

**KARAKTERISTIK SIFAT MEKANIK ALUMINIUM  
HASIL PROSES  
EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING - SEMI  
SOLID FORMING**

**DISERTASI**

**Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Doktor**



**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
2018**



DISERTASI

**Karakteristik Sifat Mekanik  
Aluminium Hasil Proses *Equal Channel Angular Pressing -  
Semi Solid Forming***

Oleh :

Aminnudin

NIM : 0930602001

Menyetuji

Komisi Pembimbing,  
Promotor



Prof. Dr. Ir. Pratikto, M.MT.

Ko Promotor I

Ko Promotor II

Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST, M.Eng    Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST, M.Eng

Malang Januari 2018,  
Ketua Program Doktor Teknik Mesin Fakultas Teknik  
Universitas Brawijaya

Prof. Ir. ING. Wardana, M.Eng., Ph.D



## IDENTITAS TIM PENGUJI

JUDUL DISERTASI : Karakteristik sifat mekanik Aluminium hasil proses *Equal Channel Angular Pressing - semi solid forming*

Nama Mahasiswa : Aminnudin  
NIM : 0930602001  
Program Studi : Teknik Mesin  
Minat : Material Manufaktur

### KOMISI PEMBIMBING

Ketua : Prof. Dr. Ir. Pratikto, M.MT  
Anggota : Dr. Eng. Anindito Purnowidodo ST, M.Eng  
Dr. Eng. Yudy Surya Irawan ST, M.Eng

### TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng  
Dosen Penguji 2 : Dr. Slamet Wahyudi, ST, MT  
Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST, MT  
Dosen Penguji Tamu : Prof. Dr. Ir. Djoko Kustono, M.Pd

Tanggal Ujian Tertutup: 3 Januari 2018

SK Penguji :



## UCAPAN TERIMA KASIH

Bismillahirohmannirrohim

Alhamdullilah kami ucakan ke hadirat ALLAH SWT dan shalawat tercurah Pada junjungan kita Nabi Muhammad SAW sehingga disertasi ini mampu terselesaikan. Banyak hambatan yang dialami penulis selama menjalani proses perkuliahan serta penyelesaian disertasi ini namun dengan bantuan dari banyak pihak maka penulis dapat menyelesaikan disertasi ini. Untuk itulah penulis ingin menutupkan terima kasih adan penghargaan yang sebesar besarnya kepada:

1. Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D. selaku ketua Program Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah banyak membantu dan memberi masukan selama penulis menyelesaikan studi di PDTM Universitas Brawijaya.
2. Prof. Dr. Ir. Pratikto , M.MT, selaku promotor yang telah banyak memberikan banyak semangat, arahan dan masukan dalam menyelesaikan disertasi ini.
3. Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST, M.Eng selaku pendamping promotor 1, yang banyak memberikan masukan dan arahan serta banyak memberi masukan tentang alur pemikiran baik dalam penulisan artikel ilmiah dan penulisan disertasi
4. Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST, M.Eng selaku pendamping promotor 2 yang banyak memberikan masukan dan arahan serta banyak memberi masukan sampai pada hal yang detail dalam penulisan disertasi ini.
5. Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng. Sc. yang bertindak sebagai penguji atas masukan dan sarannya.
6. Dr. Slamet Wahyudi ST, MT, yang bertindak sebagai penguji atas masukan dan sarannya.
7. Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, yang bertindak sebagai penguji atas masukan dan ide-idenya serta mebuka jalan untuk mengikuti program sandwich-like di Yamaguchi University.
8. Dekan Fakultas Teknik UM yang telah memberikan Ijin untuk kuliah Program di Teknik Mesin UB, Ketua Jurusan Teknik Mesin UM, Ka-prodi S1 Teknik Mesin UM yang telah banyak membantu dalam menjalani kuliah S3 di Teknik Mesin UB
9. Almarhum Kedua orang tua (Ibu Alifah dan Bapak Affandi) yang telah membimbing dan mendidik sejak dari buaian sampai dapat melangkah ke program pendidikan tertinggi ini.
10. Istriku Nadya Kurniasih, S.Pd atas segala pengertian, kesabaran dan pengorbanan yan gtelah diberikan selama menjalani pendidikan program Doktor ini. Anak-anaku Nurul Afifah, Muhammad Ridwan Muzaki serta Dewi Fatma atas pengertian dan sebagai sumber semangat dalam menyelesaikan disertasi ini.
11. Keluarga besar Singosari, Mas Fathur Rohman, Adik adiku Uswatun Hasanah, Abdul Ghofur dan Husniatul Khotimah yang sering menjadi tempat berkeluh kesah selama ini.
12. Teman teman seangkatan PDTM Pak Darmadji, P Priyagung dan P Tugur, Terutama Bu Retno Wulandari yang memberikan suport sampai batas akhir masa studi.

13. Teman-teman di prodi S1 Teknik Mesin UM, terutama P Heru atas masukan masukannya serta Pak Sukarni.
14. Teman teman di Jurusan Teknik Mesin UM, terutama P Sunomo atas doa dan dukungannya selama ini
15. Teman teman di laboratorium Teknik Mesin UM atas segala masukan yang diberikan selama proses penilitian serta kerepotan keropatan yang saya akibatkan
16. Semua Pihak tidak dapat penulis sebutkan satu persatu dalam tulisan ini, yang telah banyak membantu penulis dalam penyelesaian disertasi ini.

Semoga ALLAH SWT senantiasa melimpahkan berkah dan rahmad-Nya bagi kita semua, terima kasih untuk bantuannya selama ini dan semoga dapat menjadi amal ibadah di hadapannya. Amiin.

Malang, Januari 2018

Penulis



## Ringkasan

**Aminnudin**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Januari 2018, *Karakteristik Sifat Mekanik Aluminium Hasil Proses Equal Channel Angular Pressing - Semi Solid Forming*, Komisi Pembimbing: Prof. Dr. Ir Pratikto, M.MT, Dr. Eng Anindito Purnowidodo, ST, M.Eng dan Dr. Eng. Yudy Surya Irawan ST, M.Eng

Proses *semi solid forming* (SSF) menghasilkan benda kerja yang hanya memerlukan sedikit proses finising dan dapat dipergunakan untuk memproses benda kerja yang bentuknya rumit. Proses SSF memerlukan logam dengan bentuk butir *globular*. Salah satu cara untuk memperoleh butir logam dengan bentuk *globular* adalah dengan memanaskan logam yang telah mengalami proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP). Proses ECAP selain untuk memperoleh bentuk butir *globular* juga dapat meningkatkan sifat mekanik logam.

Pada penelitian ini logam yang digunakan adalah Aluminium paduan seri 5052 (paduan Al-Mg). Untuk memperoleh ukuran butir yang homogen dilakukan dengan proses modeling 2D dengan software Msc.marc. Pemodelan 2D menggunakan desain operasional sesuai dengan metode Taguchi.. Pemodelan 3D dilakukan dengan menggunakan sofware Ansys.

Analysis dengan metode Taguchi pada pemodelan 2D diperoleh parameter:cetakan sudut channel 105, radius fillet dalam 0 mm, radius fillet dalam 5 mm dan gesekan 0,025 merupakan cetakan ECAP yang menghasilkan alumnum dngan ukuran butir paling homogen. Sedangkan pemodelan 3D menunjukkan proses ECAP dengan geomtri cetakan dan gesekan 0,05 menghasilkan regangan yag paling homogen pada aluminium, hal ini dapat dilihat dari hilangnya *corner gap* pada proses ECAP dengan gesekan 0,05.

Proses ECAP dilakukan dengan mesin press hidrolik dengan tekanan maksimum 10 ton, proses dilakukan pada temperatur kamar. Pelumas yang digunakan adalah pelumas padat ( $\text{MoS}_2$ ). Aluminiun yang digunakan ukuran  $10 \times 10$  mm dan panjang 40 mm. Sebelum proses ECAP aluminium permukaanya di gosok dengan kertas gosok dengan mesh 400.

Kekerasan aluminium hasil proses ECAP diukur pada potongan melintang aluminium, kekerasan paling tinggi terjadi pada bagian tengah disusul pada sisi dalam dan sisi luar cetakan, hal ini sesuai dengan hasil pengukuran regangan isi dengan menggunakan data X-RD. Ukuran butir aluminium setelah proses ECAP  $142 \mu\text{m}$  sedangan sebelum proses ECAP  $156 \mu\text{m}$ . Hal ini menunjukkan proses ECAP memperkecil ukuran butir, karena proses ECAP yang dilakukan hanya satu langkah maka perbedaan ukuran butir tidak terlalu banyak, tetapi kenaikan kekerasan yang terjadi cukup besar.

Proses Semi Solid Forming dilakukan pada aluminium yang dipanaskan pada temperatur pemanasan  $650^\circ\text{C}$  selama 20 menit dan temperatur cetakan  $150^\circ\text{C}$ .

Kekerasan aluminium hasil proses semisolid forming 55,15 HR-H, kekuatan tarik 298,6 MPa. Lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium *annealing*. Ukuran butir aluminium setelah hasil proses semi solid forming adalah 116  $\mu\text{m}$  sedangkan aluminium setelah annealing adalah 220  $\mu\text{m}$ . Kekerasan aluminium hasil SSF lebih rendah dari pada aluminium hasil proses ECAP, hal ini terjadi karena energi yang diperoleh dari proses ECAP dipergunakan untuk proses rekristalisasi sehingga kekerasannya menurun, tetapi dengan adanya proses rekristalisasi ukuran butir aluminium menjadi lebih kecil. Tanpa adanya energi dalam yang diperoleh dari proses ECAP proses pengecilan ukuran butir dan perubahan bentuk butir menjadi globular tidak akan terjadi sehingga aluminium tidak dapat diproses dengan proses *semi solid forming*.

Kata kunci: Aluminium, *Equal Channel Angular Pressing*, Modeling, *Semi Solid Forming*, Taguchi



## SUMMARY

**Aminnudin**, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, January 2018, Mechanical properties of Aluminium After Equal Channel Angular Pressing – Semi Solid Forming Process, the Supervisory Committee: Prof. Dr. Ir Pratikto, M.MT, Dr. Eng Anindito Purnowidodo, ST, M.Eng dan Dr. Eng. Yudy Surya Irawan ST, M.Eng

Semi Solid forming process (SSF) produce near net size work piece and can be used to produce complicated work-piece. Semi solid forming process require metals with globular grain. One of the method of to achieve grains with globular shapes is heating the aluminium after processed Equal Channel Angular Pressing (ECAP). ECAP can be used improve the mechanical properties of metal.

In this study, the metal used is Aluminum alloy series 5052 (Al-Mg alloy). To obtain a homogeneous grain size, 2D modelling is done by using Msc.marc software. The DOE of 2D modelling used Taguchi methode. and 3D modeling is done by using Ansys software.

Analysis of 2D modeling with Taguchi methodes resulted an ECAP dies parameter for producing most homogen grain size are,th dies paramters are: channel angl 105, inner fillet radius 0 mm, outer fillet radius 5 mm and friction 0,025. Forrn 3D modeling shows the ECAP process with mold geometry and friction value 0.05 resulted the most homogeneous strain on aluminum, it can be seen from the corner gap, the ECAP process with 0.05 friction does not resulting corner gap.

ECAP process was done by hydraulic press machine with maximum pressure 10 ton, the process done at room temperature. The lubricant used is solid lubricant ( $\text{MoS}_2$ ). Aluminuin used size 10 x 10 mm and length 40 mm. Before the ECAP process surface aluminum is rubbed with a rubbing paper with 400 mesh.

The 2D modeling of ECAP shows that ECAP dies with geometri in 0 mm, 5 mm outer fillets and 105° channel angles. The highest hardness of aluminum from ECAP process occurs in the middle part followed by the inner and outer side of the mold, this is in accordance with the result of the measurement of the lattice strain using X-RD data. The grain size of aluminium after ECAP process is 142  $\mu\text{m}$  and before ECAP process is 156  $\mu\text{m}$ .

The hardness of aluminum from the ECAP process is measured on the aluminum cross-section, the highest hardness occurring at the center is followed on the inner side and the outer side of the mold, this is consistent with the resultant strain measurements using X-RD data. The size of aluminum grain after ECAP process 142  $\mu\text{m}$  before the ECAP 156  $\mu\text{m}$  process. This shows that the ECAP process reduces the size of the grain since the ECAP process is only one step, the difference in grain size is not too much, but the increase in hardness is quite large.

The semi-solid Forming process was used heated aluminum at a heating temperature of 650 °C for 20 minutes and mold temperature 150 °C. The SSF process was done using pneumatic press machine.

Aluminum hardness result of semisolid forming process 55,15 HR-H, tensile strength 298,6 MPa. Higher than aluminum annealing. The size of aluminum grain after the semi-solid forming process is 116  $\mu\text{m}$  while the aluminum after annealing is 220  $\mu\text{m}$ . The aluminum hardness of SSF results is lower than that of the ECAP process, as the energy obtained from the ECAP process is used for the recrystallization process so that the hardness decreases, but with the recrystallization process, the aluminum grain size becomes smaller. In the absence of internal energy obtained from the ECAP process, the grain size reduction process and grain shape changes to globular will not occur so that aluminum cannot be processed by the semi-solid forming process.

Keywords: Aluminium, Equal Channel Angular Pressing, Modeling, Semi Solid Forming, Taguchi



## Daftar Isi

IDENTITAS TIM PENGUJI .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
Ringkasan.....	vii
SUMMARY .....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Kontribusi Penelitian .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Aluminium.....	5
2.2 Logam Semi Padat ( <i>Semi Solid Metal / SSM</i> ) .....	7
2.2.1 Proses Pembekuan Logam Paduan.....	8
2.2.2 Proses Pembekuan Logam Paduan yang Larut Sempurna.....	8
2.2.3 Pembekuan Logam yang tidak Larut Sempurna .....	11
2.3 Proses Pembentukan Semi Padat ( <i>Semi Solid Forming / SSF</i> ) .....	12
2.3.1 Keuntungan proses semi solid Forming .....	13
2.3.2 Logam untuk Proses Semi Solid Forming .....	14
2.3.3 Sifat Mekanik Bahan akibat Proses <i>Semi Solid Forming</i> .....	17
2.4 Proses <i>Equal Channel Angular Pressing (ECAP)</i> .....	18
2.4.1 Cetakan ECAP.....	19
2.4.2 <i>Route</i> pada ECAP.....	22
2.4.3 Pengaruh Parameter cetakan ECAP terhadap homogenitas.....	23
2.5 Metode Taguchi .....	24
2.5.1 SN Ratio Nominal The Best .....	24
2.5.2 SN Ratio Smaller The Better.....	24
2.5.3 SN Ratio Higher The Better .....	25
2.6 <i>Finite Element</i> .....	25
BAB III KERANGKA KONSEPTUAL PENELITIAN .....	28
BAB IV METODE PENELITIAN .....	32
4.1 Pengujian Awal Aluminium.....	33
4.2 Modelling 2D.....	33
4.3 Modelling 3D.....	34
4.3 Proses ECAP .....	35
4.4 <i>Semi Solid Forming</i> .....	37
4.5 Pengujian aluminium hasil proses ECAP .....	39
4.5.1 Uji keras.....	39
4.5.1.1 Uji Keras Rockwell-B .....	40
4.5.1.2 Uji Keras mikro .....	40
4.5.2 Pengamatan Struktur Mikro .....	41
4.5.3 Pengamatan kerapatan dislokasi dengan XRD .....	42
4.5.4 Pemanasan.....	46
4.5.5 Uji Tarik .....	47
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
5.1 Pemodelan .....	48

5.2 Modelling 3 Dimensi.....	56
5.3 Proses ECAP .....	61
5.3.1 Pengamatan ukuran Butir dengan X-RD .....	61
5.3.2 Regangan Kisi.....	68
5.3.3 Struktur Mikro dengan Mikroskoop Optik .....	70
5.3.3 Pengujian Keras Mikro.....	72
5.4 Proses Semi Solid Forming.....	73
5.4.1 Uji Keras .....	73
5.4.2 Uji Tarik .....	74
5.4.3 Foto Mikro.....	75
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	78
6.1 Kesimpulan.....	78
6.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA.....	80



## Daftar Gambar

Gambar 2.1	Pengaruh ukuran butir terhadap kekerasan (Hatch 1995) .....	6
Gambar 2.2	Efek Temperatur Terhadap Sifat Mekanik Aluminium.....	7
Gambar 2.3	Pengaruh Temperatur Terhadap Proses Pembekuan Logam Murni (Callister <i>et al.</i> , 2007) .....	8
Gambar 2.4	Diagram Fasa dua logam (Cu-Ni) yang larut sempurna dalam kondisi padat dan cair (Callister <i>et al.</i> , 2007).....	9
Gambar 2.5	Penentuan Jarak untuk Mengetahui Fraksi Volume Liquid/ Solid pada Logam Cair (Callister <i>et al.</i> , 2007).....	10
Gambar 2.6	Proses Pertumbuhan Butir (Callister <i>et al.</i> , 2007).....	10
Gambar 2.7	Struktur Dendritik pada Logam (Binder <i>et al.</i> 2001).....	11
Gambar 2.8	Pertumbuhan Butir (Callister <i>et al.</i> , 2007).....	11
Gambar 2.9	Diagram Fasa Campuran Al-Si (Hatch 1995) .....	12
Gambar 2.10	Proses Pembentukan pada Logam Semi Solid (Hirt and Kopp 2009) .....	13
Gambar 2.11	Pengaruh struktur mikro terhadap gaya pada proses Semi Solid Forming (Singh <i>et al.</i> 2012).....	14
Gambar 2.12	Proses Patahnya Lengan dendritik pada Logam (Singh <i>et al.</i> 2012) .....	15
Gambar 2.13	Pengaruh Strain terhadap Ukuran Butir pada Al 2024 dengan proses SIMA (Siron, Dongcheng, and Kim 2006) .....	15
Gambar 2.15	Pengaruh temperatur terhadap ukuran butir dan shape faktor pada aluminium (Jiang <i>et al.</i> 2010) .....	16
Gambar 2.16	Pengaruh <i>Holding Time</i> terhadap Ukuran Butir .....	17
Gambar 2.17	Pengaruh Lama Pemanasan Terhadap Struktur Mikro aluminium hasil ECAP (Wang <i>et al.</i> 2003).....	17
Gambar 2.18	Pengaruh Temperatur cetakan terhadap kekuatan Logam Hasil Proses SSF (Cho and Kang 2000) .....	18
Gambar 2.19	Cetakan ECAP (Gurau, Gurau, and Tanase 2009) .....	19
Gambar 2.22	Pengaruh Jumlah Langkah terhadap Kekerasan aluminium 2024 (El-Danaf 2008).....	21
Gambar 2.23	Pengaruh Jumlah Langkah terhadap Ukuran Butir.....	21
Gambar 2.24	Pengaruh Jenis Partikel Terhadap Ukuran Butir Aluminium Setelah Proses ECAP (Zhang <i>et al.</i> 2005) .....	22
Gambar 2.25	Route pada Proses ECAP (Nakashima <i>et al.</i> 2000) .....	22
Gambar 2.26	Distribusi tegangan geser pada proses ECAP .....	23
Gambar 2.27	Diskritasi pada <i>Finite Element</i> .....	25
Gambar 3.1	Diagram Proses ECAP-SSF .....	28
Gambar 4.1	Diagram Alir Proses Penelitian.....	32
Gambar 4.2	Mesning pada Pemodelan 3D .....	35
Gambar 4.3	Cetakan pada pemodelan 3D.....	35
Gambar 4.4	Cetakan ECAP .....	36
Gambar 4.5	Proses ECAP dengan Mesin Tekan hidrolik .....	36
Gambar 4.6	Pemanas Cetakan Semisolid Forming .....	37
Gambar 4.7	Cetakan untuk Proses <i>Semi Solid Forming</i> .....	38
Gambar 4.8	Kontrol Mesin Press Pneumatik .....	38
Gambar 4.9	Mesin Press Pneumatic .....	39
Gambar 4.10	Posisi Pengujian Keras Makro .....	40
Gambar 4.11	Posisi pengujian Micro-hardness .....	40
Gambar 4.12	Posisi Pengamatan Struktur Mikro .....	41

Gambar 4.13	Posisi Pengamatan Kerapatan dislokasi dengan X-RD .....	42
Gambar 4.14	Pelebaran Puncak Difraksi Sinar-X .....	43
Gambar 4.15	Benda Uji X-RD.....	43
Gambar 4.16	X-RD Panalitical X-Pert MPD .....	44
Gambar 4.17	Pengukuran FWHM .....	45
Gambar 4.18	Aluminium Hasil proses ECAP .....	46
Gambar 4.19	Dapur Listrik Jenis Electric Resistance Furnace.....	47
Gambar 4.20	Spesimen Uji Tarik (Sumber ASTM 3.01:2001).....	47
Gambar 4.21	Benda Uji Tarik .....	47
Gambar 5.1	Parameters pada cetakan ECAP (Luri et al. 2011).....	48
Gambar 5.2	Parameter Pemodelan ECAP.....	50
Gambar 5.3	Distribusi ukuran butir hasil Pemodelan 1 .....	50
Gambar 5.4	Distribusi Ukuran butir hasil Pemodelan.....	51
Gambar 5.5	Distribusi ukuran butir pada pemodelan cetakan 8 .....	52
Gambar 5.6	Distribusi ukuran butir pada aluminium setelah mengalami proses ECAP (cetakan no 4) .....	52
Gambar 5.7	Analysis Taguchi terhadap hasil pemodelan pada homoginitas ukuran butir.....	53
Gambar 5.8	Cetakan ECAP dari hasil pemodelan dan dianalisa dengan Methode Taguchi .....	54
Gambar 5.9	Distribusi ukuran Butir Aluminium hasil Proses ECAP pada potongan melintang .....	54
Gambar 5.10	Efek Gesekan antara benda kerja dan cetak pada proses <i>Equal Channel Angular Pressing</i> (cetakan 8).....	55
Gambar 5.11	Mekanisme aliran logam selama proses ECAP berdasarkan plot distribusi regangan: (a) tahap awal (b) billet mulai memasuki sudut saluran (c) sisi atas billet (d) tahap akhir .....	56
Gambar 5.12	Celah sudut pada proses ECAP dengan berbagai nilai koefisien gesek (a) 0.01 (b) 0.025 (c) 0.05 .....	57
Gambar 5.13	Efek koefisien gesek terhadap celah sudut pada proses ECAP ..	57
Gambar 5.14	Regangan Geser pada Proses ECAP .....	58
Gambar 5.15	Regangan pada bagian tengah benda uji.....	59
Gambar 5.16	Distribusi regangan pada potongan melintang aluminium hasil proses ECAP dengan koefisien gesek (a) 0.01 (b) 0.025 (c) 0.0560	60
Gambar 5.17	Regangan pada proses ECAP dengan koefisien gesek 0,05 .....	60
Gambar 5.18	Homogenitas regangan dengan metode <i>Homoginities Index</i> (Ci) and <i>coefficient of variance</i> .....	61
Gambar 5.19	Pola hasil X-RD pada aluminum full annealing.....	62
Gambar 5.20	Pola X-RD aluminium hasil proses ECAP pada benda uji 1 (Permukaan luar aluminium hasil ECAP) .....	63
Gambar 5.21	Plot perhitungan $Br \cos\theta$ dan $\sin \theta$ .....	65
Gambar 5.22	Ukuran butir aluminium setelah proses ECAP (diamati dengan X-RD) .....	65
Gambar 5.23	Pola X-RD aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 2 (benda uji 1).....	66
Gambar 5.24	Perbandingan ukuran butir aluminium setelah proses ECAPdengan cetakan yang berbeda (diamati dengan X-RD) ....	68
Gambar 5.25	Plot Williamson and Hall untuk Aluminium setelah proses ECAP (posisi 1) .....	69
Gambar 5.26	Distribusi regangan kisi pada penampang Aluminium .....	69
Gambar 5.27	Struktur Mikro Aluminium Hasil Annealing.....	71
Gambar 5.28	Struktur mikro Aluminium setelah mengalami proses ECAP .....	71
Gambar 5.29	Kekerasan Aluminium setelah mengalami proses ECAP .....	72

Gambar 5.30 Aluminium hasil proses SFF.....	73
Gambar 5.31 Kekerasan Aluminium hasil proses SSF.....	74
Gambar 5.32 Kekuatan Tarik Aluminium .....	74
Gambar 5.33 Struktur mikro Aluminium sebelum SFF .....	75
Gambar 5.34 Struktur mikro Aluminium hasil SFF .....	76



## Daftar Tabel

Tabel 3.1 Pengaruh Proses ECAP terhadap struktur mikro pada logam .....	27
Tabel 4.1 Komposisi Aluminium 5052 .....	31
Tabel 4.2 Faktor and Level pemodelan .....	37
Tabel 4.3 L9 Matrix Test .....	37
Tabel 5.1 Factor and Level Descriptions .....	52
Tabel 5.2 L9 Matrix Test .....	53
Tabel 5.3 Homogeneity Index [ada aluminium .....	56
Tabel 5.4 Ci Index Pada Aluminium hasil pemodelan Cetakan optimum.....	59
Tabel 5.5 Diffraction Data of Full Annealing Aluminum .....	63
Tabel 5.6 Data Defraksi X-RD Aluminium hasil ECAP dengan cetakan 1 .....	64
Tabel 5.7 Data Defraksi X-RD Aluminium hasil ECAP dengan cetakan 2 .....	68



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

*Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) merupakan proses deformasi plastis pada logam dengan cetakan yang memiliki *channel* (saluran) dengan sudut tertentu dan luas penampang *channel* sama. Deformasi yang terjadi pada proses ini sangat besar dan dapat dilakukan berulang ulang tanpa menimbulkan kerusakan pada logam. Proses ECAP pertama kali dikembangkan oleh Segal pada tahun 1970 an (Segal 1999).

Pada proses ECAP yang sangat berpengaruh adalah geometri cetakan dan gesekan. Geometri cetakan meliputi sudut antar *channel*, radius fillet dalam, radius fillet luar sedangkan gesekan dipengaruhi oleh jenis pelumas yang digunakan dan sudut *channel*(Yoshinori Iwahashi et al. 1996)(Furukawa et al. 1997).

Sudut antar *channel* pada cetakan ECAP adalah  $60 - 120^\circ$ , makin kecil sudut *channel* makin besar gaya yang diperlukan dan regangan yang terjadi makin besar. Tingginya regangan pada proses ECAP dengan sudut *Channel* yang kecil karena gesekan antara cetakan dan logam. Selain sudut *channel* radius fillet luar juga mempengaruhi besarnya regangan yang terjadi, makin besar sudut fillet luar makin kecil regangan yang terjadi, sedangkan radius fillet dalam akan meningkatkan konsentrasi tegangan dan akan meningkatkan regangan pada bagian sisi dalam billet.

Proses pembentukan logam dalam kondisi *semi-solid* (*Semi Solid Forming/SSF*) merupakan proses pembentukan logam dimana logam tersebut dibentuk dalam kondisi semi solid (semi padat). Logam semi padat adalah logam yang memiliki dua fasa yaitu fasa cair dan fasa padat. Logam dalam kondisi semi padat sangat mudah untuk dibentuk dan dipotong, bahkan dapat dipotong dengan menggunakan pisau roti (Fan 2002).

