

PROSES DEFORMASI SANGAT TINGGI (*SEVERE PLASTIC DEFORMATION*) TERHADAP PADUAN Al-5052 HASIL ANILING

Ika Kartika

Pusat Penelitian Metalurgi-LIPI
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 470, Tangerang 15314
E - mail : pepeng2000@yahoo.com

Masuk tanggal : 10-10-2012, revisi tanggal : 05-11-2012, diterima untuk diterbitkan tanggal : 19-11-2012

Intisari

PROSES DEFORMASI SANGAT TINGGI (*SEVERE PLASTIC DEFORMATION*) TERHADAP PADUAN Al-5052 HASIL ANILING. Proses deformasi sangat tinggi adalah teknologi yang digunakan untuk menghasilkan ukuran butir sampai dengan skala nano (≤ 100 nm). Dalam penelitian ini proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP (*equal channel angular pressing*) telah dilakukan terhadap material paduan aluminium (Al-5052) hasil proses aniling. Proses aniling dilakukan untuk memunculkan presipitat dalam paduan tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh presipitat dalam paduan Al-5052 terhadap sifat mekanik paduan setelah proses deformasi sangat tinggi (*severe plastic deformation*) dengan ECAP. Proses aniling bervariasi dilakukan pada temperatur 150 °C selama 24 jam, 175 °C selama 24 jam dan 200 °C selama 24 jam. Teknik ECAP dilakukan pada rute A dengan jumlah deformasi sebanyak 8 pas. Beberapa pengujian untuk melihat pengaruh struktur mikro yang dihasilkan terhadap sifat mekanik paduan Al-5052 adalah metalografi dengan mikroskop optik dan SEM (*scanning electron microscope*), uji keras dengan metoda Brinell, analisis unsur dengan SEM-EDS (*scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy*) dan uji tarik. Hasil proses deformasi sangat tinggi setelah aniling menunjukkan bahwa peningkatan sifat mekanik terjadi dalam paduan seiring dengan meningkatnya jumlah pas deformasi yang dilakukan. Peningkatan kekuatan setelah proses deformasi juga dikarenakan terbentuknya sub butir equiaksial (*equiaxed subgrain*) dalam butir dan partikel-partikel presipitat Mg_2Si + Mg_2Al_3 yang menjadi penghalang dari pergerakan dislokasi dalam paduan Al-5052.

Kata kunci : Proses deformasi plastis sangat tinggi, Teknik ECAP (equal channel angular pressing), Paduan Al-5052, Proses aniling, Presipitat, Sub-butir equiaksial

Abstract

SEVERE PLASTIC DEFORMATION PROCESS OF ANNEALED Al-5052 ALLOY. Severe plastic deformation is a technology that has been used to obtain grain size into nano grade scale (≤ 100 nm). In this study, severely plastic deformation by equal channel angular pressing (ECAP) was conducted in the annealed of aluminum magnesium alloy (Al-5052). Annealing was done leading to form precipitates in the alloy. The aim of this study is investigated mechanical properties of this alloy after severely plastic deformation by ECAP and the influent of precipitates that was formed into those properties. Various annealing processes were treated in the Al-5052 alloy at various temperatures of 150 °C-24h for sample A, 175 °C-24h for sample B and 200 °C-24 h for sample C. The route of ECAP was concerned on A route with 8 numerous of deformation pases. Several examinations were carried out to observe the influent of microstructures and mechanical properties that was obtained after ECAP, such as metallography by using optical microscopy and SEM (*scanning electron microscope*), Brinell hardness test, chemical analysis by SEM-EDS (*scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy*) and tensile test. Severely plastic deformations after annealing show that mechanical properties increase with increasing number of pas deformation in this alloy. Strength improve after severely plastic deformation due to several formations of equiaxed sub-grains in the interior grains and $FeCrSiAl$, Mg_2Si , Mg_2Al_3 precipitations as a barrier for dislocations motion in the Al-5052 alloy.

Keywords : Severe plastic deformation, ECAP technique (equal channel angular pressing), Al-5052 alloy, Precipitate, Equiaxed sub-grain

PENDAHULUAN

Salah satu teknologi yang mendapat perhatian menarik dalam beberapa tahun terakhir ini diantaranya adalah teknologi proses deformasi plastis sangat tinggi dengan ECAP/E (*equal channel angular pressing or extrusion*) yang diaplikasikan pada logam murni seperti titanium, tembaga ataupun logam paduan. Proses ini lebih condong untuk menghasilkan ukuran butir berskala nano setelah dilakukan proses deformasi pada tingkat regangan yang sangat tinggi^[1-4]. Proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP sangat dipengaruhi oleh parameter-parameter sebagai berikut; jenis arah pas deformasi, jumlah pas deformasi, dan sudut belokan, dimana parameter-parameter tersebut mempengaruhi sifat mekanis material yang dideformasi. Rute pas deformasi yang digunakan antara lain; rute A dimana benda kerja tidak diputar setiap pergantian pas ($\theta=0^\circ$), rute B_A dimana benda kerja diputar 90° setiap pergantian pas kemudian dikembalikan lagi pada posisi semula ($\theta, \theta' = 0^\circ$), rute B_C dimana benda kerja diputar 90° setiap pergantian pas ($\theta=90^\circ$) dan rute C dimana benda kerja diputar 180° setiap pergantian pas ($\theta=180^\circ$)^[5].

