



**PERLAKUAN PANAS KOMPOSIT BERBASIS ALUMINIUM/ZIRCONIUM HASIL  
EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP) - PARALEL CHANNEL**

**HEAT TREATMENT OF ALUMINUM BASED COMPOSITES BY EQUAL CHANNEL  
ANGULAR PRESSING (ECAP) - PARALLEL CHANNEL**

**Agus Pramono<sup>1</sup>, Suryana<sup>1</sup>, Alfirano<sup>1</sup>, A. Ali Alhamidi<sup>1</sup>, Adhitya Trenggono<sup>1</sup>, Anistasia Milandia<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Jurusan Metalurgi Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon-Banten  
Jl. Jenderal Sudirman Km 3 Cilegon, Banten 42435, Indonesia  
E-mail : agus.pramono@untirta.ac.id

**Abstrak**

Proses produksi dengan menggunakan metode pengerjaan logam konvensional seringkali sulit terutama untuk produk masif, dimana peralatan dan produk seperti gaya dan tekanan tinggi diperlukan. Keterbatasan ini bisa diatasi dengan menggunakan teknologi terbaru yaitu *severe plastic deformation* (SPD), dengan metode spesifiknya yaitu *equal channel angular pressing* (ECAP). Perkembangan ECAP sudah mencapai tahap aplikasi produk, salah satu pengembangan metodenya yaitu model *parallel channel*, atau disebut ECAP-PC. Dalam aplikasi pembuatan komponen, diperlukan proses perlakuan panas material, bertujuan untuk mengubah sifat material. Perlakuan panas yang sesuai diantaranya adalah proses pelunakan *annealing* untuk pengerjaan komponen dan perlakuan panas jenis T6; *artificial aging/age-hardening* sebagai proses akhir, untuk penerapan aplikasi tertentu. Serbuk aluminium (Al) dengan campuran zirconium (Zr) diaktivasi secara mekanis menggunakan *ball milling*. Pencampuran menggunakan cairan etanol dan heptane untuk memudahkan pengeringan. Fraksi volume yang digunakan dalam komposit Al sebagai matriks dan Zr yaitu 97:3%. Serbuk komposit dilakukan penggilingan dengan proses *ball milling* menggunakan putaran 60 rpm selama 24 jam. Hasil perlakuan panas *age-hardening* menghasilkan sifat mekanik tertinggi sebesar 144-222 HV/1406-2177 MPa dibanding dengan jenis *annealing* yaitu 31-46 HV/301-449 MPa. Hal ini sesuai dengan tujuan dari perlakuan panas yaitu untuk menurunkan sifat mekanik agar material mudah diproses.

Kata Kunci: Perlakuan panas, *annealing*, *hardening*, komposit, aluminium, zirconium dan ECAP-PC

**Abstract**

*The production of conventional metalworking methods is often difficult especially for massive products, where equipment and products such as high force and pressure are required. This limitation can be overcome by using the latest technology, namely severe plastic deformation (SPD). By specific method, namely Equal Channel Angular Pressing (ECAP). The development of ECAP has reached the product application stage, one of the methods development is parallel channel model, or called ECAP-PC. Application of component manufacturing requires a material heat treatment process, aims to change the properties of the material. Suitable heat treatments include the annealing softening process for component work and the T6 type heat treatment; artificial aging/age-hardening as a finishing process for the*

*application of certain applications. Aluminum (Al) powder and zirconium (Zr), mixture were activated mechanically by ball milling. Mixing processed using liquid ethanol and heptane for easy drying. The volume fraction used in the Al composite as a matrix and Zr is 97: 3%. The composites powder was milled by ball milling used a 60 rpm rotation for 24 hours. The results of age-hardening heat treatment produced the highest mechanical properties of 144-222 HV / 1406-2177 MPa compared to the type of annealing, namely 31-46 HV / 301-449 MPa. This is in accordance with the purpose of heat treatment, namely to reduce mechanical properties so that the material is easy to process.*