Proses SSF belum lama ditemukan dan dikembangkan, proses ini dimulai dengan penelitian tentang sifat logam dalam kondisi semi solid dimulai oleh Fleming pada tahun 1971. Pada awalnya penelitian dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat logam pada kondisi *semi solid*, tetapi kemudian berlanjut dengan

penelitian tentang pembentukan logam semi-solid (Hirt and Kopp 2009). Kondisi semi solid pada logam dapat diperoleh dengan cara memanaskan logam sampai temperatur antara garis solidus dan liquidus pada diagram fasa, makin tinggi temperatur makin besar volume logam cair (Callister, et al., 2007).

Beberapa jenis proses pembentukan logam semi solid adalah: *thixo casting*, *thixo-forging*, *thixo-extrusion*, *thixo-lateral extrusion*, *thixo-rolling*, dan *thixo-joining*. *Thixo casting* adalah proses pembentukan dengan penuangan logam pada cetakan pada saat logam dalam kondisi semi padat, *thixo-forging* adalah proses forging (tempa) logam dalam keadaan semi padat. Proses *semi solid forging* mempunyai keunggulan dibandingkan dengan proses *semi-solid* yang lain, dibandingkan dengan proses *thixo-extrusion*, *thixo-lateral extrusion* dan *thixo-rolling* proses *semi solid forming* dapat menghasilkan benda kerja dengan bentuk yang lebih rumit sedang dibandingkan dengan proses thixo-casting proses semi solid forming mempunyai keunggulan pada sifat mekanik yang lebih baik disamping resiko cacat retak panas dan porous lebih kecil (Fan 2002).

Proses SSF memerlukan logam dengan bentuk butir *globular/non-dendritic structure*, logam yang memiliki bentuk butir memanjang atau memiliki banyak lengan dendrite mempunyai sifat mampu bentuk (dalam kondisi semi padat) yang rendah hal ini disebabkan adanya hambatan aliran logam semi padat dari lengan dendritik pada saat dibentuk (Fan 2002).

Bentuk butir *globular* dapat diperoleh dengan beberapa macam cara, antara lain dengan proses *strain induced melt activated* (SIMA) (Chan Choi and Jin Park 1998), penambahan inokulan (pada proses pembekuan), pengadukan mekanik, pengadukan induksi dan proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP). Proses ECAP mempunyai keunggulan dibandingkan dengan metode-metode yang lain karena dapat menghasilkan logam ukuran butir sangat halus, bahkan sampai dengan ukuran 400-800 nano meter (Valiev 1997), bahkan pada proses ECAP pada aluminium dapat mencapai ukuran dibawah 100 nanometer(Nakashima et al. 2000). Proses ECAP dapat dilakukan pada berbagai bahan mulai logam dan paduan logam sampai *metal matrix composite* (MMC) (Hashim, Looney, and Hashmi 2002) (Sabirov et al. 2005) dan (LLyod et al., 1989).

Proses ECAP menghasilkan struktur mikro dengan bentuk butir memanjang (Xu et al. 2010), sehingga perlu dilakukan proses pemanasan untuk dapat menghasilkan aluminium dengan bentuk butir yang *globular* (Jiang et al. 2010), tetapi rata-rata ukuran butir yang dihasilkan masih sangat besar bila

dibandingkan dengan ukuran butir hasil proses ECAP, penelitian Ashouri menghasilkan aluminium dengan ukuran butir 84 mikrometer (Ashouri et al. 2008), sedangkan penelitian pada paduan magnesium tipe AZ91D dapat menghasilkan ukuran butir rata-rata 2 mikrometer (Jiang et al. 2010).

Hasil penelitian yang dilakukan baik oleh Ashouri (2008) maupun Jufu (2010) belum meneliti homogenitas ukuran butir logam setelah proses perlakuan panas (yang sebelumnya telah mengalami proses ECAP), padahal homogenitas sangat berpengaruh pada sifat mekanik logam. Penelitian tentang homogenitas baik yang dilakukan oleh Luri meneliti tentang homogenitas regangan pada proses ECAP (Luri et al., 2011).

Logam yang memiliki ukuran butir yang homogen akan mempunyai sifat mekanik yang homogen pula (Callister, et al., 2007), untuk itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh proses ECAP dan proses pemanasan terhadap aluminium hasil proses ECAP terhadap homogenitas ukuran butir. Selain homogenitas ukuran butir, penelitian tentang proses ECAP juga dilakukan untuk memperoleh aluminium dengan ukuran butir yang lebih halus (dibawah 10  $\mu\text{m}$ ) setelah di panaskan. Hal ini masih mungkin dilakukan dilakukan karena pada proses ECAP telah dapat menghasilkan aluminium dengan ukuran butir dibawah 0,1  $\mu\text{m}$  (El-Danaf 2008) tetapi proses pemanasan pada aluminium hasil ECAP masih menghasilkan butir *globular* dengan ukuran lebih besar dari 80  $\mu\text{m}$  (Ashouri et al. 2008).

Sifat mekanik logam hasil proses *Semi Solid Forming* dipengaruhi oleh temperatur logam semi padat, temperatur cetakan, kecepatan penekanan dan besarnya deformasi (Fan 2002). Ukuran butir logam semi padat mempengaruhi sifat mampu bentuk logam tersebut, untuk itu perlu diteliti lebih lanjut tentang pengaruh proses ECAP terhadap sifat mekanik benda kerja hasil ECAP yang selanjutnya diproses *Semi Solid Forming* karena proses ECAP dapat menghasilkan ukuran butir yang sangat halus. Parameter-parameter proses ECAP yang berpengaruh terhadap ukuran butir adalah sudut *channel*, diameter fillet dalam, diameter fillet luar serta gesekan (antar cetakan dan benda kerja), jenis route, jumlah langkah dan jenis pelumas. Penelitian lebih lanjut tentang pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap homogenitas ukuran butir perlu dilakukan karena homogenitas butir sangat berpengaruh sifat mekanik suatu logam. Selain itu perlu diteliti juga pengaruh proses pemanasan terhadap bentuk dan ukuran

butir pada aluminium setelah proses ECAP sebagai bahan baku proses SSF dan pengaruhnya terhadap karakteristik mekanik aluminium.

### 1.2 Rumusan Masalah

Proses *Semi Solid Forming* meliputi dua hal utama yaitu adalah penyiapan bahan baku dan proses *Semi Solid Forming*, karena itu dalam disertasi ini masalah yang diteliti adalah

1. Berapakah sudut *channel*, diameter fillet dalam, diameter fillet luar serta gesekan (antar cetakan dan benda kerja) pada cetakan *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) yang menghasilkan aluminium dengan ukuran butir kecil dan homogen?
2. Bagaimanakah distribusi kekerasan aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan yang dihasilkan dari proses modeling?
3. Bagaimanakah struktur mikro aluminium hasil proses ECAP?
4. Bagaimanakah kekerasan dan kekuatan tarik aluminium hasil proses SSF?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Untuk memperoleh cetakan ECAP agar diperoleh bentuk dan ukuran yang menghasilkan aluminium dengan ukuran butir kecil dan homogen
2. Untuk mengetahui distribusi kekerasan aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan yang dihasilkan dari proses modeling
3. Untuk mengetahui struktur mikro aluminium hasil proses ECAP.
4. Untuk mengetahui kekerasan dan kekuatan tarik aluminium hasil proses SSF.

### 1.4 Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan memperoleh parameter pada proses ECAP yang menghasilkan ukuran butir yang paling homogen serta proses SSF dengan bahan baku dari aluminium yang diproses dengan ECAP. Dari kedua proses tersebut akan menghasilkan hal sebagai berikut:

1. Bentuk cetakan ECAP yang dapat menghasilkan aluminium dengan struktur mikro yang homogen.
2. Benda kerja yang dihasilkan dari proses SSF mempunyai sifat mekanik (kekuatan) lebih baik sehingga lebih hemat bahan baku yang juga berarti lebih hemat sumber daya alam dan energi

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Aluminium

Aluminium merupakan salah satu jenis logam yang memiliki berat jenis yang rendah yaitu 2,7 gram/cm<sup>3</sup>. Karena berat jenisnya yang ringan aluminium banyak digunakan diberbagai bidang yang memerlukan struktur yang ringan seperti pada industri pesawat terbang dan industri automotif. Salah satu kekurangan aluminium adalah kekuatannya yang relatif rendah, sehingga dilakukan berbagai cara untuk meningkatkan kekuatan aluminium (Hatch 1995).

Hal yang lazim dilakukan untuk meningkatkan kekuatan aluminium adalah dengan *precipitation hardening*, tetapi cara ini hanya dapat dilakukan pada aluminium paduan tertentu yaitu pada aluminium seri 2xxx dan beberapa jenis seri 6XXX sedangkan untuk jenis aluminium paduan lain tidak dapat dilakukan dengan cara ini (Hatch 1995).

Cara lain untuk meningkatkan kekuatan aluminium adalah dengan memperkecil ukuran butir. Menurut hukum Hall-Petch (Hatch 1995), makin kecil ukuran butir makin tinggi kekuatan logam. Hubungan antara ukuran butir dan kekuatan dapat dinyatakan dengan persamaan (Hatch 1995):

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

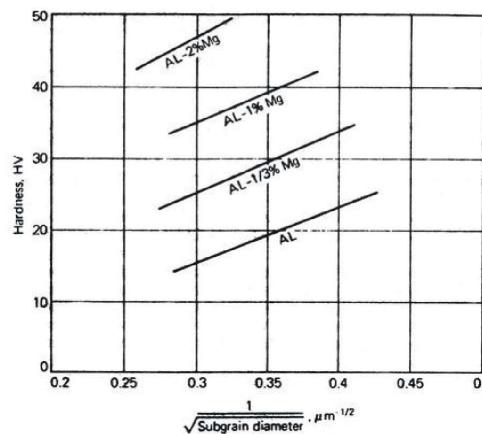
dengan  $\sigma_o$  = kekuatan awal logam

$\sigma_i$  = kekuatan logam

k = konstanta

D = ukuran butir logam

Proses untuk memperkecil ukuran butir pada aluminium dapat dilakukan dengan mengendalikan proses pengintian pada saat proses pembekuan aluminium atau pada saat proses rekristalisasi aluminium padat.



Gambar 2.1 Pengaruh ukuran butir terhadap kekerasan (Hatch 1995).

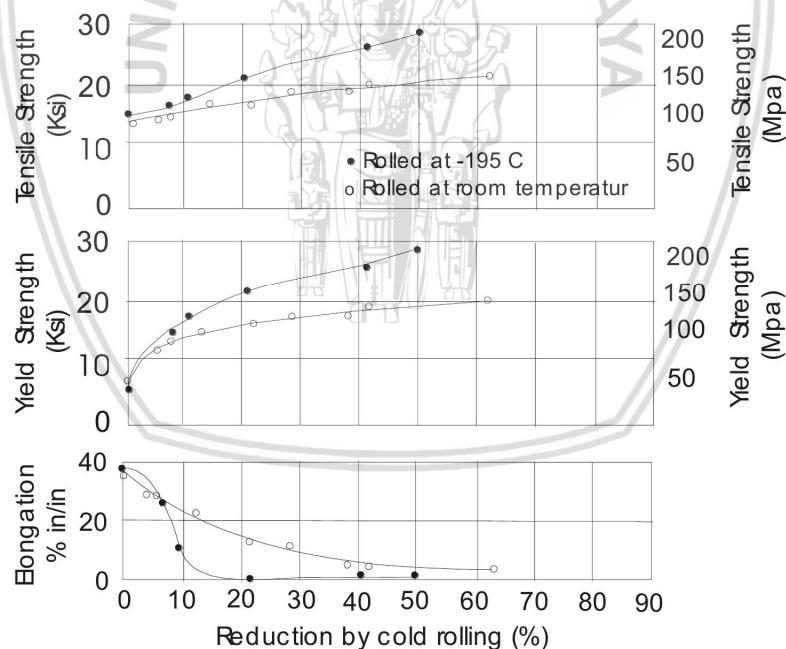
Pada saat aluminium mengalami proses pembekuan dari logam cair menjadi logam padat besar butir yang terbentuk tergantung dari jumlah inti yang terbentuk. Semakin banyak inti yang terbentuk semakin kecil ukuran butir yang dihasilkan, sehingga untuk memperkecil ukuran butir dilakukan dengan memperbanyak inti, inti ini dapat diperbanyak dengan menambahkan inokulan (Hatch 1995); (Kalpakjian, Schmid, and Musa 2009), beberapa jenis inokulan yang digunakan pada aluminium antara lain TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> dan TiB. Ukuran butir pada aluminium yang dapat dihasilkan dengan penambahan inokulan adalah 100 μm (Ming-xing, Jin-hui, and Zhi-yong 2010), hal ini dapat dicapai dengan menambahkan Al-Ti-B master alloy pada aluminium.

Proses mempekecil ukuran butir pada saat aluminium sudah dalam kondisi padat dapat dilakukan dengan proses rekristalisasi, proses ini memerlukan energi yang besar. Energi untuk proses rekristalisasi diperoleh dari proses penggeraan dingin disamping energi dari proses pemanasan. Butir-butir baru akan tumbuh pada tempat-tempat yang mempunyai tingkat energi yang tinggi.

Tempat-tempat tersebut secara berurutan mulai dari yang berenergi tinggi adalah sebagai berikut (Hatch 1995) (Porter and Easterling 1992).

- Permukaan
- Batas butir
- *Stacking fault*
- Dislokasi
- Vacancy

Permukaan butir dan batas butir merupakan sifat dari aluminium yang ingin diperkecil ukuran butirnya, maka yang dapat dilakukan adalah dengan memperbanyak jumlah dislokasi. Aluminium adalah logam yang memiliki struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*) dan memiliki energi salah tumpuk (*Stacking Fault Energi / SFE*) yang sangat tinggi ( $200 \text{ mJ m}^{-2}$ ) sehingga pada saat aluminium menerima deformasi plastis maka dislokasi yang terjadi sangat mudah bergerak, sehingga kenaikan jumlah dislokasi yang terjadi akibat deformasi plastis tidak tinggi. Agar kenaikan kepadatan dislokasi dapat naik diusahakan agar dislokasi yang terbentuk lebih sulit untuk bergerak, yaitu dengan cara pemberian deformasi plastis pada temperatur rendah (Hatch 1995), (Aminnudin, Siswosuwarno, and Basuki 2003). Pada temperatur rendah dislokasi yang terjadi lebih sulit untuk bergerak sehingga banyak dislokasi yang tertahan pada saat aluminium menerima deformasi plastis. Hal ini mengakibatkan kenaikan sifat mekanik (kekerasan dan kekuatan tarik) tetapi kenaikan jumlah dislokasi menyebabkan keuletan aluminium menurun (Gambar 2.2). Penurunan keuletan pada aluminium akibat deformasi plastis ini terjadi karena kenaikan kerapatan dislokasi.

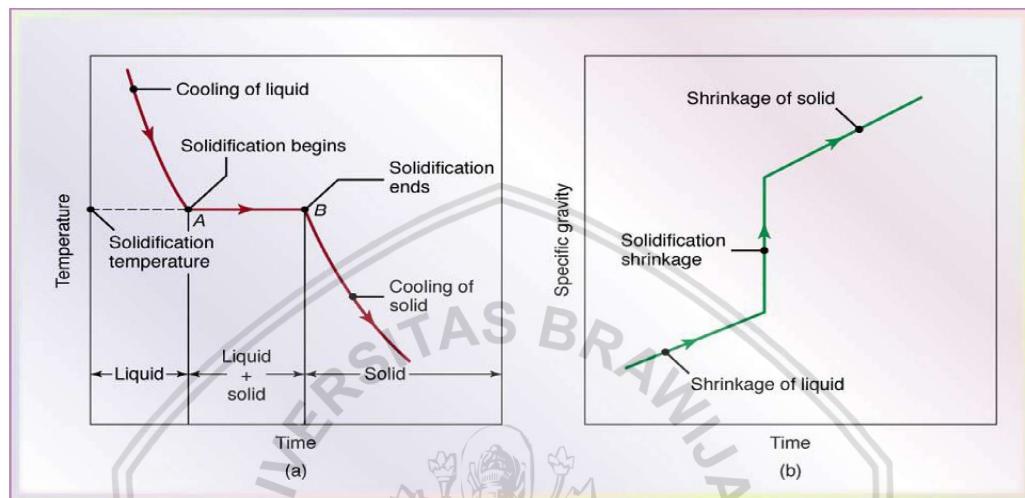


Gambar 2.2 Efek Temperatur Terhadap Sifat Mekanik Aluminium (Hatch 1995).

## 2.2 Logam Semi Padat (*Semi Solid Metal / SSM*)

Pembekuan logam adalah proses perubahan dari logam dari fasa cair menjadi fasa padat. Proses pembekuan logam murni terjadi pada temperatur tertentu (gambar 2.3). Komposisi logam yang membeku merupakan fungsi waktu, logam akan membeku seluruhnya setelah waktu tertentu. Setelah seluruh logam

membeku temperatur logam akan turun lagi sampai mencapai temperatur kamar. Selain terjadi perubahan fasa (dari cair ke padat) terjadi juga perubahan volume, perubahan volume terbesar terjadi pada saat logam membeku. Volume logam cair/padat pada logam murni tergantung dari fungsi waktu, makin lama waktu (dari kondisi logam cair) makin banyak fraksi volume logam padat yang terjadi (gambar 2.3)



Gambar 2.3 Pengaruh Temperatur Terhadap Proses Pembekuan Logam Murni  
(Callister et al., 2007)

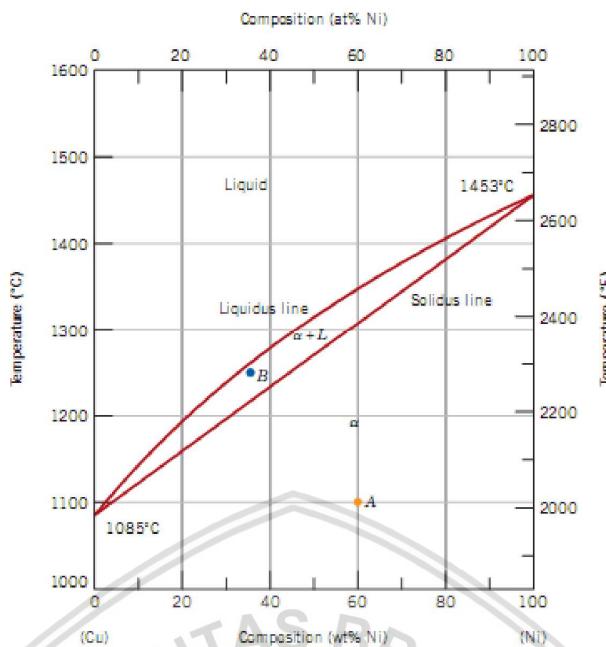
## 2.2.1 Proses Pembekuan Logam Paduan

Proses pembekuan logam paduan lebih rumit dibandingkan dengan logam murni, pada logam paduan proses pembekuan tergantung dari fasa yang terbentuk, ada beberapa jenis paduan yang terjadi pada pencampuran logam, antara lain adalah

1. Logam A dan Logam B larut sempurna
2. Logam A larut sebagian di Logam B membentuk fasa  $\alpha$  sedangkan logam B larut sebagian dalam logam A dan membentuk fasa  $\beta$ .

## 2.2.2 Proses Pembekuan Logam Paduan yang Larut Sempurna

Tembaga (Cu) dan nikel (Ni) merupakan salah satu paduan logam yang membentuk larutan sempurna, pada keadaan cair tembaga dan nikel larut sempurna sedangkan pada saat membeku kedua logam larut sempurna sehingga tidak dapat dibedakan antara tembaga dan nikel pada paduan tersebut (gambar 2.4).



Gambar 2.4 Diagram Fasa dua logam (Cu-Ni) yang larut sempurna dalam kondisi padat dan cair (Callister et al., 2007)

Proses pembekuan pada paduan Tembaga dan Nikel terjadi pada rentang temperatur tertentu tergantung dari kadar Cu dan Ni yang ada. Pada paduan dengan kadar tembaga 60% dan Nikel 40%, proses pembekuan akan mulai pada saat temperatur logam mencapai garis liquidus ( $1380^{\circ}\text{C}$ ) dan akan membeku seluruhnya pada saat mencapai garis solidus. Jumlah (volume) logam yang membeku dapat diketahui dengan persamaan (2).

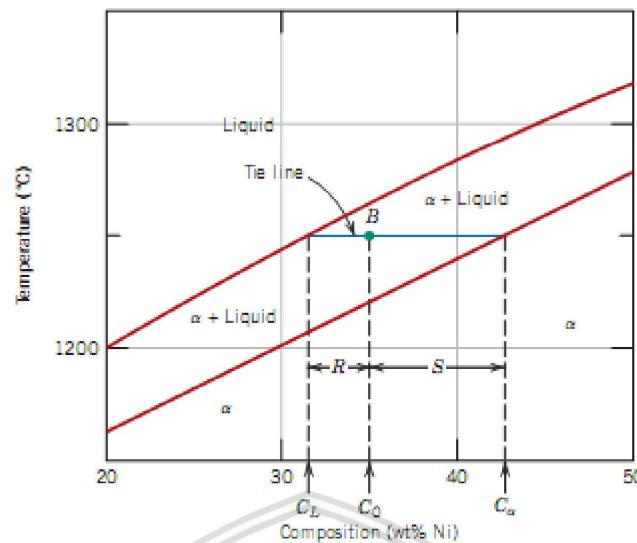
$$W_L = \frac{S}{R + S} \quad (2)$$

dengan  $W_L$  = fraksi volume *liquid*

$S$  = Jarak ke garis *solidus*

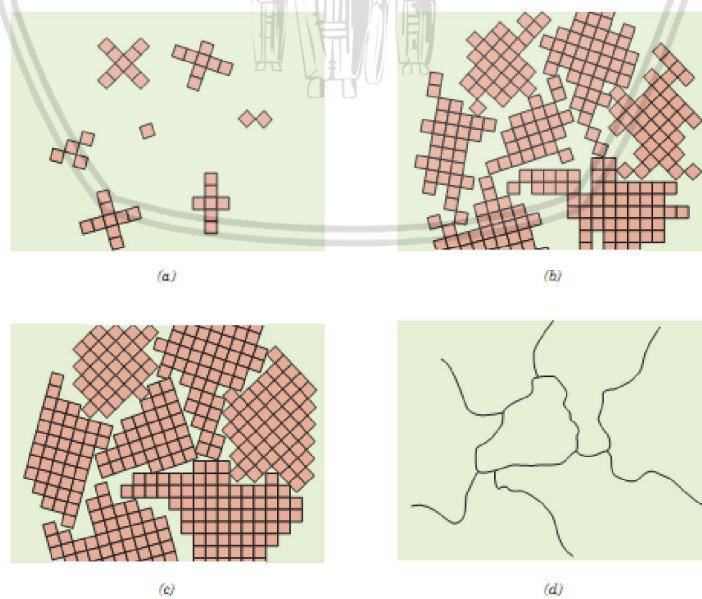
$R$  = jarak ke garis *liquidus*

Garis *liquidus* adalah garis pada diagram fasa yang menyatakan perbatasan antara fasa padat (*solid*) dan fasa cair+padat (*liquid*), sedangkan garis solidus merupakan garis perbatasan antara fasa padat dengan fasa campuran padat dan cair.



Gambar 2.5 Penentuan Jarak untuk Mengetahui Fraksi Volume Liquid/ Solid pada Logam Cair (Callister *et al.*, 2007)

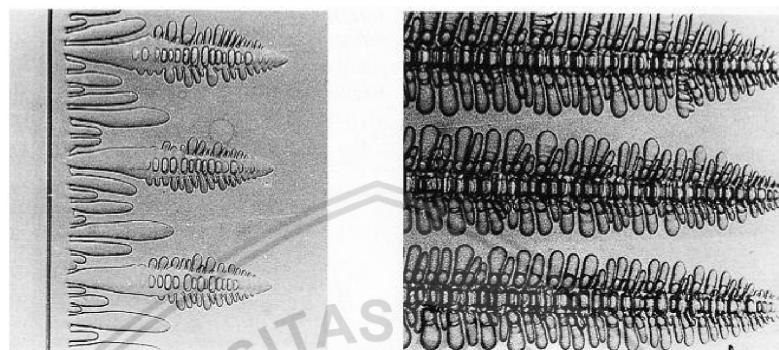
Proses pembekuan logam dimulai dengan proses pengintian, inti inilah yang akan tumbuh menjadi butir pada logam. Ukuran butir ini tergantung dari temperatur, makin rendah temperatur maka butir akan tumbuh, proses pertumbuhan butir ini akan berhenti apabila butir tersebut bersentuhan dengan butir yang lain (gambar 2.6). Ukuran butir yang terbentuk tergantung dari jumlah inti yang terbentuk, makin banyak inti yang terbentuk makin banyak butir yang terbentuk sehingga ukuran butir yang terbentuk makin kecil



Gambar 2.6 Proses Pertumbuhan Butir (Callister *et al.*, 2007)

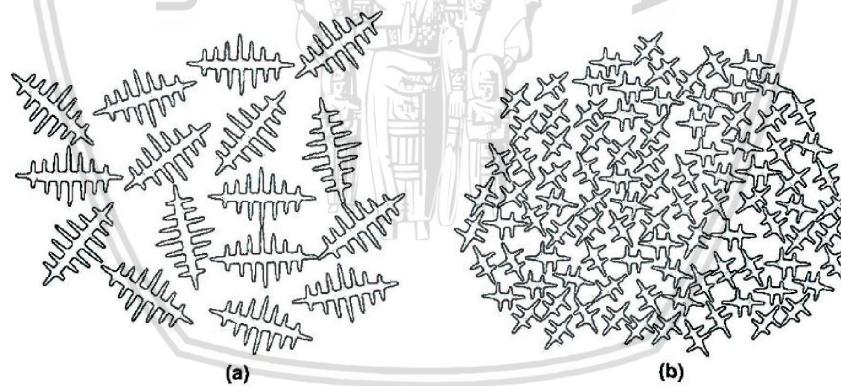
Proses pembekuan yang terjadi menurut gambar 2.7 merupakan proses pembekuan ideal, pada kondisi sesungguhnya butir yang terbentuk banyak

memiliki lengan dendritik. Lengan dendritik pada logam terbentuk karena proses pertumbuhan butir berlawanan arah dengan arah perpindahan panas, makin tinggi laju perpindahan panas makin cepat butir itu tumbuh, tempat yang memiliki laju perpindahan panas yang tinggi adalah pada dinding cetakan dan pada permukaan butir. Hal ini menyebabkan butir yang terbentuk pada kedua tempat tersebut berbentuk dendritik (gambar 2.7)



Gambar 2.7 Struktur Dendritik pada Logam (Binder et al. 2001)

Pertumbuhan butir selain berlawanan arah dengan arah perpindahan panas butir tersebut akan tumbuh dan membentuk lengan pada arah tertentu dan membentuk lengan dendritik (gambar 2.8).