Material yang dikembangkan dengan teknik ini akan memunculkan regangan dalam (*internal strain*) yang memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap proses deformasi dan juga menghasilkan kerapatan dislokasi yang besar. Beberapa material bahkan memunculkan beberapa keuntungan lain seperti kekuatan dan keuletan tinggi, superplastisitas pada temperatur rendah dan laju regangan tinggi^[6-8]. Hal ini merupakan suatu prospek yang sangat menguntungkan bagi asosiasi industri pada umumnya.

Dalam paduan aluminium, paduan aluminium magnesium (Al-5052) merupakan paduan yang cocok untuk diperlakukan dengan ECAP, karena selain ringan, penambahan magnesium akan memberikan efek penurunan kecepatan

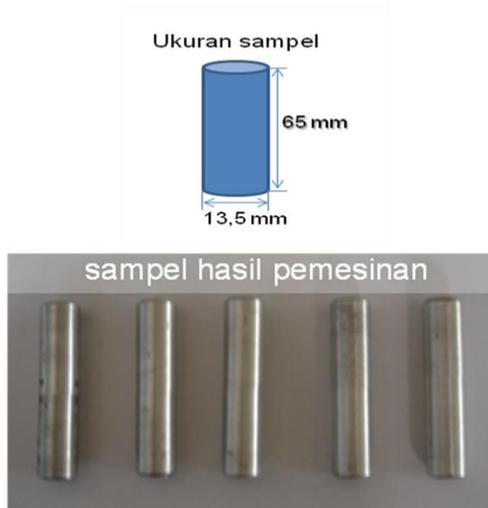
recovery. Penurunan kecepatan *recovery* memerlukan persyaratan berupa jumlah deformasi (*pas*) yang optimum dari deformasi yang dilakukan sehingga menghasilkan struktur yang homogen dan penurunan ukuran butir *equiaxed*^[9]. Selain itu, penambahan unsur Mg dalam paduan akan memberikan pengaruh dalam penurunan mobilitas dari dislokasi, menghasilkan *solid solution strengthening*, meningkatkan kekuatan material tanpa menurunkan keuletannya dan meningkatkan pembentukan *shear band* ketika proses deformasi dilakukan pada temperatur kamar^[10]. Aplikasi dari paduan Al-5052 adalah aluminium foil dengan kekuatan tinggi, struktur-struktur untuk aplikasi di laut, komponenomotif pada velg dan komponen-komponen arsitektur^[11].

Pada studi penelitian ini akan dilakukan proses deformasi sangat tinggi dari paduan Al-5052 dengan ECAP setelah dilakukan proses aniling. Paduan tersebut dipilih karena mampu dideformasi dengan ECAP sehingga akan menghasilkan paduan aluminium dengan kekuatan tinggi yang tidak membutuhkan proses pengerasan dengan *aging*, dimana proses ini biasa dilakukan terhadap paduan aluminium. Beberapa karakterisasi akan dilakukan untuk melihat adanya peningkatan sifat mekanis dan morfologi struktur mikro yang dihasilkan antara lain; pengujian kekerasan, uji tarik, metalografi dengan mikroskop optik dan SEM (*scanning electron microscope*) dan analisis kualitatif unsur dalam paduan dengan SEM-EDS (*energy dispersive spectroscopy*).

METODE PERCOBAAN

Paduan yang akan digunakan pada studi penelitian ini adalah paduan Al-5052 yang diperoleh dari pasaran dalam bentuk pelat lembaran dengan tebal 15 mm, lebar 40 mm dan panjang 220 mm. Pelat kemudian diproses dengan mesin untuk mendapatkan sampel berbentuk silinder dengan diameter 13,5 mm dan panjang 65 mm (Gambar 1).

Pinggiran dari area permukaan puncak dan bawah sampel dibentuk tidak bersudut untuk menghindari konsentrasi tegangan pada sampel tersebut ketika akan dilakukan proses deformasi plastis sangat tinggi dengan ECAP. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia paduan Al-5052 yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Ukuran sampel Al-5052 dan sampel hasil pemesinan yang digunakan untuk proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP

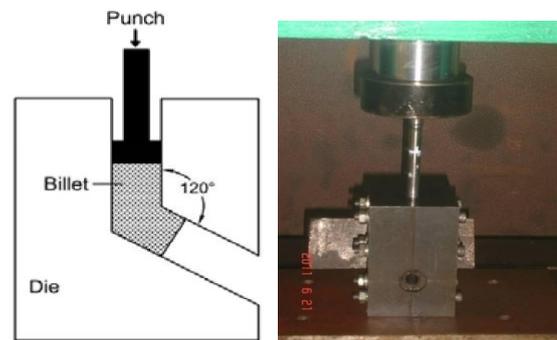
Sampel kemudian dihomogenisasi pada temperatur 500 °C selama 96 jam untuk menghilangkan tegangan sisa saat proses pemesinan serta untuk mendapatkan ukuran butir yang homogen. Setelah dilakukan homogenisasi, beberapa sampel dikenai proses aniling yang bervariasi. Proses aniling untuk sampel A adalah 150 °C selama 24 jam, sampel B pada temperatur 175 °C selama 24 jam dan sampel C dilakukan proses aniling pada temperatur 200 °C selama 24 jam.

