



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Unand.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Unand.

**PENGARUH ECAP ALUR T RUTE Ba TERHADAP KEKUATAN DAN
KETAHANAN KOROSI ALUMINIUM MURNI DAN ALUMINIUM
PADUAN AA7075**

SKRIPSI



**ARIF BUDIMAN A
07 171 049**

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG 2012**

ABSTRAK

Aluminium merupakan salah satu jenis logam non-ferro dengan sifat-sifat yang sangat dibutuhkan di dunia engineering, seperti tahan korosi, massa jenis yang rendah dan mudah dibentuk. Namun logam non-ferro ini memiliki kelemahan yang sangat berarti yaitu sifat mekanik yang kurang baik. Banyak upaya yang dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik ini seperti penambahan unsur lain dan perlakuan panas. Namun upaya ini menimbulkan masalah lainnya yaitu harganya yang menjadi sangat tinggi serta ketahanan korosinya menurun. Kemudian muncul suatu metoda cetak tekan yang dikenal dengan Equal Channel Angular Pressure (ECAP). ECAP dilaporkan dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosi aluminium. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan ECAP dengan rute L, namun ditemukan masalah yaitu kurang efektif dalam pembongkaran spesimen dan penekanan multipass tidak bisa dilakukan tanpa mengeluarkan spesimen setiap selesai ditekan satu laluan. Penelitian sebelumnya juga melaporkan bahwa ECAP alur T dapat meningkatkan kekuatan aluminium murni.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian ECAP alur T rute B_A pada aluminium murni dan aluminium paduan AA7075. Kemudian dilakukan pengujian tarik dengan menggunakan mesin uji COM-TEN, pengujian korosi dengan metoda perendaman dalam larutan NaOH dan pemeriksaan struktur mikro menggunakan mikroskop optik Jenco terhadap hasil ECAP tersebut.

Dari penelitian yang telah dilakukan, material setelah ECAP mengalami peningkatan kekuatan yang cukup signifikan, harga kekuatan ini meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP. Sebagaimana kekuatan tarik, ketahanan korosi pun meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP. Laju korosi material setelah ECAP cenderung menurun, ini membuktikan bahwa ketahanan korosinya meningkat. Selain itu, dari pengamatan struktur mikro dapat diketahui bahwa ukuran butir material semakin halus seiring bertambahnya jumlah laluan ECAP. Ukuran butir ini lah yang menjadi alasan utama meningkatnya kekuatan dan ketahanan korosi aluminium.

KATA PENGANTAR



Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT dan shalawat beriring salam kepada Rasulullah SAW. Pada akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“Pengaruh ECAP Alur T Rute B_A Terhadap Kekuatan dan Ketahanan Korosi Aluminium Murni dan Aluminium Paduan AA7075”** sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan tahap sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, adik dan keluarga tercinta atas perhatian, motivasi, doa serta kasih sayang yang tiada terbalas.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. H. Gunawarman dan Ilhamdi, M. Eng sebagai pembimbing tugas akhir penulis.
3. Bapak Dr. H. Is Primananda dan Bapak Dr. Eng Eka Satria selaku tim penguji.
4. Rekan-rekan tim ECAP atas kebersamaan, motivasi dan kerjasama dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. .
5. Keluarga besar Laboratorium Metalurgi sebagai keluarga kedua yang telah memberikan semangat, pengertian dan ilmu yang telah dibagi bersama.
6. Teman-teman Mesin angkatan 2007 dan semua mahasiswa mesin FT-UA, Hidup Mesin!!!
7. Dan semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah banyak membantu penulis dalam pembuatan tugas akhir ini.

Penulis berdoa semoga segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan mendapat balasan pahala oleh Allah SWT, serta kesuksesan selalu diberikan-Nya kepada kita.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidak luput dari kekurangan. Untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang sangat membangun.

DAFTAR ISI

PENETAPAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR SIMBOL.....	viii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Sistematika Penulisan Laporan.....	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Aluminium	4
2.2 Aluminium Murni Seri 1100 dan Aluminium AA7075.....	4
2.3 Material Cetakan ECAP.....	5
2.4 ECAP (<i>Equal Channel Angular Pressure</i>)	5
2.5 Prinsip Kerja ECAP	5
2.6 Pemodelan geseran butir oleh ECAP	9
2.7 Teori <i>Hall-Petch</i>	10

BAB III METODOLOGI

3.1 Penyiapan Cetakan.....	11
3.2 Persiapan Sampel	11
3.3 Perlakuan ECAP	11
3.4 Pengujian Tarik.....	12
3.5 Pengujian Korosi.....	13
3.6 Metalografi.....	13

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Proses ECAP	14
-----------------------------	----

4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Tarik.....	15
4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Korosi	17
4.4 Pengamatan Struktur Mikro.....	20
4.5 Korelasi Antara Kekuatan dan Ukuran Butir.....	22
4.6 Korelasi Antara Ketahanan Korosi dan Ukuran Butir	24

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	25
5.2 Saran	25

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A : Data Hasil Uji Tarik

LAMPIRAN B : Foto-Foto Spesimen Pengujian

LAMPIRAN C : Gambar Teknik Cetakan Ecap Alur T



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Hasil pengujian tarik aluminium murni setelah ECAP rute B _A	15
Tabel 4.2	Pengurangan massa aluminium yang direndam dalam NaOH 2 M	18
Tabel 4.3	Ukuran butir masing-masing laluan ECAP	22



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Cetakan ECAP	5
Gambar 2.2	Prinsip ECAP	6
Gambar 2.3	Prinsip geseran antara elemen 1 dan 2 pada ECAP	6
Gambar 2.4	Rute ECAP	7
Gambar 2.5	<i>Slip system</i> pada bidang X,Y dan Z untuk laluan berurutan pada rute B _A	8
Gambar 2.6	Distorsi elemen kubik pada bidang X,Y dan Z yang diproses dengan rute B _A untuk laluan 1-3	8
Gambar 2.7	Model bidang geser aluminium yang diproses ECAP rute B _A untuk masing-masing laluan	9
Gambar 3.1	Cetakan ECAP alur T	11
Gambar 3.2	Rancangan spesimen ECAP	11
Gambar 3.3	Perlakuan ECAP	12
Gambar 3.4	<i>Com-Ten testing machine</i>	12
Gambar 4.1	Bentuk spesimen aluminium murni setelah ECAP	14
Gambar 4.2	Bentuk spesimen aluminium paduan AA7075 setelah ECAP	14
Gambar 4.3	Bentuk patahan spesimen ECAP setelah uji tarik	15
Gambar 4.4	Perbandingan kekuatan tarik, kekuatan luluh dan elongasi Aluminium murni ECAP laluan T	16
Gambar 4.5	Fenomena-fenomena selama pengujian korosi	18
Gambar 4.6	Perbandingan laju korosi masing-masing laluan ECAP	19
Gambar 4.7	Bentuk struktur mikro aluminium murni setelah ECAP	20
Gambar 4.8	Bentuk struktur mikro aluminium paduan setelah ECAP	21
Gambar 4.9	Perbandingan ukuran butir masing-masing laluan ECAP	22
Gambar 4.10	Kurva tegangan luluh – $d^{-1/2}$ hasil ECAP rute B _A menurut Teori <i>Hall-Petch</i>	23
Gambar 4.11	Kurva tegangan luluh terhadap jumlah laluan ECAP Berdasarkan teori <i>Hall-Petch</i>	24

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Arti	Satuan
A	Luas penampang spesimen uji tarik	mm
D	Diameter rata-rata butir	μm
ΔL	Pertambahan panjang spesimen uji tarik	mm
e	Regangan teknis	%
ε	Regangan sebenarnya	%
ε_n	Total regangan	%
k_y	Konstanta Hall Petch	$\text{MPa } \mu\text{m}^{1/2}$
L_i	Panjang akhir spesimen uji tarik	mm
L_o	Panjang awal spesimen uji tarik	mm
N	Jumlah langkah	kali
P	Beban	kgf, N
Φ	Sudut antar alur cetakan	$^{\circ}$
Ψ	Sudut Kelengkungan Alur Cetakan	$^{\circ}$
σ_u	Kekuatan ultimate material	MPa
σ_y	Kekuatan luluh material	MPa
UTS	Kekuatan ultimate material	MPa

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara keseluruhan aluminium memiliki sifat-sifat yang sangat dibutuhkan di dunia *engineering*, seperti tahan korosi, massa jenis yang rendah dan mudah dibentuk. Namun kekurangan utama aluminium dibandingkan dengan logam *ferro* adalah sifat mekanik yang kurang bagus [1-3]. Banyak upaya yang telah dilakukan untuk memperbaiki kekurangan tersebut, seperti penambahan unsur lain, perlakuan panas, perlakuan permukaan, *cold working* dan lain-lain. Namun cara tersebut memunculkan persoalan lainnya. Persoalan tersebut diantaranya harga jual yang meningkat, waktu pengerjaan yang lama dan menimbulkan sifat-sifat lain yang tidak diinginkan seperti meningkatnya kegetasan material.

Penambahan unsur lain dan perlakuan panas telah diterapkan pada material pesawat terbang, hasilnya kekuatan aluminium meningkat cukup signifikan, namun harga jual dan biaya *recycling*-nya juga meningkat. Selain itu juga terjadi penurunan ketahanan korosi pada material aluminium tersebut.

Adanya suatu metode lain yang lebih efektif dan terbukti dapat meningkatkan kekuatan aluminium tentu saja akan menjadi suatu keuntungan di dunia *engineering*. Metode tersebut dilakukan dengan cara pemberian penekanan yang tinggi dan menyeluruh pada material. Proses penekanan secara menyeluruh yang mudah dilakukan adalah ECAP (*Equal Channel Angular Pressure*), proses ini dilakukan dengan cara melewatkan material dalam cetakan beralur dengan memberikan penekanan tanpa mengubah penampang material. Beberapa penelitian sebelumnya melaporkan bahwa kekuatan material meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP [4-5], selain itu ukuran butirnya pun semakin halus dan ketahanan korosinya meningkat seiring jumlah laluan ECAP [6].

Penelitian terdahulu dari grup penguatan material [4] melaporkan bahwa ada permasalahan yang timbul dari ECAP alur L yang digunakan selama ini, yaitu kurang efektif dalam pembongkaran spesimen dan penekanan *multi-pass* tidak bisa

dilakukan tanpa mengeluarkan spesimen setiap selesai ditekan satu laluan [4]. Untuk memperbaiki permasalahan ini, metoda ECAP telah mengalami perkembangan dengan menggunakan alur T, dimana alur T ini dapat dijadikan sebagai alternatif yang efektif pengganti cetakan alur L, sebagaimana penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [4]. Pada penelitian kali ini akan dikaji pengaruh ECAP alur T dengan rute BA. Pada rute BA, spesimen ECAP diputar sejauh 90° secara bolak balik untuk tiap laluannya. Pemutaran spesimen ini bertujuan agar seluruh bagian spesimen mendapatkan perlakuan yang sama.