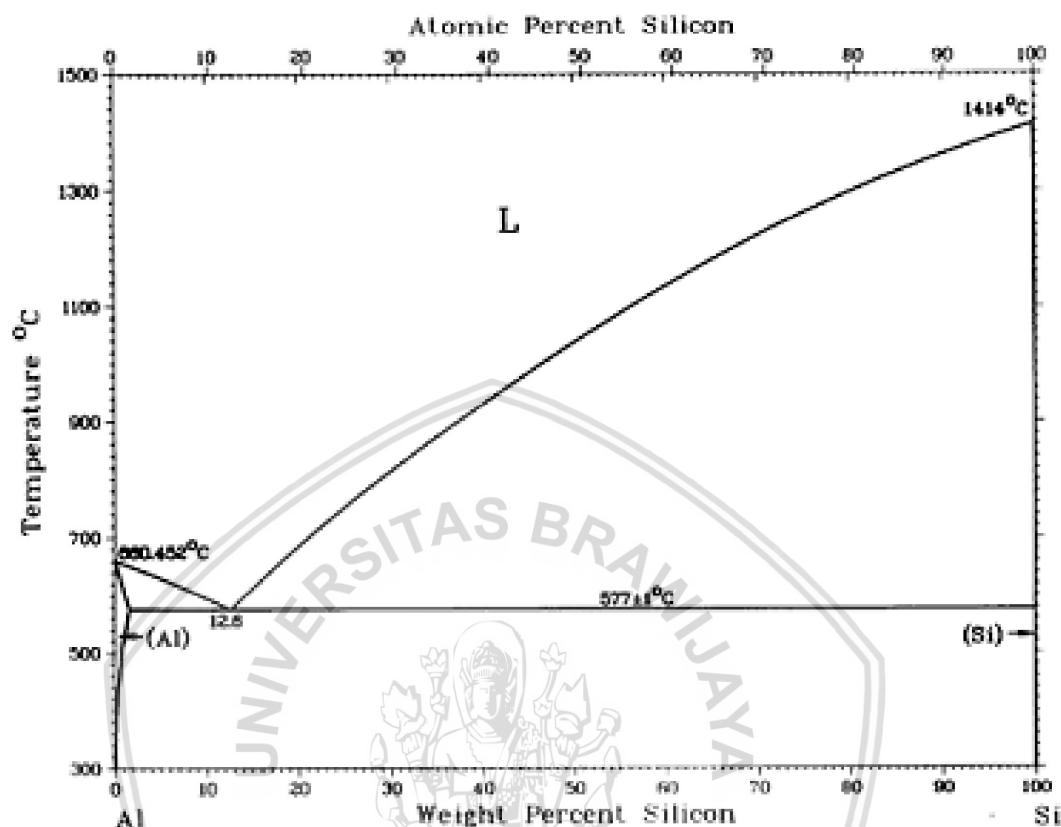


Gambar 2.8 Pertumbuhan Butir (Callister et al., 2007)

### 2.2.3 Pembekuan Logam yang tidak Larut Sempurna

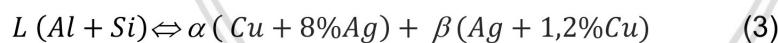
Berbeda dengan paduan logam yang dapat larut sempurna dalam kondisi padat, logam yang tidak larut sempurna dalam kondisi padat logam padat yang terbentuk tergantung dari komposisinya. Dalam sistem Aluminium (Al) dan Silikon (Si), apabila kadar Si kurang dari 12.8 % maka fasa yang terbentuk lebih dahulu adalah fasa  $\alpha$  sebaliknya apabila kadar Si lebih dari 12.8% maka fasa yang terbentuk lebih dahulu adalah fasa  $\beta$ . Jumlah fraksi volume logam padat pada tergantung dari komposisi dan temperatur, proses pembekuan dimulai pada saat temperatur logam mencapai garis liquidus dan akan membeku seluruhnya pada

saat mencapai garis solidus. Jumlah fraksi volume dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3).



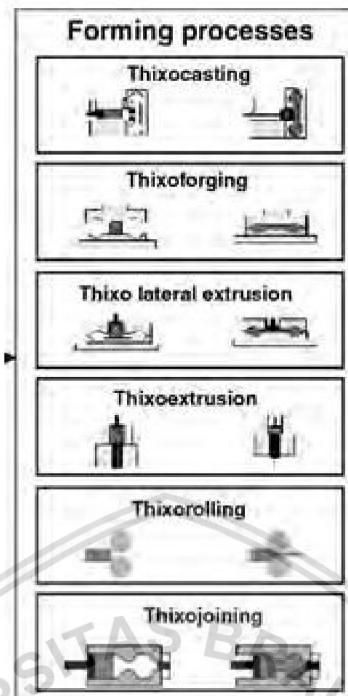
Gambar 2.9 Diagram Fasa Campuran Al-Si (Hatch 1995)

Paduan logam yang tidak larut sempurna dalam kondisi padat akan menghasilkan fasa  $\alpha$  dan  $\beta$ . Pada paduan Aluminium dan Silikon (Gambar 2.9) pada saat proses pembekuan terjadi reaksi sebagai berikut:



### 2.3 Proses Pembentukan Semi Padat (*Semi Solid Forming / SSF*)

Proses *Semi Solid Forming* ditemukan sekitar tahun 1970-an, diawali oleh Fleming dan kawan-kawan yang mempelajari aliran logam pada kondisi semi solid (Fan 2002). Produk awal dari proses ini merupakan komponen yang mempunyai bentuk tidak terlalu rumit seperti silinder rem, velg ban dan komponen chassis. Pada perkembangannya berikutnya yaitu sekitar tahun 1980-an berkembang pada komponen yang lebih besar dan lebih rumit. Setelah tahun 1980-an perkembangan teknologi *semi solid forming* agak melemah karena adanya teknologi proses *reocasting* yang lebih cepat.



Gambar 2.10 Proses Pembentukan pada Logam Semi Solid (Hirt and Kopp 2009)

Perkembangan proses semi solid berikutnya memerlukan pengetahuan lebih detail mengenai pengaruh setiap proses terhadap sifat mekanik bahan (komponen) yang dihasilkan. Dengan sifat mekanik yang lebih baik bila dibandingkan dengan proses *rheocasting*, maka perkembangan proses semi solid dapat berkembang.

### 2.3.1 Keuntungan proses semi solid Forming

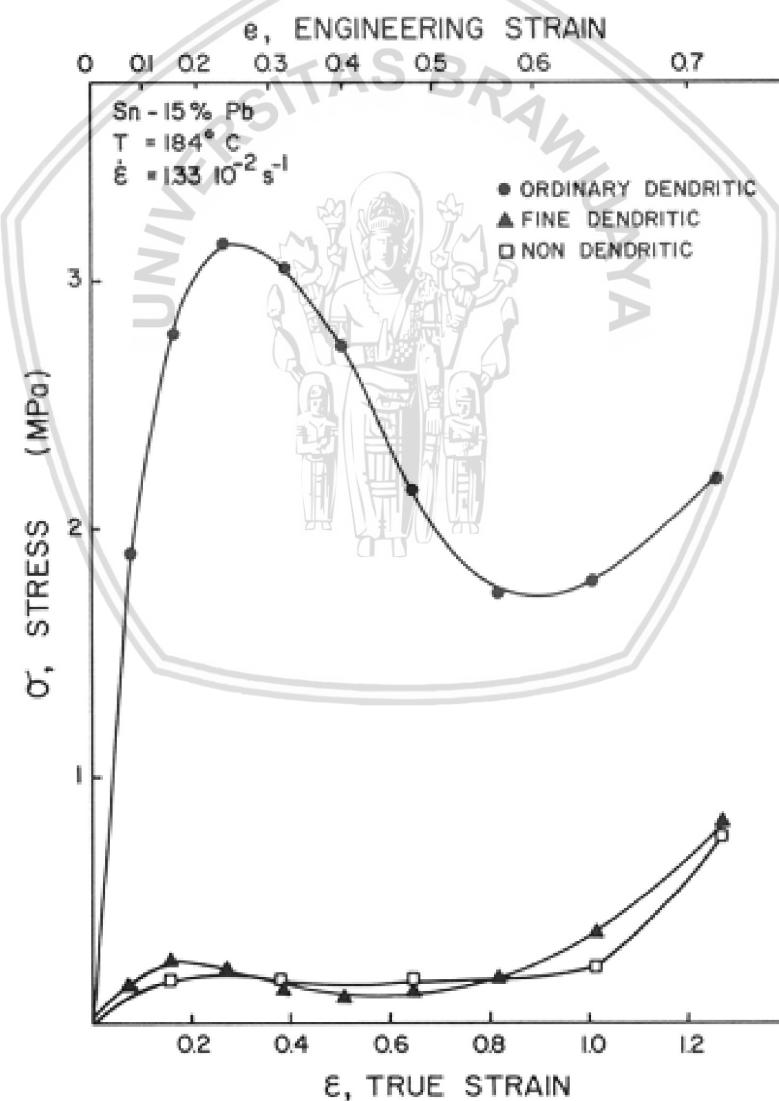
Dibandingkan dengan pengecoran konvensional, tingginya viskositas logam semi-padat memungkinkan turbulensi makroskopik selama pengisian yang harus dihindari untuk mengurangi bagian cacat pada produk yang terjadi karena terjebaknya udara. Keuntungan kedua adalah bahwa karena fraksi padat tinggi (sekitar 40%) sehingga penyusutan volume selama proses solidifikasi dapat dikurangi (menurunkan porositas).

Dibandingkan dengan proses tempa konvensional, gaya yang digunakan lebih kecil sehingga ada peluang untuk menghasilkan komponen dengan bentuk/geometri yang kompleks, yang tidak dapat diproduksi dengan proses tempa. Namun proses tempa pada paduan aluminium berkuatan tinggi, yang biasanya digunakan dalam menempa, tidak cocok untuk proses semi padat, terutama karena memiliki kecenderungan untuk retak panas selama proses solidifikasi.

### 2.3.2 Logam untuk Proses Semi Solid Forming

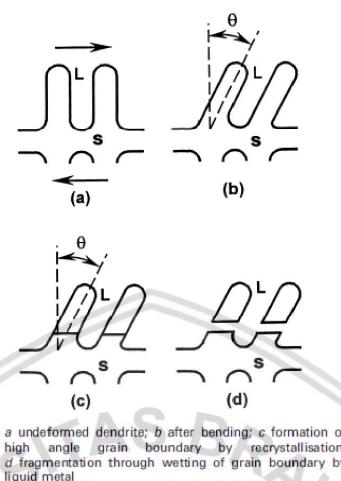
*Semi Solid Forming* (SSF) memerlukan aluminium dengan bentuk butir *globular*, bentuk butir globular dapat diperoleh dengan berbagai cara antara lain: penambahan inokulan, induksi elektromagnetik, dan proses thermomechanical forming.

Bentuk butir logam untuk proses SSF sangat berpengaruh terhadap gaya yang diperlukan, struktur butir dentritik memerlukan gaya lebih tinggi dibandingkan dengan struktur nondendritik (Singh et al. 2012). Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.11, dimana adanya struktur dendritik memerlukan gaya yang jauh lebih besar dibandingkan dengan logam dengan struktur mikro tanpa adanya dendritik dan dendritik halus.



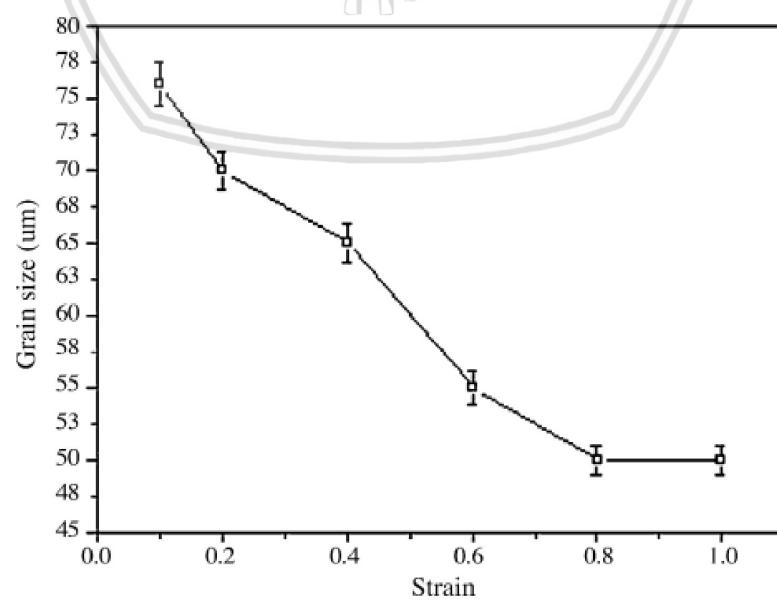
Gambar 2.11 Pengaruh struktur mikro terhadap gaya pada proses Semi Solid Forming (Singh et al. 2012)

Gaya yang lebih besar diperlukan karena "aliran" logam semi padat dihambat oleh lengan dendritik, diperlukan gaya lebih untuk mematahkan lengan-lengan *dendritik* tersebut supaya logam dapat mengalir dan mengisi rongga cetakan (Gambar 2.12).



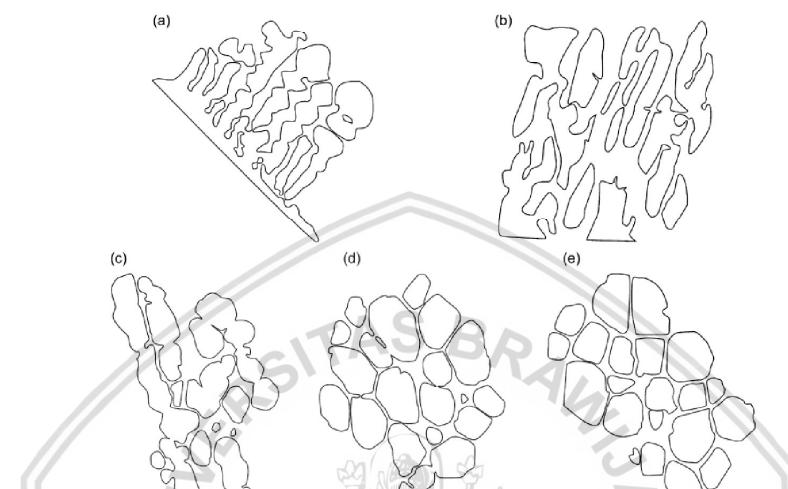
Gambar 2.12 Proses Patahnya Lengan dendritik pada Logam (Singh et al. 2012)

Struktur logam dengan bentuk *equiaxial* dapat diperoleh dengan memanaskan aluminium hasil proses ECAP (Ashouri et al. 2008). Pemanasan aluminium dilakukan sampai pada kondisi semi solid menghasilkan struktur *globular*, selain itu ukuran butir yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan proses yang lain. Pada proses SIMA (*strain induced melt activated*) butir yang dihasilkan masih diatas 50 mikrometer (Chan Choi and Jin Park 1998) (Siron, Dongcheng, and Kim 2006).



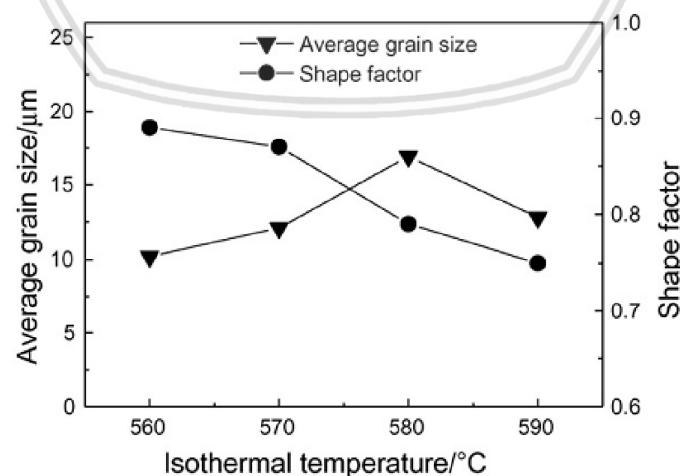
Gambar 2.13 Pengaruh Strain terhadap Ukuran Butir pada Al 2024 dengan proses SIMA (Siron, Dongcheng, and Kim 2006)

Struktur mikro pada aluminium hasil ECAP yang dipanaskan sampai temperatur 580 °C seperti gambar 2.14, dari gambar tersebut nampak ukuran butir kurang homogen selain itu distribusi ukuran butir masih belum teramat lebih terinci. Ukuran butir yang dihasilkan dibawah 80 µm pada aluminium setelah 4 proses ECAP dengan 4 langkah, dengan proses ECAP dengan jumlah langkah lebih banyak akan dihasilkan butir dengan ukuran lebih kecil (Ashouri et al. 2008).



Gambar 2.14 Pengaruh waktu Pemanasan Terhadap Struktur Mikro Aluminium hasil ECAP (Ashouri et al. 2008)

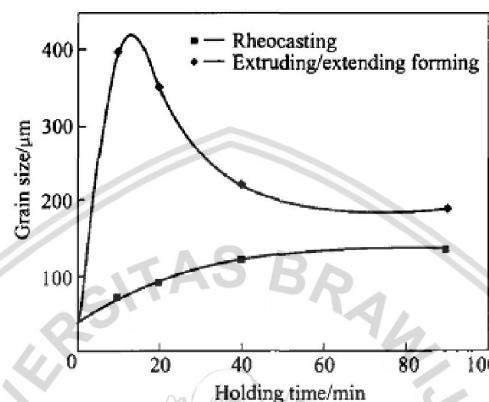
Temperatur pemanasan selain berpengaruh terhadap ukuran butir juga berpengaruh terhadap *shape faktor* (kebulatan) logam, makin tinggi temperatur pemanasan ukuran butir akan semakin kecil tetapi *shape faktor* juga menurun (gambar 2.16), tetapi bila temperatur terlalu rendah *shape faktor* juga turun (Jiang et al. 2010).



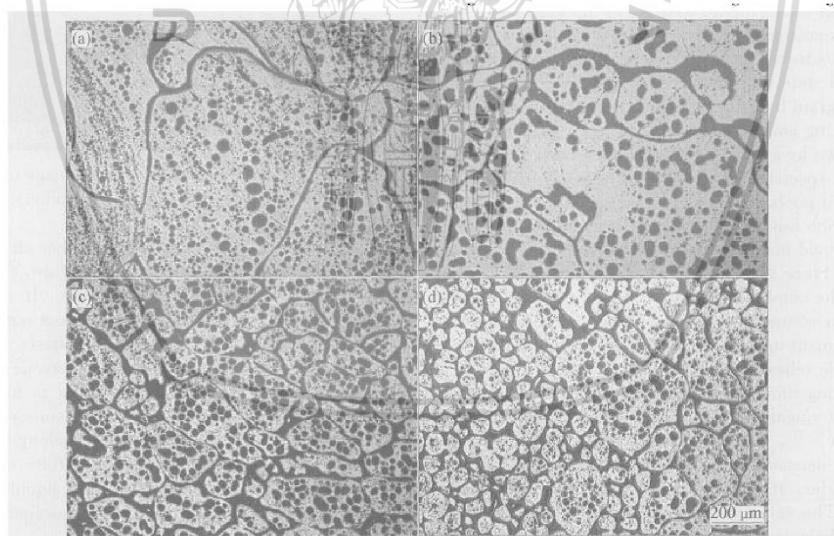
Gambar 2.15 Pengaruh temperatur terhadap ukuran butir dan shape faktor pada aluminium (Jiang et al. 2010)

### 2.3.3 Sifat Mekanik Bahan akibat Proses Semi Solid Forming

Sifat mekanik logam dari proses semi solid Forming tergantung dari kondisi awal benda kerja dan parameter proses semi solid Forming. Temperatur pemanasan pada benda kerja mempengaruhi struktur mikro dan ukuran butir logam (Wang et al. 2003). Struktur mikro dan ukuran butir berhubungan langsung dengan sifat mekanik bahan, makin kecil ukuran butir main keras dan ulet bahan tersebut (hukum Hall-petch) (Furukawa et al. 1997).

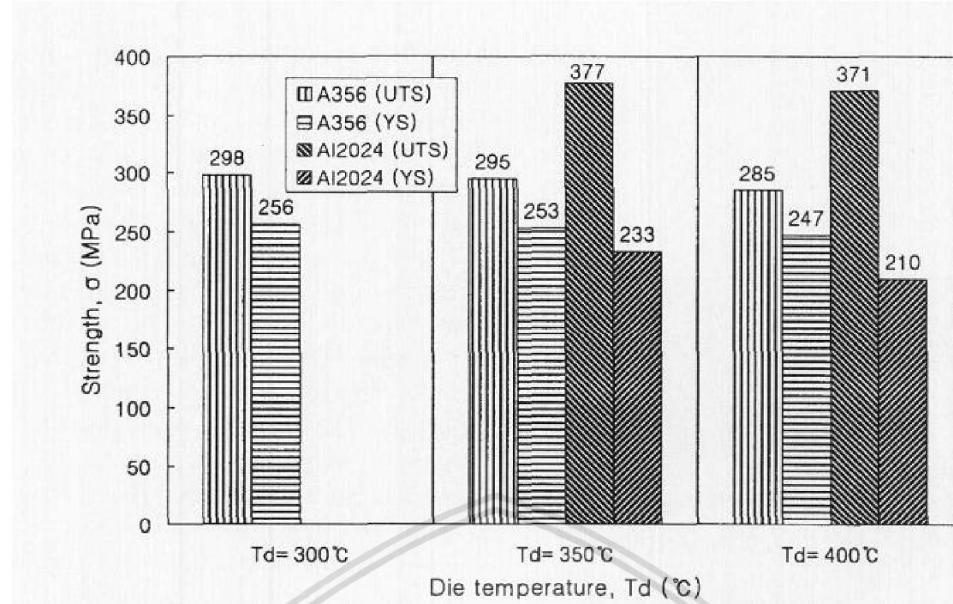


Gambar 2.16 Pengaruh *Holding Time* terhadap Ukuran Butir (Wang et al. 2003)



Gambar 2.17 Pengaruh Lama Pemanasan Terhadap Struktur Mikro aluminium hasil ECAP (Wang et al. 2003)

Temperatur benda kerja menurut Cho (Cho and Kang 2000) akan mempengaruhi sifat mekanik benda kerja, makin tinggi temperatur benda kerja makin turun sifat mekaniknya. Hubungan antara temperatur dan sifat mekanik sangat penting karena apabila temperatur terlalu rendah maka gaya yang dibutuhkan lebih besar dan bentuk benda kerja yang dapat dikerjakan menjadi sangat terbatas (karena deformati plastisnya juga terbatas).

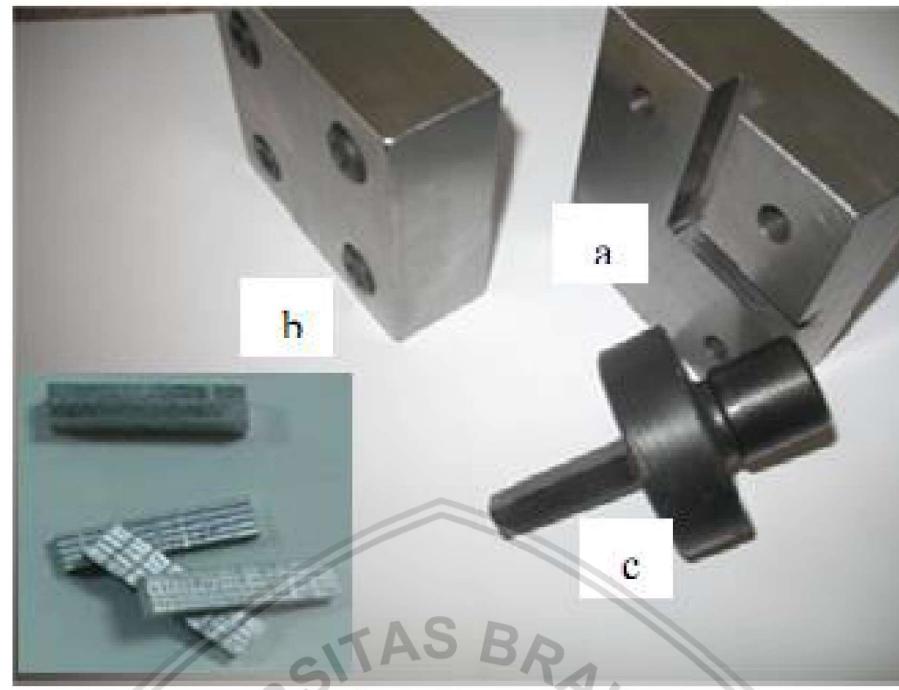


Gambar 2.18 Pengaruh Temperatur cetakan terhadap kekuatan Logam Hasil Proses SSF (Cho and Kang 2000)

Proses *re-heating* pada logam mempengaruhi struktur mikro logam, menurut (Kang, Seo, and Jeon 2005) *re-heating* pada logam akan membuat distribusi partikel pada logam lebih homogen. Proses *semi solid Forming* diharapkan juga akan mengurangi porositas pada benda kerja sehingga komponen yang dihasilkan mempunyai sifat lebih baik dari dengan proses pengecoran.

#### 2.4 Proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP)

*Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) merupakan proses deformasi plastis pada logam/aluminium yang pertama kali dikembangkan oleh Segal pada tahun 1970 an, deformasi plastis yang diberikan adalah dengan tegangan geser. Proses ECAP dapat dilakukan pada berbagai jenis logam (antara lain aluminium, tembaga dan titanium) dan dapat menghasilkan logam dengan ukuran butir sangat halus (400 – 800 nano meter) (Furukawa et al. 1997). Logam dengan ukuran butir sangat halus mempunyai kekerasan dan keuletan yang sangat tinggi pada temperatur kamar. Pada perkembangan selanjutnya banyak diteliti penggunaan proses ECAP pada jenis-jenis logam lain (paduan aluminium, paduan tembaga, paduan titanium, magnesium dan paduannya sampai dengan baja), bahkan proses ECAP pada komposit (dengan matrix logam/*Metal Matrix Composite*) (Lloyd et al. 1989)(Hashim, Looney, and Hashmi 2002) dan (Sabirov et al. 2005).



a. body die, b. Die cover, c. plunger  
Gambar 2.19 Cetakan ECAP (Gurau, Gurau, and Tanase 2009)

Ukuran butir dan sifat mekanik logam/aluminium hasil ECAP dipengaruhi jumlah regangan yang terjadi pada aluminium dan route yang dilakukan selama proses terjadi. Regangan pada proses ECAP dipengaruhi oleh parameter cetakan dan jumlah langkah yang dilakukan sedangkan route merupakan posisi aluminium pada saat proses ECAP.