Tabel 1. Komposisi paduan Al-5052 yang digunakan

Unsur % Berat	Mg	Si	Fe	Cr	Cu	Mn	Zn	V	Al
	2,66	0,13	0,27	0,23	0,001	0,006	0,012	0,007	sisa

Fasilitas untuk ECAP dilakukan dengan dua blok cetakan yang disatukan dari material baja perkakas SKD 11 hasil fabrikasi dan dilaku panas serta proses

nitriding untuk meningkatkan kekuatan material cetakan. Kemiringan cetakan untuk teknik ECAP yang dilakukan dalam penelitian ini adalah $\theta = 120^\circ - \psi = 7^\circ$ (Gambar 2a). Kedua blok cetakan tersebut dapat digabungkan dengan menggunakan 6 baut besar. Apabila kedua blok tersebut disatukan, maka akan membentuk cetakan dengan ukuran luar berkisar 150 x 90 x 50 mm. Punch atau penekan terbuat dari material HSS (*high strength steel*) yang dilaku panas. Gambar 2b menunjukkan blok cetakan yang sudah disatukan untuk ECAP. Bagian dalam cetakan telah dipoles menggunakan kertas ampelas sampai dengan 1200 grit sebelum cetakan disatukan. Blok cetakan kemudian diletakkan pada area penekanan dari mesin pres BMI tipe D dengan kapasitas penekanan maksimum mesin tersebut sebesar 100 ton. Penekanan dilakukan pada kisaran 7-10 ton. Jenis deformasi atau rute pas yang digunakan dalam penelitian ini adalah rute A yaitu sampel tidak diputar dalam setiap pergantian deformasi atau $\theta=0^\circ$. Jumlah pas deformasi yang dilakukan adalah 1 sampai dengan 8 pas deformasi terkecuali bila sampel mengalami retak. Sebelum proses deformasi dilakukan, sampel diberi pelumas untuk meminimalisir gesekan selama penekanan sehingga melancarkan proses deformasi yang dilakukan. Pelumas yang digunakan adalah *grease* yang biasa tersedia di pasaran.



Gambar 2. (a) Ilustrasi bagian dalam dies dengan sudut $\theta = 120^\circ - \psi = 7^\circ$, (b) Dies yang digunakan dalam penelitian ini dan *punch* yang ditempelkan pada bagian penekan dari mesin press

Pengujian kekerasan pada sampel Al-5052 hasil proses aniling dan deformasi sangat tinggi dengan ECAP dilakukan menggunakan metoda Brinell-HB10 dengan beban 62,5 kgf dan \varnothing indentor 2,5 mm. Uji keras dilakukan pada posisi melintang dari arah deformasi yang dilakukan. Preparasi pengujian kekerasan adalah sampel dipotong dengan diameter dan ketebalan 13,5 mm. Sampel kemudian diampelas menggunakan kertas amplas dengan kekasaran 400-1000 mesh.

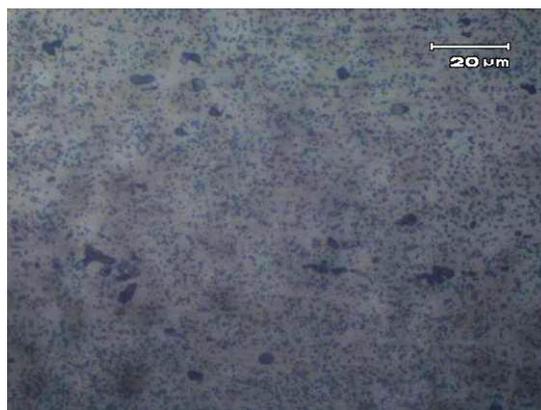
Pengujian metalografi dilakukan dengan mikroskop optik merk Olympus type PME dan SEM merk JEOL JSM 6390 A. Sampel hasil proses aniling dan deformasi kemudian dipotong pada posisi sejajar dengan proses deformasi yang dilakukan. Sampel dipotong untuk mendapatkan ukuran panjang 10 mm dan tebal 5 mm. Sampel kemudian dimounting, diampelas menggunakan kertas amplas kekasaran 400-1000 mesh, dan dilanjutkan dengan polishing menggunakan alumina dengan ukuran partikel 1 dan 0,5 μm serta dilanjutkan dengan proses etsa. Etsa yang digunakan adalah Keller's dan Poulton's reagent atau 50 ml (30 ml HCl + 15 ml HNO₃ + 2,5 HF + 2,5 ml H₂O) + 25 ml HNO₃ + 40 ml (3 gr CrO₃ / 10 ml H₂O). Demikian pula untuk analisa kualitatif unsur dengan SEM-EDS, preparasi dan posisi pengujian adalah sama seperti dalam pengujian metalografi.

Pengujian tarik dilakukan dengan mesin uji tarik Schenck type RME 100 dan beban yang digunakan sebesar 5 KN dengan laju regangan 0,3 mm per menit. Sampel uji tarik dipotong menggunakan *wire cut* pada posisi searah dengan proses deformasi. Ukuran sampel uji tarik adalah panjang area penarikan (*gage length*) 12 mm, ketebalan pelat pada posisi bersilangan (*cross section area*) sekitar 3,5 x 2,2 mm². Pengujian tarik tidak dilakukan pada sampel hasil deformasi pada pas ke 8 dikarenakan ukuran sampel yang tidak memadai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Material Hasil Homogenisasi

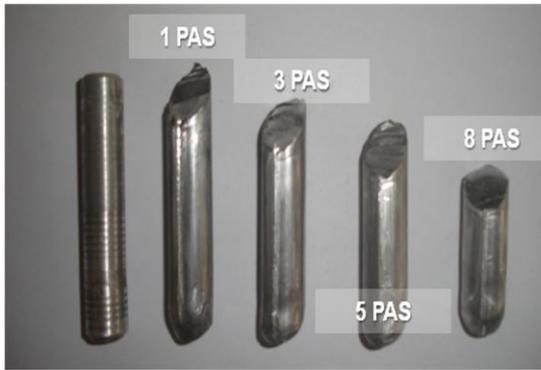
Struktur mikro dengan mikroskop optik dalam material paduan Al-5052 sebelum aniling pada T = 500 °C selama 96 jam ditunjukkan pada Gambar 3. Struktur yang terbentuk adalah Al- α sebagai matriks dan adanya presipitat yang mengandung magnesium (Gambar 3). Harga kekerasan rata-rata paduan tersebut setelah proses homogenisasi adalah sebesar 61,56 HB-10 (Tabel 2).