1.2 Tujuan

Dari penelitian ini akan diperoleh hasil pengaruh ECAP terhadap ketahanan korosi dan kekuatan material aluminium murni dan aluminium paduan. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui perbandingan kekuatan dan ketahanan korosi aluminium murni dan aluminium paduan.

1.3 Manfaat

Hasil dari penelitian ini diharapkan menghasilkan material *non-ferro* yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik, dan diperoleh dengan cara yang sederhana. Lebih jauh, penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi untuk menjadikan metoda ECAP dapat diaplikasikan didunia industri.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian, maka penelitian ini dibatasi oleh beberapa hal yaitu material yang digunakan sebagai spesimen adalah aluminium murni komersil seri 1100 dan aluminium paduan AA7075. Proses ECAP yang dilakukan adalah rute BA dengan tiga kali laluan dan pada temperatur kamar. Pengujian sifat mekanik yang dilakukan adalah pengujian kekuatan tarik. Pengamatan struktur mikro hanya untuk melihat butir dan batas butir material.

1.5 Sistematika Penulisan Laporan

Laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan, Bab II Tinjauan Pustaka, Bab III Metodologi Penelitian, Bab IV Hasil dan Pembahasan, Bab V Penutup.

Bab I Pendahuluan, menjelaskan mengenai latar belakang masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan pustaka, menjelaskan mengenai aluminium dan proses ECAP.

Bab III Metodologi penelitian, menjelaskan prosedur pengujian, spesimen dan peralatan pengujian.

Bab IV Hasil dan pembahasan, memaparkan dan membahas data-data yang didapatkan dari hasil pengujian sebelum dan setelah proses ECAP yang diproses dengan cetakan beralur T, yaitu data pengujian tarik, pengujian kekerasan, pengujian korosi dan foto struktur mikro.

Bab V Kesimpulan dan saran, menjelaskan mengenai kesimpulan akhir penelitian dan saran-saran yang direkomendasikan berdasarkan pengalaman di lapangan untuk perbaikan proses pengujian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Aluminium

Aluminium adalah logam yang paling banyak terdapat di kerak bumi dan merupakan unsur ketiga terbanyak setelah oksigen dan silikon. Aluminium terdapat di kerak bumi sebanyak kira-kira 8,07% hingga 8,23% dari seluruh massa padat kerak bumi. Sulit menemukan aluminium murni di alam karena merupakan logam yang cukup reaktif. Proses pembuatan aluminium ini meliputi proses penambangan, proses pemurnian dan proses peleburan.

Aluminium ditambang dari biji bauksit kemudian dilakukan proses pemanasan untuk mengurangi kadar air. Selanjutnya biji bauksit digiling dan dihancurkan supaya halus dan merata, setelah itu dilanjutkan dengan proses pemurnian. Proses pemurnian aluminium dilakukan melalui proses pemurnian Bayer. Caranya dilakukan dengan melarutkan bauksit ke dalam larutan natrium hidroksida (NaOH). Aluminium oksida larut dalam NaOH sedangkan pengotornya tidak larut. Pengotor-pengotor dapat dipisahkan melalui proses penyaringan. Selanjutnya aluminium diendapkan dari filtratnya dengan cara mengalirkan gas CO₂ dan pengenceran. Endapan aluminium hidroksida disaring, dikeringkan lalu dipanaskan sehingga diperoleh aluminium oksida murni (Al₂O₃). Proses selanjutnya yaitu peleburan aluminium dengan menggunakan proses Hall-Heroult. Aluminium yang terbentuk berupa zat cair, kemudian dimasukkan ke dalam cetakan dan diperoleh aluminium batangan (ingot).

2.2 Aluminium murni seri 1100 dan AA7075

Aluminium yang digunakan adalah aluminium murni seri 1100 dan seri AA7075. Aluminium seri 1100 merupakan jenis aluminium murni dengan komposisi kimia 99% Al, 1,0% Si dan 0,12% Cu. Aluminium dengan seri AA7075 merupakan jenis aluminium paduan dengan unsur pemuat utama Zn. Komposisi kimia dari AA7075 ini adalah Zn 5,1-6,1%, Si 0,5%, Fe 0,7%, Cu 1,2-2,0%, Mn 0,3%, Mg 2,1-2,0%, Cr 0,18-0,40%, Ti 0,2% dan selebihnya Al [7].

2.3 Material Cetakan ECAP

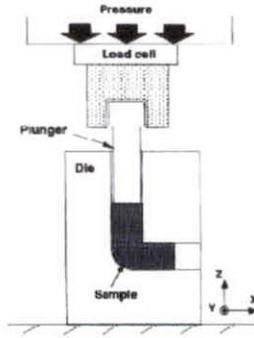
Cetakan ECAP mengalami pembebanan yang besar selama proses ECAP. Oleh karena itu dibutuhkan material dengan kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Material cetakan ECAP ini menggunakan besi Assab 80 dengan komposisi kimia C 0,9%, Si 0,9%, Mn 0,5%, Cr 7,8%, Mo 2,5% dan V 0,5%. Assab 80 termasuk kedalam golongan *tool steel*. *Tool steel* atau baja perkakas banyak digunakan untuk peralatan-peralatan permesinan seperti pahat pada mesin bubut dan peralatan-peralatan perkakas lainnya. Pemilihan material jenis ini didasarkan pada sifatnya yang memiliki kekerasan yang tinggi, kekuatan yang tinggi dan ketahanan aus yang tinggi.

2.4 ECAP (*Equal Channel Angular Pressure*)

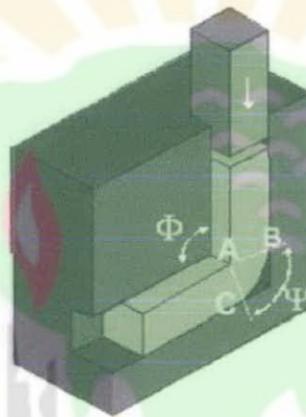
Sifat fisik dan sifat mekanik dari suatu logam sangat dipengaruhi oleh ukuran butirnya. Semakin kecil ukuran butir suatu logam maka semakin tinggi kekuatan logam tersebut. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kekuatan suatu logam maka dapat dilakukan dengan cara menghaluskan ukuran butirnya. Ada beberapa teknik penghalusan butir dengan cara pemberian deformasi plastis yang menyeluruh diantaranya adalah *multiple forging*, *torsion straining*, *accumulated roll bending* dan *Equal Channel Angular Pressing (ECAP)*. Berdasarkan penelitian sebelumnya [4-5], ECAP dilaporkan cukup efektif untuk pemberian deformasi secara menyeluruh yang memungkinkan peningkatan kekuatan material *bulk* pada temperatur rendah, dimana tidak terjadi perubahan penampang melintang dan memungkinkan diaplikasikan di dunia industri. Selain meningkatkan kekuatan, ECAP juga dilaporkan dapat meningkatkan ketahanan korosi aluminium [6].

2.5 Prinsip Kerja ECAP

Pada dasarnya sebuah mekanisme ECAP terdiri dari material uji, *plunger* yang berfungsi untuk menekan spesimen melalui alur cetakan, pelumas dan cetakan dengan dua buah alur yang berpenampang sama (Gambar 2.1 dan 2.2)

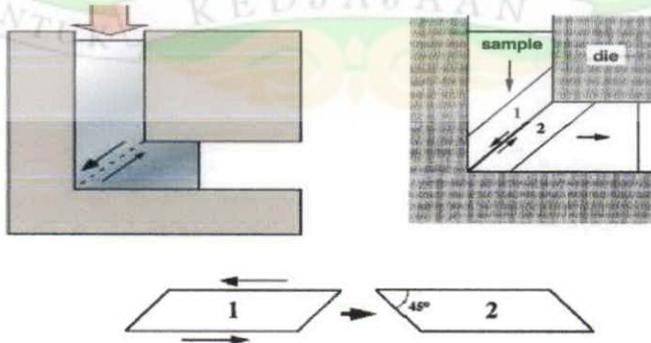


Gambar 2.1 Cetakan ECAP [7]



Gambar 2.2 Prinsip ECAP [8]

Pada Gambar 2.3 di bawah ini menunjukkan daerah geser yang terjadi pada material uji. Daerah geser ini disebabkan oleh pemberian deformasi pada material sehingga terjadi geseran sederhana pada bidang slip dan orientasi butir. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan ukuran butir material menjadi lebih halus, bahkan bila dibandingkan dengan proses *thermo-mechanical*.



Gambar 2.3 Prinsip geseran antara elemen 1 dan 2 pada ECAP [8][9]

Nilai regangan ekuivalen untuk satu laluan ECAP dapat dinyatakan dengan persamaan [10] :

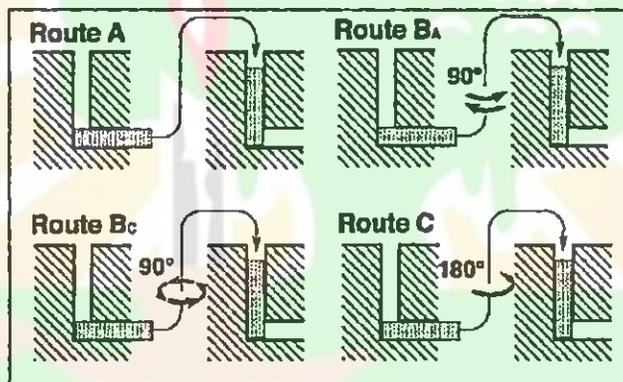
$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Phi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (2.1)$$

Serta persamaan R.E Goforth, K.T Hartwig dan L.R Cornwel [11]

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi + \Psi}{2} \right) + \Psi \right] \quad (2.2)$$

Kedua persamaan ini identik untuk semua besar sudut Ψ dan hanya berbeda $< 5\%$ untuk semua kondisi sudut $\Phi > 90^\circ$.

Proses ECAP dapat dilakukan dengan berbagai rute. Gambar 2.4 berikut memperlihatkan jenis-jenis dari rute ECAP.



Gambar 2.4 Rute Proses ECAP [8]

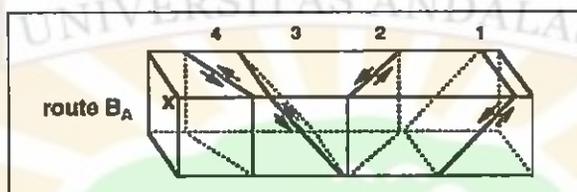
- Rute A, yaitu rute dengan pemutaran sampel sebesar 0° diantara setiap langkah proses
- Rute B, yaitu rute dengan pemutaran sampel sebesar 90° diantara setiap langkah proses

Rute B terbagi 2, yaitu :

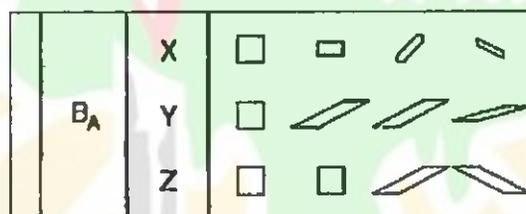
- ✓ Rute Ba, yaitu rute dengan pemutaran sampel sebesar 90° dengan arah bolak balik diantara setiap langkah proses.
- ✓ Rute Bc, yaitu rute dengan pemutaran sampel sebesar 90° dengan arah sama diantara setiap langkah proses.