Besarnya gaya yang diperlukan pada ECAP dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$P = 2k \cdot \text{Cot} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad \text{dengan } P = \frac{F}{A}$$

Sehingga

$$F = A \cdot 2k \cdot \text{Cot} \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

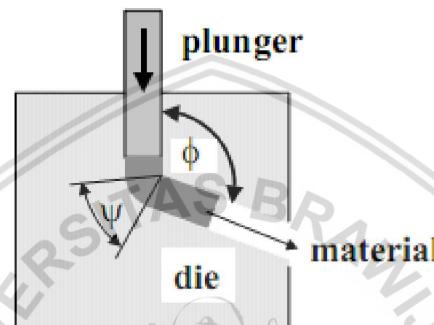
#### 2.4.1 Cetakan ECAP

Parameter utama pada cetakan ECAP adalah sudut *channel* ( $\Phi$ ) dan sudut  $\Psi$ . Sudut *channel* antara  $90^\circ$  dan  $135^\circ$  sedangkan sudut  $\Psi$  mulai  $0$  sampai  $30^\circ$ . Kedua parameter cetakan tersebut mempengaruhi regangan yang pada aluminium, besarnya regangan pada aluminium dapat diketahui dengan persamaan berikut (Yoshinori Iwahashi et al. 1996).

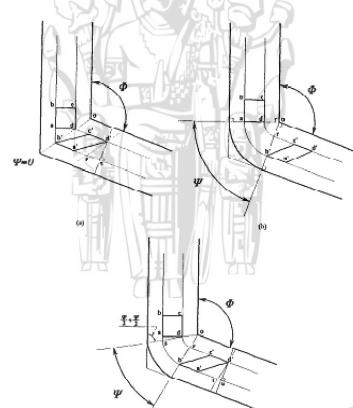
$$\varepsilon_n = N \left[ \frac{2 \cot g\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \cos ec\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right] \quad (5)$$

dengan

- N : jumlah langkah
- $\Phi$  : sudut *channel* cetakan
- $\Psi$  : sudut filet cetakan

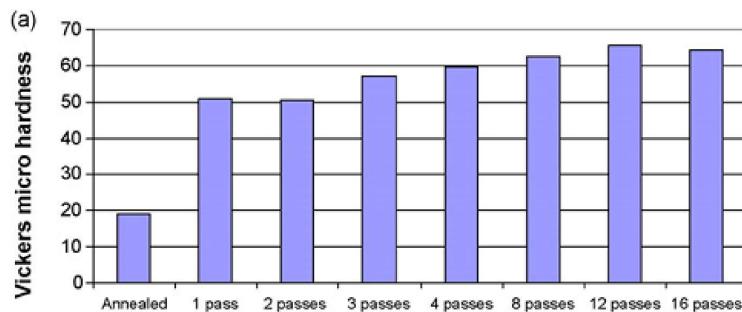


Gambar 2.20 Parameter Cetakan ECAP (Rusz and Malanik 2007)



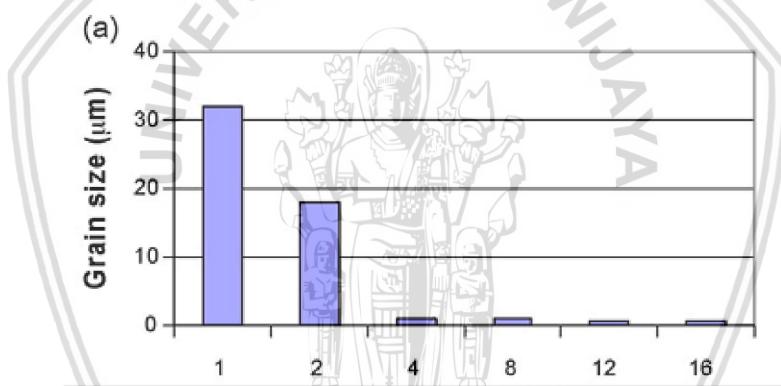
Gambar 2.21 Jenis-Jenis Cetakan ECAP (Yoshinori Iwahashi et al. 1996)

Sifat mekanik dan struktur mikro aluminium hasil ECAP tergantung dari jumlah langkah yang dilakukan. Makin banyak langkah makin tinggi kekerasan dan keuletan aluminium, selain sifat mekanik ukuran butir juga semakin kecil (El-Danaf 2008). Sifat mekanik aluminium setelah mengalami proses ECAP dapat dilihat di gambar 2.22. Makin banyak jumlah langkah makin tinggi kekerasan aluminium tersebut, hal ini karena jumlah langkah juga merupakan penjumlahan dari regangan yang diterima oleh aluminium tersebut pada setiap langkahnya.



Gambar 2.22 Pengaruh Jumlah Langkah terhadap Kekerasan aluminium 2024 (El-Danaf 2008)

Selain kekerasan jumlah langkah pada proses ECAP akan menurunkan ukuran butir, makin banyak langkah yang dialami makin kecil ukuran butir aluminium tersebut (Gambar 2.23). Pada proses ECAP regangan geser yang terjadi akan menyebabkan terjadi proses pemecahan butir, sehingga makin banyak makin kecil ukuran butir yang dihasilkan (El-Danaf 2008).



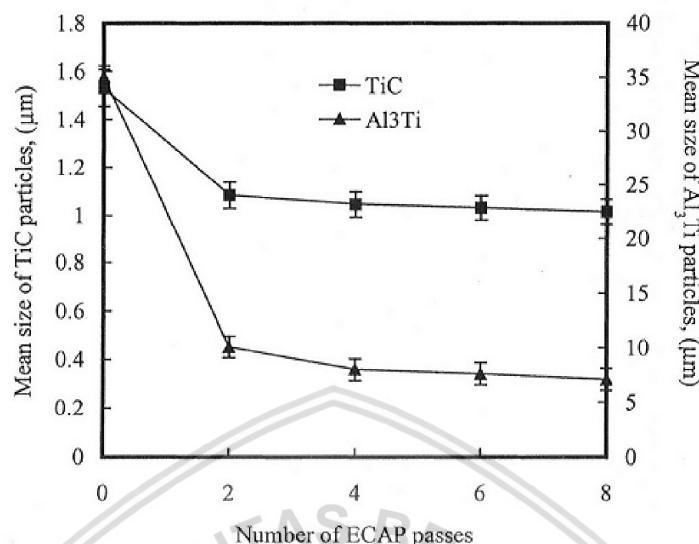
Gambar 2.23 Pengaruh Jumlah Langkah terhadap Ukuran Butir (El-Danaf 2008).

Tabel 1.Pengaruh Partikel pada Proses ECAP Terhadap Struktur Mikro pada Logam (Xu et al. 2010)

Material	Initial dimensions		Number of passes, $N$	Grain size		References
	Diameter (mm)	Length (m)		Initial ( $\mu\text{m}$ )	Final (on cross-section) (nm)	
CP Al	3.4	>1	1–4	5–7	~650	Raab et al. [15]
CP Ti	8	>1	6	25–30	~200–300	Raab et al. [16]
Al-6061	3.8	0.20–0.25	1–4	~350	~150	This investigation

Selain pengaruh cetakan, jumlah langkah dan jenis route, jenis logam juga berpengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro logam. Pada aluminium yang memiliki partikel halus ( $\text{TiC}$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$ ) memiliki ukuran butir lebih kecil dibandingkan dengan aluminium tanpa partikel halus (Zhang et al. 2005). Ukuran partikel ini juga bepengaruh terhadap sifat mekanik aluminium hasil ECAP, partikel-partikel tersebut akan menghambat pergerakan dislokasi sehingga selain

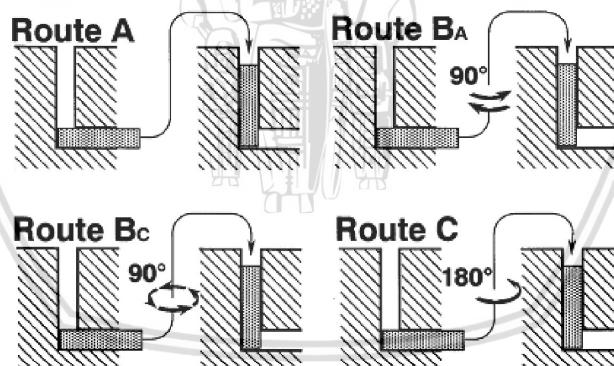
dapat meningkatkan kekerasan tetapi juga dapat memperkecil ukuran butir pada aluminium tersebut.



Gambar 2.24 Pengaruh Jenis Partikel Terhadap Ukuran Butir Aluminium Setelah Proses ECAP (Zhang et al. 2005)

#### 2.4.2 Route pada ECAP

Route pada ECAP merupakan posisi benda uji (aluminium) pada setiap langkah proses ECAP. Route pada proses ECAP adalah seperti gambar berikut:



Gambar 2.25 Route pada Proses ECAP (Nakashima et al. 2000)

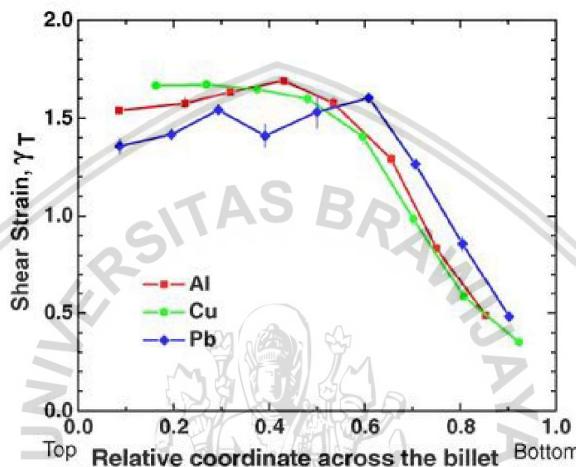
Route pada proses ECAP adalah route A ,C ,B<sub>A</sub> dan B<sub>C</sub>. Pada route A posisi aluminium tetap pada setiap langkah ECAP, sedangkan pada route C posisi aluminium diputar 180° pada setiap langkah proses ECAP. Route B<sub>A</sub> dan B<sub>C</sub> merupakan kombinasi dari route C dan A, pada route B<sub>A</sub> aluminium diputar 90°, putaran aluminium arahnya untuk tiap langkah adalah bolak-balik. Sedangkan route B<sub>C</sub> aluminium diputar 90° dan arah putarannya selalu tetap.

Menurut Iwahashi (Yoshinori Iwahashi et al. 1998) route B menghasilkan regangan paling homogen, tetapi menurut Suo (Suo et al. 2007) dan Solliman

(Soliman, El-danaf, and Almajid 2012) route Bc menghasilkan regangan lebih homogen dibandingkan dengan route B.

#### 2.4.3 Pengaruh Parameter cetakan ECAP terhadap homogenitas

Regangan pada proses ECAP tidak sama, renganngan pada potongan melintang benda uji dapat dilihat pada gambar 2.18. *Inhomogeneity* ini terjadi karena sudut *channel* pada cetakan (Stoica et al. 2005), gesekan antara benda kerja dan cetakan (Balasundar and Raghu 2010), celah sudut (Karpuz, Simsir, and Gur 2009) dan radius fillet (Luri et al. 2011).



Gambar 2.26 Distribusi tegangan geser pada proses ECAP (Stoica et al. 2005)

Regangan geser terkecil terjadi pada bagian luar billet, sedangkan bagian yang mengalami regangan geser paling besar terjadi pada bagian tengen billet. Hal ini terjadi pada logam aluminium, tembaga maupun timbal (gambar 2.18). Pemilihan ketiga parameter tersebut sangat penting untuk memperoleh regangan geser yang paling homogen.

Pengukuran homogenitas dilakukan dengan metode yang dikembangkan oleh Suo (Suo et al. 2007), persamaan untuk mengukur homogenitas adalah sebagai berikut

$$C_i = \frac{\text{Max}\varepsilon_p - \text{Min}\varepsilon_p}{\text{Average}\varepsilon_p} \quad (6)$$

dengan:

$C_i$  = indek kehomogenan

$\text{Max}\varepsilon_p$  = regangan maksimum

$\text{Min}\varepsilon_p$  = regangan minimum

$\text{Average}\varepsilon_p$  = regangan rata-rata

## 2.5 Metode Taguchi

Metode Taguchi adalah metode yang dikembangkan oleh Dr. Genichi Taguchi pada tahun 1949 saat mendapatkan tugas untuk memperbaiki sistem telekomunikasi di Jepang. Metode ini merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan bahan seminimal mungkin. Pada perkembangannya metode ini banyak digunakan pada proses penelitian, mulai tahun 1993 sudah ada jurnal ilmiah yang menggunakan metode Taguchi dalam proses penelitiannya (Ryan 2011).

Taguchi menggunakan fungsi penyimpangan kualitas untuk mengukur kerugian karena variasi fungsional, meminimalisasi penyimpangan kinerja suatu produk dari nilai targetnya akan meningkatkan kualitas produk. Dengan demikian semakin kecil variasi fungsional, maka semakin kecil pula kerugian yang ditanggung sehingga tinggi kualitas produk.

Taguchi memperkenalkan pendekatan *SN Ratio* guna meneliti pengaruh faktor *noise* terhadap variasi yang timbul. Tujuan utama perancangan parameter adalah menghasilkan kombinasi faktor-faktor kontrol yang tahan terhadap faktor *noise*, dalam artian tidak menimbulkan variabilitas yang besar. Ditinjau dari karakteristik kualitas yang diinginkan, *SN Ratio* dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu karakteristik *nominal the best*, *smaller the better*, dan *higher the better*.

### 2.5.1 SN Ratio Nominal The Best

Nilai yang dituju adalah nilai nominal tertentu yang didekati dari dua arah. Semakin mendekati nilai nominal kualitasnya semakin baik. Persamaan untuk fungsi ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\eta &= 10 \log_{10} \left[ \frac{\mu^2}{\sigma^2} \right] \\ \mu &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sigma^2 &= \frac{1}{n} \sum (y_i - \mu)^2\end{aligned}$$

### 2.5.2 SN Ratio Smaller The Better

Nilai yang dituju adalah suatu nilai yang mengecil. Semakin kecil nilainya, maka semakin baik kualitasnya. Persamaan untuk fungsi ini adalah sebagai berikut.

$$\eta = -10 \log_{10} [\sigma^2 + \bar{y}^2]$$

### 2.5.3 SN Ratio Higher The Better

Nilai yang dituju adalah suatu nilai yang membesar. Semakin besar nilainya, maka semakin baik kualitasnya. Persamaan untuk fungsi ini adalah sebagai berikut.

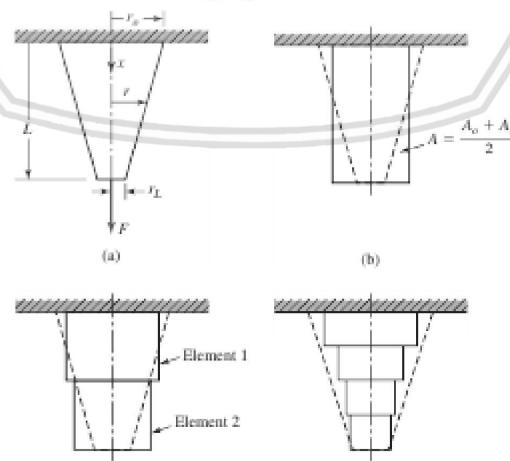
$$\eta = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

### 2.6 Finite Element

*Finite element* atau Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk memecahkan masalah teknik dan fisika matematika. Masalah tersebut adalah analisa struktur, perpindahan panas, aliran fluida, perpindahan massa dan elektromagnetik. Metode dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan komplek yang susah untuk dipecahkan dengan persamaan matematik biasa.

Dalam penyelesaian dengan metode elemen hingga, langkah-langkah yang dilakukan adalah

1. struktur/objek dibagi menjadi elemen-elemen kecil (finite elemen atau elemen hingga) yang terhubung oleh titik-titik (yang dikenal sebagai nodes) yang didigunakan oleh elemen-elemen tersebut dan sebagai batas dari struktur/objek. Pembagian struktur/objek menjadi elemen kecil dikenal sebagai diskritisasi, makin kecil elemen makin banyak nodal yang terbentuk dan semakin tepat hasil perhitungan yang diperoleh(Hutton 2004).

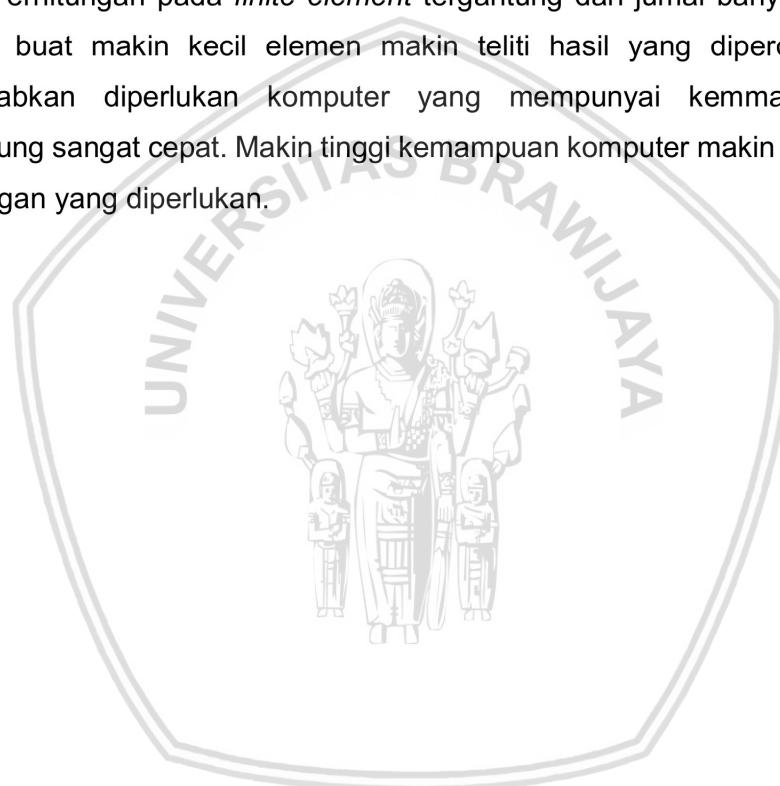


Gambar 2.27 Diskritisasi pada *Finite Element*

2. Menentukan karakteristik dari masing-masing elemen (membuat persamaan sesuai dengan jenis objek/struktur tersebut)

3. Menghubungkan tiap elemen-elemen tersebut sehingga dapat diperoleh persamaan global dari struktur/objek.
4. Menyelesaikan persamaan global tersebut dengan metode matriks. Penyelesaian MEH memerlukan perhitungan memerlukan perhitungan yang sangat banyak dan berulang-ulang dari persamaan yang sama. Dalam penyelesaian perhitungan matrix dilakukan dengan cara: Cholesky, Eliminasi Gauss, Iterasi Gauss-Seidel.
5. Menyelesaikan persamaan untuk mengetahui faktor-faktor yang ingin diketahui seperti regangan atau tegangan pada struktur.

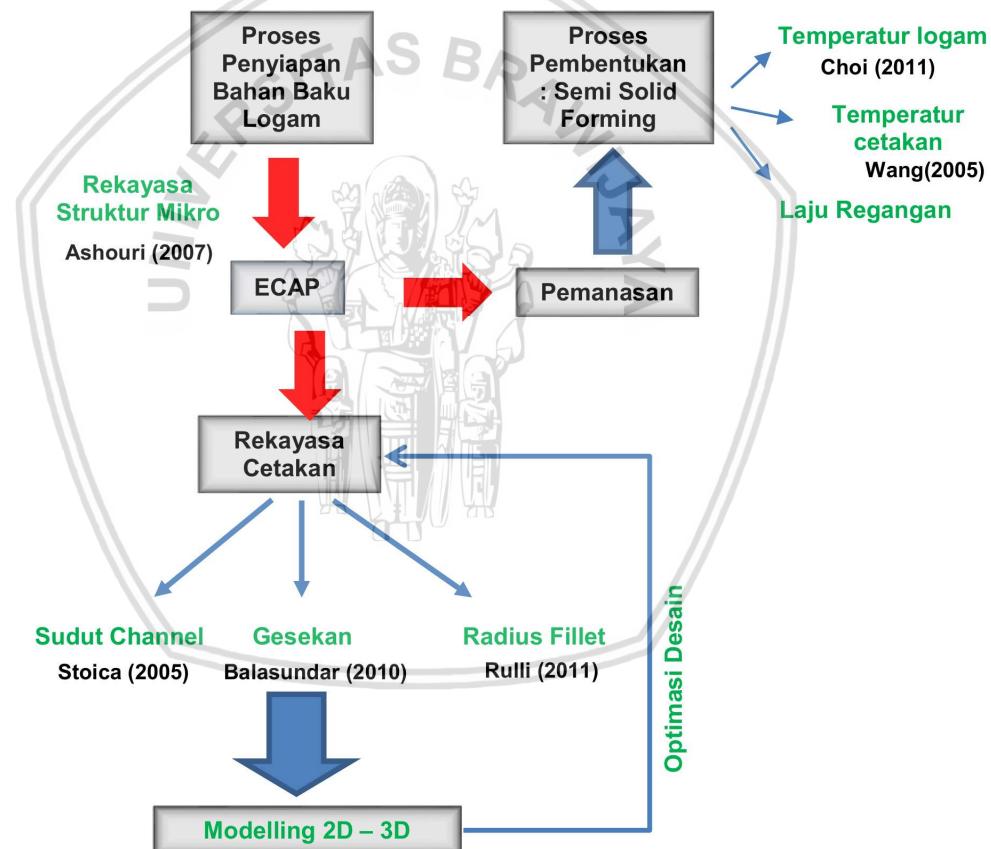
Perhitungan pada *finite element* tergantung dari jumlah banyaknya elemen yang dibuat makin kecil elemen makin teliti hasil yang diperoleh. Hal ini menyebabkan diperlukan komputer yang mempunyai kemampuan untuk menghitung sangat cepat. Makin tinggi kemampuan komputer makin cepat proses perhitungan yang diperlukan.



## BAB III

### KERANGKA KONSEPTUAL PENELITIAN

Proses *semi solid forming* (SSF) merupakan proses pembentukan dengan bahan baku logam dengan kondisi semi solid (semi padat). Proses SSF meliputi dua proses, pertama adalah proses penyiapan bahan baku dan kedua adalah proses pembentukannya. Bahan baku untuk proses SSF memerlukan logam (aluminium) dengan struktur mikro berbentuk *globular*, sedangkan parameter yang mempengaruhi proses SSF meliputi fraksi volume logam cair dan padat (yang dipengaruhi oleh temperatur) dan laju pendinginan (tergantung dari temperatur cetakan).



Gambar 3.1 Diagram Proses ECAP-SSF

Rekayasa bahan baku untuk proses SSF adalah rekayasa untuk memperoleh logam dengan bentuk butir *globular*. Bentuk butir *globular* pada aluminium *globular* dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) (Ashouri et al. 2008).

Pemanasan pada aluminium hasil ECAP pada temperatur 520 °C selama 60 menit menghasilkan alauminium dengan butir yang *globular*.

Selain bentuk butir yang *globular*, homogenitas butir juga berpengaruh terhadap sifat mekanik dan sifat mampu bentuk logam. Penelitian tentang homoginitas butir pada aluminium hasil ECAP belum dilakukan sampai sekarang homogenitas yang diteliti adalah homoginitas regangan. Regangan dan ukuran butir sangat berpengaruh terhadap proses rekristalisasi, regangan memberikan energi dalam yang besar sedangkan batas butir merupakan tempat untuk terbentuknya butir baru, ukuran butir yang homogen akan menyebabkan pertumbuhan butir akan lebih homogen sehingga butir pada aluminium tersebut akan lebih homogen.

Homoginitas ukuran butir pada proses ECAP dipengaruhi oleh sudut *channel* ( $\Phi$ ), radius fillet dalam ( $\Psi_1$ ) dan radius fillet luar ( $\Psi_2$ ) serta gesekan. Regangan yang terjadi pada proses ECAP adalah regangan geser makin besar regang yang terjadi makin kecil ukuran butir. Regangan tersebut dipengaruhi oleh sudut *channel*, radius fillet dalam, radius fillet luar dan gesekan.

Sudut *channel* pada cetakan ECAP mempengaruhi gesekan yang terjadi pada sisi luar dan konsentrasi tegangan pada sisi dalam. Gesekan pada sisi luar akan menurunkan sudut  $\Psi$  sehingga meningkatkan regangan yang terjadi, kenaikan regangan ini mengurangi perbedaan regangan antara bagian luar dan bagian tengah billet pada saat proses ECAP. Radius fillet dalam dan sudut *channel* mempengaruhi konsentrasi tegangan pada bagian dalam billet, makin kecil radius fillet dalam makin besar konsentrasi tegangan yang terjadi sedangkan sudut *channel* akan memperbesar konsntrasi tegangan konsentrasi tegangan yang terlalu besar akan menyebabkan tegangan yang terjadi lerlalu besar sehingga pada bagian ini akan memiliki regangan yang jauh lebih besar dari pada bagian lain billet.

Regangannya terjadi pada proses ECAP adalah regangan geser, sehingga bentuk butir yang dihasilkan dari proses ini menghasilkan aluminium dengan memanjang, meskipun untuk proses ECAP satu langkah perubahan ini belum banyak.

Bentuk butir aluminium yang *globular* diperoleh dengan cara memanaskan aluminium hasil proses ECAP. Regangan yang terjadi pada aluminium pada saat proses ECAP akan memberi energi yang cukup untuk proses pembentun butir baru sehingga benda kerja yang diproses dengan proses SSF akan memiliki

ukuran butir yang lebih kecil hal ini menyebabkan kenaikan kekerasan dan kekuatan tarik dari aluminium tersebut.