Gambar 3. Struktur mikro paduan Al-5052 sebelum aniling pada T = 500 °C selama 96 jam dengan mikroskop optik. Struktur yang terbentuk adalah fasa Al- α sebagai matriks, presipitat yang mengandung magnesium (hitam). Etsa Keller's reagent

Hasil Pengamatan Visual

Hasil proses aniling dan deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada material paduan Al-5052 menunjukkan bahwa material tidak mengalami retak sampai dengan jumlah pas deformasi terbesar atau pas ke-8. Gambar 4 menunjukkan foto visual sampel B-hasil aniling temperatur 175°C selama 24 jam pada berbagai jumlah pas deformasi.



Gambar 4. Foto visual sampel B paduan Al-5052 hasil aniling $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, diteruskan dengan ECAP dalam berbagai jumlah pas deformasi

Hasil Uji Keras

Harga kekerasan pada material paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling dan dilanjutkan dengan proses deformasi plastis sangat tinggi dengan ECAP pada beberapa jumlah pas deformasi ditunjukkan pada Tabel 2.

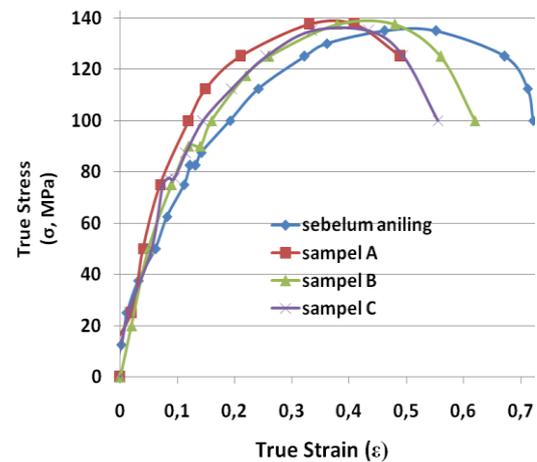
Tabel 2. Harga kekerasan rata-rata material paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling diteruskan dengan ECAP pada beberapa jumlah pas deformasi dengan metoda Brinell (HB-10)

JMLH PAS	HARGA KEKERASAN RATA-RATA (HB-10)			
	SEBELUM ANILING	SETELAH ANILING		
		Sampel A	Sampel B	Sampel C
0	61,56	60,80	60,72	60,75
1	113,68	112,72	117,04	115,36
3	135,10	136,8	132,18	134,50
5	147,40	149,36	149,24	138,26
8	169,66	163,36	158,32	154,72

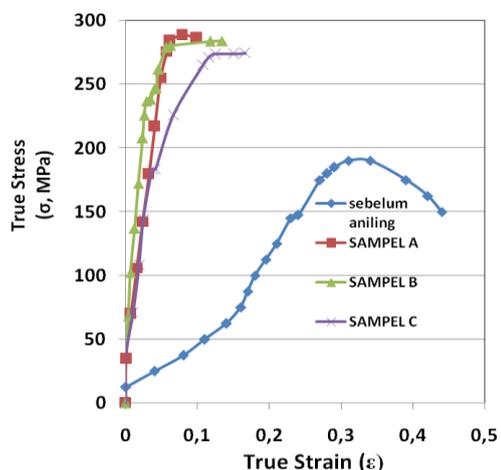
Hasil Uji Tarik

Hasil uji tarik pada material paduan Al-5052 sebelum dan setelah deformasi sangat tinggi dengan ECAP ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Gambar 5 menunjukkan grafik tegangan-regangan sebenarnya dari paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling, pada 0 pas deformasi atau sebelum