- Rute C, yaitu rute dengan pemutaran sampel sebesar 180° diantara setiap langkah proses.

Masing-masing rute ECAP memberikan *slip system* pada bidang butir yang berbeda-beda. Rute Ba menghasilkan *slip system* yang berupa jajaran genjang pada bidang Y untuk satu laluan saat melewati daerah geser. Rute Ba menghasilkan distorsi dan bentuk *slip system* yang berbeda untuk setiap langkahnya. Hal ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.5 dan 2.6 berikut



Gambar 2.5 Slip systems pada bidang X, Y, dan Z untuk laluan berurutan pada rute B_A [12]



Gambar 2.6 Distorsi elemen kubik pada bidang X, Y, Z yang diproses dengan rute B_A untuk laluan 1-3 [12]

Pada Gambar 2.6 terlihat bahwa setiap penekanan ECAP terjadi perubahan distorsi pada material uji. Rute Ba menghasilkan distorsi elemen kubik yang berbeda-beda disetiap laluan. Semakin banyak jumlah laluan, bentuk distorsi elemen kubiknya semakin berbeda-beda. Pada bidang X perubahan distorsi elemen kubiknya semakin kecil seiring bertambahnya jumlah laluan ECAP. Elemen kubiknya semakin lama semakin menipis membentuk persegi panjang dengan kemiringan 45°. Sedangkan untuk bidang Y, perubahan elemen kubiknya membentuk jajaran genjang yang semakin menipis seiring bertambah jumlah laluan ECAP. Pada bidang Z, perubahan elemen kubiknya juga menjadi jajaran genjang yang arahnya berlawanan dengan arah elemen kubik sebelumnya seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP. Distorsi elemen kubik ini

menggambarkan distorsi yang terjadi pada butir material jika diamati dalam skala mikro.

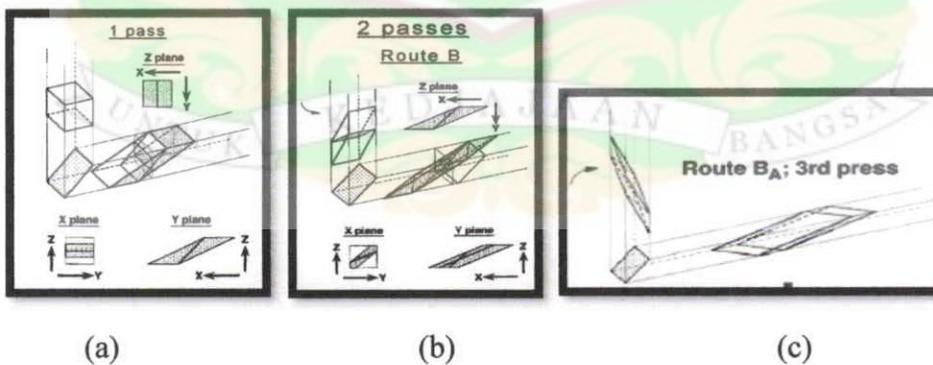
Beberapa faktor yang mempengaruhi strukturmikro yang dihasilkan dari ECAP adalah :

1. Rute proses, dimana sampel diputar diantara penekanan yang berturut-turut.
2. Geometri cetakan seperti, Φ sudut diantara kedua alur cetakan (*channel angle*) dan ψ sudut lengkungan cetakan (*corner angle*).
3. Variabel proses seperti, kecepatan penekanan, pelumasan, dan temperatur.
4. Sifat material, seperti kekuatan dan perilaku pengerasan.

2.6 Pemodelan Geseran Butir oleh ECAP rute B_A

Gambar 2.7 berikut merupakan bentuk deformasi elemen kubus ketika melewati satu laluan ECAP, dimana pada bidang Y elemen kubus berbentuk persegi berubah menjadi jajaran genjang setelah melewati daerah geser laluan pertama. Hal ini mengilustrasikan bentuk perpanjangan butir ke arah *elongated*.

Pada laluan kedua di bidang Y, yang sebelumnya berbentuk jajaran genjang, setelah melewati daerah geser perpanjangan butirnya semakin *elongated* (Gambar 2.7 b). Kemudian, pada laluan selanjutnya efek perpanjangan butir *elongated* sebelumnya dilanjutkan lagi. Begitu seterusnya seiring pertambahan jumlah laluan ECAP.



Gambar 2.7 Model bidang geser aluminium yang diproses ECAP rute B_A untuk masing-masing laluan (a) deformasi elemen kubik pada 1 langkah ECAP, (b) deformasi elemen kubik pada 2 langkah, (c) deformasi elemn kubik pada 3 langkah proses [8]

2.7 Teori Hall-Petch

Proses ECAP ini berhubungan dengan penghalusan butir, karena deformasi secara menyeluruh dapat menghaluskan ukuran butir. Hubungan antara tegangan luluh (dan sifat mekanik lainnya) dengan ukuran butir dikemukakan oleh Hall dan dikembangkan oleh Petch, kemudian didapatkan persamaan *Hall-Petch* [13], persamaannya yaitu :

$$\sigma_0 = \sigma_i + kD^{-1/2} \quad (2.3)$$

dimana,

- σ_0 : Tegangan luluh
- σ_i : Tegangan geser, menunjukkan ketahanan secara menyeluruh dari struktur kristal terhadap pergerakan dislokasi
- k : Konstanta material, yang diukur dari kekerasan relatif dari batas butir
- D : Diameter butir

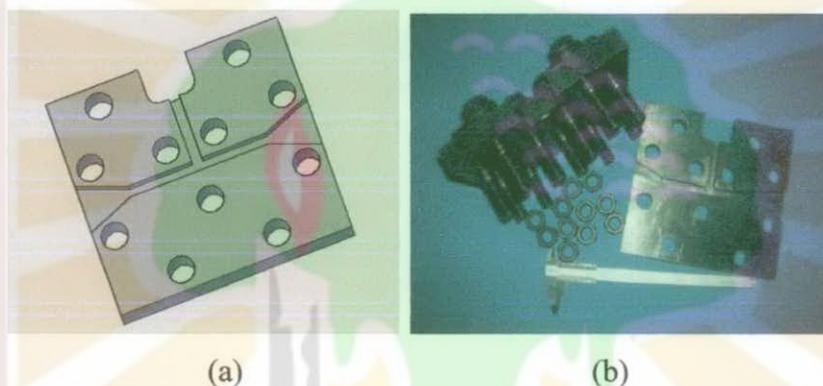
Persamaan *Hall-Petch* ini berdasarkan pada pengukuran titik *yield* baja karbon rendah. Persamaan ini ditemukan untuk menunjukkan bahwa ukuran butir tergantung dari aliran tegangan pada regangan plastis sampai patah ulet dan juga untuk menunjukkan variasi tegangan patah getas oleh ukuran butir, serta kekuatan lelah tergantung pada ukuran butir.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Penyiapan cetakan

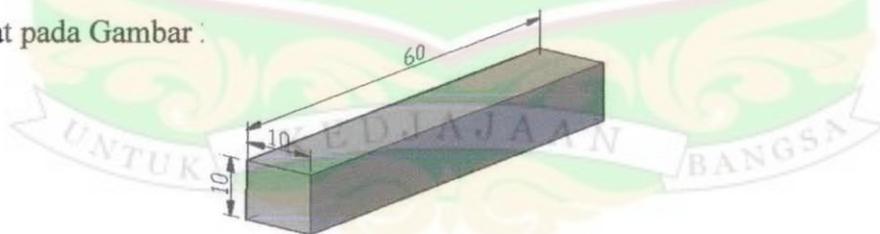
Penyiapan cetakan diawali dengan perancangan bentuk cetakan yang dibuat dengan Auto-CAD. Material cetakan adalah *tool steel* Assab 80, yang dirancang dengan sudut $\Phi = 90^\circ$ dan sudut lengkung $\Psi = 180^\circ$. Cetakan dengan ukuran 200 x 200 x 30 mm ini dibuat alur T dengan kedalaman 10 mm, seperti pada Gambar 3.1. Sebelum dibuat alur, cetakan di-*annealing* untuk mengurangi kekerasannya (± 17 HRC). Setelah alur dibuat cetakan di-*flame hardening* untuk meningkatkan kekuatannya (± 54 HRC).



Gambar 3.1 Cetakan alur T (a) gambar rancangan, (b) perangkat cetakan alur T

3.2 Persiapan sampel

Sampel yang digunakan adalah aluminium murni dan aluminium paduan AA7075. Spesimen dipotong dan dibentuk dengan spesifikasi yang terdapat pada Gambar :



Gambar 3.2. Gambar rancangan spesimen ECAP

3.3 Perlakuan ECAP

ECAP dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) bertenaga hidrolik dengan kapasitas mesin 30.000 kgf, seperti pada Gambar 3.3.



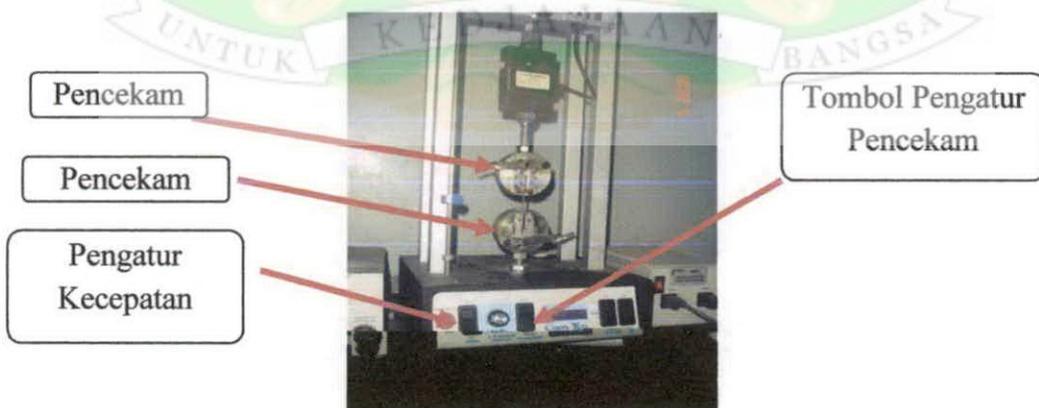
Gambar 3.3 Perlakuan ECAP

Prosedur ECAP :

1. Spesimen dan *plunger* dilumuri dengan gemuk agar gaya gesek berkurang
2. Spesimen diletakkan ke dalam cetakan
3. *Plunger* dipasang pada UTM
4. Cetakan yang sudah dipasangkan dan dieratkan dengan baut diletakkan di dudukan pada UTM.
5. Beban diberikan, spesimen yang berada di dalam cetakan tertekan oleh *plunger*.
6. Spesimen yang telah di ECAP kemudian dikeluarkan dari cetakan, prosedur ECAP selesai.