### Hipotesa

1. Homogenitas ukuran butir pada proses ECAP dipengaruhi oleh sudut *channel* ( $\Phi$ ), radius fillet dalam ( $\Psi_1$ ) dan radius fillet luar ( $\Psi_2$ ) serta gesekan, ukuran yang tepat pada ketiga faktor tersebut akan menghasilkan ukuran butir yang homogen.
2. Proses ECAP akan menghasilkan kekerasan yang berbeda pada potongan melintang aluminium
3. Aluminium hasil proses ECAP memiliki bentuk butir memanjang
4. Aluminium hasil proses SSF memiliki kekerasan dan kekuatan tarik lebih tinggi dari pada aluminium annealing

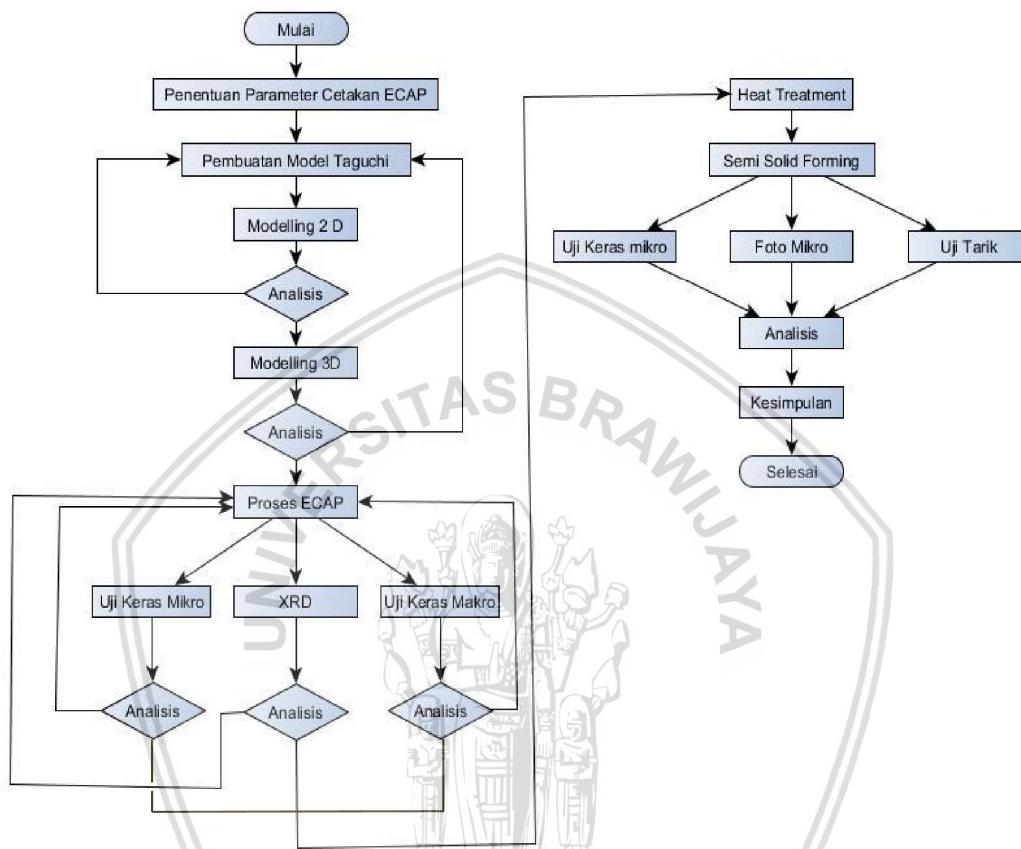




## BAB IV

### METODE PENELITIAN

Alur pada penelitian ini adalah sebagai berikut



Gambar 4.1 Diagram Alir Proses Penelitian

Penelitian ini terdiri dari tiga proses pokok yaitu proses Modeling ECAP, ECAP dan proses SSF. Modeling dilakukan untuk memperoleh parameter-parameter cetakan ECAP yang dapat menghasilkan struktur mikro yang homogenitas, sedangkan proses ECAP dilakukan dengan mempergunakan cetakan dengan parameter yang diperoleh dari proses pemodelan dan proses ini dilakukan untuk memperoleh bahan baku yang akan digunakan dalam proses SSF. Selain ketiga proses tersebut juga terdapat pengujian bahan, yaitu pengujian sebelum dan sesudah proses ECAP dan SSF.

Aluminium yang dipergunakan pada penelitian ini adalah aluminium seri 5052 yang diperoleh dari onlinemetals.com. Komposisi kimia dari aluminium seri 5052 adalah:

Tabel 2.1. Komposisi Kimia Aluminium 5052

Aluminum (Al)	95.7 - 97.7%
Chromium (Cr)	0.15 - 0.35%
Copper (Cu)	0.1%
Iron (Fe)	0.4%
Magnesium (Mg)	2.2 - 2.8
Manganese (Mn)	0.1%
Silicon (Si)	0.25%

#### 4.1 Pengujian Awal Aluminium

Pengujian awal pada aluminium yang dilakukan adalah pengujian kekerasan defraksi sinar X (XR-D) dan struktur mikro aluminium. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Rockwell-H sedangkan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik untuk metallurgi.

#### 4.2 Modelling 2D

Modeling dilakukan dengan menggunakan software Msc.Marc, pemodelan dilakukan untuk memperoleh bentuk cetakan ECAP yang dapat menghasilkan hasil paling homogen. Pada proses pemodelan ada empat faktor yang digunakan yaitu sudut *channel*, radius fillet luar, radius fillet dalam dan gesekan antara benda kerja dan cetakan. Sudut *channel* yang digunakan adalah 90°, 105° dan 120°. Radius fillet luar dan radius fillet dalam yang digunakan adalah 1,5; 5,0 dan 10 mm, radius 1,5 mm digunakan sebagai representasi radius 0 mm, karena pemodelan dengan radius 0 mm tidak dapat dilakukan (lurri:2010). Gesekan antara benda kerja adalah 0; 0,025 dan 0,5. Gesekan 0 adalah gesekan ideal, 0,025 terjadi pada cetakan dengan menggunakan pelumas MoS<sub>2</sub> sedangkan 0,05 dengan pelumas grafit. Pemodelan dengan 4 faktor dan masing masing faktor dengan 3 level dengan metode Taguchi dapat dilakukan dengan L9.

Pemodelan dilakukan dengan benda kerja berupa aluminium seri 5052 dengan ukuran 10x10 mm dan panjang 40 mm. Ukuran mesh yang digunakan adalah 0,5 mm sehingga total meshing pada billet 1600. Setting deformasi large deformation dan Model material diasumsikan sebagai model pengerasan isotropika bilinear (Santosa et al. 2001) (Luis-Pérez, Luri-Irigoyen, and Gastón-Ochoa 2004). Penggunaan bilinear hardening untuk mengurangi proses iterasi perhitungan sehingga waktu proses lebih singkat.

Tabel 4.2 Faktor and Level pemodelan

Factor	Factor descripton	Level 1	Level 2	Level 3
A	Sudut <i>Channels</i> ( $\Phi$ )	90	105	120
B	Radius fillet luar ( $\Psi_1$ )	1.5	5	10
C	Radius fillet dalam( $\Psi_2$ )	1.5	5	10
D	Gesekan	0	0.025	0.05

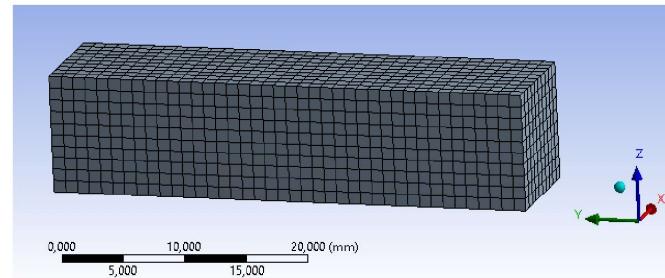
Tabel 4.3 L9 Matrix Test

Run	Factor			
	Sudut ( $\Phi$ )	$\Psi_1$	$\Psi_2$	Gesekan
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

#### 4.3 Modelling 3D

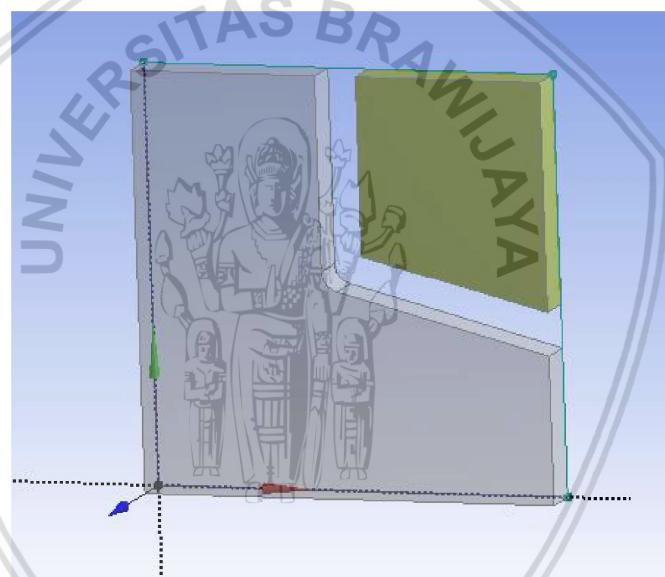
Pengukuran terhadap regangan dan distribusinya selama proses ECAP sulit untuk dilakukan, namun regangan, distribusi regangan dan tegangan dalam aluminium selama proses ECAP dapat diprediksi dengan simulasi. Pemodelan dengan model 2D menghasilkan cetakan yang menghasilkan regangan paling homogen. Model 2D dipilih karena kesederhanaan CAD dan lebih cepat waktu berjalan. Sayangnya, model 2D memberikan informasi terbatas tentang aliran logam dan distribusi regangan hanya pada tampilan 1 bidang.

Pemodelan 3D dilakukan penelitian lebih detail tentang efek gesekan terhadap distribusi regangan dan homogenitasnya. Koefisien gesek yang digunakan dalam pemodelan adalah 0.01; 0,025 dan 0,05. Billet yang digunakan berbentuk segi empat dengan ukuran 10 x 10 mm dan panjang 40 mm. Meshing yang dilakukan 0,1 mm (sehingga mesh total menjadi 4000/ 10x10x40) (lihat gambar 4.2)



Gambar 4.2 Meshing pada Pemodelan 3D

Model material diasumsikan sebagai model pengerasan isotropika bilinear . Geometri dies berdasarkan geometri eksperimental sebelumnya dengan sudut saluran  $105^\circ$ , radius fillet dalam 0 mm, dan radius fillet luar 5 mm (lihat gambar 4.3). Distribusi tegang diamati pada bagian tengah billet. Hasil simulasi ECAP diverifikasi dengan uji keras mikro.



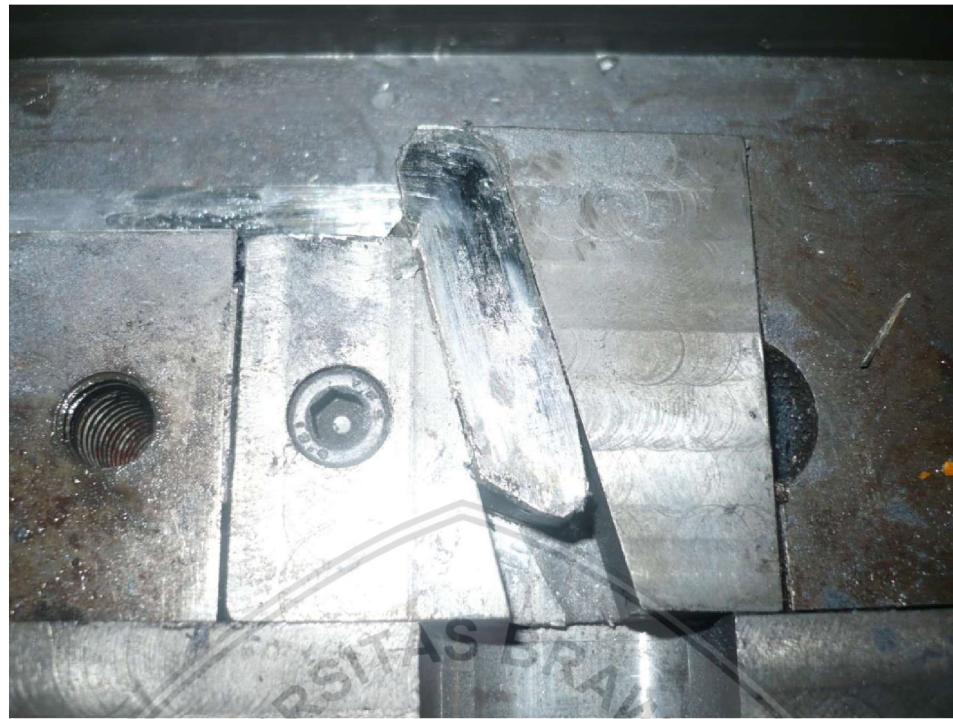
Gambar 4.3 Cetakan pada pemodelan 3D

#### 4.3 Proses ECAP

Proses ECAP dilakukan dengan menggunakan mesin press hidrolik. Cetakan ECAP yang digunakan adalah cetakan dengan parameter yang diperoleh dari proses pemodelan.

##### Pameter proses ECAP

- jumlah langkah : 1, 2 dan 4
- jenis route : B
- Cetakan :
  1. sesuai dengan hasil pemodelan
  2. sudut *channel* 90, radius fillet dalam, radius fillet luar 2.5 mm



Gambar 4.4 Cetakan ECAP



Gambar 4.5 Proses ECAP dengan Mesin Tekan hidrolik

#### 4.4 Semi Solid Forming

Proses proses *semi solid forming* dilakukan dengan menggunakan mesin Forming (forming) dan cetakan. Proses SSF dilakukan di Laboratorium produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang.

Alat yang digunakan dalam proses SSF adalah:

1. Mesin Forming
2. Cetakan
3. Dapur listrik (untuk memanaskan aluminium)
4. Thermometer (thermocouple) untuk mengukur temperatur aluminium

Variable dalam penelitian proses ECAP adalah

Variabel bebas: kekerasan , struktur mikro

Variabel terikat : strain rate

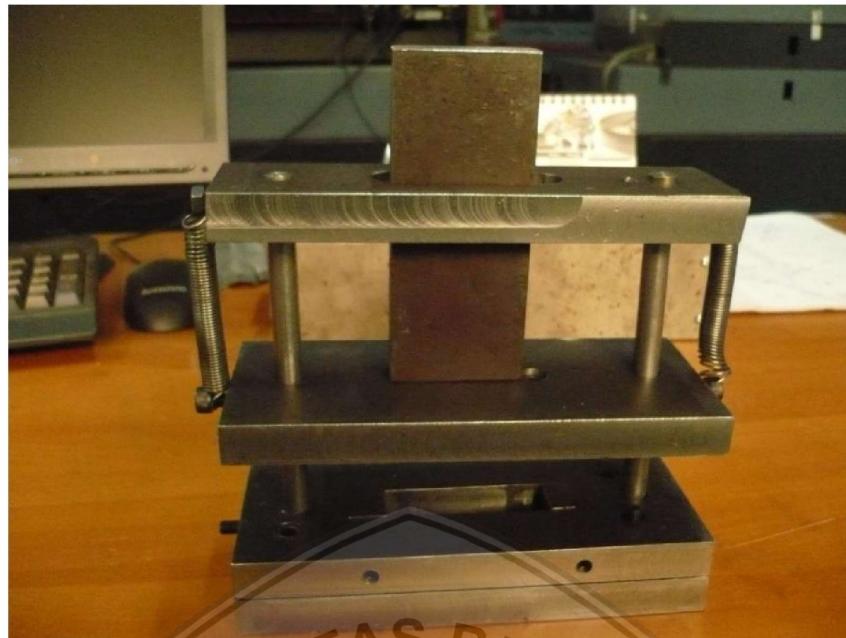
Variabel kontrol : temperatur benda kerja, temperatur cetakan

Proses pembentukan (forming) logam cair dilakukan dengan cetakan yang terbuat dari logam, karena logam memiliki panas jenis yang tinggi maka logam perlu dicegah agar temperatur benda kerja tidak turun terlalu cepat. Penurunan temperatur yang terlalu cepat akan menyebabkan fasa cair pada logam semi solid akan berubah menjadi fasa padat, hal ini menyebabkan proses semi solid forming tidak dapat dilakukan. Pada penelitian ini proses pembentukan dilakukan pada cetakan dengan temperatur 150 °C.



Gambar 4.6 Pemanas Cetakan Semisolid Forming

Temperatur cetakan dipanaskan dengan filament listrik dengan daya 1000 Watt, untuk mempertahankan temperatur cetakan agar konstan pada temperatur 150 °C pada cetakan diberi kontrol temperatur otomatis.



Gambar 4.7 Cetakan untuk Proses *Semi Solid Forming*

Gaya tekan pada proses *semi solid forming* menggunakan tekanan yang diperoleh dari tekanan udara (pneumatic). Pemilihan sistem pneumatic agar diperoleh penekanan dengan kecepatan tinggi. Sistem Hydraulic dapat menghasilkan tekanan yang jauh lebih besar dibanding dengan sistem pneumatic tetapi sistem hydraulic yang tersedia memiliki kecepatan yang rendah sehingga dikawatirkan temperatur logam turun terlalu banyak.



Gambar 4.8 Kontrol Mesin Press Pneumatik

Mesin press pneumatic yang digunakan memiliki diameter (dalam) silinder 100 mm panjang langkah 150 mm. Tekanan udara yang digunakan sebesar 0,5 MPa ( $5 \text{ kg/cm}^2$ ). Kontrol penggerak silinder menggunakan *electro pneumatic valve* yang merupakan satu kesatuan sistem dengan pengontrol temperatur cetakan. Gaya tekan yang dihasilkan oleh mesin press pneumatik ini adalah:

$$\begin{aligned}P &= \pi r^2 P_{silinder} \\&= \pi \cdot 5^2 \cdot 5 \\&= 393 \text{ N}\end{aligned}$$



Gambar 4.9 Mesin Press Pneumatic

#### 4.5 Pengujian aluminium hasil proses ECAP

Pengujian benda uji dilakukan untuk mengetahui pengaruh proses SSF terhadap sifat mekanik dan struktur mikro aluminium.

##### 4.5.1 Uji keras

Uji keras dilakukan dengan dua metode, yaitu dengan metode rockwell-B dan microhardness. Pengujian dengan metode rockwell-B dilakukan untuk mengetahui peningkatan kekerasan aluminium setelah proses ECAP dengan cepat. Apabila dari pengujian dengan metode ini menunjukkan kenaikan kekerasan maka dilakukan pengujian microharness untuk mengetahui distribusi dan homoginitas kekerasan pada aluminium tersebut.

#### 4.5.1.1 Uji Keras Rockwell-B

Uji keras dilakukan dengan menggunakan metode pengujian Rockwell B, Pengujian dilakukan dengan beban minor 10 Kgf dan beban mayor 100 Kgf. Uji keras dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Negeri Malang.

Posisi titik uji pada pengujian ini adalah pada bagian tengah aluminium setelah mengalami proses ECAP (Gambar 4.10).

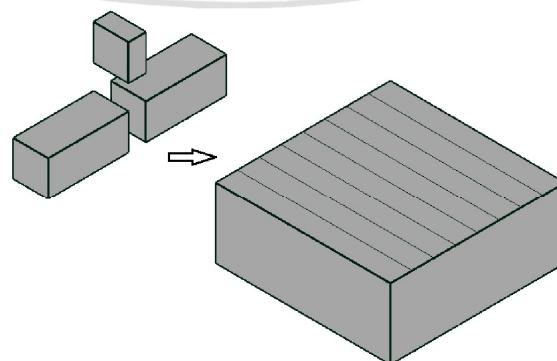


Gambar 4.10 Posisi Pengujian Keras Makro

#### 4.5.1.2 Uji Keras mikro

Pengujian keras mikro dilakukan dengan metode micro-vickers, pada pengujian ini dilakukan dengan indentor kerucut intan. Beban yang digunakan pada pengujian ini adalah 200 gram. Titik uji pada pengujian ini adalah pada penampang melintang dari aluminium (Gambar 4.11). Uji keras mikrohardness dilakukan di lab logam Universitas Negeri Malang.

Kekerasan aluminium pada penampang diuji dengan menggunakan uji kekerasan mikro; Uji kekerasan digunakan untuk mendukung analisis distribusi regangan dari pemodelan. Aluminium dipotong di bagian tengah, ukuran spesimen uji untuk uji kekerasan mikro disesuaikan dengan kapasitas mesin uji keras mikro. Sebelum diuji sampel di mounting dengan resin. Selain itu, sampel di gosok dengan kertas gosok dengan kekasaran mulai ukuran mesh 100, 200, 500 dan 1000. Posisi uji micro-hardness ditunjukkan pada gambar 4.11



Gambar 4.11 Posisi pengujian Micro-hardness

Benda kerja diuji dengan metode mikro vickers, jarak antar titik pengujian adalah 1,5 mm, sedangkan jarak dari tepi benda uji 1,25 mm.

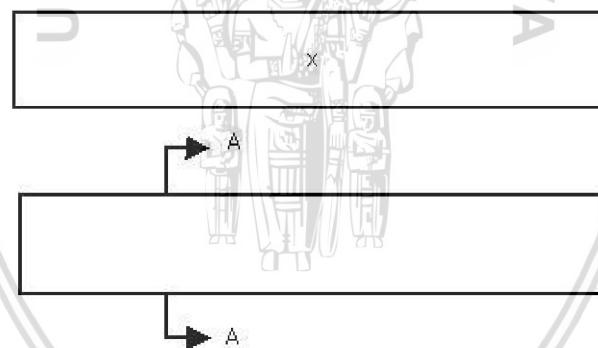
#### 4.5.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur Mikro dilakukan dengan mikroskop logam. Bahan-bahan yang dipergunakan dalam proses ini adalah

- Kertas gosok, ukuran 100, 200, 400, 1000 dan 5000
- Kain bludru (untuk memoles)
- Pasta gigi (untuk memoles)
- Cairan etsa
- Mikroskop logam
- Resin (untuk holder)

Benda uji untuk dapat diamati dengan mikroskop sebelumnya di ampelas dengan kertas gosok, kertas gosok yang digunakan mulai ukuran 100, 200, 400, 1000 dan 5000, terakhir dipoles dengan kain bludru. Pada saat dipoles permukaan kain diberi pasta gigi sebagai bahan abrasive (penganti alumina). Setelah proses poles struktur mikro logam dapat dimuncul setelah dietsa.

Struktur mikro diamati pada dua posisi, posisi yang pertama adalah pada potongan melintang benda uji (potongan A-A), sedang yang kedua pada bagian sisi benda uji (gambar 4.12)



Gambar 4.12 Posisi Pengamatan Struktur Mikro

Larutan etsa yang digunakan untuk mengamati struktur mikro aluminium dalam peneilitan ini adalah larutan *Modified Poulton's*. Komposisi larutan ini adalah:

Larutan A: - 12 ml HCl,  
- 6 ml HNO<sub>3</sub>  
- 1 ml aquades  
- 1 ml HF

Larutan B: - 25 ml HNO<sub>3</sub>  
- 40 ml aquades  
- 9 gram asam chromat

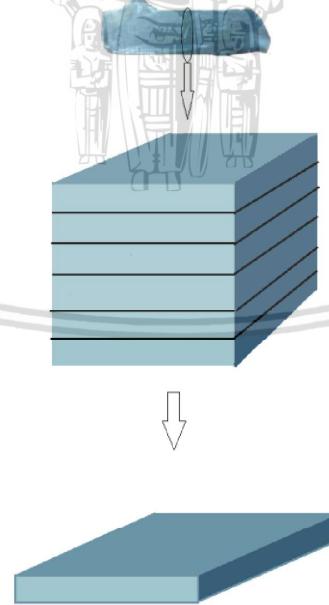
Aluminium yang telah diampelas dan dipoles dicuci dengan air mengalir dan sabun untuk menghilangkan notoran yang tersisa akibat proses poles. Aluminium dicelup pada campuran larutan 50 ml A dan 40 ml B. Aluminium dicelup selama 3 menit, apabila struktur mikro belum terlihat waktu pencelupan dapat ditambah. Setelah dicelup aluminium dicuci bersih dengan air dan sabun.

Pengamatan struktur mikro dengan mikroskop optik dilakukan di laboratorium bahan jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang.

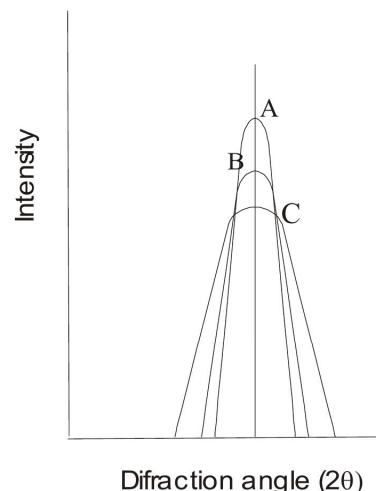
#### 4.5.3 Pengamatan kerapatan dislokasi dengan XRD

Spesimen yang dikenai sinar X akan menghasilkan puncak-puncak pada sudut tertentu sebagai hasil difraksi. Dengan menggunakan sudut dimana puncak itu terjadi dapat diidentifikasi puncak dari kisi kristal tertentu. Selain untuk mengidentifikasi kisi, puncak-puncak difraksi dapat digunakan untuk menghitung kerapatan dislokasi.

Kerapatan dislokasi diperkirakan dengan menggunakan lebar puncak difraksi pada setengah intensitas (FWHM / Full Width at Half Maximum) dari hasil difraksi sinar-X. Pada kondisi ideal puncak intensitas berupa garis lurus bukan merupakan kurva. Pengaruh kondisi alat, adanya batas butir dan regangan kisi akan mengakibatkan pelebaran pada puncak-puncak hasil difraksi.



Gambar 4.13 Posisi Pengamatan Kerapatan dislokasi dengan X-RD



Gambar 4.14 Pelebaran Puncak Difraksi Sinar-X (Suryanaraya, Norton, and Suryanarayana, C., Grant Norton 1998)

Pelebaran peak karena alat

Pelebaran peak karena alat (kurva A pada gambar 4.5) antara lain disebabkan oleh:

- berkas  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  tidak terpisah dengan sempurna
- berkas sinar yang dipancarkan tidak benar-benar sejajar



Gambar 4.15 Benda Uji X-RD

Karena difraksi sinar-X yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan alat yang sama, maka pelebaran puncak yang terjadi akibat alat ini pengaruhnya sama pada masing-masing spesimen.



Gambar 4.16 X-RD Panalitical X-Pert MPD

#### Pelebaran akibat ukuran butir

Ukuran partikel (besarnya butir) yang berpengaruh terhadap pelebaran puncak (kurva B pada gambar 4.5 adalah pelebaran puncak karena alat dan ukuran butir) adalah butir yang mempunyai ukuran lebih kecil dari  $0,1 \mu\text{m}$ . Besarnya pelebaran puncak akibat ukuran butir yang kecil dinyatakan dengan persamaan scherrer.

$$B_{\text{crystallite}} = \frac{k\lambda}{L \cos \theta} \quad (7) \quad (\text{Suryanaraya, Norton, and Suryanarayana, C., Grant Norton 1998})$$

dengan :  $\lambda$  = panjang gelombang sinar-x

$\theta$  = sudut Bragg

L = ukuran butir rata-rata pada permukaan sampel spesimen difraksi sinar-x

k = konstanta (diasumsikan k = 1)

#### Pelebaran peak akibat regangan kisi

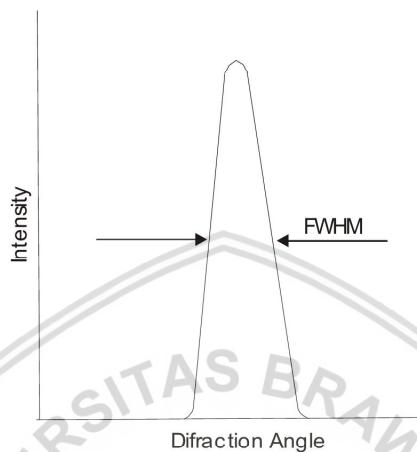
Pelebaran peak karena regangan kisi (kurva C pada gambar 2.6 menunjukkan pelebaran peak karena alat, ukuran butir dan regangan kisi) dapat dinyatakan dengan.

$$B_s = \eta \tan \theta$$

dengan :  $B_s$  = line broadening akibat regangan

$\eta$  = regangan kisi

$\tan \theta$  = tan dari sudut Bragg



Gambar 4.17 Pengukuran FWHM (Suryanaraya, Norton, and Suryanarayana, C., Grant Norton 1998)

Besarnya pelebaran peak ( $B_r$ ) yang terjadi karena alat untuk masing-masing spesimen besarnya sama karena dalam penelitian ini menggunakan mesin difraksi sinar-x yang sama. Maka besarnya pelebaran peak dapat diasumsikan hanya dipengaruhi oleh regangan kisi ( $B_s$ ) dan ukuran butir ( $B_{crystallite}$ ), dan dinyatakan dengan persamaan:

$$B_r = B_{crystallite} + B_{strain} \quad (8)$$

Karena spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah aluminium yang mempunyai ukuran butir lebih besar dari  $0,1 \mu\text{m}$ , sehingga  $B_{crystallite}$  sama dengan nol. Maka pelebaran peak yang terjadi hanya pengaruh regangan kisi ( $B_r = B_{strain}$ ).