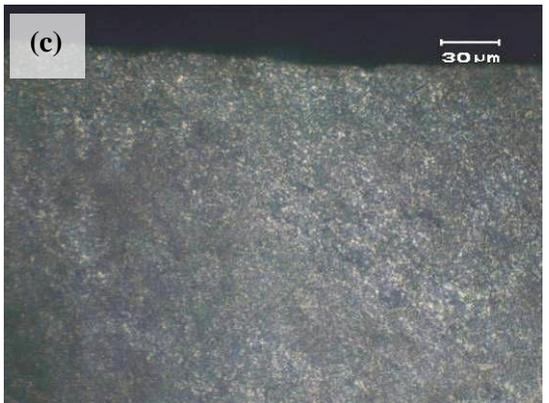
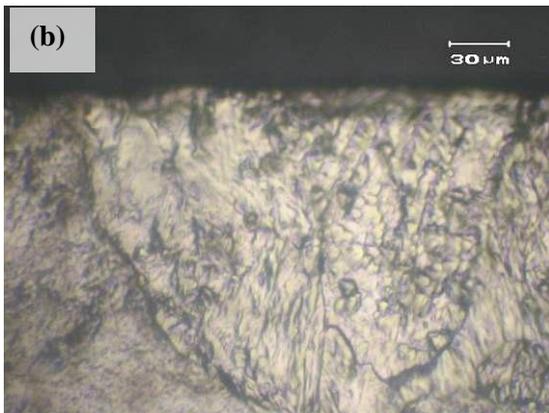
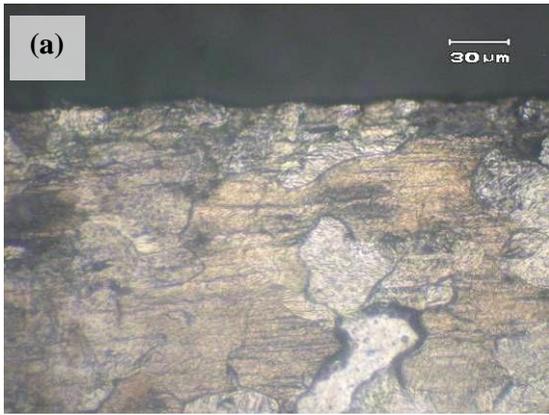
dilakukan ECAP. Gambar 6 menunjukkan grafik tegangan regangan sebenarnya dari paduan Al-5052 pada 1 pas deformasi dengan ECAP. Dari kedua grafik pada Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa tegangan meningkat seiring dengan peningkatan regangan pada berbagai perlakuan untuk paduan Al-5052. Semakin meningkat jumlah pas deformasi dilakukan pada material paduan, kekuatan tarik dan kekuatan luluh dalam paduan Al-5052 semakin meningkat (Gambar 5 dan 6).



Gambar 5. Kurva tegangan-regangan sebenarnya dari paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling pada 0 pas deformasi

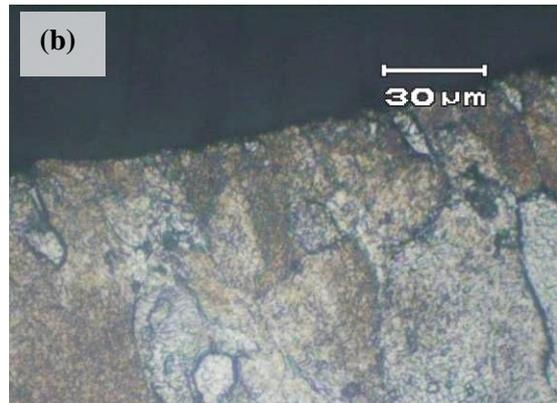
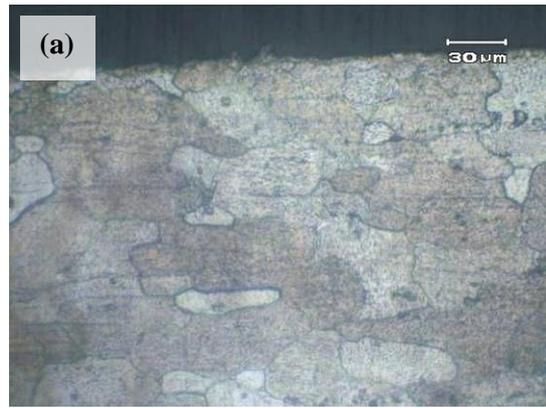


Gambar 6. Kurva tegangan-regangan sebenarnya dari paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling pada 1 pas deformasi dengan ECAP



↔
Arah penarikan

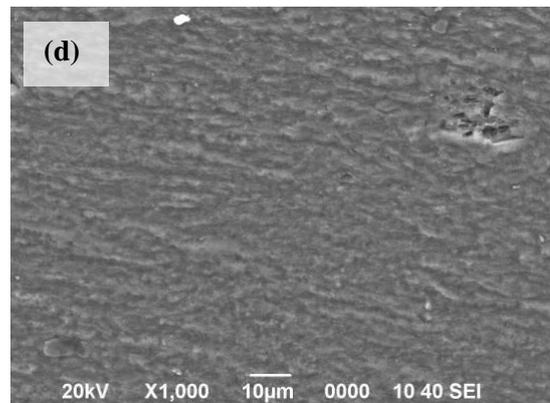
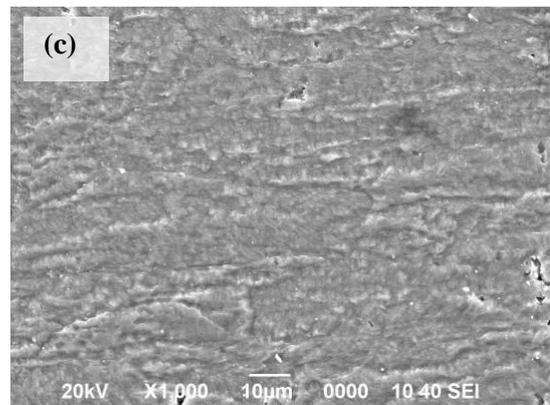
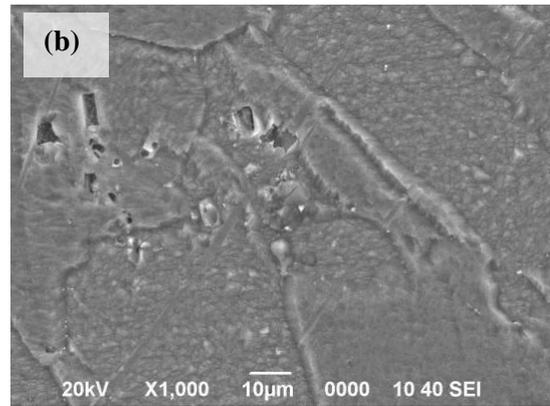
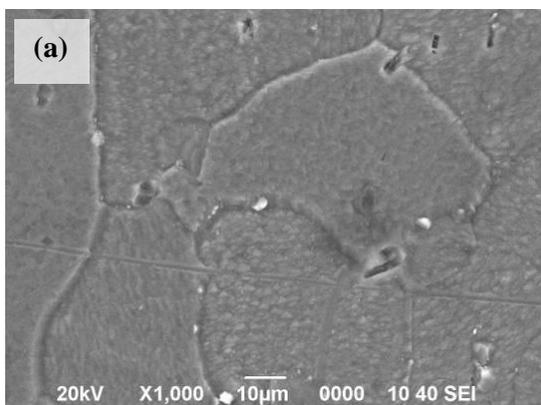
Gambar 7. Foto struktur mikro dengan mikroskop optik dari sampel paduan Al-5052 sebelum aniling pada $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 96 jam dan dilanjutkan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada jumlah pas deformasi; (a) 0 pas, (b) 1 pas, (c) 8 pas. Etsa Poulton's reagent