3.4 Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik dilakukan pada spesimen setelah ECAP dan tanpa ECAP di mesin uji tarik mini dengan kecepatan penarikan 10 mm/menit yang di-*running* dengan *software* C-TAP, seperti terlihat pada Gambar 3.5



Gambar 3.4 Com-Ten Testing Machine

Prosedur pengujian tarik dengan mesin uji tarik mini :

1. Komputer dan mesin uji tarik mini dihidupkan
2. Program C-TAP pada komputer dijalankan
3. Spesimen uji tarik diletakkan di pencekam, naik atau turun nya pencekam dapat diatur dengan tombol pengatur pencekam
4. Tombol start yang ada pada program C-TAP di klik
5. Data spesimen (dimensi) dimasukkan
6. Tombol OK pada program C-TAP ditekan
7. Kecepatan penarikan diatur dengan pengatur kecepatan
8. Setelah putus, nilai kekuatan diperoleh dari grafik

3.5 Pengujian korosi

Pengujian korosi dilakukan dengan menggunakan metoda *static immersion test*, dimana spesimen direndam dalam larutan NaOH 2M selama 12 jam. Sampel uji korosi di cek pada waktu berikut selama 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, 120 menit, 180 menit, 240 menit, 720 menit. Pengecekan dilakukan dengan cara membersihkan sampel dengan *brush* plastik dan air mengalir, setelah kering sampel ditimbang, lalu dimasukkan lagi ke dalam larutan uji.

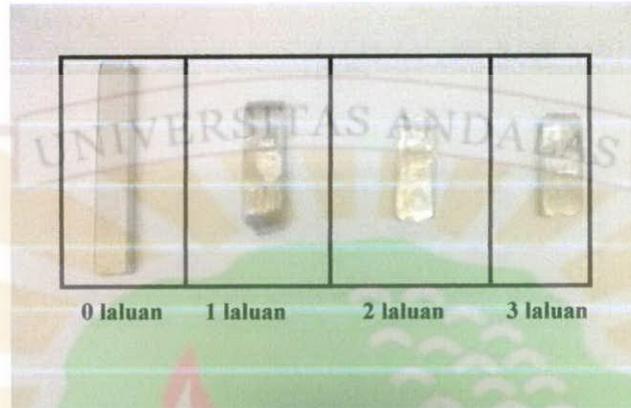
3.6 Metalografi

Sampel metalografi diambil dari spesimen ECAP yang dipotong dengan gergaji dengan ukuran 10 x 10 x 5 mm. Sampel dibingkai dengan resin *unsaturated polyester* dan *hardener*. Setelah resin mengeras sampel diampelas kemudian dipoles sampai permukaannya mengkilat dan dapat memantulkan cahaya. Setelah itu sampel difoto makro dan di etsa dengan larutan *Poulton reagent* [12 ml HCl (conc) + 6 ml HNO₃ (conc) + 1 ml HF (48%) + 1 ml H₂O]. Setelah etsa kering, sampel diamati di bawah mikroskop optik yang di *running* dengan program Jenco Image.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Proses ECAP

Bentuk spesimen setelah mengalami proses ECAP dapat kita lihat pada Gambar 4.1 dan 4.2 di bawah ini.



Gambar 4.1 Bentuk spesimen aluminium murni setelah proses ECAP



Gambar 4.2 Bentuk spesimen aluminium paduan AA 7075 setelah proses ECAP

Pada aluminium murni, setelah dilakukan proses ECAP terjadi pengurangan dimensi dari spesimen. Spesimen yang mulanya berukuran 6 cm setelah ECAP satu laluan ukurannya berkurang menjadi 4 cm, untuk laluan ketiga dan keempat ukurannya menjadi 3,5 cm. Hal ini terjadi ketika dilakukan proses ECAP, void-void yang terdapat pada material menjadi semakin sedikit. Semakin banyak jumlah laluan void-void ini juga semakin menghilang sehingga terjadi pengurangan dimensi dari spesimen. Hal ini juga berpengaruh pada massa jenis spesimen. Massa jenisnya mengalami peningkatan.

Spesimen aluminium paduan AA 7075 setelah dilakukan proses ECAP memiliki bentuk yang pecah-pecah. Di sini dapat kita ketahui bahwa aluminium paduan AA 7075 mengalami penggetasan setelah dilakukan proses ECAP, oleh sebab itu tidak bisa dilakukan peningkatan kekuatan dengan menggunakan proses ECAP.

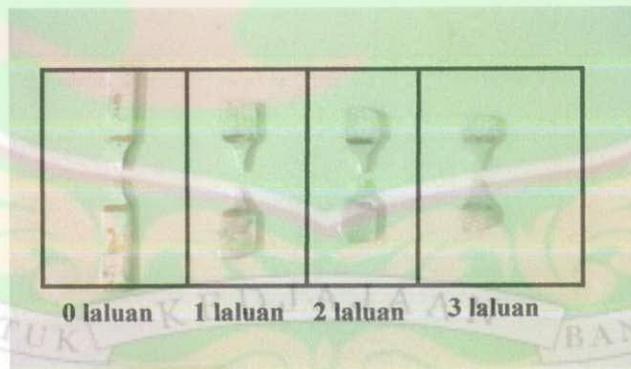
Pada penelitian ini ECAP alur T yang digunakan juga harus dilakukan pembongkaran untuk mengeluarkan spesimen. Ada beberapa faktor yang menyebabkan cetakan harus dibongkar untuk mengeluarkan spesimen. Faktor yang pertama mungkin disebabkan karena terjadinya gesekan yang besar antara spesimen dan cetakan, dimana pelumas yang diberikan mengalami kehilangan viskositas karena gesekan besar yang menimbulkan panas. Faktor selanjutnya dikarenakan spesimen yang ditekan masuk ke dalam celah antara cetakan dan pasangannya. Celah ini ada karena pemasangan baut yang tidak kuat. Sehingga spesimen menempel pada cetakan dan harus dilakukan pembongkaran cetakan untuk mengeluarkan spesimen.

4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian Tarik

Pengujian tarik hanya dilakukan pada aluminium murni karena aluminium paduan setelah ECAP berbentuk pecah-pecah. Hasil pengujian tarik setelah ECAP dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.1 Hasil pengujian tarik aluminium murni setelah proses ECAP T rute BA

Data Pengujian	0 x laluan	1 x laluan	2 x laluan	3 x laluan
Kekuatan Tarik, σ_u (MPa)	117,21	130,18	189,05	204,32
Kekuatan Luluh (MPa)	46,62	72,87	187,57	162,12
Elongasi, e (%)	14	13,6	12,74	12,7

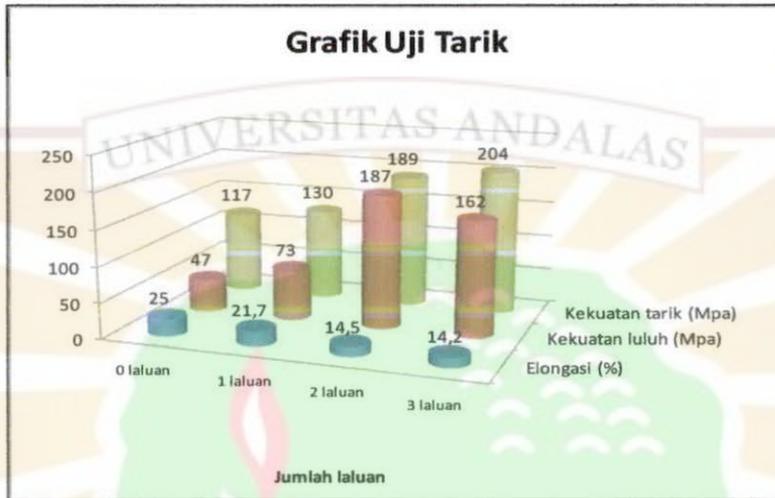


Gambar 4.3 Bentuk patahan spesimen ECAP setelah uji tarik

Berdasarkan hasil pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 di atas, aluminium murni mengalami peningkatan kekuatan yang cukup signifikan. Peningkatan kekuatan ini seiring dengan jumlah peningkatan laluan ECAP laluan T. Pada Tabel 4.1 dapat kita lihat kekuatan yang paling tinggi terdapat pada laluan ketiga, selanjutnya laluan kedua, laluan pertama dan yang paling rendah adalah tanpa

proses ECAP. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya [4-5]. Dimana, dilaporkan bahwa peningkatan kekuatan material berbanding lurus dengan jumlah laluan ECAP.

Perbedaan yang lebih jelas antara kekuatan masing-masing laluan dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut



Gambar 4.4 Perbandingan kekuatan tarik, kekuatan luluh dan elongasi aluminium murni ECAP laluan T

Dari hasil pengujian tarik aluminium murni yang ditampilkan pada Gambar 4.4 di atas menunjukkan bahwa kekuatan aluminium meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan jumlah laluan. Semakin banyak jumlah laluan maka semakin tinggi kekuatan aluminium tersebut.

Kekuatan aluminium ECAP 0 laluan adalah 117 MPa, kekuatan ini meningkat menjadi 130 MPa pada laluan pertama, 187 MPa untuk laluan kedua dan menjadi 204 MPa pada laluan ketiga. Pada laluan ketiga ini peningkatan kekuatan dari tanpa laluan hampir mencapai dua kali lipat.

Sebagaimana kekuatan tarik, kekuatan luluh juga mengalami peningkatan kekuatan seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP. Semakin banyak jumlah laluan ECAP, kekuatan luluh spesimen semakin mendekati kekuatan tarik spesimen. Pada kondisi 0 laluan selisih antara kekuatan tarik dan kekuatan luluh adalah 73 MPa, laluan pertama selisihnya 57 MPa, laluan ketiga selisihnya semakin dekat hanya 1 MPa. Namun, pada laluan ketiga selisihnya kembali jauh yaitu 42 MPa. Seharusnya semakin banyak jumlah laluan ECAP, maka selisih antara

kekuatan luluh dan kekuatan tarik semakin kecil. Hal ini mungkin terjadi karena disetiap penekanan ECAP terjadi penyusunan ulang butir-butir dari material uji.

Peningkatan kekuatan aluminium setelah proses ECAP disebabkan karena terjadinya regangan plastis menyeluruh setelah penekanan yang berulang-ulang menghasilkan penghalusan butir akibat efek dari pengerjaan dingin. Proses ini menyebabkan dislokasi bergerak dan bertumpuk pada batas butir, sehingga terjadi peningkatan energi dalam pada dislokasi [14].

Dari hasil pengujian tarik diketahui juga bahwa elongasi dari spesimen aluminium ini mengalami penurunan. Pada spesimen kondisi 0 laluan nilai elongasinya adalah 14 %. Nilai elongasi untuk ECAP 1 laluan adalah 13,6 %, untuk 2 laluan nilai elongasinya 12,74 % dan untuk 3 laluan nilai elongasinya 12,7 %. Nilai ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah laluan ECAP maka nilai elongasinya akan semakin menurun. Hubungan antara jumlah laluan ECAP dan nilai elongasi tersebut adalah berbanding terbalik, sesuai dengan penelitian terdahulu [5][7]. Hasil penelitian ini tidak sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa nilai elongasi meningkat seiring dengan peningkatan jumlah laluan [4].