Besarnya kerapatan dislokasi secara tidak langsung ditunjukkan dengan harga regangan kisi ( $\eta$ ). Semakin besar regangan kisi yang terjadi pada suatu logam, semakin besar kerapatan dislokasi ( $\rho$ ) pada logam tersebut.



Gambar 4.18 Aluminium Hasil proses ECAP

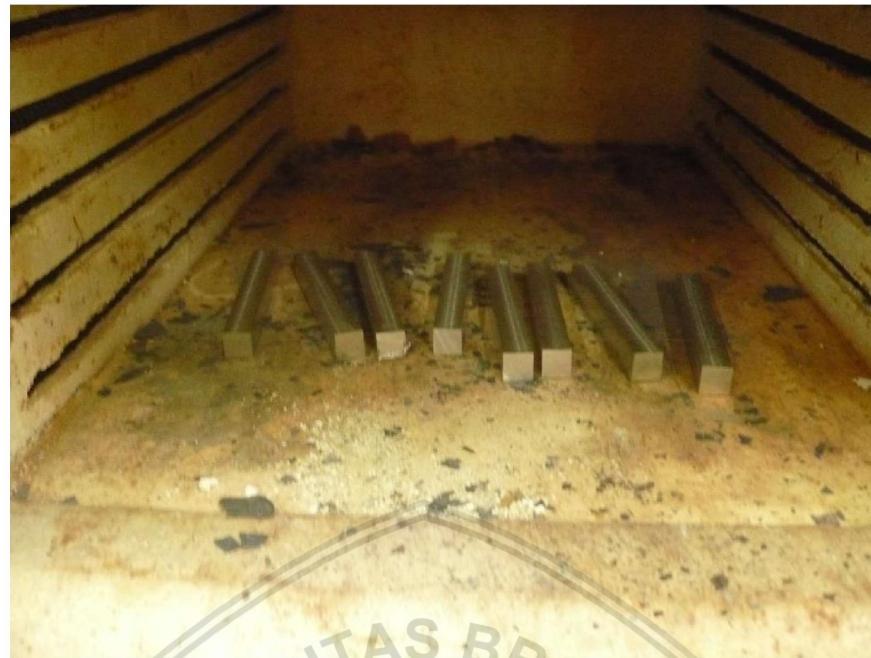
Benda uji untuk pengamatan dengan X-RD aluminium hasil proses ECAP (gambar 4.16) dipotong menjadi 6 bagian (gambar 4.13), sehingga di peroleh 7 permukaan yang mewakili mulai sisi atas sampai sisi bawah alumnum dan mewakili distribusi ukuran butir aluminium. Proses pemotongan dilakukan dengan memodifikasi mesin asah pahat, gerinda pada mesin tersebut diganti dengan gergaji untuk memotong aluminium dengan dengan diameter 10 cm. Pengunaan mesin asah pahat untuk memperoleh ukuran ketebalan yang presisi karena pada mesin tersebut memiliki alat pengontrol ketebalan. Proses pemotongan dilakukan dengan pendingin untuk mencegah kenaikan panas yang berlebihan yang dapat merubah struktur mikro aluminium tersebut.

Pengamatan X-RD dilakukan di laboratorium karakterisasi materil jurusan teknik material Institut Teknologi Sepuluh Novermber (ITS) Surabaya. Mesin X-RD yang digunakan adalah mesin X-RD merk Panalitical type X-Pert MPD dengan anoda jenis Cu dan panjang gelombang  $K\lambda_1$  1,54060 Angstrom.

#### 4.5.4 Pemanasan

Pemanasan dilakukan dengan dapur listrik, pemanasan pada temperatur semi solid. Temperatur semisolid aluminium dapat diketahui dari diagram fasa, pada penelitian ini temperatur pemanasan adalah 650 °C selama 20 menit.

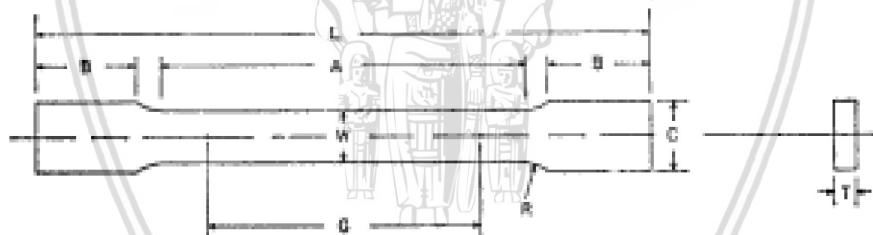
Pemanasan aluminium dilakukan dengan dapur tahana listrik (electric resistance furnace) tanpa gas pelindung dilakukan di laboratorium pengujian logam jurusan teknik mesin univesitas negeri malang. Dapur tersebut memerlukan daya listrik 10.000 Watt (10 kW) dan dilengkapi dengan kontrol temperatur otomatis untuk memperoleh temperatur yang sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 4.19 Dapur Listrik Jenis Electric Resistance Furnace

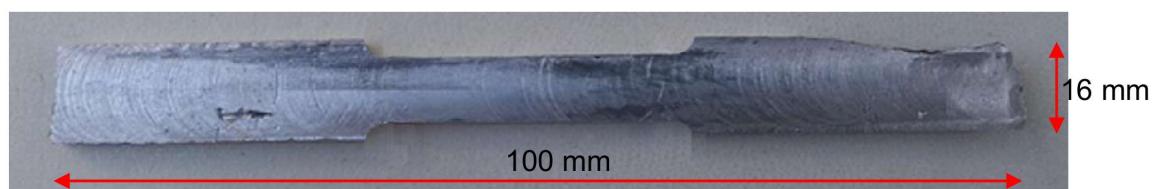
#### 4.5.5 Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan standar ASTM E-8. Spesimen yang digunakan adalah spesimen dengan ukuran kecil (gambar 4.20).



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	in.	in.	in.
G—Gage length (Note 1 and Note 2)	8.00 ± 0.01	2.000 ± 0.005	1.000 ± 0.003
W—Width (Note 3 and Note 4)	1 ½ + ¼ = ¾	0.500 ± 0.010	0.250 ± 0.005
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	1	½	¼
L—Over-all length, (Note 2, Note 7 and Note 8)	18	8	4
A—Length of reduced section, min	9	2 ¾	1 ½
B—Length of grip section, (Note 8)	3	2	1 ½
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	2	¾	¾

Gambar 4.20 Spesimen Uji Tarik (Sumber ASTM 3.01:2001)



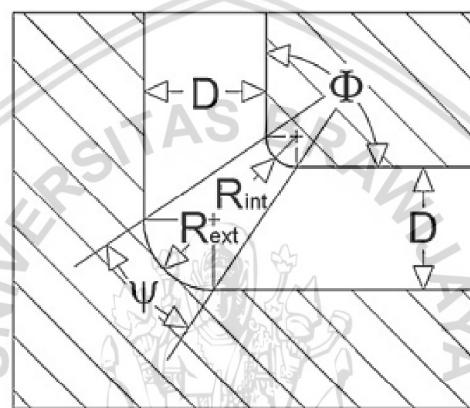
Gambar 4.21 Benda Uji Tarik

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Pemodelan

Pemodelan dilakukan dengan sudut  $\Phi = 90^\circ, 105^\circ$  dan  $120^\circ$  sementara radius fillet 1,5; 5 dan 10 mm. Radius fillet sebesar 1,5 mm mewakili radius 0 mm (Luis-Pérez, Luri-Irigoyen, and Gastón-Ochoa 2004). Pemodelan ini dilakukan untuk menentukan parameter pada cetakan ECAP yang menghasilkan butir yang paling homogen.



Gambar 5.1 Parameters pada cetakan ECAP (Luri et al. 2011)

Proses simulasi pada proses ECAP dilakukan dengan menggunakan software pemodelan Msc. Marc 2008. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan aluminium paduan seri 5052 dengan ukuran panjang 40 mm dan penampang berbentuk segi empat dengan lebar 10 mm dan tinggi 10mm. Parameter pada pemodelan dengan MSc Marc adalah: benda kerja *deformable* dengan jenis *element plane strain iso parametric 4-node*. Benda kerja dibagi menjadi 1600 node dengan panjang 0,5 mm. Pada proses pemodelan dilakukan proses global remising dengan mode *element distortion, strains and rotations reached to a critical value*.

#### Optimasi dengan Taguchi

Metode Taguchi adalah desain penelitian experimental untuk mencari pengaruh suatu parameter terhadap kualitas suatu produk. Dalam penelitian ini metode Taguchi digunakan untuk mengetahui pengaruh parameter cetakan (sudut channel, radius fillet luar dan fillet dalam serta gesekan antara aluminium dan cetakan) terhadap homogenitas ukuran butir pada proses ECAP.

Menurut Taguchi, karakteristik kualitas adalah parameter yang variasi memiliki efek penting pada kualitas produk, misalnya, berat badan, biaya, ketebalan sasaran, kekuatan, sifat material, dll strategi kualitas Taguchi adalah untuk meningkatkan kualitas dalam tahap desain produk dengan: (1) membuat desain kurang sensitif terhadap pengaruh faktor tak terkendali dan (2) Mengoptimalkan desain produk .

### Matrix Taguchi

Tabel 5.1 Factor and Level Descriptions

Faktor	Factor descriptor	Level 1	Level 2	Level 3
A	Sudut Channels( $\Phi$ )	90	105	120
B	Radius fillet luar ( $R_1$ )	1.5	5	10
C	Radius fillet dalam ( $R_2$ )	1.5	5	10
D	Gesekan	0	0.025	0.05

Pemodelan dengan 4 faktor dan 3 level akan menghasilkan 4 pangkat 3 ( $4^3$ ) atau 64 jenis model yang perlu di simulasikan. Simulasi untuk 64 jenis model memerlukan waktu yang lama, untuk menjalankan pemodelan 1 jenis dengan software MSc Marc diperlukan waktu 24 sampai 48 jam sehingga diperlukan waktu 64 sampai 128 hari untuk mensinulasikan seluruh model-model tersebut. Waktu yang diperlukan lebih lama dari perkiraan karena dalam kenyataannya sering dijumpai problem antara lain computer error dan simulasi tidak jalan karena kesalahan parameter dll.

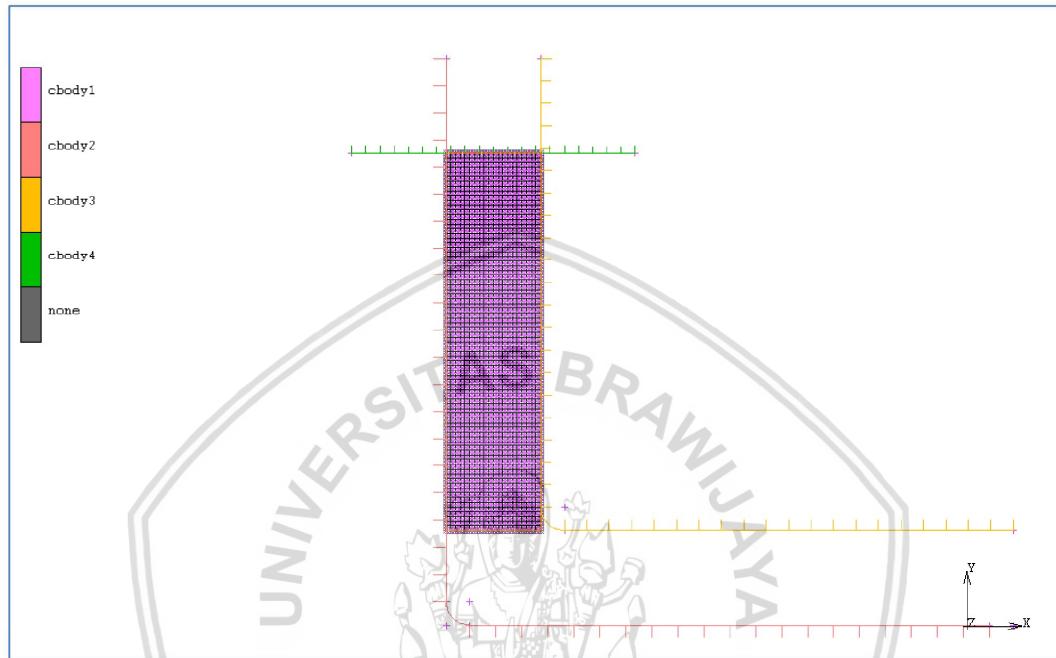
Perancangan experimental dengan metode taguchi mengurangi jumlah model dari semula 64 buah menjadi 9 saja. Model cetakan yang diperoleh dengan taguchi adalah seperti pada Tabel berikut (Tabel 2 )

Tabel 5.2 L9 Matrix Test

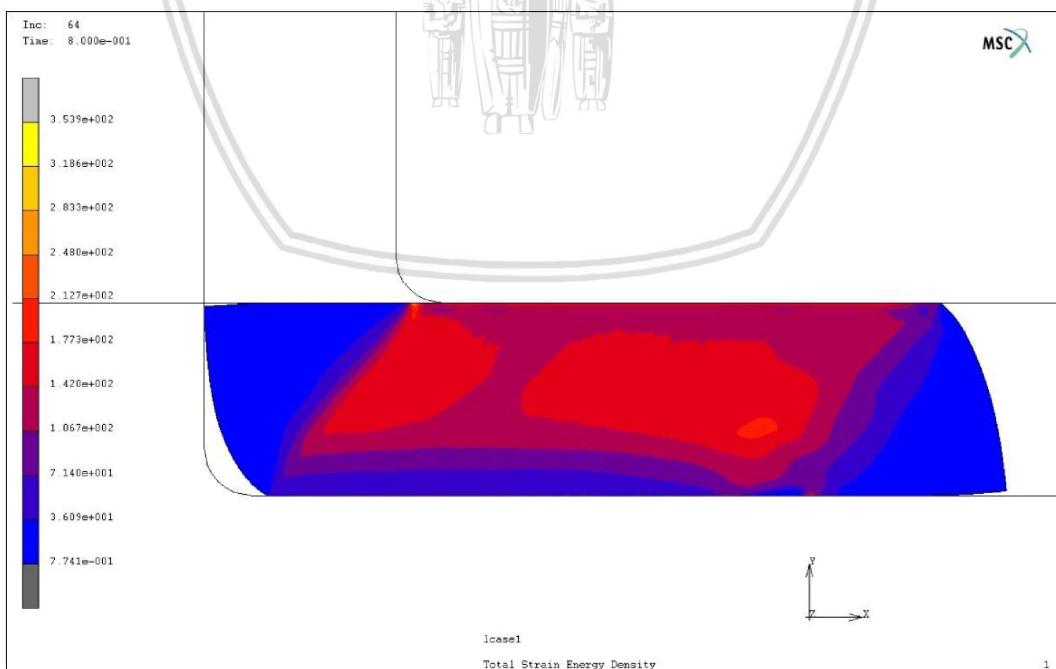
cetakan	Faktor			
	sudut ( $\Phi$ )	$R_1$	$R_2$	gesekan
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

## Pemodelan

Parameter pada proses simulasi proses ECAP dapat dilihat pada gambar berikut. Benda kerja adalah cbody1 yang bersifat *deformable*, cetakan diwakili oleh cbody2 dan cbody3 yang bersifat *rigid* sedangkan penekan (*plunger*) diwakili oleh cbody4 yang besifat rigid dan bergerak dari atas kebawah.



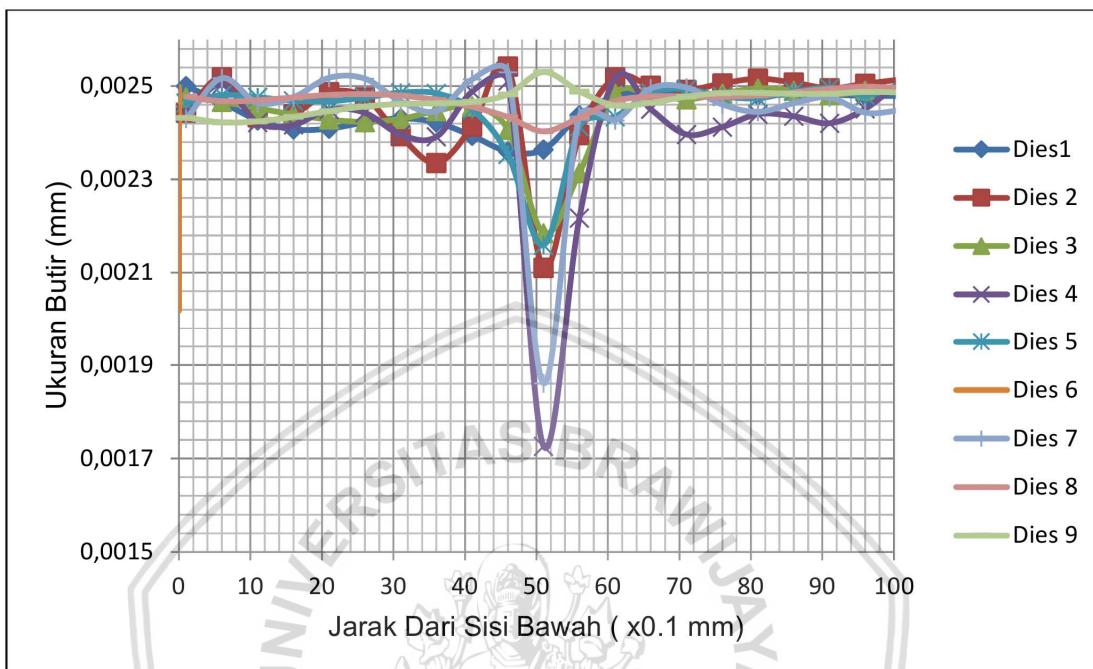
Gambar 5.2 Parameter Pemodelan ECAP



Ukuran Butir dalam mm

Gambar 5.3 Distribusi ukuran butir hasil Pemodelan 1

Ukuran butir pada bagian spesiment lintas setelah ECAP dapat ditunjukkan pada gambar 2. Ukuran butir pada spesimen tidak homogen. Butir terkecil berada di pada bagian billet sedangkan ukuran butir paling besar terjadi pada bagian sisi luar dan sisi dalam billet.

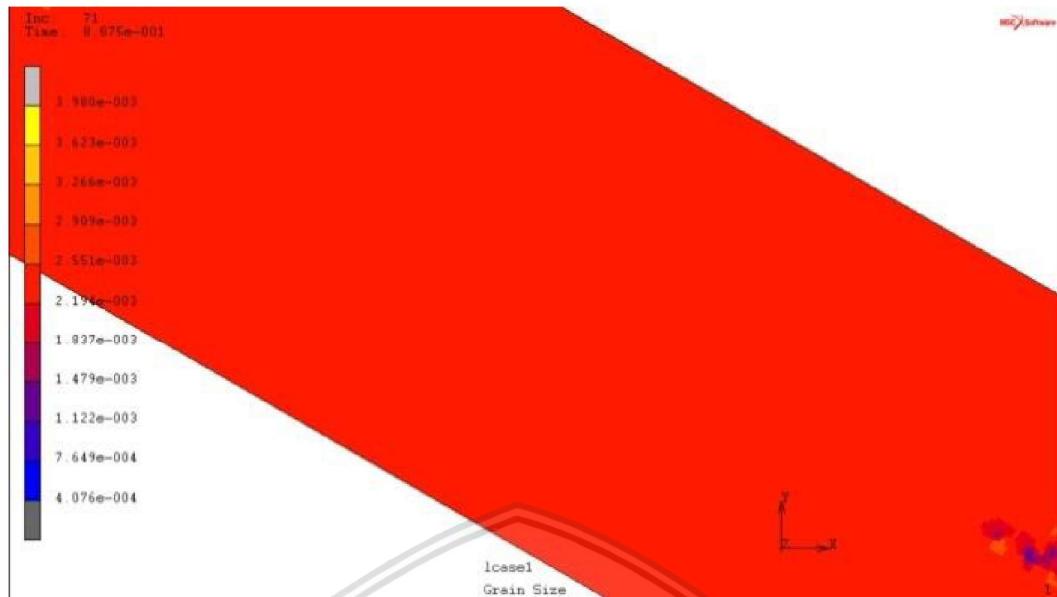


Gambar 5.4 Distribusi Ukuran butir hasil Pemodelan

Homoginitas ukuran butir dilakukan dengan cara menghitung Grain indeks dengan persamaan 4 (Suo et al. 2007). Ci adalah grain indek yang juga menunjukkan homoginitas, ukuran butir yang homogeny ditunjukkan dengan Ci yang rendah sedangkan nilai ci tinggi menunjukkan ukuran butir kurang homogen. Homogen ukuran butir pada benda uji dapat ditampilkan pada Tabel 3. Nilai Ci yang paling rendah diperoleh dari cetakan cetakan 8 8 (sudut channel  $120^\circ$ , radius fillet (dalam) 5 mm, radius fillet luar 1,5 mm dan gesekan 0,025).

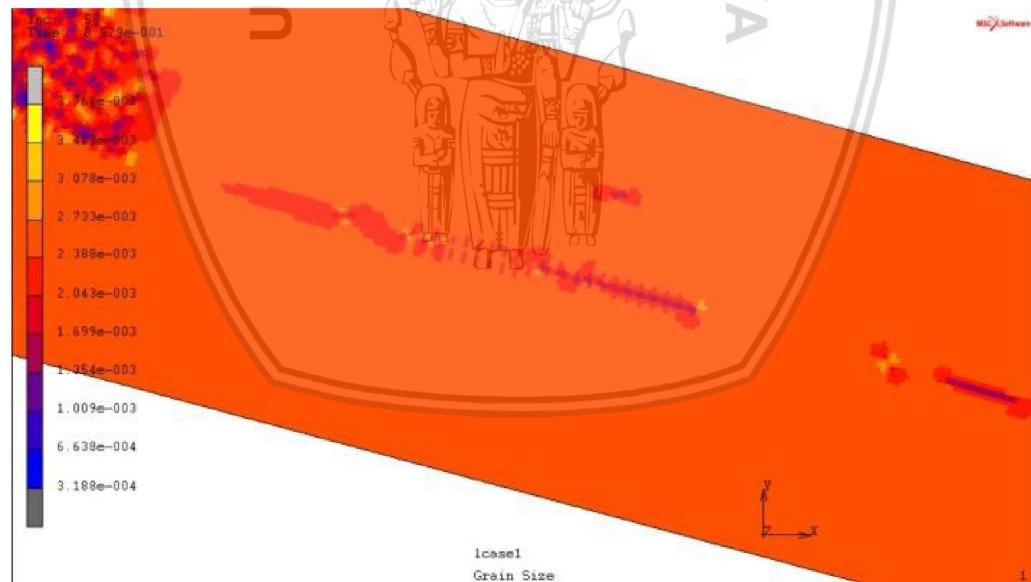
Tabel 5.3 *Homogeneity Index* pada aluminium

Dies	Maximum	Minimum	Average	Ci
1	0,002500	0,002360	0,002446	0,057113
2	0,002542	0,002110	0,002454	0,175926
3	0,002500	0,002185	0,002443	0,129196
4	0,002518	0,001726	0,002402	0,329715
5	0,002504	0,002159	0,002453	0,140662
6	0,002499	0,002020	0,002411	0,198746
7	0,002530	0,001861	0,002444	0,273643
8	0,002499	0,002403	0,002471	0,038846
9	0,002530	0,002422	0,002468	0,043775



Gambar 5.5 Distribusi ukuran butir pada pemodelan cetakan 8

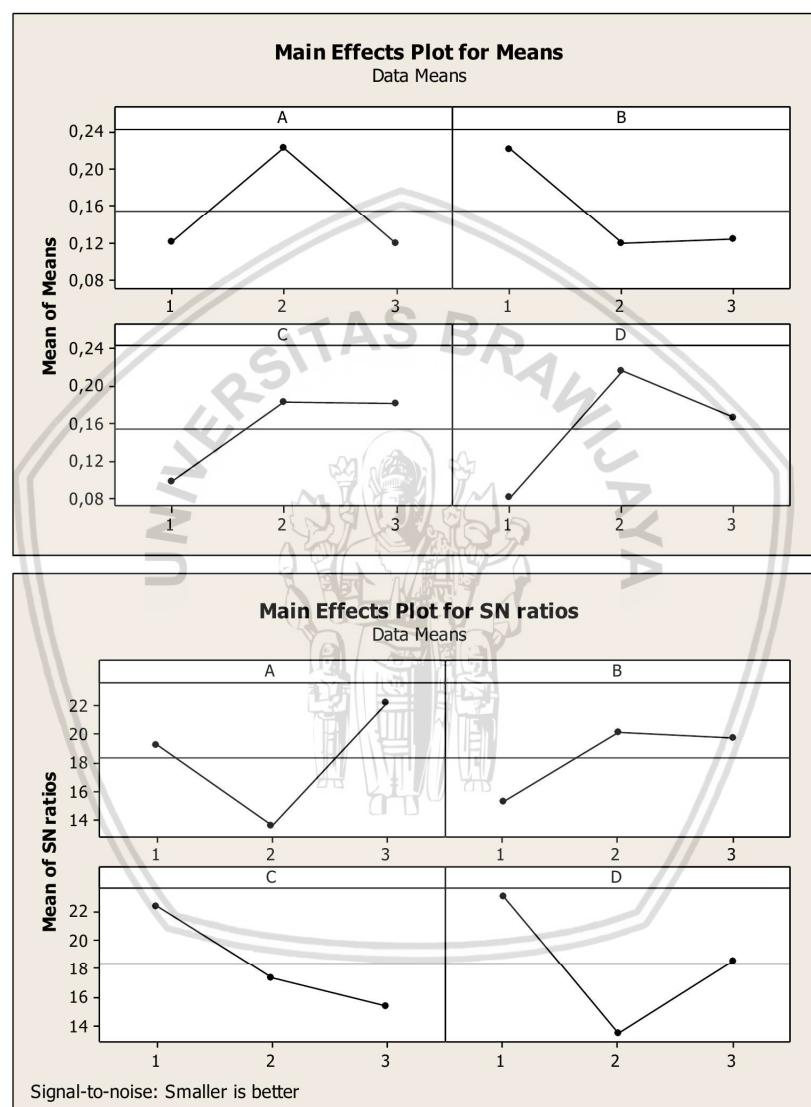
Distribusi ukuran butir paling homogen butir hasil pemodelan ke- 8 (gambar 5.5), ukuran butir pada penampang spesimen yang paling kecil terjadi di pusat billet, dan terbesar di sisi luar spesimen. Distribusi ukuran butir yang tidak homogen dihasilkan dari pemodelan ke 4.