↔
Arah penarikan

Gambar 8. Foto struktur mikro dengan mikroskop optik dari sampel A-setelah aniling pada $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam dan dilanjutkan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada jumlah pas deformasi ; (a) 0 pas, (b) 1 pas, (c) 8 pas. Etsa Poulton's reagent

Struktur mikro dengan mikroskop optik pada material paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling tanpa ECAP memiliki perbedaan besar butir yang signifikan (Gambar 7a dan 8a). Besar butir sebelum aniling berkisar 30-90 μm sedangkan untuk hasil aniling berkisar 90-120 μm . Setelah dilakukan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP seperti ditunjukkan pada Gambar 7b, 7c, 8b dan 8c, teramati bentuk butir menjadi pipih atau memanjang, adanya perubahan orientasi butir dan beberapa presipitasi tersebar merata dalam butir dan di batas butir. Gambar 9a-9d menunjukkan struktur mikro dengan SEM pada sampel A hasil deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada jumlah pas deformasi berturut-turut; 0, 1, 3 dan 8. Tampak batas butir masih terlihat dengan jelas dan presipitasi terlihat di batas butir dan di dalam butir (Gambar 9a-9c). Seperti ditunjukkan dalam Gambar 9d, semakin tinggi jumlah pas deformasi diberikan maka pita-pita deformasi semakin banyak terbentuk sehingga batas butir sulit teramati, dalam kondisi ini pula sangat dimungkinkan sub butiran hasil deformasi akan banyak terbentuk bila diobservasi dengan TEM (*transmission electron microscope*).



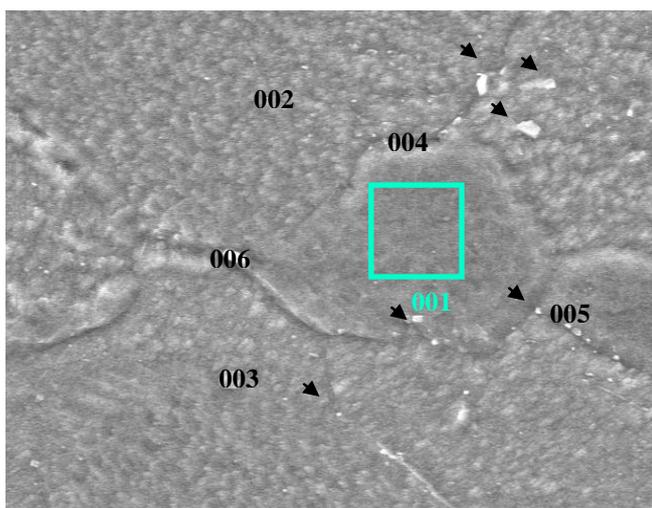
↔
Arah penarikan

Gambar 9. Foto struktur mikro dengan SEM dari sampel A-hasil aniling pada $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam dan dilanjutkan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada jumlah pas deformasi ; (a) 0 pas, (b) 1 pas, (c) 3 pas, (d) 8 pas. Etsa Poulton's reagent

Hasil SEM-EDS

Hasil foto SEM-EDS pada permukaan sampel A dengan deformasi sebanyak 1 pas ditunjukkan pada Gambar 10. Tabel 3

menunjukkan komposisi unsur (% massa) yang terkandung di permukaan sampel A dari material paduan Al 5052 dengan SEM-EDS pada 6 area penembakan (merujuk pada Gambar 10). Partikel-partikel presipitat dalam paduan Al-5052 hasil karakterisasi dengan SEM-EDS adalah dimungkinkan FeCrSiAl, Mg₂Si dan Mg₂Al₃ (Gambar 10 dan Tabel 3). Terlihat partikel-partikel presipitat tersebar halus dalam butir setelah dilakukan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP (Gambar 10-ditunjukkan dengan panah hitam).