*Keywords : Heat treatment, annealing, hardening, composites, aluminum, zirconium and ECAP-PC*

## **PENDAHULUAN**

Aluminium (Al) merupakan logam non besi dengan aplikasi yang sangat luas. Material ini memiliki sifat khusus yaitu; ringan, ulet dan titik leleh lebih rendah dibandingkan dengan banyak bahan logam lainnya. Pada aplikasinya, aluminium sering digunakan sebagai paduan dengan mempertimbangkan rasio kekuatan dan kepadatan tinggi (Pramono et al. 2014). Sifat dasar Al menggabungkan sifat ringan dengan sifat mekanik yang memadai. Proses produksi dengan menggunakan metode pengerjaan logam konvensional seringkali sulit, terutama untuk produk masif. Proses pembentukan logam seperti penempaan, ekstrusi, penggulangan, dan *drawing* menghasilkan sifat mekanik yang tidak terlalu tinggi, dimana peralatan dan produk seperti gaya dan tekanan tinggi dibutuhkan. Ukuran benda kerja dibatasi dengan perubahan yang terjadi dalam dimensi benda kerja dan tingkat yang lebih tinggi dari regangan non-keseragaman dalam produk (Pramono et al. 2015). Keterbatasan ini bisa diatasi dengan menggunakan teknologi terbaru yaitu *severe plastic deformation plastic* (SPD). Untuk fabrikasi logam Al bisa dilakukan dengan menggunakan teknik SPD. Selama dekade terakhir SPD telah muncul sebagai prosedur yang dikenal luas untuk pembuatan logam dan paduan berbutir sangat halus (Pramono 2018).

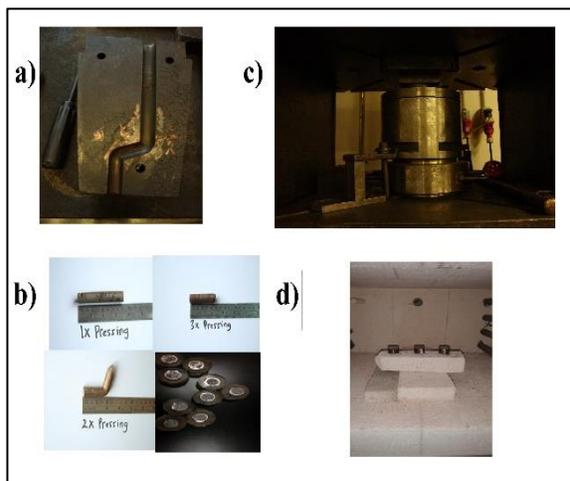
Teknologi baru proses manufaktur dengan SPD telah berkembang pesat sebagai pengolahan logam dan paduan. Menggunakan tekanan tinggi dan lebih dari satu jenis gaya yang bekerja, maka akan menghasilkan butiran halus pada strukturmikro *ultrafine grained* (UFG), sehingga material yang diproses akan mengarah 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, ECAP memiliki kemampuan untuk melakukan penyempurnaan butiran halus yang signifikan dalam jumlah besar, hal tersebut mengurangi ukuran sub-mikrometer. Dengan demikian menghasilkan bahan yang mampu memberikan sifat fisik dan mekanik yang tinggi. ECAP menggabungkan tegangan tarik dan tegangan tekan di dalam cetakan untuk menghasilkan produk dengan sifat yang lebih baik (Kollo et al. 2012). ECAP merupakan proses manufaktur yang diterapkan untuk logam yang memiliki kemampuan memperkenalkan penyempurnaan butiran halus yang signifikan untuk mencapai ukuran butir pada tingkat sub-mikrometer, mencapai ukuran  $<1\mu\text{m}$ . Dalam aplikasi pembuatan komponen diperlukan perlakuan panas pada material yang bertujuan untuk mengubah sifat material. Perlakuan panas yang sesuai diantaranya adalah proses pelunakan *annealing* untuk pengerjaan komponen dan perlakuan panas jenis *age-hardening* sebagai proses *finishing* untuk penerapan aplikasi (Pramono, Trenggono, dan Sulaiman 2019). 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 et al. 2015). Perkembangan ECAP yang terbaru yaitu *parallel channel* (ECAP-PC), penambahan saluran tegangan yang bertujuan untuk meminimalisir siklus agar diperoleh sifat mekanik yang tinggi, namun secara prosedur lebih ringkas. Penelitian ini menerapkan perlakuan panas pada paduan logam Al/zirconium (Zr) menggunakan proses ECAP-PC. Agar material mudah diproses maka diperlukan perlakuan panas jenis *annealing*