Gambar 5.6 Distribusi ukuran butir pada aluminium setalah mengalami proses ECAP (cetakan no 4)

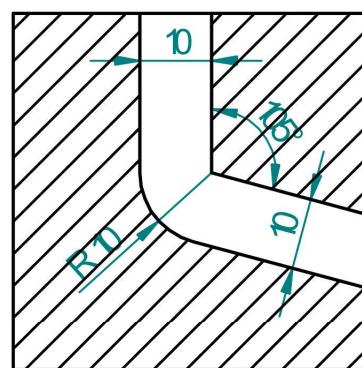
Perhitungan terhadap matrik L9 dilakukan dengan tiga parameter dari setiap model model yang digambarkan dalam Tabel 3. Pendekatan analysis Taguchi dapat dibagi menjadi dua bagian:

1. ANOVA (Analysis of Variance): Hal ini dilakukan untuk menemukan kontribusi relatif dari masing-masing faktor kontrol untuk respon yang diukur secara keseluruhan.
2. S / N ANOVA (Signal to Noise ANOVA): Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh kebisingan akibat pengulangan pemodelan.



Gambar 5.7 Analysis Taguchi terhadap hasil pemodelan pada homoginitas ukuran butir

Analisis data hasil pemodelan dengan metode Taguchi menghasilkan cetakan ECAP yang optimum dengan parameter: sudut *channel* 105 °; radius fillet luar 5 mm; radius fillet (dalam) 1,5 mm; dan esekan ( $\mu$ ): 0,025. Radius fillet dalam 1,5 mm adalah mewakili radius 0 mm sehingga radius dalam fillet 0 Dimensi ECAP dapat ditunjukkan pada gambar 5.8.

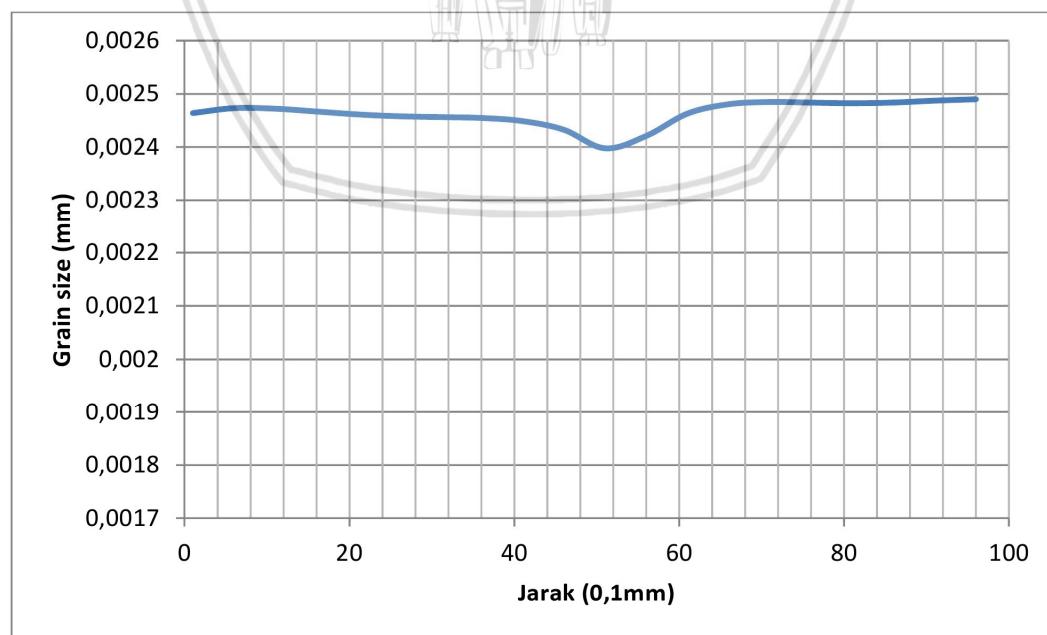


Gambar 5.8 Cetakan ECAP dari hasil pemodelan dan dianalisa dengan Methode Taguchi

Pemodelan terhadap cetakan dengan parameter yang diperoleh dengan analisis Taguchi, setelah itu dilakukan penghitungan terhadap homogenitas ukuran butir. Perhitungan homogenitas ukuran butir terhadap dari hasil pemodelan diperoleh Ci 0,037469, nilai Ci yang diperoleh lebih rendah dari pada Ci cetakan 8 sehingga cetakan yang digunakan untuk pengujian ECAP adalah cetakan dengan parameter yang diperoleh dari perhitungan Taguchi.

Tabel 5.4 Ci Index Pada Aluminium hasil pemodelan Cetakan optimum

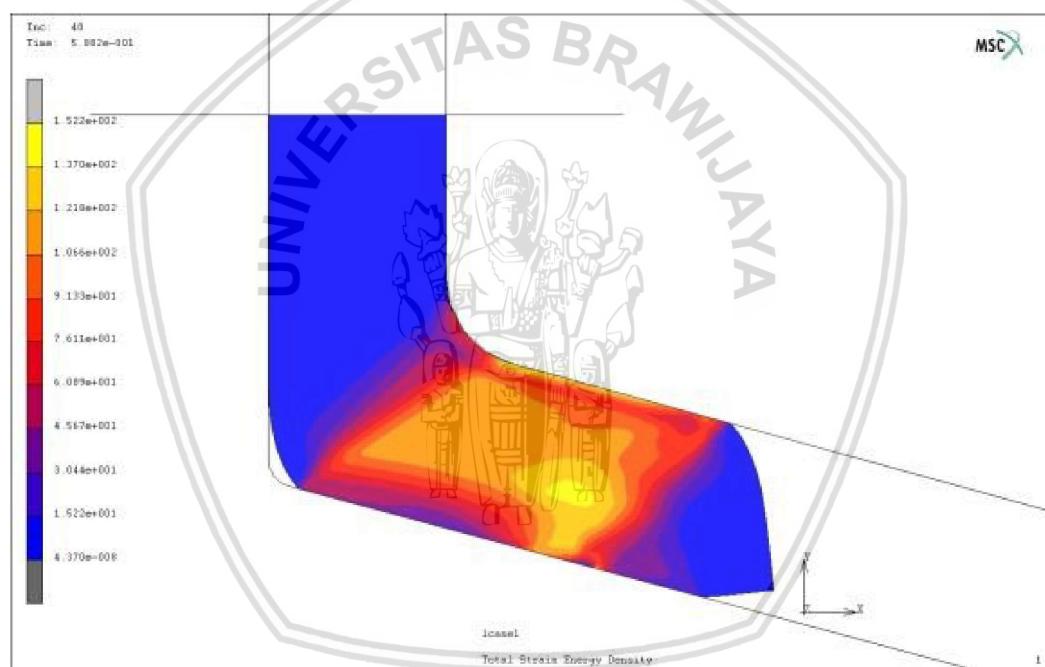
max	min	average	Ci
0,00249	0,002398	0,002463	0,037469



Gambar 5.9 Distribusi ukuran Butir Aluminium hasil Proses ECAP pada potongan melintang

## Diskusi

Homogenitas ukuran butir pada aluminium setelah proses ECAP ditentukan oleh kombinasi sudut *channel*, gesekan dan radius *Fillet* (luar dan dalam) cetakan. Sudut *channel* pada cetakan yang menghasilkan ukuran butir yang paling homogen terjadi pada dies dengan sudut  $105^\circ$ , diikuti oleh cetakan dengan sudut *channel*  $90^\circ$  dan paling tidak homogen dengan sudut *channel*  $120^\circ$ . Dies dengan sudut *channel*  $90^\circ$  ukuran butir terkecil terjadi di bagian tengah dari spesimen sedangkan butir besar berada di luar dan bagian dalam spesimen. Fenomena ini terjadi disebabkan oleh konsentrasi tegangan di sisi luar dan sisi dalam billet pada proses ECAP. Pada bagian tengah spesimen memiliki gaya geser terbesar (Aminnudin, Siswosuwarno, and Basuki 2003) (Balasundar and Raghu 2010).



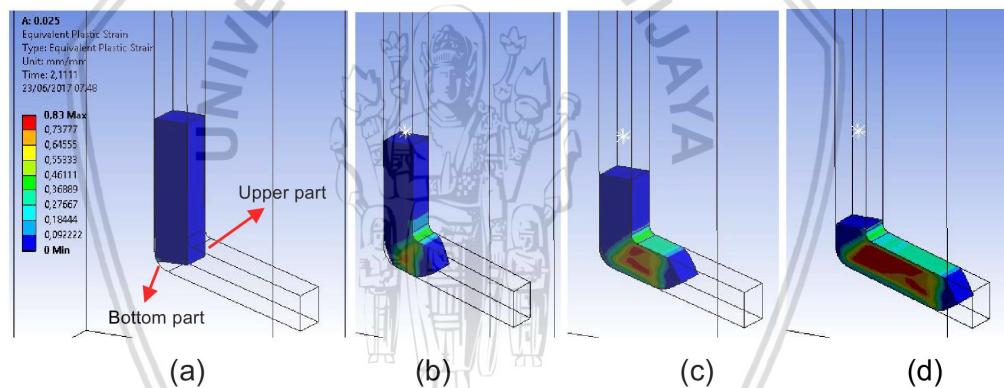
Gambar 5.10 Efek Gesekan antara benda kerja dan cetak pada proses *Equal Channel Angular Pressing* (cetakan 8)

Sudut *Channel* pada cetakan mengurangi konsentrasi tegangan pada spesimen. Konsentrasi tegangan menyebabkan kenaikan tegangan hal ini menyebabkan logam lebih susah untuk bergerak dan menyebabkan regangan yang terjadi lebih besar. Sedangkan gesekan antara benda uji dan cetakan menyebabkan aliran logam menjadi terhambat makin besar gesekan makin hambatan yang terjadi, hal ini menyebabkan regangan pada bagian bawah akan naik (Y. Iwahashi et al. 1997) hal ini menyebabkan ukuran butir makin kecil, apabila

gesekan sangat kecil maka butir yang terjadi lebih besar sehingga ukuranbutir menjadi kurang homogen.

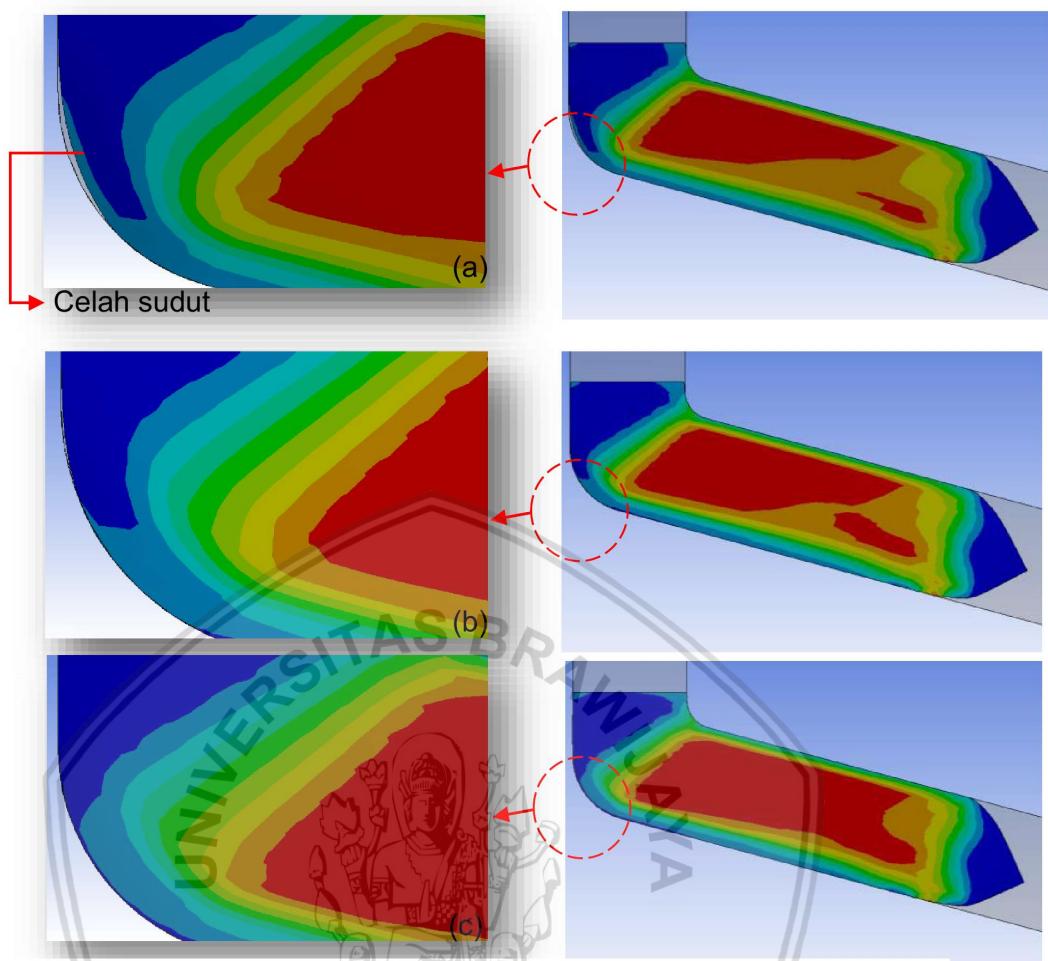
## 5.2 Modelling 3 Dimensi

Hasil pemodelan proses ECAP 3 dimensi dapat ditunjukkan pada gambar 5.11. Pada tahap awal, strain yang lebih besar terjadi pada bagian atas billet seperti ditunjukkan pada Gambar 5.11 (a). Pada tahap selanjutnya, bagian atas bilet tersebut mengalir lebih lambat dibandingkan dengan material di bagian bawah. bagian sebagai konsekuensi aturan aliran material. Variasi distribusi regangan pada penampang saluran keluar menghasilkan pembentukan celah sudut. Hal tersebut disebabkan strain geser bawah pada bagian bawah bahan billet yang ditekan. Warna regangan menunjukkan billet, biru adalah regangan terendah (0) dan merah menunjukkan regangan tertinggi (0,83 mm / mm). Nilai merah tergantung pada gesekan, gambar 5.11 untuk pemodelan dengan gesekan 0,025.

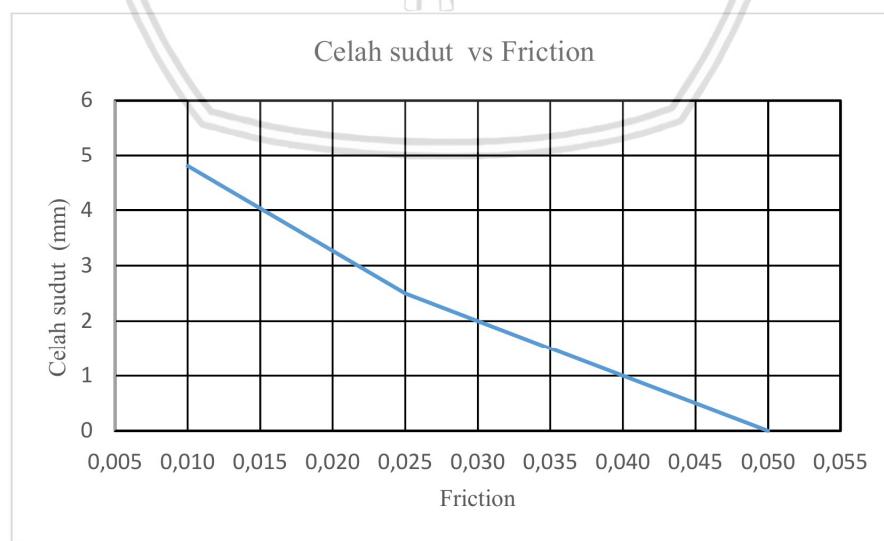


Gambar 5.11 Mekanisme aliran logam selama proses ECAP berdasarkan plot distribusi regangan: (a) tahap awal (b) billet mulai memasuki sudut saluran (c) sisi atas billet (d) tahap akhir

Bentuk billet yang mengalami deformasi dengan koefisien gesek yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 5.12 (a) 0,01 (b) 0,025 dan (c) 0,5. Pengurangan konsentrasi tegangan pada proses ECAP dilakukan dengan cetakan yang memiliki sudut *channel*  $105^\circ$ , sehingga mengurangi celah sudut pada proses ECAP. Celah sudut terjadi pada proses ECAP dengan koefisien gesek 0,01, celah sudut ini ukurannya lebih kecil pada proses ECAP dengan koefiesien gesek 0,025 bahkan pada koefisien 0,05 tidak terjadi celah sudut . Fenomena ini adalah tren yang sama dengan penelitian sebelumnya dimana gesekan meningkatkan gap sudut menurun. Kondisi ini dijelaskan sebagai tekanan balik yang mengarah pada pengisian celah sudut. Distribusi regangan menunjukkan bahwa gesekan 0,05 mendapatkan regangan yang lebih seragam dari pada gesekan 0,025 dan 0,01.



Gambar 5.12 Cela sudut pada proses ECAP dengan berbagai nilai koefisien gesek (a) 0.01 (b) 0.025 (c) 0.05

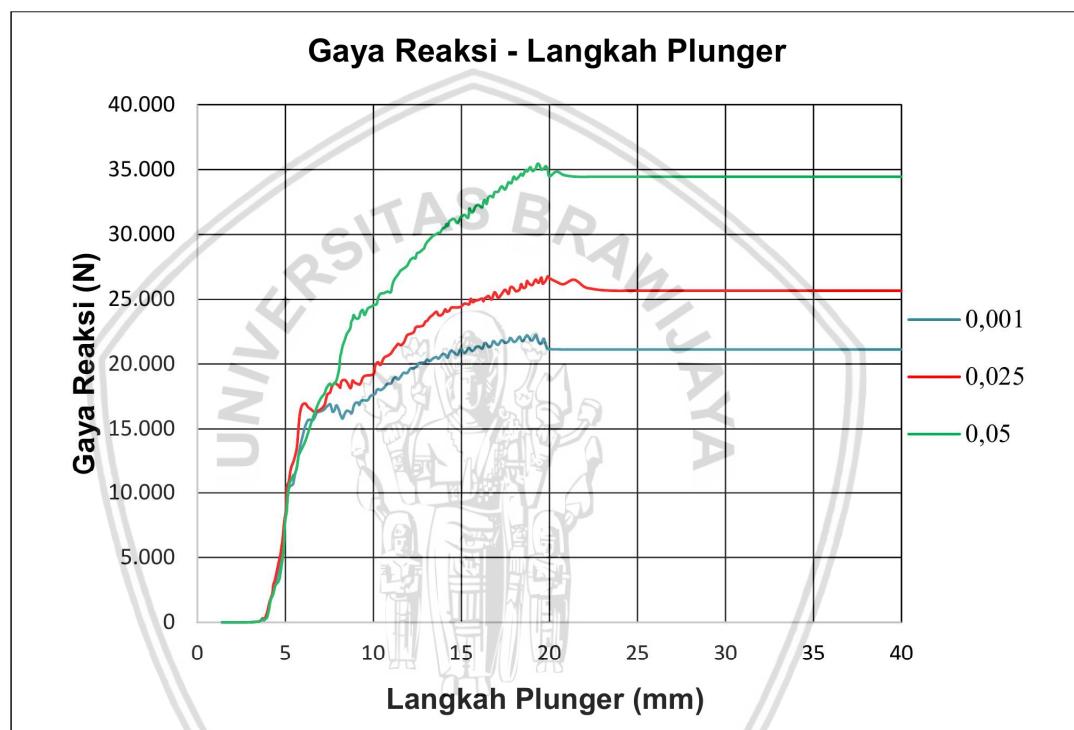


Gambar 5.13 Efek koefisien gesek terhadap cela sudut pada proses ECAP

Cela sudut pada proses ECAP dapat ditunjukkan pada Gambar 5.13, cela sudut terbesar terjadi pada proses ECAP dengan koefisien gesek 0,01

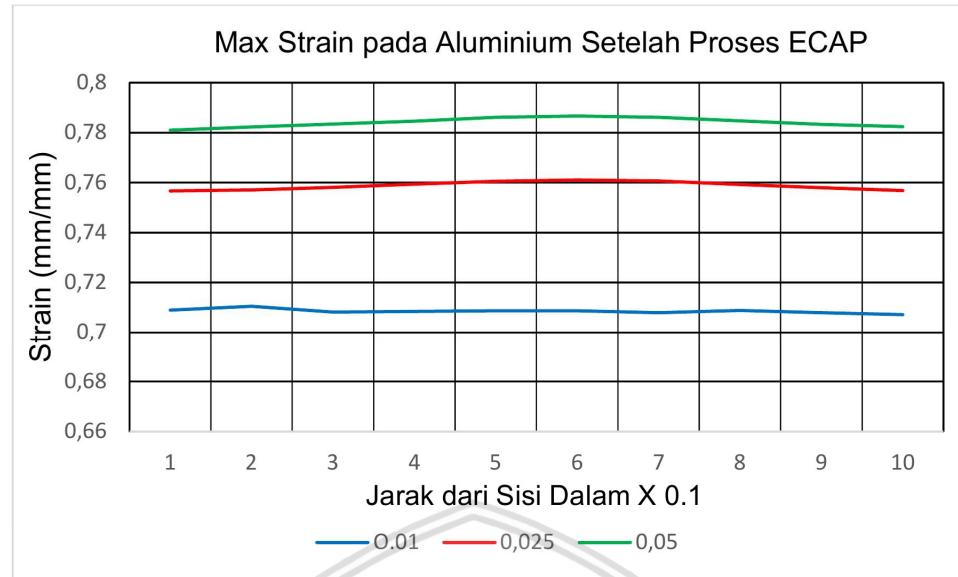
sedangkan proses ECAP dengan koefisien gesekan 0,05 celah sudut tidak terjadi. Cela sudut dalam proses ECAP ini terjadi karena gesekan antara benda kerja dan cetakan.

Gesekan yang meningkatkan tegangan pada bagian luar billet, hal ini menyebabkan billet pada bagian tersebut lebih susah untuk bergerak (aliarn logam tertahan) karena itu celah sudut yang terjadi menurun sesuai dengan kenaikan koefisien gesek bahkan pada kofisien gesek 0,05 celah sudut menjadi hilang (gambar 5.12 dan 5.13).



Gambar 5.14 Regangan Geser pada Proses ECAP

Push back yang dihasilkan billet membuat gaya tekan pada pross ECAP meningkat (gambar 5.14). Kenaikan gaya tegangan (stress) yang bekerja pada billet akan meningkatkan regangan yang terjadi, hal ini terjadi karena makin kecil celah sudut makin kecil sudut  $\Psi$  yang menyebabkan regangan yang terjadi meningkat (Y. Iwahashi et al. 1997).



Gambar 5.15 Regangan pada bagian tengah benda uji

Meningkatnya tegangan akibat koefisi gesekan, gesekan juga berpengaruh terhadap strain homogenitas. Tingkat *inhomogeneity strain* dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan yang diajukan oleh Suo dkk. (Suo et al. 2006). Dan Patil dkk. (Patil Basavaraj, Chakkingal, and Prasanna Kumar 2009). Yang diberikan oleh Persamaan (9) dan (10), masing-masing.

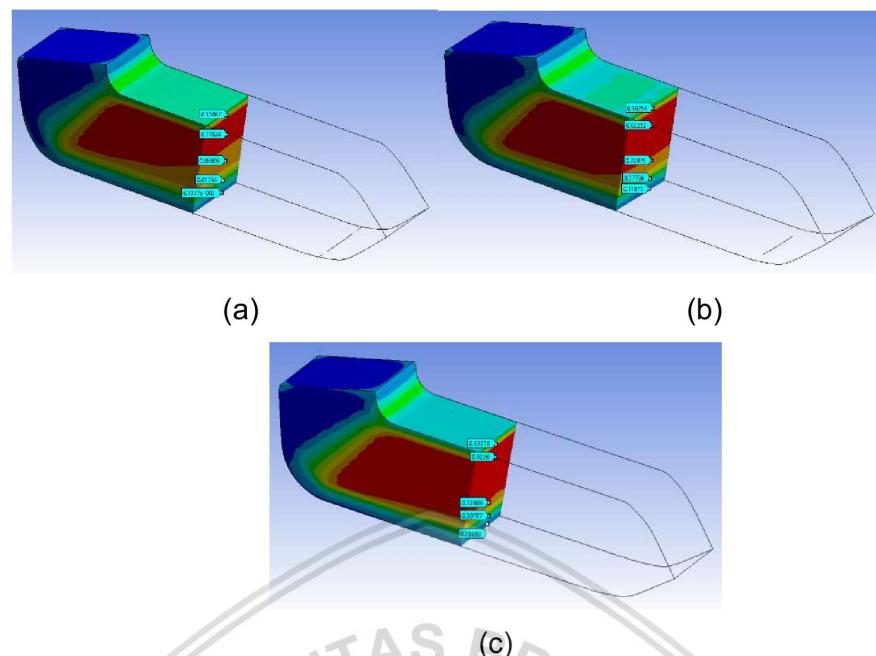
$$Ci = \frac{Max_{eps} - Min_{eps}}{Avg_{eps}} \quad (9)$$

$$Ci = \frac{Max_{eps} - Min_{eps}}{Avg_{eps}} \quad (10)$$

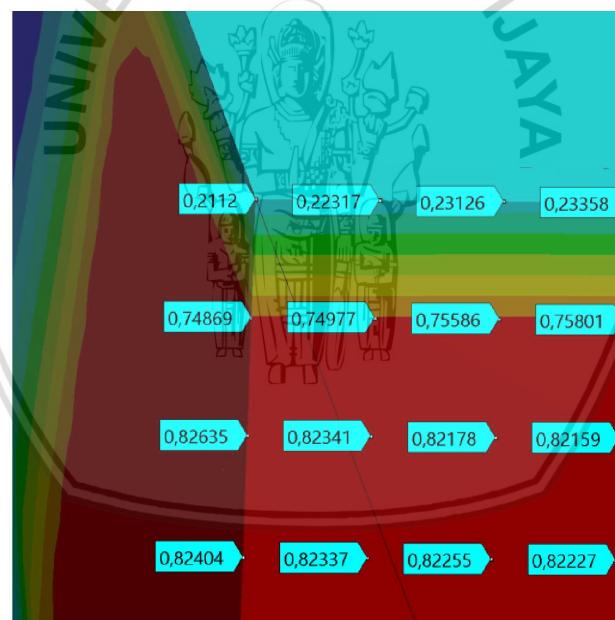
dimana

- Ci = strain inhomogeneity index
- Max(eps) = maximum equivalent plastic strain
- Min(eps) = minimum equivalent plastic strain
- CV(eps) = coefficient of variance of equivalent plastic strain
- stdev(eps) = standard deviation of equivalent plastic strain
- Avg(eps) = average equivalent plastic strain

Distribusi regangan hasil pemodelan pada proses ECAP dapat dilihat pada gambar 5.16 dan 5.17.