Gambar 10. Posisi pengujian SEM-EDS pada sampel A, hasil aniling pada T = 175 °C selama 24 jam dan dilanjutkan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP sebanyak 1 pas deformasi

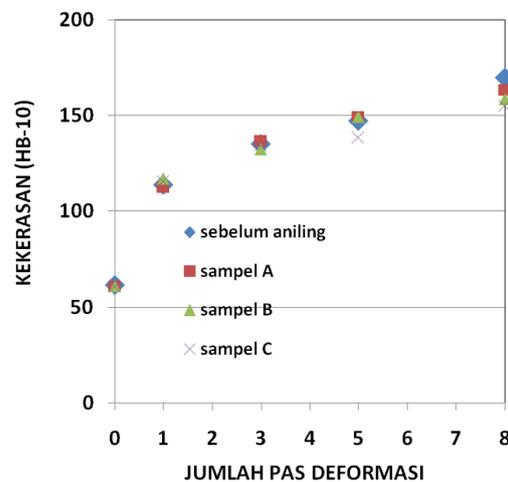
Tabel 3. Komposisi unsur (% massa) pada material paduan Al-5052 merujuk pada Gambar 10

UNSUR (% Massa)	POSISI					
	001	002	003	004	005	006
Mg	4,54	4,34	3,25	4,46	4,45	4,00
Fe	0,16	0,09	0,06	0,37	0,28	1,15
Si	2,60	2,50	15,06	2,41	2,28	2,40
Cr	0,25	0,18	2,06	0,6	0,43	0,25
Al	92,29	92,76	67,15	92,16	92,11	91,85

PEMBAHASAN

Kekerasan paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling dilanjutkan dengan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP menunjukkan adanya peningkatan

kekerasan yang signifikan seiring dengan bertambahnya jumlah deformasi yang dilakukan seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Peningkatan harga kekerasan sebelum aniling sebesar 63,7% sedangkan untuk proses aniling peningkatan harga kekerasan terbesar yaitu 62,8% dari harga kekerasan awal terjadi pada temperatur aniling 150 °C selama 24 jam.



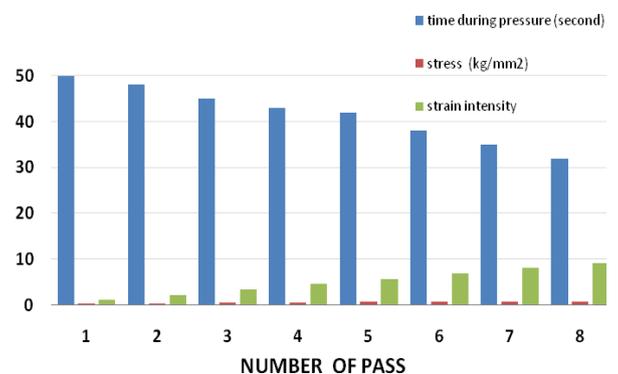
Gambar 11. Grafik harga kekerasan pada paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling dilanjutkan dengan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP

Kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari paduan Al-5052 meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah pas deformasi dengan ECAP dilakukan, akan tetapi elongasi menurun seiring dengan meningkatnya jumlah pas deformasi (Gambar 5 dan 6). Dalam Gambar 5 sebelum dilakukan ECAP, terlihat dalam grafik tegangan-regangan untuk paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling, tegangan meningkat seiring dengan meningkatnya regangan. Dari grafik dalam Gambar 5 tersebut terlihat sampel B dengan perlakuan aniling pada temperatur 175 °C selama 24 jam memiliki kekuatan luluh yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan pada sampel paduan Al-5052 lainnya, dengan harga $\sigma_y = 90$ MPa. Kekuatan tarik maksimum tertinggi (σ_u) dimiliki oleh sampel A dan sampel B

sebesar 175 MPa. Setelah 1 pas deformasi dengan ECAP, kekuatan luluh dan kekuatan tarik pada semua perlakuan mengalami peningkatan seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Kekuatan luluh dan tarik tertinggi dalam grafik tegangan-regangan sebenarnya dari paduan Al-5052 dalam semua perlakuan dimiliki oleh sampel A-aniling pada temperatur 150 °C selama 24 jam dengan nilai $\sigma_y = 147$ MPa dan $\sigma_u = 288,6$ MPa.

Pada Gambar 6, grafik tegangan alir menunjukkan adanya peningkatan tegangan setelah titik luluh dan pada akhirnya tegangan menunjukkan kondisi aliran tegangan yang tetap (*steady state flow*), kondisi ini sangat signifikan teramati hanya pada sampel-sampel hasil aniling. Pada sampel C, terlihat dalam grafik, adanya fenomena *lock unlock dislocation*. Besar kemungkinan fenomena ini terjadi dalam paduan Al-5052 akibat adanya unsur Mg dalam paduan yang akan memberikan pengaruh dalam penurunan mobilitas dari dislokasi, dan menghasilkan *solid solution strengthening*^[10], selain itu juga akibat terbentuknya sub butir equiakial (*equiaxed sub grain*). Sedangkan kondisi *steady state flow* terjadi karena adanya keseimbangan dinamis antara pengerasan regangan dan *dynamic recovery* (DRV) disertai dengan bentuk butiran yang memipih meskipun regangan terjadi pada kondisi temperatur kamar^[12]. Dalam paduan Al-5052, dimana Al dan Mg memiliki SFE (*stacking fault energy*) yang tinggi, dislokasi yang dihasilkan karena adanya deformasi pada awalnya berupa kekusutan dislokasi (*entangle dislocation*) kemudian dislokasi memanjat (*climb*) dan pada akhirnya dislokasi akan saling menghilangkan (*annihilation*) serta mengarah pada terbentuknya struktur sub butir dalam butiran. Kondisi ini ditunjukkan dalam struktur mikro paduan Al-5052 hasil SEM dimana dengan semakin banyak jumlah pas deformasi diberikan, maka sub butir dimungkinkan makin banyak teramati dalam butiran (Gambar 8).