agar material menjadi lebih lunak supaya mudah untuk dideformasi sedangkan untuk meningkatkan kekuatannya, diperlukan *artificial aging* untuk mempertahankan sifat mekaniknya terutama kekerasan dan kekuatannya. Bahan dasar yang digunakan adalah; Al murni, dengan Zr sebagai penguat. Penggabungan bertujuan untuk menggabungkan sifat Zr yang memiliki sifat mekanik yang optimal, sedang penggunaan Al untuk mempertahankan sifat elastisitas, agar diperoleh material superplastis.

## METODOLOGI

Bahan yang digunakan adalah; serbuk aluminium (Al), seri AA1070 dengan ukuran partikel  $-75\ \mu\text{m}$  sebagai matriks. Sedangkan bahan penguat berupa Zr, diperoleh dari *aluminium powder company Ltd, ALPOCO*. Bahan Zr memiliki ukuran partikel dalam kisaran 7-10 nm. Serbuk Al dan campuran Zr diaktivasi secara mekanis dengan *ball milling*. Fraksi volume yang digunakan dalam komposit Al sebagai matriks dan Zr yaitu 97: 3%. Serbuk komposit dimilling dengan proses *ball milling* dengan putaran 60 rpm selama 24 jam. Serbuk tersebut dibungkus dalam tabung tembaga dan dipanaskan dalam tungku dengan suhu  $400\text{-}500^\circ\text{C}$  selama satu jam.



Gambar 1. Tahapan ECAP-parallel channel: a) Cetakan, b) Siklus sampel tekanan, c) Desain cetakan pada mesin press hidrolik, d) Proses perlakuan panas.

Karakteristik ECAP-PC dalam prosedurnya merupakan pemrosesan lintasan siklus penekanan berulang yang terjadi dua kali peristiwa

penekanan dalam sebuah cetakan. Sampel meluncur di dua zona deformasi berikutnya sesuai dengan dua saluran persimpangan cetakan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Nilai perpindahan antara dua saluran, zona deformasi, dan sudut persimpangan dua saluran, adalah parameter utama dari geometri cetakan, yang berpengaruh pada aliran dan proses ECAP-PC. Perpindahan dua saluran deformasi, dan sudut perpotongan merupakan parameter utama dari geometri cetakan, yang memengaruhi pola aliran dan kondisi tegangan-regangan hasil proses saluran paralel ECAP. Sampel ditekan dengan cetakan ECAP-PC. Dipanaskan selama 5-10 detik dan ditekan pada kecepatan 4 sampai 12 mm/s melalui *single pass*. Tekanan untuk pematatan berkisar antara 400-500 MPa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang dilakukan; pengujian kekerasan, kekuatan tekan, strukturmikro. Uji kekerasan vickers (HV10) dan kuat tekan kuasistatis dilakukan pada benda uji silinder berdiameter 1,5 x 12 mm. Pegujian kekerasan *microvickers* merupakan salah satu cara untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material [Calister, 2001]. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan dan daya tahan suatu material terhadap gaya indentasi intan dengan beban yang digunakan yaitu antara 25-1000 gr. Angka nilai kekerasan yang digunakan adalah *microvickers*. HV merupakan hasil bagi koefisien dari beban uji dengan luas permukaan hasil indentasi (Sidney H. Avner 2017).