Deformasi plastis yang terjadi ini akan menyebabkan regangan plastis pada material. Hal inilah yang meningkatkan kekuatan dari material. Namun, peningkatan kekuatan ini memiliki efek samping yaitu terjadinya penurunan keuletan pada material. Penurunan keuletan ini tidak signifikan. Karena penurunan nilai kekuatan inilah terjadi sedikit penurunan nilai elongasi pada material.

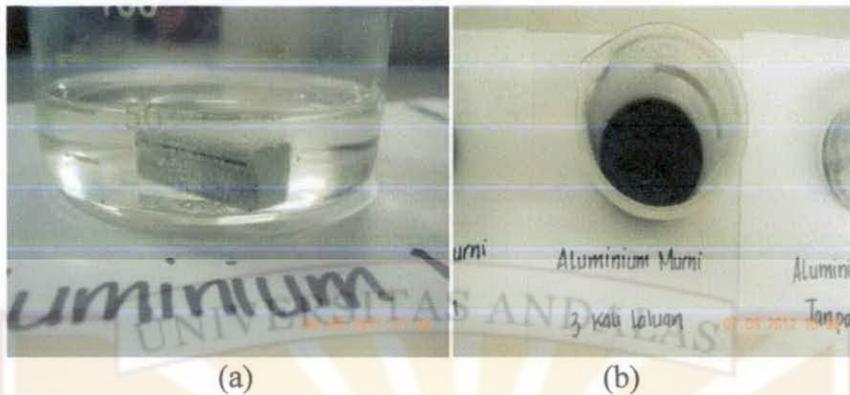
4.3 Hasil dan Pembahasan Pengujian Korosi

Pengujian korosi dilakukan pada setiap spesimen dengan menggunakan metoda *immersion*, yaitu dengan cara perendaman. Korosi dinyatakan sebagai kehilangan massa dari spesimen yang direndam dalam larutan NaOH selama 12 jam.

Peristiwa yang terjadi selama pengujian korosi ini yaitu terdapat gelembung-gelembung pada spesimen yang direndam dalam larutan NaOH 2M. Gelembung ini menandakan adanya reaksi antara spesimen dengan larutan NaOH 2M. Gelembung ini terjadi secara terus menerus selama proses pengujian.

Hal lain yang ditemukan pada pengujian korosi ini yaitu terdapatnya endapan berwarna hitam pada dasar gelas kimia yang dijadikan wadah untuk perendaman.

Endapan ini merupakan bagian dari spesimen yang terkorosi. Fenomena-fenomena yang terjadi selama pengujian korosi dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4.5 Fenomena-fenomena selama pengujian korosi (a) terdapat gelembung pada spesimen, (b) terdapat endapan pada wadah larutan korosi

Dari pengujian ini diketahui kehilangan massa dari aluminium setelah direndam selama 12 jam dalam larutan NaOH 2M. Pada tabel 4.2 dibawah ini dapat diketahui lebih jelas pengurangan massa aluminium per satuan waktunya.

Tabel 4.2 Pengurangan massa aluminium yang direndam dalam NaOH 2M

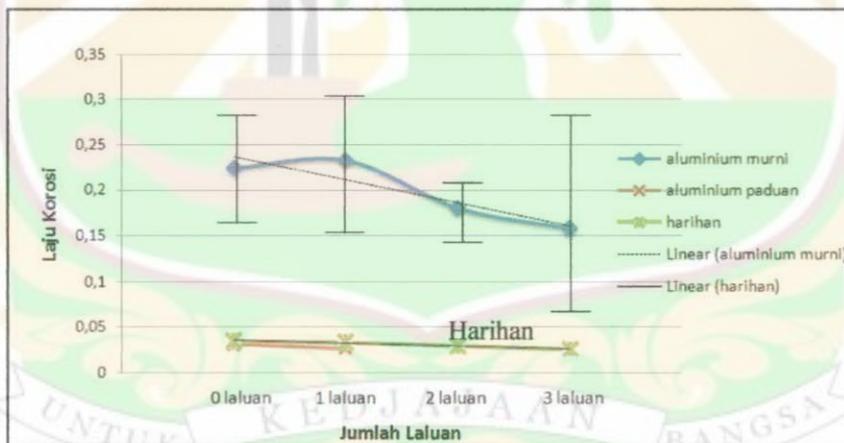
Spesimen	Jumlah Laluan	massa rata-rata (gram)								
		awal	15 menit	30 menit	45 menit	1 jam	2 jam	3 jam	4 jam	12 jam
Aluminium murni	0	7,88	7,82	7,73	7,645	7,435	7,14	6,655	6,065	5,19
	1	7,99	7,955	7,875	7,745	7,59	7,215	6,995	6,23	5,195
	2	7,535	7,515	7,44	7,305	7,11	6,72	6,495	6,04	5,37
	3	5,105	5,08	5,01	4,87	4,77	4,4	4,235	3,935	3,21
Aluminium paduan	0	5,96	5,95	5,87	5,73	5,69	5,56	5,53	5,53	5,59
	1	4,4	4,39	4,33	4,19	4,17	4,07	4,03	4,03	4,08

Dari data di atas dapat kita ketahui bahwa setelah direndam selama 12 jam pengurangan massa yang terjadi pada spesimen aluminium murni dengan kondisi 0 laluan adalah 2,69 gram, sedangkan untuk spesimen ECAP 1 laluan adalah 2,795 gram, untuk 2 laluan sebesar 2,165 gram dan untuk tiga laluan sebesar 1,895 gram. Laju korosi tertinggi terdapat pada spesimen dengan 1 laluan yaitu sebesar 0,23 gram/jam, diurutkan kedua yaitu pada 0 laluan sebesar 0,22 gram/jam, selanjutnya pada kondisi 2 laluan sebesar 0,18 gram/jam. Laju korosi terendah terdapat pada spesimen dengan 3 laluan yaitu sebesar 0,16 gram/jam.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini tidak sepenuhnya sesuai dengan penelitian sebelumnya, dimana pada penelitian sebelumnya dilaporkan bahwa ketahanan korosi meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP [6].

Perbedaan hasil ini terdapat pada spesimen 1 laluan, dimana laju korosi rata-ratanya mengalami peningkatan. Pada Gambar 4.6 dapat kita lihat bahwa masing-masing laluan memiliki *range-range* laju korosi. Nilai *range* ini diambil berdasarkan batas maksimum dan batas minimum dari laju korosi yang diperoleh dari beberapa kali pengujian. Dari *range* tersebut dapat kita lihat bahwa kenaikan laju korosi pada 1 laluan tidak melebihi batas maksimum dari laju korosi 0 laluan. Walau mengalami sedikit peningkatan namun dapat kita simpulkan dari penelitian ini bahwa ketahanan korosi meningkat seiring jumlah laluan ECAP.

Pengujian korosi ini juga dilakukan pada spesimen aluminium paduan AA 7075. Dari data yang diperoleh dapat dilihat bahwa aluminium paduan AA 7075 dengan perlakuan ECAP lebih tahan korosi jika dibandingkan dengan aluminium paduan ECAP 0 laluan. Spesimen 0 laluan ECAP memiliki laju korosi 0,03 gram/jam, sedangkan spesimen aluminium dengan 1 laluan ECAP memiliki laju korosi 0,02 gram/jam. Dari laju korosi ini dapat disimpulkan bahwa pada aluminium paduan ketahanan korosi meningkat setelah dilakukan proses ECAP. Gambar 4.6 di bawah ini menunjukkan laju korosi masing-masing material.



Gambar 4.6 Perbandingan laju korosi masing-masing laluan ECAP

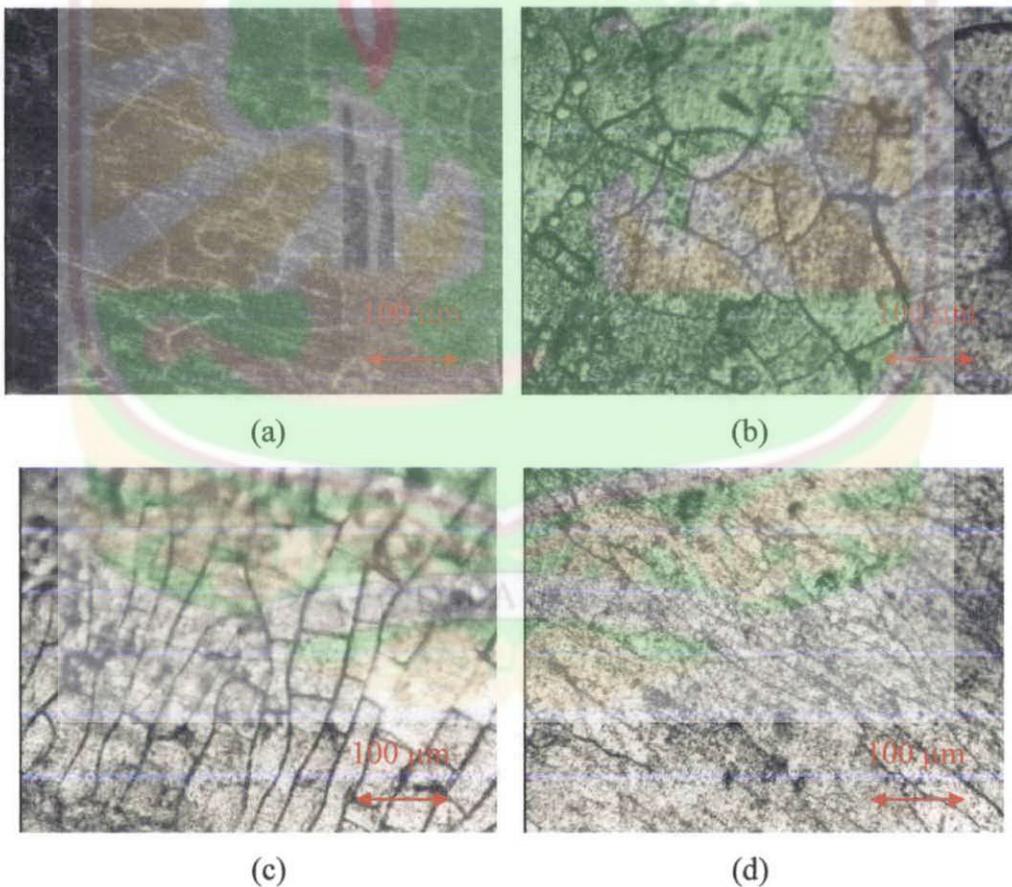
Pada grafik dapat kita lihat laju korosi cenderung menurun seiring bertambahnya jumlah laluan ECAP, walaupun berdasarkan data yang diperoleh terjadi peningkatan laju korosi pada laluan 1. Kecenderungan menurun ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya [6].