Hal lain adalah kecenderungan yang dihasilkan saat dilakukan proses deformasi sangat tinggi dengan ECAP pada sampel paduan Al-5052 yang sebelumnya dilakukan proses aniling, pada umumnya memiliki kondisi yang sama untuk seluruh sampel paduan Al-5052 seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Intensitas regangan total akan meningkat, sedangkan waktu deformasi akan semakin menurun serta tegangan sedikit meningkat dengan meningkatnya jumlah deformasi/jumlah pas yang dilakukan, dimana intensitas regangan total diperoleh dengan melalui $\varepsilon = 2N/\sqrt{3} \cdot \cotg\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ^[13]. Gambar 12 menunjukkan kecenderungan tersebut pada material paduan Al-5052 sebelum proses aniling pada T = 500 °C selama 96 jam.



Gambar 12. Kecenderungan antara waktu penekanan (detik), tegangan (kg/mm²) dan intensitas regangan terhadap jumlah pas dari deformasi yang dilakukan dengan ECAP dalam paduan Al-5052 sebelum aniling pada T = 500 °C selama 96 jam

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dalam material paduan Al-5052 hasil aniling dilanjutkan dengan deformasi sangat tinggi dengan ECAP dapat disimpulkan bahwa:

1. Paduan Al-5052 sebelum dan setelah aniling dilanjutkan dengan ECAP menghasilkan perbedaan sifat mekanik yang signifikan. σ_u sebelum aniling dilanjutkan dengan ECAP adalah sebesar 190 MPa, sedangkan setelah

aniling dilanjutkan dengan ECAP $\sigma_u = 288,6$ MPa (untuk sampel A).

2. Proses aniling dalam paduan Al-5052 pada berbagai temperatur proses tidak menghasilkan perbedaan kekuatan mekanik yang signifikan. Semakin meningkat jumlah pas deformasi dalam material paduan Al-5052, kekuatan tarik meningkat disertai dengan penurunan keuletan. Peningkatan sifat mekanik dan keuletan yang optimum dalam material paduan Al-5052 hasil aniling adalah pada $T=175$ °C selama 24 jam.
3. Peningkatan kekuatan terjadi karena terbentuknya *equiaxed subgrain* dalam butir dan partikel-partikel presipitat FeCrSiAl, Mg₂Si dan Mg₂Al₃ yang menjadi penghalang dari pergerakan dislokasi. Semakin banyak dislokasi yang terhambat pergerakannya, maka akan meningkatkan kekuatan dari paduan Al-5052 tersebut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh kegiatan Tematik Puslit Metalurgi LIPI Tahun 2011. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Teknisi Bidang Karakterisasi Laboratorium Metalurgi Fisik dan Manufaktur yang telah banyak membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V.M. Segal. 1995., "Material Processing by Simple Shear". *Mater. Sci. Eng. A* 197, page : 157-164.
- [2] V.M. Segal. 1999., "Equal Channel Angular Extrusion; From Macromechanics to Structure Formation". *Mater. Sci. Eng. A* 271, page : 322.
- [3] M. Furukawa, Z. Horita, T.G. Langdon. 2002. *Mater. Sci. Eng. A* 332, page : 97
- [4] M. A. Munoz-Morris, C.G. Oca, D.G. Morris. 2003. *Scripta Mater.* vol 48 page : 213
- [5] A. Gholinia, P.B. Prangnell and M.V. Markushev. 2000. *Acta Mater.* vol 48, page : 115-1130.
- [6] Valiev R.Z. 1996. *Nano Structure Material.* vol. 6, page : 73.
- [7] R.Z. Valiev. 1997., "Structure and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metals". *Mater Sci Eng. A* 234-236, page : 59-66.
- [8] Wang J., Iwahashi Y., Horita Z., Furukawa M., Nemoto M., Valiev R.Z. et al. 1996. *Acta Mater.* vol. 44, page : 2973.
- [9] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon. 1998., "Factors Influencing the Equilibrium Grain Size in Equal Channel Angular Pressing : Role of Mg Additions to Aluminum, *Met. Mater. Trans.*, vol. 29A, page : 2503.
- [10] J.E. Hatch, ed. 1984., "Aluminium: Properties and Physical Metallurgy". *ASM Metals Park, OH.* page: 231-32.
- [11] <http://www.slideshare.net/acenk14/aplikasi-alumunium-dan-paduannya>, diakses tanggal 3 Oktober 2012.
- [12] T. Sakai, J.J. Jonas. 2001., "Plastic Deformation : Role of Recovery and Recrystallization". *Elsevier Oxford.* : vol. 7, page : 7079-7084.
- [13] M. Greger, R. Kocich, L. Cizek, L. Kander. 2006. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 15.

RIWAYAT PENULIS

Ika Kartika, lahir di Bandung. Menamatkan S1 di Jurusan Teknik Metalurgi UNJANI Bandung tahun 1996. Menamatkan S2 di Jurusan Teknik Material ITB pada tahun 2006 dan S3 di Jurusan Material Processing, Institute for Materials Research, Tohoku University, Sendai, Japan lulus pada tahun 2010. Bekerja sebagai Peneliti di Puslit Metalurgi-LIPI sejak Maret 1998.