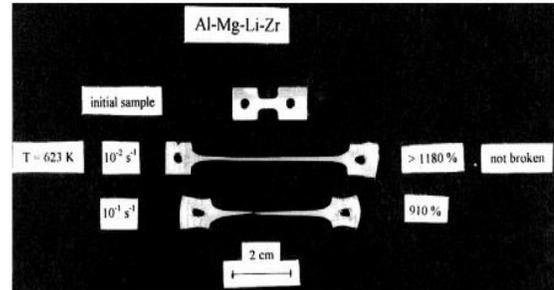
Tabel 1. Hasil sifat mekanik kekerasan dan kekuatan tarik komposit berbasis Al/Zr dari 5 titik pengujian

Perlakuan Panas	Siklus Penekanan	Kekerasan HV10	Kekuatan Tekan (MPa)
Non Perlakuan Panas	1-siklus	49	481
	2-siklus	56	548
	3-siklus	64	627
Age-Hardening	1-siklus	144	1406
	2-siklus	167	1641
	3-siklus	222	2177
Annealing	1-siklus	31	301
	2-siklus	39	387
	3-siklus	46	449

Sedangkan pengujian kekuatan tekan untuk mengetahui kemampuan suatu material dalam menahan perpatahan. Morfologi butir dan distribusi fasa ditelusuri dengan menggunakan *microscope optic*, agar diketahui distribusi butir pada kondisi-kondisi tertentu, baik sebelum dan sesudah dilakukan perlakuan panas. Komposit berbasis Al/Zr, menghasilkan sifat mekanik yang disajikan pada Tabel 1. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai kekerasan komposit Al/Zr sebelum dikenai perlakuan panas: 49 - 64 HV dan kekuatan tekan 481-625 MPa. Perlakuan panas jenis *age-hardening* meningkatkan sifat mekanik sangat signifikan. Dengan nilai kekerasan 144 - 222 HV, dengan kekuatan tarik 1406 - 2177 MPa. Hasil ini mengindikasikan suatu sifat superplastis dengan nilai kekuatan mencapai 2177 Mpa.

Superplastisitas merupakan kondisi yang mengacu pada kemampuan bahan menarik keluar untuk mencapai *elongation* yang tinggi sebelum terjadi suatu kegagalan material (Langdon 2013). Membutuhkan suhu pengujian tinggi dan ukuran butir kecil yang biasanya kurang dari 1-10  $\mu\text{m}$ . Pengolahan logam berbutir halus atau biasa disebut *ultrafine grained* (UFG) dengan ukuran butir *submicrometer* melalui penerapan SPD (Pramono et al. 2019). Hal ini memberikan kesempatan untuk mencapai sifat superplastis baik dalam logam massal yang disediakan dengan butiran kecil yang cukup stabil pada suhu tinggi (Pramono et al. 2015). Pada penelitian yang dilakukan oleh Komura *et al*, telah membuktikan kondisi superplastis yang ideal, dimana hasil awal menunjukkan bahwa tinggi regangan superplastisitas tingkat itu tidak mudah dicapai dalam bahan metalurgi ingot, sehingga bahan dirubah menjadi serbuk. Hal ini dilakukan pada komposit Al/Zr yang berbahan dasar serbuk. Paduan aluminium berbasis Al - 3 % Mg - 0,2 % Sc diproses oleh ECAP dan kemudian ditarik dalam ketegangan kegagalan pada suhu 573-723K. Kegagalan terhadap laju regangan tercapai pada suhu perpanjangan kurang dari 1000% pada tingkat regangan  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  ke atas. Hasil dari sampel yang mengalami pengerolan dingin mengalami kegagalan pada temperatur 673 K. Spesimen terakhir tidak menunjukkan superplastis karena strain dalam CR tidak cukup untuk mencapai ukuran butir UFG dengan fraksi tinggi batas butir memiliki sudut tinggi misorientation. Sesuai dengan pengujian spesimen tarik konvensional

setelah ECAP, elongations tinggi serupa juga dicapai jika bahan diproses oleh ECAP dingin digulung menjadi bentuk lembaran dan kemudian diuji dalam ketegangan, hasil superplastis disajikan pada Gambar 2.