Pada grafik dapat juga kita lihat perbandingan laju korosi yang didapat pada penelitian ini dan laju korosi yang didapat pada penelitian sebelumnya (grafik

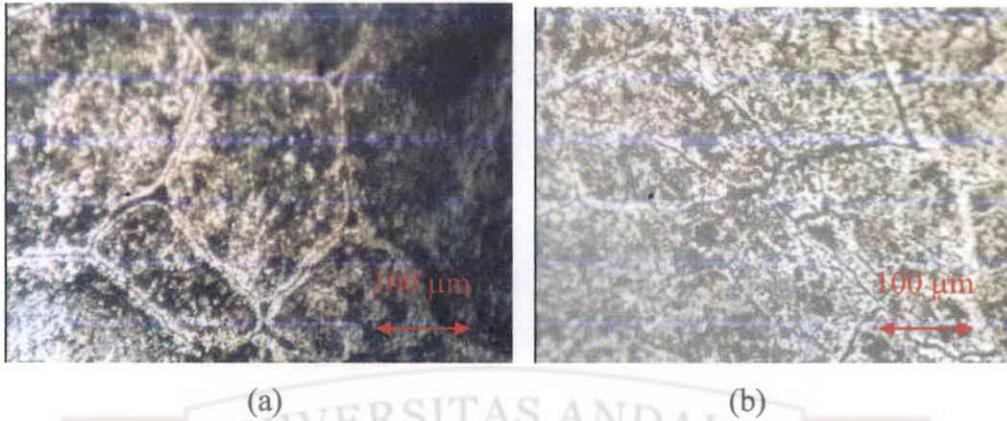
berwarna hijau) [6]. Secara keseluruhan laju korosi pada penelitian sebelumnya lebih kecil dibanding laju korosi pada penelitian ini dengan spesimen yang sama yaitu aluminium murni. Perbedaan ini mungkin terjadi karena perbedaan larutan korosi yang digunakan serta lama waktu pengujian. Seperti yang telah disebutkan penelitian sebelumnya [6] menggunakan larutan korosi HCl, sedangkan pada penelitian ini menggunakan NaOH 2M. Waktu pengujian pada penelitian ini 12 jam, sedangkan pada penelitian sebelumnya selama 28 jam.

4.4 Pengamatan Struktur Mikro Material

Pengamatan struktur mikro bertujuan untuk melihat ukuran butir material setelah ECAP. Gambar 4.7 dan 4.8 berikut memperlihatkan struktur mikro spesimen aluminium murni dan aluminium paduan pada kondisi 0 laluan, 1 laluan, 2 laluan dan 3 laluan.



Gambar 4.7 Bentuk struktur mikro aluminium murni setelah ECAP pada kondisi (a) tanpa laluan, (b) 1 laluan, (c) 2 laluan dan (d) 3 laluan



Gambar 4.8 Bentuk struktur mikro aluminium paduan setelah ECAP pada kondisi (a) tanpa luan dan (b) 1 luan

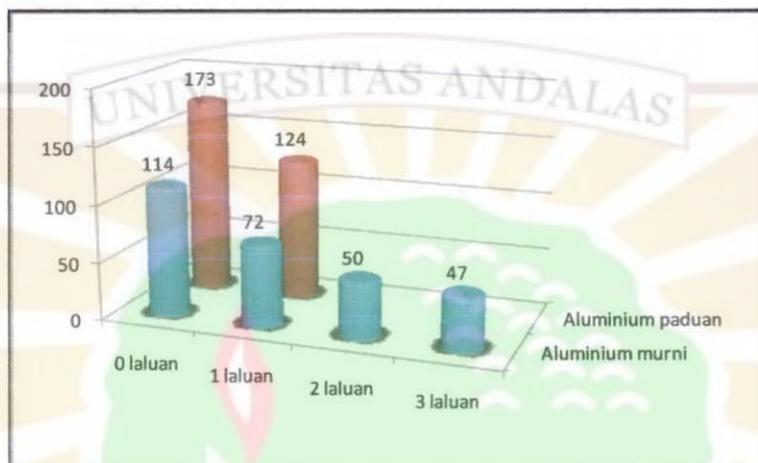
Gambar 4.7a menunjukkan gambar struktur mikro dari aluminium murni 0 luan, dimana struktur butir masih *equiaxed* dengan rata-rata ukuran butir $114 \mu\text{m}$ yang dihitung dengan metoda *point counting*. Untuk spesimen ECAP 1 luan ukuran butirnya rata-rata $72 \mu\text{m}$, bentuk butirnya masih *equiaxed* yang dapat dilihat pada Gambar 4.7b, dimana jumlah batas butirnya lebih banyak dibanding tanpa luan, pada gambar dapat dilihat bahwa telah terjadi reduksi ukuran butir. Gambar 4.7c menunjukkan gambar struktur mikro spesimen setelah ECAP 2 luan, bentuk butirnya sudah mulai berubah menjadi *elongated* dengan ukuran butir rata-rata $50 \mu\text{m}$. Gambar 4.7d memperlihatkan bentuk struktur mikro dari spesimen ECAP 5 luan, dimana struktur butirnya *elongated* dengan ukuran rata-rata butir $47 \mu\text{m}$. Dari hasil yang diperoleh ini dapat kita ketahui bahwa ukuran butir spesimen aluminium murni semakin halus seiring bertambahnya jumlah luan ECAP rute BA.

Gambar struktur mikro spesimen aluminium paduan AA7075 untuk ECAP tanpa luan dapat dilihat pada Gambar 4.8a, dimana bentuk butirnya *equiaxed* dengan ukuran butir rata-rata $173 \mu\text{m}$. Gambar 4.8b memperlihatkan bentuk butir spesimen ECAP aluminium paduan, dimana bentuk butirnya juga *equiaxed* dengan ukuran butir rata-rata $124 \mu\text{m}$. Pada aluminium paduan ini juga terjadi reduksi ukuran butir setelah dilakukannya proses ECAP.

Perbandingan ukuran butir masing-masing luan lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.9 berikut ini.

Tabel 4.3 Ukuran butir masing-masing laluan ECAP

Spesimen	Jumlah laluan	Ukuran butir (μm)
Aluminium murni	0 laluan	114 ± 3
	1 laluan	72 ± 2
	2 laluan	50 ± 2
	3 laluan	47 ± 1
Aluminium paduan	0 laluan	173 ± 4
	1 laluan	124 ± 2



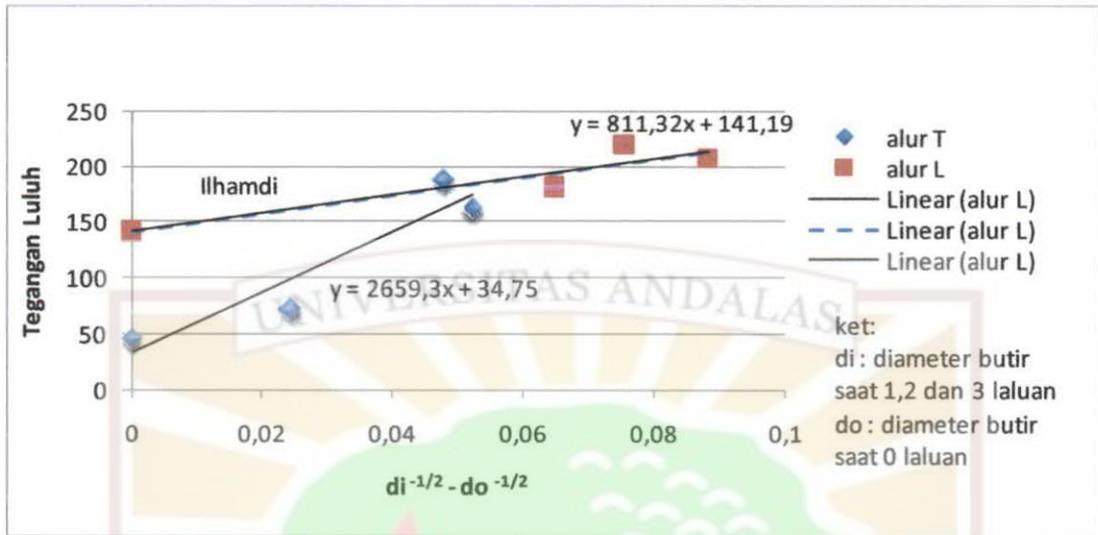
Gambar 4.9 Perbandingan ukuran butir masing-masing laluan ECAP

Pada tabel dan gambar di atas dapat dilihat bahwa pada spesimen aluminium murni, ukuran butir yang paling halus terdapat pada spesimen ECAP 3 laluan, kemudian ECAP 2 laluan, ECAP satu laluan dan ukuran butir yang paling besar tersapat pada speimen ECAP tanpa laluan. Begitu juga dengan spesimen aluminium paduan AA7075, ukuran butir setelah ECAP mengalami reduksi dibanding tanpa laluan. Perubahan ukuran ini cukup signifikan. Oleh karena itu, dapat dikatakan ukuran butir suatu material semakin halus seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP. Hal ini sesuai dengan penelitian-penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP maka ukuran butir akan semakin halus [4-5].

4.5 Korelasi Antara Kekuatan dan Ukuran Butir

Pada penelitian ini diperoleh hubungan antara kekuatan dan ukuran butir, dimana kekuatan meningkat seiring dengan semakin halusya ukuran butir. Dari perubahan ukuran butir dapat diperkirakan tegangan luluh dari material untuk proses

tersebut dan proses selanjutnya, hal ini dinyatakan dengan persamaan *Hall-Petch* [13]. Grafik dari persamaan tersebut untuk penelitian ini adalah:



Gambar 4.10 Kurva tegangan luluh vs $d^{-1/2}$ hasil ECAP rute B_A menurut teori *Hall-Petch*

Dari persamaan pada grafik di atas dapat kita ketahui bahwa nilai konstanta k_y adalah sebesar $2659,3 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$. Nilai ini didapat dari nilai gradien persamaan garis lurus tersebut. Nilai konstanta ini berbeda dengan penelitian sebelumnya [15], dimana dilaporkan bahwa nilai konstanta k_y sebesar $811,32 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}^{1/2}$. Oleh karena itu dibutuhkan alat optik yang lebih baik agar pengamatan struktur mikro bisa mendapatkan hasil yang lebih baik.

Dengan persamaan yang diperoleh dari grafik di atas kita dapat memperkirakan tegangan luluh material dengan mengetahui ukuran butir 0 laluan dan ukuran butir setelah ECAP.

Perkiraan harga tegangan luluh setelah laluan ke-1

$$\text{Tegangan luluh} = 2659,3 (72^{-1/2} - 114^{-1/2}) + 34,75 = 99 \text{ MPa}$$

Harga ini memiliki selisih 27 MPa dibandingkan dengan 72 MPa, harga yang didapat dari pengujian.

Perkiraan harga tegangan luluh setelah laluan ke-2

$$\text{Tegangan luluh} = 2659,3 (50^{-1/2} - 114^{-1/2}) + 34,75 = 162 \text{ MPa}$$

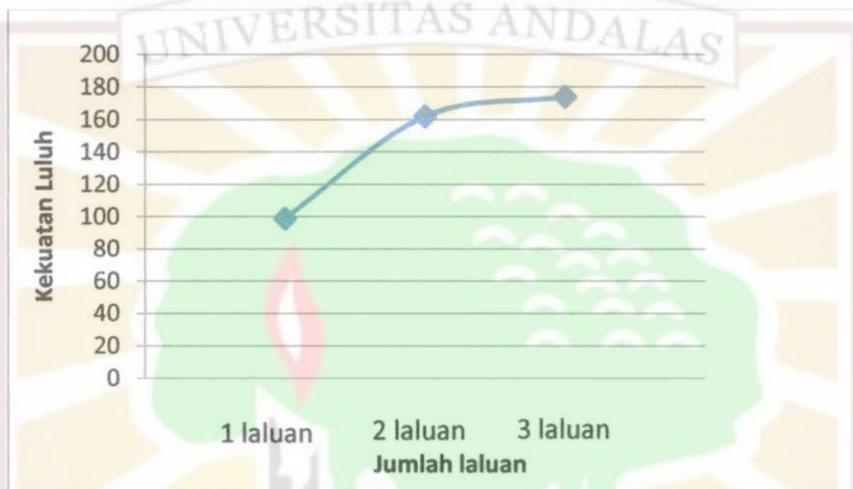
Harga ini memiliki selisih 26 MPa dibandingkan dengan 188 MPa, harga yang didapat dari pengujian.

Perkiraan harga tegangan luluh setelah laluan ke-3

$$\text{Tegangan luluh} = 2659,3 (47^{-1/2} - 114^{-1/2}) + 34,75 = 174 \text{ MPa}$$

Harga ini memiliki selisih 12 MPa dibandingkan dengan 162 MPa, harga yang didapat dari penelitian.

Dengan demikian, persamaan tersebut untuk ketiga laluan memiliki simpangan sebesar +27 MPa dan -26 MPa. Tegangan luluh yang diperoleh berdasarkan teori *Hall-Petch* dapat dilihat perbandingannya pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Kurva tegangan luluh berdasarkan teori *Hall-Petch* terhadap jumlah laluan ECAP

4.6 Korelasi Antara Ketahanan Korosi dan Ukuran Butir

Pada penelitian ini diperoleh hubungan antara ukuran butir dan ketahanan korosi adalah laju korosi menurun dengan adanya proses ECAP. Pada grafik (Gambar 4.6) dapat kita lihat bahwa laju korosi cenderung menurun seiring dengan jumlah laluan ECAP. Walaupun pada laluan 1 dan laluan 3 terjadi kenaikan laju korosi. Hal ini mungkin terjadi karena tidak meratanya sebaran ukuran butir spesimen. Pada penelitian sebelumnya [16], dilaporkan bahwa deformasi secara menyeluruh dapat mengakibatkan penghalusan ukuran butir material, deformasi secara menyeluruh akan menjadikan sebaran butir material menjadi homogen dengan ukuran yang lebih halus dibandingkan dengan material tanpa deformasi. Ukuran butir yang halus dan homogen inilah yang dapat memperbaiki sifat ketahanan korosi material.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah :

1. Peningkatan kekuatan aluminium murni setelah ECAP alur T dengan rute BA cukup signifikan. Kekuatannya meningkat seiring bertambahnya jumlah laluan ECAP.
2. Ketahanan korosi aluminium murni mengalami peningkatan pada laluan ke-2 dan ke-3, namun pada laluan ke-1 terjadi penurunan laju korosi, yang mungkin disebabkan karena tidak meratanya sebaran ukuran butir spesimen.
3. Spesimen dengan jenis aluminium paduan AA 7075 menjadi pecah-pecah setelah dilakukannya proses ECAP.
4. Ukuran butir material mengalami penghalusan seiring dengan bertambahnya jumlah laluan ECAP.
5. Cetakan harus dibongkar untuk mengeluarkan spesimen.

5.2 Saran

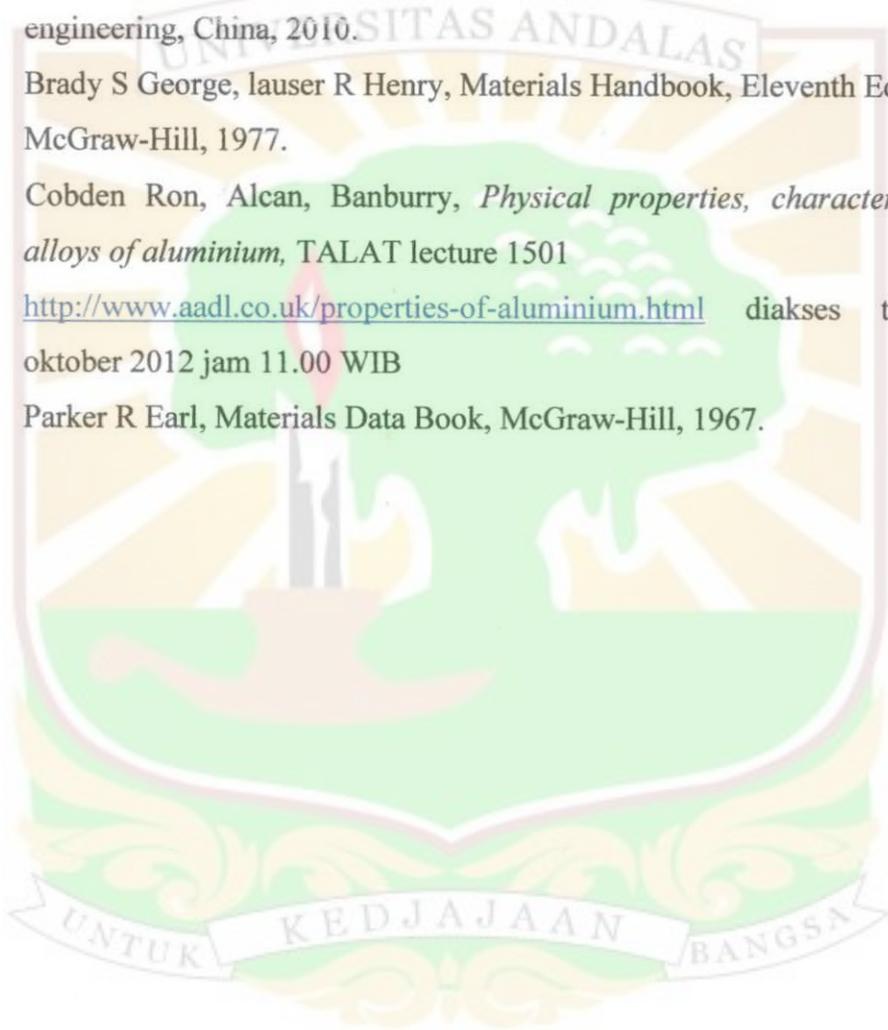
Untuk lebih baiknya penelitian ini, maka dapat disarankan beberapa hal sebagai berikut :

1. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang valid, sebaiknya pengujian dilakukan dengan jumlah sampel yang banyak.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan memberikan perlakuan-perlakuan tertentu pada spesimen untuk ECAP alur T khususnya untuk aluminium paduan, seperti dengan melakukan pemanasan sebelum spesimen di ECAP, sehingga peningkatan kekuatan dan penghalusan butir dapat diperoleh lebih baik lagi.
3. Perlu digunakan alat optik yang lebih baik agar pengamatan struktur mikro dapat diperoleh hasil yang valid.
4. Gunakan pelumas dengan viskositas yang tinggi agar gesekan antara spesimen dan cetakan dapat diminimalisir.
5. Dalam pemasangan cetakan, pastikan baut terpasang dengan erat agar spesimen tidak masuk ke dalam celah pada cetakan dan pasangannya.

DAFTAR PUSTAKA

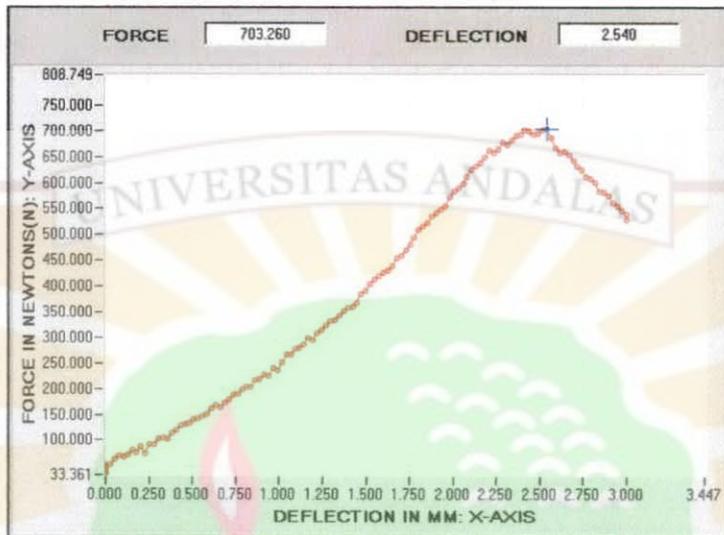
- [1] Callister, *Materials Science and Engineering*, John Wiley, 1985
- [2] <http://blog.ub.ac.id/muhammadkhairul/2012/06/> diakses pada tanggal 8 oktober 2012 pada jam 10.30 WIB
- [3] Smith W.F, *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill, 1996
- [4] Ferdial Rafli, Skripsi S-1, Pengaruh ECAP Alur L dan T Terhadap Peningkatan Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Aluminium dan Tembaga Komersil, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, April 2011.
- [5] Adie Nala Pruja, Skripsi S-1, Pengaruh Kombinasi Cetak Tekan dan Pengerolan Dingin terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Aluminium, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, 2009.
- [6] Harihan, Skripsi S-1, Pengaruh Laluan Proses ECAP Rute Bc Terhadap Laju Korosi Aluminium Komersil, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas, Padang, Oktober 2007.
- [7] Setiawan Hera, "Pengaruh proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) terhadap kekerasan aluminium 1050"
- [8] 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 – 2843
- [9] <http://google.com/HDDr-Equal Channel Angular Pressing> diakses tanggal 12 oktober 2012 pada jam 15.00 WIB
- [10] Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, *Acta Mater.* 46 (1998) 3317.
- [11] R. E. Goforth, k. t. hartwig and L. R. Cornwell, in "*Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation*," edited by T. C. Lowe and R. Z. Valiev (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 2000), p. 3.
- [12] Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon. *Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain refinement*. *Progress in material science* 51 (2006) 881-981.
- [13] Dieter, G.E, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, London, 1986

- [14] Gunawarman, Jon Affi, Andre Islah Azhani, "Pengaruh pemanasan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro aluminium hasil cetak tekan (ECAP) rute Bc", november 2008.
- [15] Ilhamdi. Skripsi S-1. Analisis Perubahan Sifat Mekanik dan Struktur mikro Aluminium Komersial yang Diproses dengan ECAP Rute C. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Andalas, Padang, 2004.
- [16] Min. Z. Zhang, Xu Hong Yan, Li Bao-Cheng. *Corrosion properties of plastically deformed AZ80 magnesium alloy*. School of material science and engineering, China, 2010.
- [17] Brady S George, lauser R Henry, *Materials Handbook*, Eleventh Edition, McGraw-Hill, 1977.
- [18] Cobden Ron, Alcan, Banbury, *Physical properties, characteristics and alloys of aluminium*, TALAT lecture 1501
- [19] <http://www.aadl.co.uk/properties-of-aluminium.html> diakses tanggal 8 oktober 2012 jam 11.00 WIB
- [20] Parker R Earl, *Materials Data Book*, McGraw-Hill, 1967.