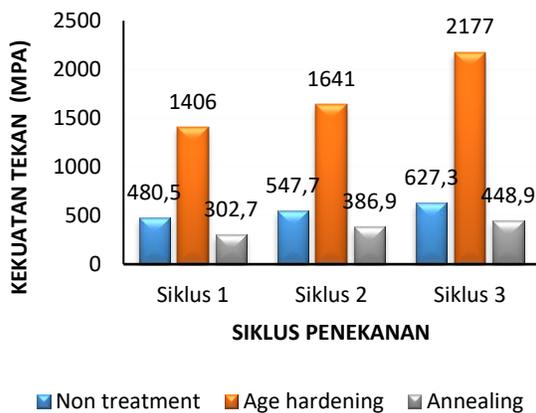
Gambar 2. Superplastisitas laju regangan tinggi dalam paduan yang diproses oleh ECAP sebagai pembandingan (Valiev et al. 2016).

Perlakuan panas *annealing* bertujuan mengubah struktur mikro suatu bahan untuk mengubah sifat mekanik atau listriknya. Hal ini bertujuan untuk mengurangi kekerasan, meningkatkan keuletan, dan membantu menghilangkan tekanan internal (Kollo et al. 2012). Fenomena ini diperlukan dalam proses pengerjaan. Sifat mekanik yang dihasilkan dari perlakuan panas anil menurun signifikan, kekerasan 31-46 HV dan kekuatan tarik 301 - 449. Proses ECAP-PC menghasilkan nilai kekerasan yang signifikan, dengan dilakukan pengulangan penekanan hingga empat kali siklus. Penekanan berulang juga menghilangkan cacat mikro pada sampel. Pada kondisi ini terjadi pemulihan mikrostruktur yang terbentuk setelah penekanan pertama yang tidak signifikan dan pada peristiwa kompresi kedua hingga empat akan mendorong perbaikan butiran yang signifikan. Berdasarkan (Pramono et al. 2019) distribusi tegangan dipengaruhi oleh suhu panas pada penekanan. Pada suhu panas tegangan-regangan terdistribusi secara merata. Berdasarkan sifat mekanik yang dihasilkan pada penelitian sebelumnya, saat terjadi konsentrasi tegangan pada ujung sampel, maka dihasilkan retakan, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Contoh sampel retak akibat distribusi tegangan yang tidak merata (Kollo et al. 2012)

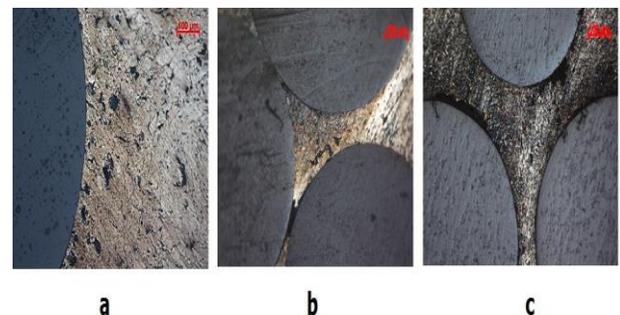
Nilai kekuatan tekan komposit Al/Zr non *heat treatment* tertinggi didapatkan pada sampel dengan 3 kali siklus penekanan yaitu 627 MPa. Nilai yang diperoleh pada sampel dengan 2 kali siklus penekanan yaitu 548 MPa sedangkan pada sampel dengan 1 kali siklus penekanan yaitu 481 MPa. Perlakuan panas *age-hardening* komposit Al/Zr dilakukan dengan memanaskan sampel hingga temperatur 530°C, kemudian ditahan selama 60 menit, dengan pendinginan cepat dengan media air (*quenching*). Hasil pengujian disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hubungan antara siklus penekanan masing-masing *treatment* terhadap nilai kekuatan tekan.