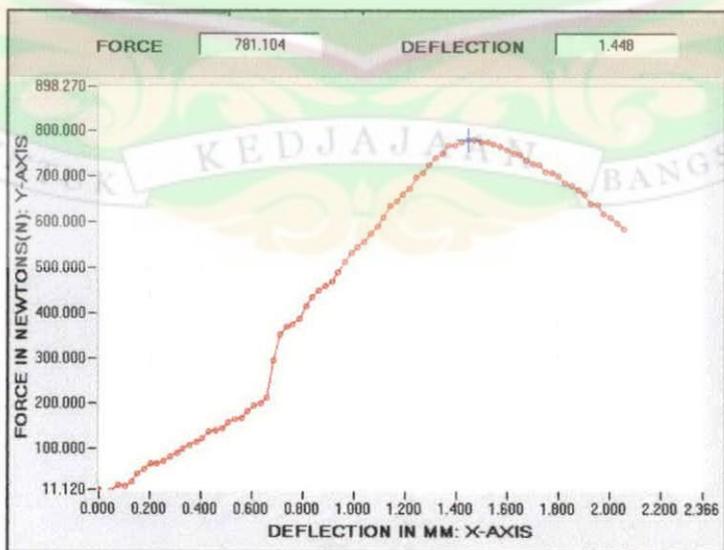
Aluminium murni 0 laluan

TEST SPEED	AREA	TENSILE STRENGTH	YIELD STRENGTH	ELASTIC MODULUS	BREAK STRENGTH
mm/min	mm ²	MPa	MPa	MPa	lb/in ²
64.52	6.00	117.21	46.62	1155.84	12795.67



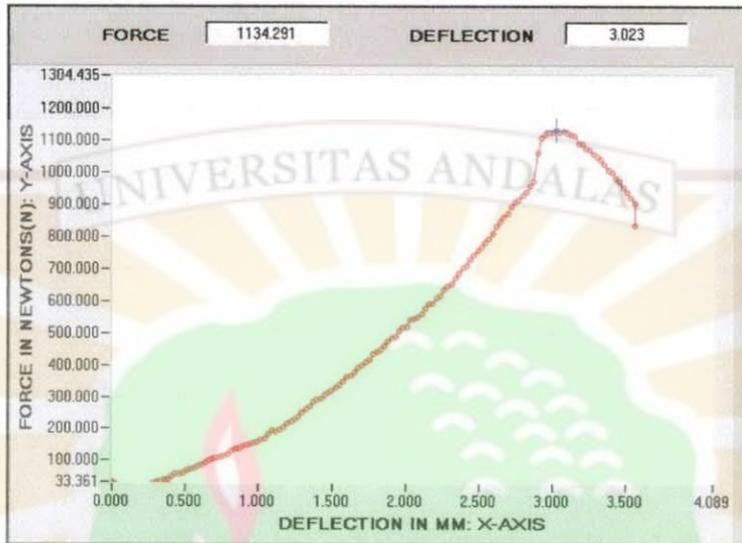
Aluminium murni 1 laluan

TEST SPEED	AREA	TENSILE STRENGTH	YIELD STRENGTH	ELASTIC MODULUS	BREAK STRENGTH
mm/min	mm ²	MPa	MPa	MPa	lb/in ²
103.23	6.00	130.18	72.87	3817.77	14172.01



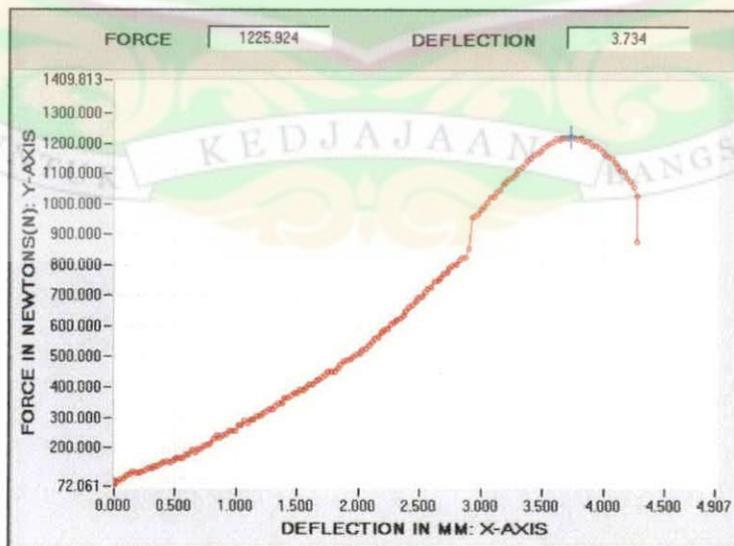
Aluminium murni 2 laluan

TEST SPEED	AREA	TENSILE STRENGTH	YIELD STRENGTH	ELASTIC MODULUS	BREAK STRENGTH
mm/min	mm ²	MPa	MPa	MPa	lb/in ²
64.52	6.00	189.05	187.57	4045.44	20225.77



Aluminium murni 3 laluan

TEST SPEED	AREA	TENSILE STRENGTH	YIELD STRENGTH	ELASTIC MODULUS	BREAK STRENGTH
mm/min	mm ²	MPa	MPa	MPa	lb/in ²
103.23	6.00	204.32	161.12	5201.26	21236.52

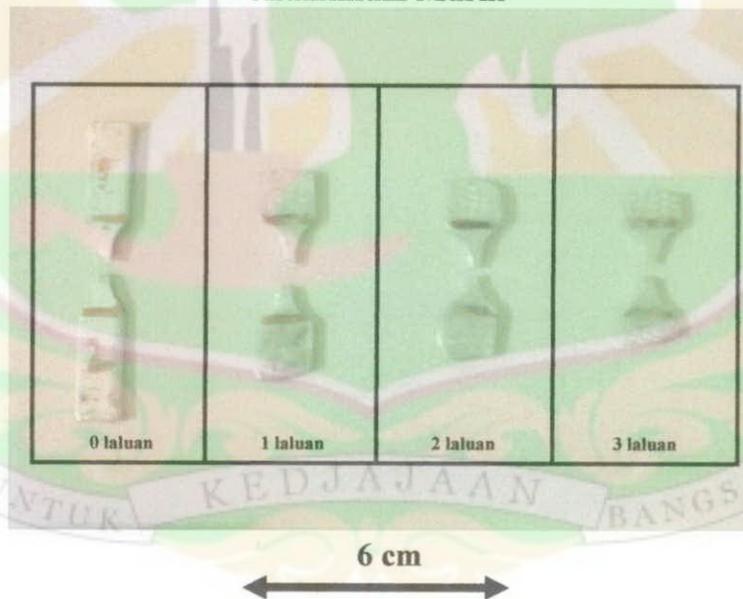


SPESIMEN UJI TARIK

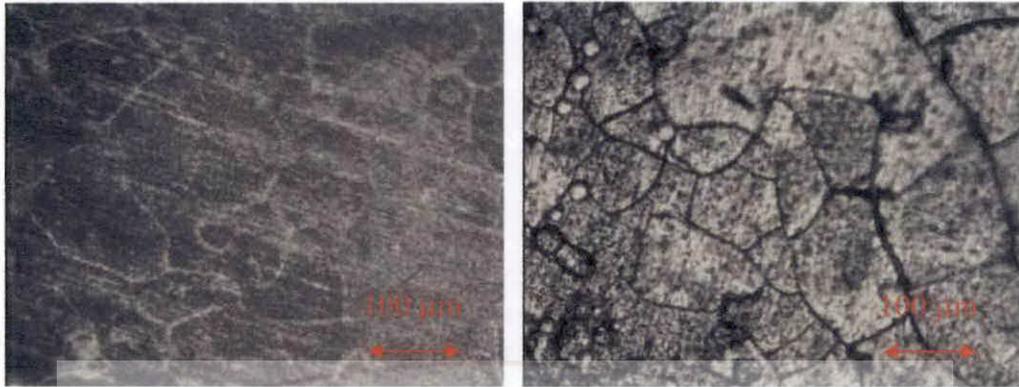
Spesimen Sebelum Uji Tarik ECAP T Aluminium Murni



Spesimen Setelah Uji Tarik ECAP T Aluminium Murni

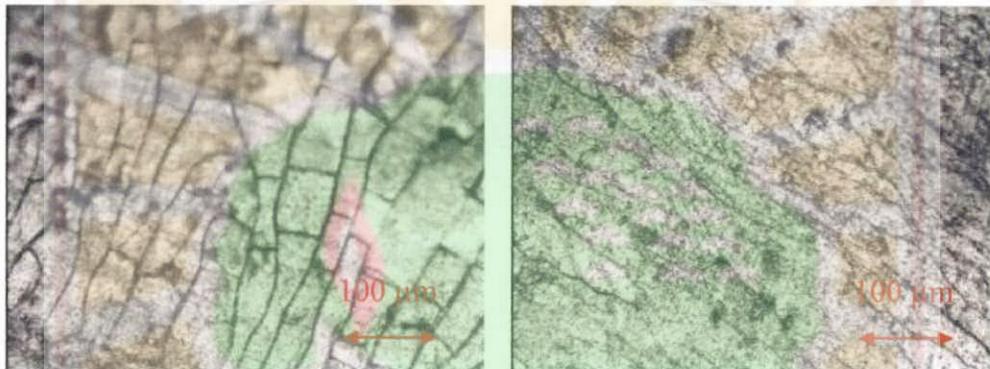


METALOGRAFI



(a)

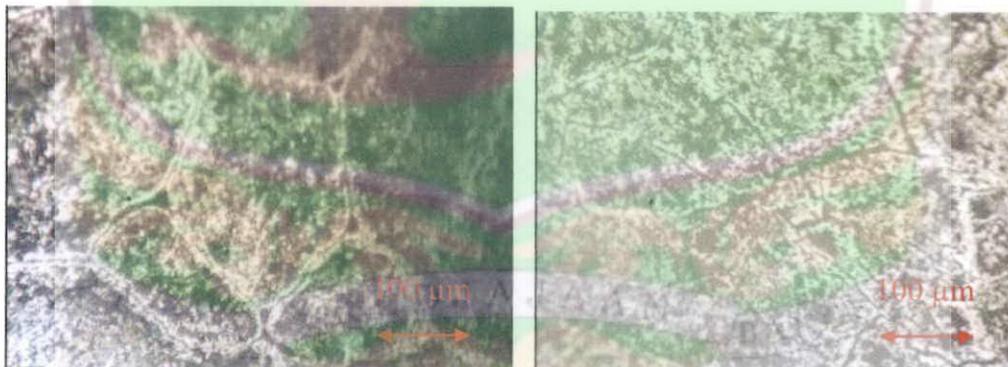
(b)



(c)

(d)

Bentuk struktur mikro aluminium murni setelah ECAP pada kondisi (a) tanpa luan, (b) 1 luan, (c) 2 luan dan (d) 3 luan



(a)

(b)

Bentuk struktur mikro aluminium paduan setelah ECAP pada kondisi (a) tanpa luan dan (b) 1 luan