Hasil proses *age-hardening* menunjukkan nilai kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan sampel yang tidak dilakukan perlakuan panas. Presipitasi pada perlakuan panas

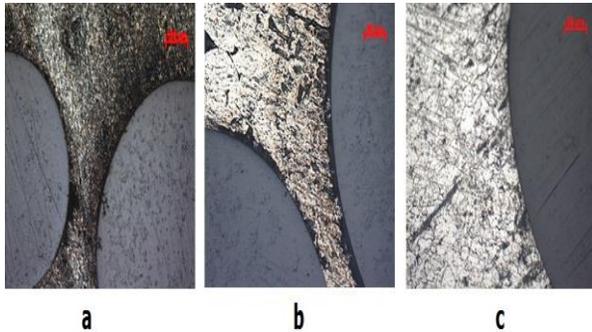
*age-hardening* yang terjadi, menyebabkan peningkatan nilai kekuatan tekan seiring dengan meningkatnya nilai kekerasan sampel. Nilai kekuatan tekan dari setiap sampel setelah proses *age-hardening* yaitu: 1406 MPa dengan 1 siklus, 1641 MPa dengan 2 siklus dan 2177 MPa dengan 3 siklus. Untuk perlakuan panas *annealing* dilakukan dengan cara memanaskan logam sampai temperatur 415°C kemudian ditahan selama 150 menit, lalu diturunkan sampai temperatur 177°C. Kemudian ditahan dengan waktu penahanan selama 480 menit, didinginkan didalam *furnace* hingga mencapai temperatur ruang. Pada *annealing* energi, panas yang dihasilkan mampu mempercepat proses rekristalisasi yang terjadi (Ferrasse et al. 1997). Rekristalisasi dapat berdampak terhadap penurunan kuat tarik sampel komposit Al/Zr. Proses *annealing* menunjukkan nilai kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan nilai sebelum dilakukan perlakuan panas. Nilai kekuatan dari hasil proses *annealing* yaitu: 303 MPa dengan 1 siklus, 387 MPa dengan 2 siklus dan 449 MPa dengan 3 siklus. Hasil nilai kekuatan tekan terhadap siklus penekanan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Strukturmikro perbesaran 100x (a) 1-siklus (b) 2-siklus (c) 3-siklus

Pengamatan struktur mikro bertujuan untuk menganalisis morfologi butir yang terbentuk dan mengidentifikasi butiran yang terjadi pada sampel. Pada Gambar 5 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro dengan perbesaran hingga 100x sampel *non heat treatment* dari 1 - 3 siklus penekanan hasil proses ECAP-PC. Pengamatan struktur mikro *non heat treatment* berguna sebagai pembandingan pada struktur mikro dari variabel yang dilakukan proses *heat treatment*, dimana struktur mikro sampel dari hasil

proses *heat treatment* akan membuat batas butir yang lebih banyak. Proses *heat treatment* mampu mendistribusikan butiran menjadi lebih seragam. Selain itu, Gambar 5 juga menunjukkan struktur mikro sampel dengan 3-siklus, menunjukkan butiran yang lebih padat dibanding sampel *non heat treatment* 1 - 2 siklus. Hal ini disebabkan karena pada ECAP-PC terjadi pepadatan yang menjadikan butiran semakin terdistribusi lebih merata (Sauvage et al. 2012).

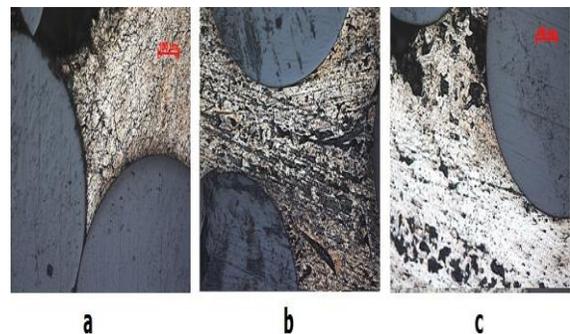


Gambar 6. Struktur mikro perbesaran 100x  
 (a) sampel *age hardening* 1 siklus  
 (b) sampel *age hardening* 2 siklus  
 (c) sampel *age hardening* 3 siklus.

Gambar 6 menunjukkan struktur mikro dari sampel hasil *age hardening* dengan temperatur pemanasan 530°C dan waktu tahan 60 menit, didinginkan secara cepat dengan menggunakan media air dan dibiarkan pada temperatur ruang. Pengamatan struktur mikro memperlihatkan distribusi fasa presipitat yang tersebar secara merata hingga memperhalus butiran dan memperbanyak batas butir. Berdasarkan (William D. Callister, 2007) batas butir dapat menghentikan pergerakan dislokasi. Faktor inilah yang menyebabkan kekerasannya meningkat. Presipitat yang terjadi pada sampel dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan Fallahi, bahwa *age-hardening* mampu membentuk presipitasi pada matriks aluminium serta memperhalus butiran pada matriks aluminium (Valiev et al. 2016). Sehingga dapat meningkatkan stabilitas mikro struktur pada *reinforcement* dengan menjepit dan menghambat pergerakan batas butir (Fallahi, Hosseini-Tudeshky, dan Ghalehbandi 2014).

Gambar 7 menunjukkan struktur mikro dari sampel hasil proses *annealing* dengan temperatur

pemanasan 415°C dan waktu tahan 150 menit, diturunkan sampai temperatur 177°C kemudian ditahan dengan waktu penahanan selama 480 menit. Kemudian didinginkan di dalam *furnace* sampai mencapai temperatur kamar. Pada saat *annealing*, presipitasi terjadi pada saat rekristalisasi sehingga pergerakan presipitat melambat seiring meningkatnya suhu dalam proses anil dan memainkan peran penting untuk menstabilkan struktur mikro pada suhu tinggi. *Annealing* bertujuan meningkatkan keuletan, sehingga berdampak pada penurunan nilai kekerasan logam tersebut (Pramono, Kollo, dan Veinthal 2015).



Gambar 7. Struktur Mikro Perbesaran 100x  
 (a) Sampel *annealing* 1-siklus  
 (b) Sampel *annealing* 2-siklus  
 (c) Sampel *annealing* 3-siklus.

## KESIMPULAN

Siklus pada penekanan ECAP-PC memberikan sebuah pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik yang dihasilkan. Semakin bertambah siklus maka semakin meningkat sifat mekaniknya. Pada siklus ketiga menghasilkan nilai sifat mekanik yang tertinggi yaitu; 46-64-222 MPa/449-627-2177 MPa.

Perbandingan antara perlakuan panas jenis anil dengan *hardening* terdapat pada sifat mekanik dan struktur mikro yang dihasilkan. Anil membentuk material lebih lunak sehingga kekerasannya cenderung menurun, sedangkan *hardening* membentuk material komposit Al/Zr yang lebih kuat.

Proses *hardening* mampu membentuk presipitasi pada matriks aluminium serta memperhalus butiran pada matriks aluminium. Sehingga dapat meningkatkan stabilitas mikro struktur pada *reinforcement* dengan menjepit dan

menghambat pergerakan batas butir, distribusi fasa presipitat tersebar merata hingga memperhalus dan memperbanyak batas butir. *Annealing* mempercepat proses rekristalisasi yang terjadi karena pergerakan presipitat melambat seiring meningkatnya suhu. *Anealling* memainkan peran penting untuk menstabilkan struktur mikro pada suhu tinggi, sehingga terjadi perubahan morfologi butir menjadi kasar.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Senior researcher: Prof Lembit Kommel., Ph. D., Tech. Department Material Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Tallinn Insitutive of Technology (TalTech) Estonia yang telah memfasilitasi penelitian ini, serta Laboratorium Metalurgi - Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA).

## DAFTAR PUSTAKA

- Fallahi, A., H. Hosseini-Tudeshky, dan S. M. Ghalehbandi. 2014. "Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties of ECAPed 7075 Aluminum Alloy." *Advanced Materials Research* 829 (January 2017): 62–66. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.829.62>.
- Ferrasse, Stephane, Vladimir M. Segal, K. Theodore Hartwig, dan Ramon E. Goforth. 1997. "Development of a Submicrometer-Grained Microstructure in Aluminum 6061 Using Equal Channel Angular Extrusion." *Journal of Materials Research* 12 (5): 1253–61. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0173>.
- Kollo, Lauri, Kaspar Kallip, Jaana Kateriina Gomon, dan Lembit Kommel. 2012. "Hot Consolidation of Aluminium and Aluminium Nano-MMC Powders by Equal Channel Angular Pressing." *Medziagotyra* 18 (3): 234–37. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.18.3.2431>.
- Langdon, Terence G. 2013. "Achieving Superplasticity in Ultrafine-Grained Metals." *Mechanics of Materials Journal* 67: 6–8.
- Pramono, Agus, Alry Mochtar Jamil, dan Anistasia Milandia. 2018. "Aluminum Based Composites by Severe Plastic Deformation (S.P.D) Process as New Methods of Manufacturing Technology." 218 (04011): 1–9.
- Pramono, Agus. 2018. "Perlakuan Panas Paduan Aluminium Berbutir Halus Ultrafine Grained Hasil Teknologi Severe Plastic Deformation." *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi* 14 (2): 107. <https://doi.org/10.36055/tjst.v14i2.5866>.
- Pramono, Agus, Klodian Dhoska, Irida Markja, dan Lembit Kommel. 2019. "Impact Pressure on Mechanical Properties of Aluminum Based Composite by ECAP-Parallel Channel." *Pollack Periodica* 14 (1): 67–74. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.1.7>.
- Pramono, Agus, Lauri Kollo, Kaspar Kallip, Renno Veinthal, dan Jaana Kateriina Gomon. 2014. "Heat Treatment of Ultrafine Grained High-Strength Aluminum Alloy." *Key Engineering Materials* 604: 273–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.604.273>.
- Pramono, Agus, Lauri Kollo, dan Renno Veinthal. 2015. "Microstructure of AA7075 Based Composite by Accumulative Roll Bonding Process." *Advanced Materials Research* 1123: 114–18. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1123.114>.
- Pramono, Agus, Lembit Kommel, Lauri Kollo, dan Renno Veinthal. 2015. "Hot and Cold of Pressing Effect on ECAP-Parallel Channel Composite Based on Al/ANF Material." *Advanced Materials Research* 1123: 343–47. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1123.343>.
- Pramono, Agus, Adhitya Trenggono, dan Fatah Sulaiman. 2019. "Kompatibilitas Sintering Dan Fraksi Volume Terhadap Sifat Mekanik Komposit Hybrid" 2 (1): 43–49.
- Sauvage, X., G. Wilde, S. V. Divinski, Z. Horita, dan R. Z. Valiev. 2012. "Grain Boundaries in Ultrafine Grained Materials Processed by Severe Plastic Deformation and Related Phenomena." *Materials Science and Engineering A* 540: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.080>.
- Sidney H. Avner. 2017. *Introduction to Physical Metallurgy*. Edited by Sidney H Avner and Introduction. Second-Sev. New York:

McGraw-Hill.

- Valiev, Ruslan Z., Yuri Estrin, Zenji Horita, Terence G. Langdon, Michael J. Zehetbauer, dan Yuntian Zhu. 2016. "Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later." *Jom* 68 (4): 1216–26. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-1820-6>.
- William D. Callister, Jr. n.d. *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive*. Edited by Wayne Anderson. Fifth. California: John Wiley & Sons, Inc.