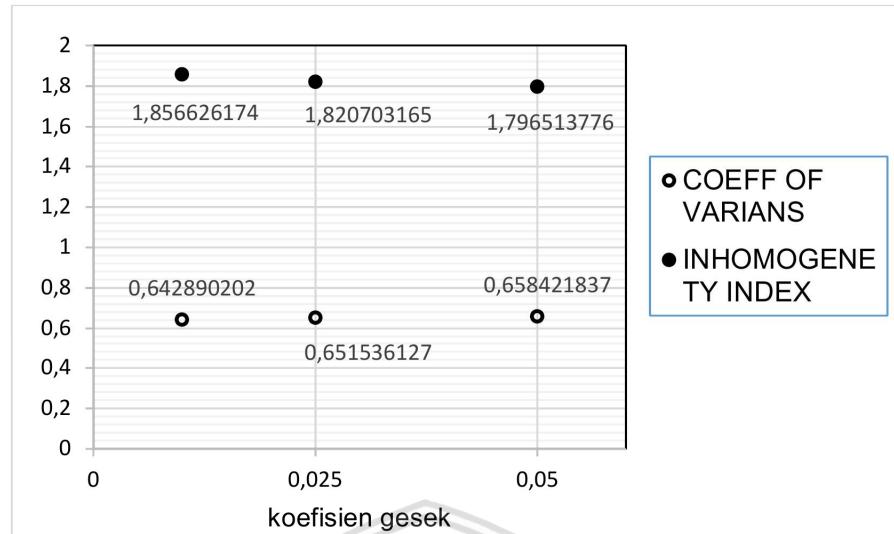


Gambar 5.16 Distribusi regangan pada potongan melintang aluminium hasil proses ECAP dengan koefisien gesek (a) 0.01 (b) 0.025 (c) 0.05



Gambar 5.17 Regangan pada proses ECAP dengan koefisien gesek 0,05

Tegangan maksimum pada aluminium setelah proses ECAP ditunjukkan pada gambar 5.17, regangan tertinggi terjadi pada proses ECAP dengan koefisien gesekan 0,05.



Gambar 5.18 Homogenitas regangan dengan metode *Homogenites Index* ( $C_i$ ) and *coefficient of variance*

Indeks inhomogeneity strain dan koefisien varians strain plastik setara yang diperkirakan ditunjukkan pada Gambar 5.18. Nilai indeks yang lebih rendah mengindikasikan homogenitas yang lebih baik. Hal ini dapat dilambangkan bahwa gesekan 0.05 memiliki homogenitas yang lebih baik. Keputusan ini didukung bahwa gesekan 0,05 menghasilkan gap sudut yang lebih kecil dan regangan yang lebih seragam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 sebelumnya.

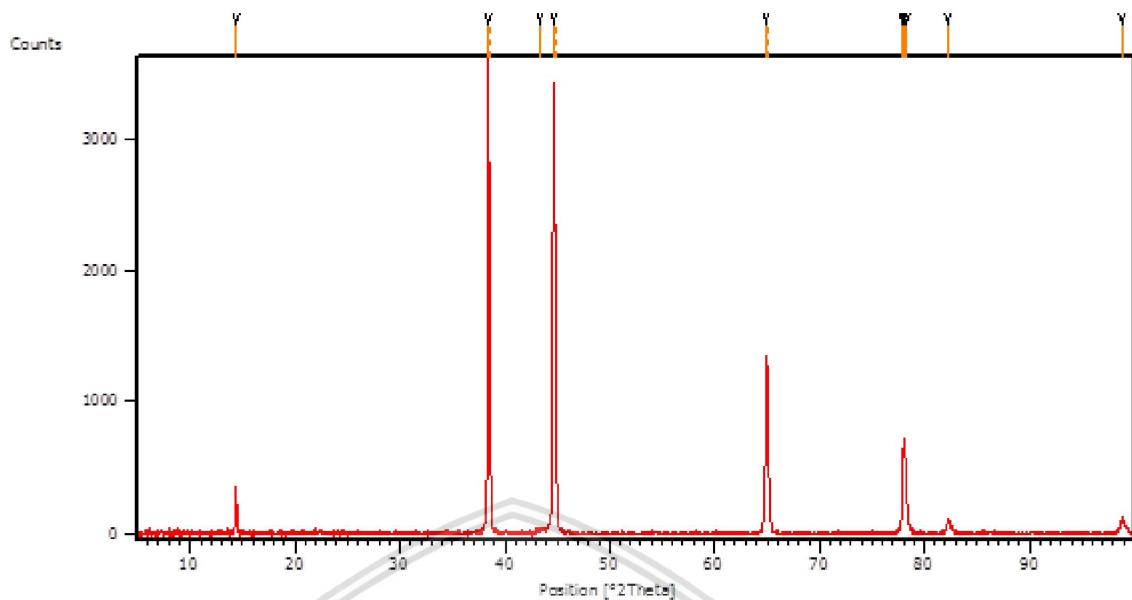
### 5.3 Proses ECAP

Proses dilakukan pada aluminium pada temperatur kamar, proses dilakukan dengan menggunakan dua buah cetakan. Cetakan yang pertama menggunakan cetakan sesuai dengan hasil pemodelan sedangkan cetakan yang kedua dengan cetakan dengan sudut *channel* 90, dan radius fillet luar 2.5 mm, cetakan ini sebagai pembanding.

Aluminium hasil proses ECAP diukur ukuran butirnya dengan menggunakan X-RD. Penggunaan X-RD sebagai alat untuk mengukur ukuran butir karena X-RD dapat mengamati permukaan yang jauh lebih luas dibandingkan dengan mikroskop optik, selain itu proses persiapan sample untuk pengamatan dengan mikroskop optik cukup lama terutama dalam proses etsa.

#### 5.3.1 Pengamatan ukuran Butir dengan X-RD

Pengamatan aluminium dengan X-RD menghasilkan data yang disajikan dalam belum grafik benda yang diamati, pengamatan terhadap aluminium 5052 yang diperlakukan panas “*full annealing*” dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 5.19 Pola hasil X-RD pada aluminium full annealing

Pola hasil X-RD merupakan grafik dengan sumbu X menyatakan sudut  $\theta$  sedangkan sumbu y menyatakan intensitas pantulan sinar-X. Sudut sudut tersebut menyatakan bidang pada kristal menurut index miller. Puncak-puncak intensitas yang terjadi tersebut secara ideal terjadi pada sudut tertentu sehingga pada grafik berupa garis lurus, tetapi pada kenyataannya berupa kurva. Lebar kurva pada pola X-RD dapat digunakan untuk mengukur ukuran butir, pengukuran lebar kurva dilakukan pada setengah tinggi kurva yang dikenal dengan *Full Width at Half Maximum (FWHM)*.

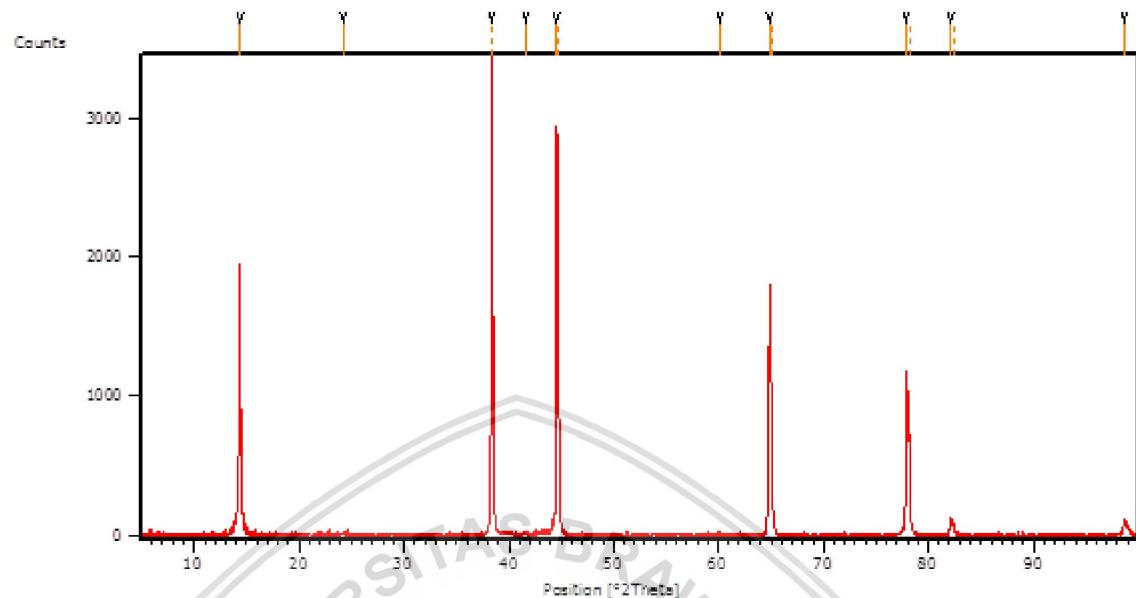
FWHM untuk aluminium yang mengalami proses *full annealing* digunakan sebagai data pembading untuk mengetahui ukuran butir aluminium yang mengalami proses ECAP. FWHM aluminium *full annealing* adalah sebagai berikut:

Tabel 5.5 Diffraction Data *Full Annealing* Aluminum

	<b>hkl</b>	<b>2θ</b>	<b>FWHM</b>
1	<b>200</b>	38.39993	0.08075
2	<b>220</b>	44.49152	0.13794
3	<b>311</b>	64.78034	0.1048
4	<b>222</b>	77.87438	0.08358

Perhitungan ukuran butir aluminium hasil proses ECAP menggunakan data FWHM dari aluminium full annealing dan FWHM aluminium hasil proses ECAP. FWHM aluminium hasil proses ECAP dengan sudut  $\theta$  105°, radius fillet dalam 0

mm, radius fillet luar 5 mm dan pelumas *molybdenum disulfide* dapat dilihat pada tabel 2.



Gambar 5.20 Pola X-RD aluminium hasil proses ECAP pada benda uji 1  
(Permukaan luar aluminium hasil ECAP)

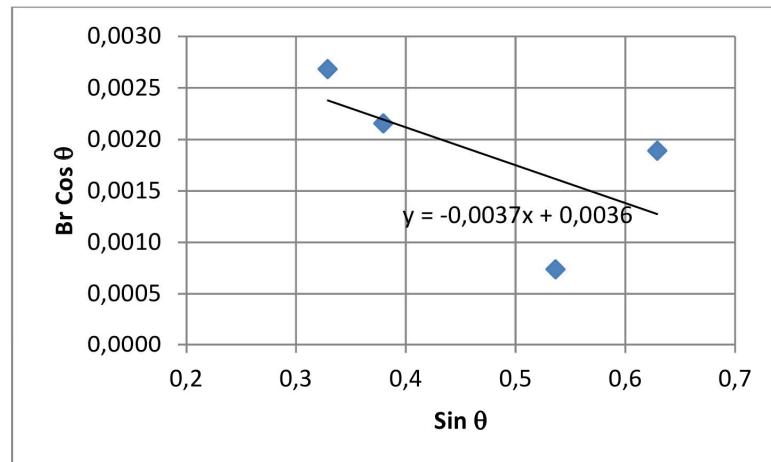
Benda uji untuk pengamatan X-RD pada aluminium hasil ECAP terdiri dari 7 buah yang mewakili ukuran butir pada benda uji tersebut. Karena benda uji terdiri 7 benda uji maka pola X-RD juga terdiri dari 7 macam. FWHM dari ke-7 pola X-RD dapat dilihat pada tabel 5.6



Tabel 5.6 Data Defraksi X-RD Aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 1

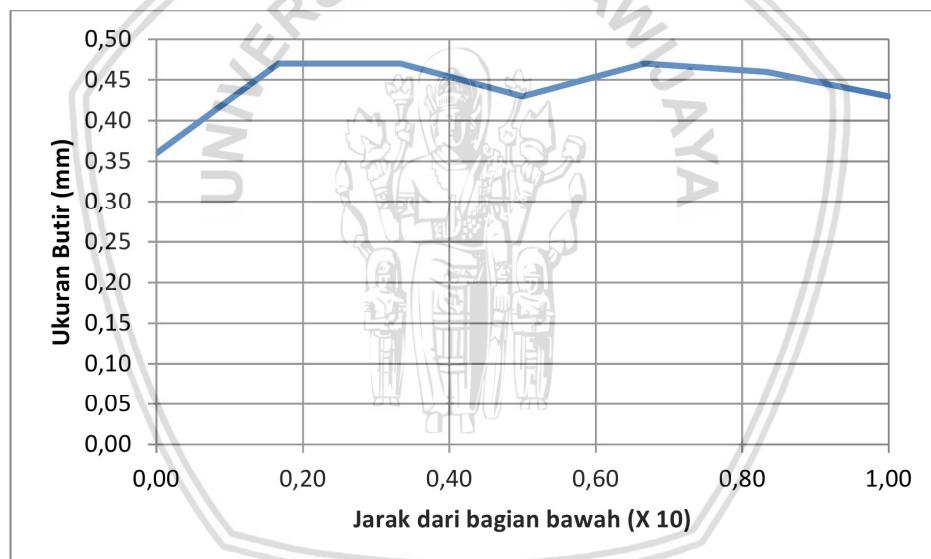
Benda Uji	<b>hkl</b>	<b><math>2\theta</math></b>	FWHM
<b>1</b>	<b>200</b>	38.37	0.182
	<b>220</b>	44.59	0.192
	<b>311</b>	64.87	0.116
	<b>222</b>	77.95	0.162
<b>2</b>	<b>200</b>	38.44	0.196
	<b>220</b>	44.67	0.225
	<b>311</b>	64.95	0.150
	<b>222</b>	77.97	0.143
<b>3</b>	<b>200</b>	38.56	0.194
	<b>220</b>	44.80	0.215
	<b>311</b>	65.07	0.141
	<b>222</b>	77.97	0.140
<b>4</b>	<b>200</b>	38.90	0.195
	<b>220</b>	45.13	0.214
	<b>311</b>	65.39	0.199
	<b>222</b>	78.40	0.140
<b>5</b>	<b>200</b>	38.56	0.194
	<b>220</b>	44.80	0.215
	<b>311</b>	65.07	0.141
	<b>222</b>	77.97	0.140
<b>6</b>	<b>200</b>	38.45	0.200
	<b>220</b>	44.68	0.227
	<b>311</b>	64.96	0.187
	<b>222</b>	77.86	0.147
<b>7</b>	<b>200</b>	38.34	0.193
	<b>220</b>	44.57	0.214
	<b>311</b>	64.73	0.116
	<b>222</b>	77.96	0.165

Perhitungan ukuran butir aluminium menggunakan data FWHM bidang 200, 220 dan 311, dari data FWHM tiap bidang tersebut dicari Br Cos  $\theta$  dan Sin  $\theta$ . Ploting data dari ketiga titik tersebut di buat persamaan garis, perpotongan garis tersebut dengan sumbu Y merupakan ukuran butir aluminium.



Gambar 5.21 plot perhitungan  $Br \cos\theta$  dan  $\sin \theta$

Plotting terhadap perhitungan FWHM dari bidang 200, 220 dan 311 dari setiap benda uji dibuat suatu grafik (gambar 5.14). Grafik tersebut menyatakan distribusi ukuran butir aluminium yang telah mengalami proses ECAP.



Gambar 5.22 Ukuran butir aluminium setelah proses ECAP (diamati dengan X-RD)

Ukuran butir aluminium paling kecil terjadi pada bagian luar, hal ini terjadi karena gesekan antara benda uji dan cetakan. Makin besar gesekan tersebut makin kecil ukuran butir yang dihasilkan, selain memperkecil ukuran butir gesekan antara benda uji dan cetakan ini mempengaruhi gaya tekan yang diperlukan dalam proses ECAP. Gaya tekan tersebut sangat besar sehingga dapat merusak permukaan cetakan.

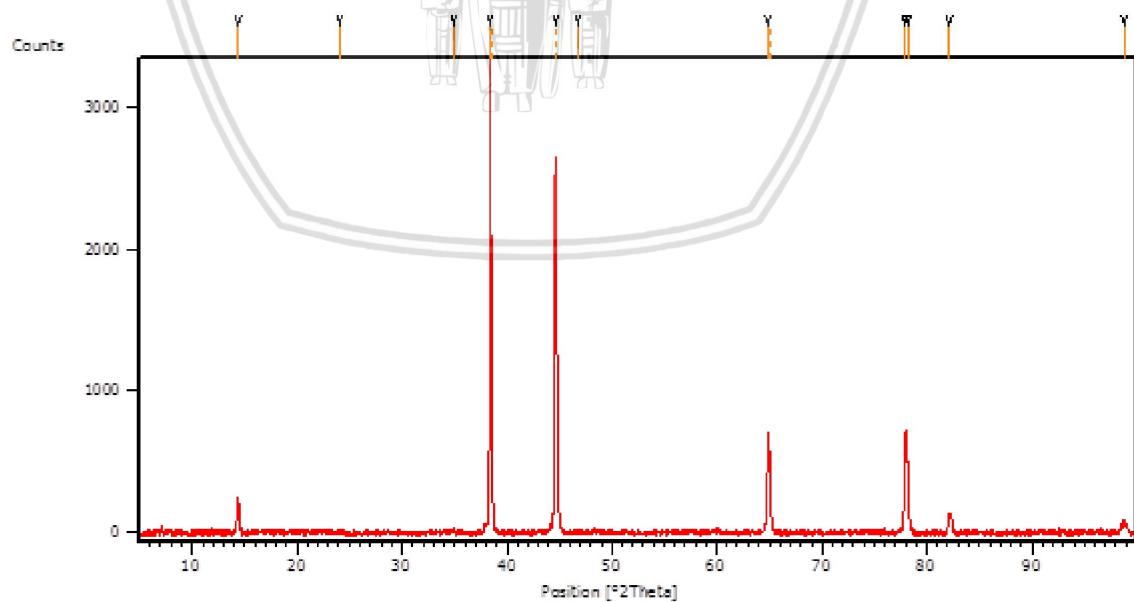
Gaya gesek antara benda uji dan cetakan yang sangat besar memerlukan pelumas yang selain mempunyai koefisien gesek yang rendah tetapi juga tahan

terhadap tekanan tinggi untuk itu dalam penelitian ini digunakan pelumas pada jenis *Molybdenum disulfide* ( $\text{MoS}_2$ ).

Distribusi ukuran butir aluminium pada potongan melintang menunjukkan selain pada bagian luar ukuran butir lebih kecil terjadi pada bagian tengah benda uji. Pada bagian tengah uji memiliki ukuran butir yang lebih kecil karena tegangan geser pada bagian tengah lebih besar sehingga butir yang terjadi menjadi lebih kecil daripada bagian lain (kecuali bagian luar cetakan).

Ukuran butir pada bagian memiliki ukuran butir lebih kecil, hal ini terjadi karena konsentrasi tegangan yang terjadi pada saat proses ECAP. Konsentrasi tegangan ini terjadi karena adanya sudut yang tajam pada cetakan dan sudut *channel*. Konsentrasi tegangan yang tinggi karena sudut cetakan berkurang karena sudut *channel* cetakan. Makin besar sudut *channel* makin kecil konsentrasi tegangan yang terjadi, tetapi sudut *channel* makin besar akan mengurangi regangan yang terjadi sehingga proses pengecilan butir dan deformasi plastis yang terjadi semakin kecil sehingga tujuan proses ECAP menjadi tidak tercapai.

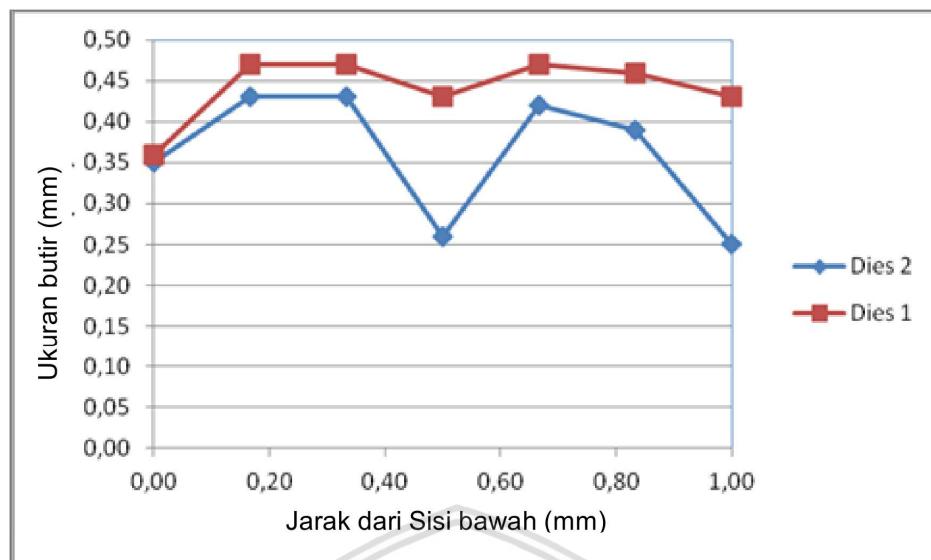
Hasil defraksi X-RD pada aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan kedua (benda uji 1) dapat dilihat pada gambar 8. Perhitungan ukuran butir sama dengan aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 1, distribusi ukuran butir aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 1 dan cetakan dapat dilihat pada gambar 5.23.



Gambar 5.23 Pola X-RD aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 2 (benda uji 1)

Tabel 5.7 Data Defraksi X-RD Aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan 2

Benda Uji	<b>hkl</b>	<b>2θ</b>	FWHM
1	<b>200</b>	38.37	0.182
	<b>220</b>	44.59	0.192
	<b>311</b>	64.87	0.116
	<b>222</b>	77.95	0.162
2	<b>200</b>	38.44	0.196
	<b>220</b>	44.67	0.225
	<b>311</b>	64.95	0.150
	<b>222</b>	77.97	0.143
3	<b>200</b>	38.56	0.194
	<b>220</b>	44.80	0.215
	<b>311</b>	65.07	0.141
	<b>222</b>	77.97	0.140
4	<b>200</b>	38.90	0.195
	<b>220</b>	45.13	0.214
	<b>311</b>	65.39	0.199
	<b>222</b>	78.40	0.140
5	<b>200</b>	38.56	0.194
	<b>220</b>	44.80	0.215
	<b>311</b>	65.07	0.141
	<b>222</b>	77.97	0.140
6	<b>200</b>	38.45	0.200
	<b>220</b>	44.68	0.227
	<b>311</b>	64.96	0.187
	<b>222</b>	77.86	0.147
7	<b>200</b>	38.34	0.193
	<b>220</b>	44.57	0.214
	<b>311</b>	64.73	0.116
	<b>222</b>	77.96	0.165



Gambar 5.24 Perbandingan ukuran butir aluminium setelah proses ECAP dengan cetakan yang berbeda (diamati dengan X-RD)

Distribusi ukuran butir pada aluminium hasil ECAP dengan cetakan jenis 2 menghasilkan ukuran butir rata-rata lebih kecil daripada aluminium yang diproses ECAP dengan cetakan 1. Ukuran butir paling kecil terjadi pada bagian tengah dan bagian dalam cetakan.

Butir aluminium pada bagian dalam memiliki ukuran butir paling kecil hal ini karena konsentrasi tegangan yang terjadi sangat besar sehingga butir yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Pada proses ECAP dengan sudut *channel*  $105^\circ$  konsentrasi tegangan berkurang karena sudut tersebut sehingga butir yang dihasilkan tidak terlalu berbeda dibandingkan dengan bagian yang lain, tetapi pada cetakan dengan sudut *channel*  $90^\circ$  konsentrasi tegangan sangat tinggi sehingga ukuran butirnya jauh lebih kecil dibandingkan dengan bagian lain.

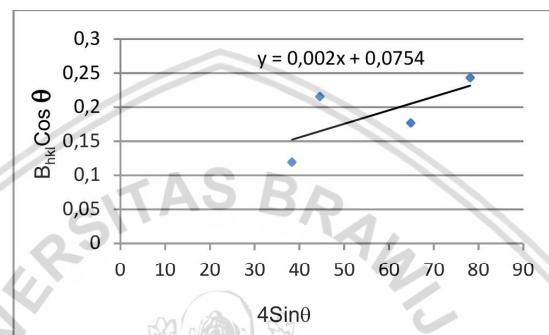
Regangan geser pada proses ECAP paling besar terjadi pada bagian tengah, regangan geser ini dipengaruhi oleh sudut *channel* pada proses ECAP dengan sudut *channel*  $90^\circ$  mengalami regangan geser lebih besar daripada proses ECAP dengan cetakan yang memiliki sudut *channel*  $105^\circ$ . Hal ini mempengaruhi ukuran butir yang terjadi, regangan geser yang besar akan menghasilkan butir yang lebih kecil.

### 5.3.2 Regangan Kisi

Regangan kisi pada aluminium disebabkan oleh tegangan sisa dan kerapatan dislokasi. Energi yang tersimpan paling besar disebabkan oleh dislokasi (Hull and DJ Bacon 2011) (Benzerga and Bre 2005), makin besar regangan kisi

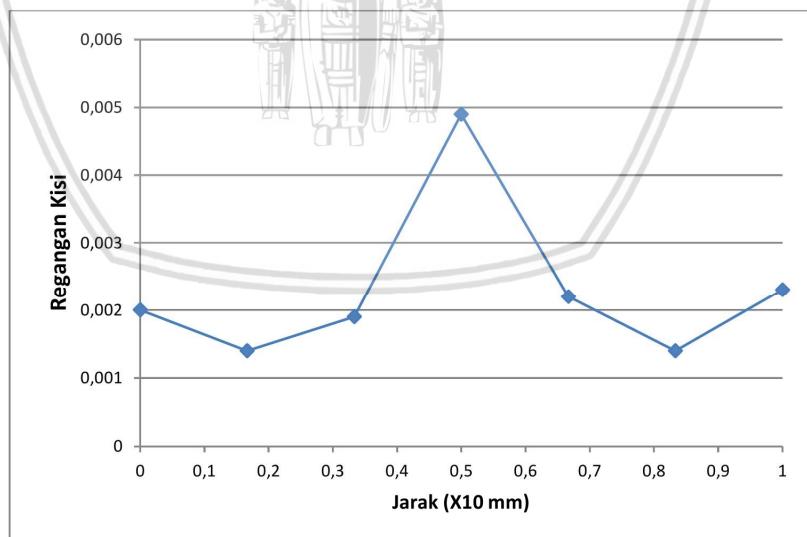
makin tinggi kepadan dislokasi sehingga makin tinggi energi yang dimiliki oleh logam tersebut.

Regangan kisi pada aluminium hasil proses ECAP dihitung menggunakan data dari tabel 5.7. Strain kisi dihitung dengan membandingkan persamaan fit linier dengan persamaan (3) untuk tujuh sampel yang berbeda. Gambar 9 menunjukkan plotting untuk spesimen yang bisa ditunjukkan. Dari garis lurus sesuai dengan data, ukuran kristal diperkirakan dari intercept y, dan regangan  $\epsilon$ , dari kemiringan bugar. Tekanan kisi untuk posisi 1 Kita dapat menunjukkan pada gambar 10 strain kisi adalah 0,002.



Gambar 5.25 Plot Williamson and Hall untuk Aluminium setelah proses ECAP (posisi 1)

Hasil perhitungan regangan kisi dari tujuh posisi aluminium ditunjukkan pada gambar 5.26.



Gambar 5.26 Distribusi regangan kisi pada penampang Aluminium

Tekanan kisi aluminium setelah proses ECAP bergantung pada regangan. Perhitungan dari difraksi X-RD, strain kisi tertinggi terjadi pada garis tengah spesimen. Tekanan kisi tertinggi pada aluminium setelah proses ECAP sama dengan regangan pada aluminium dari hasil simulasi.

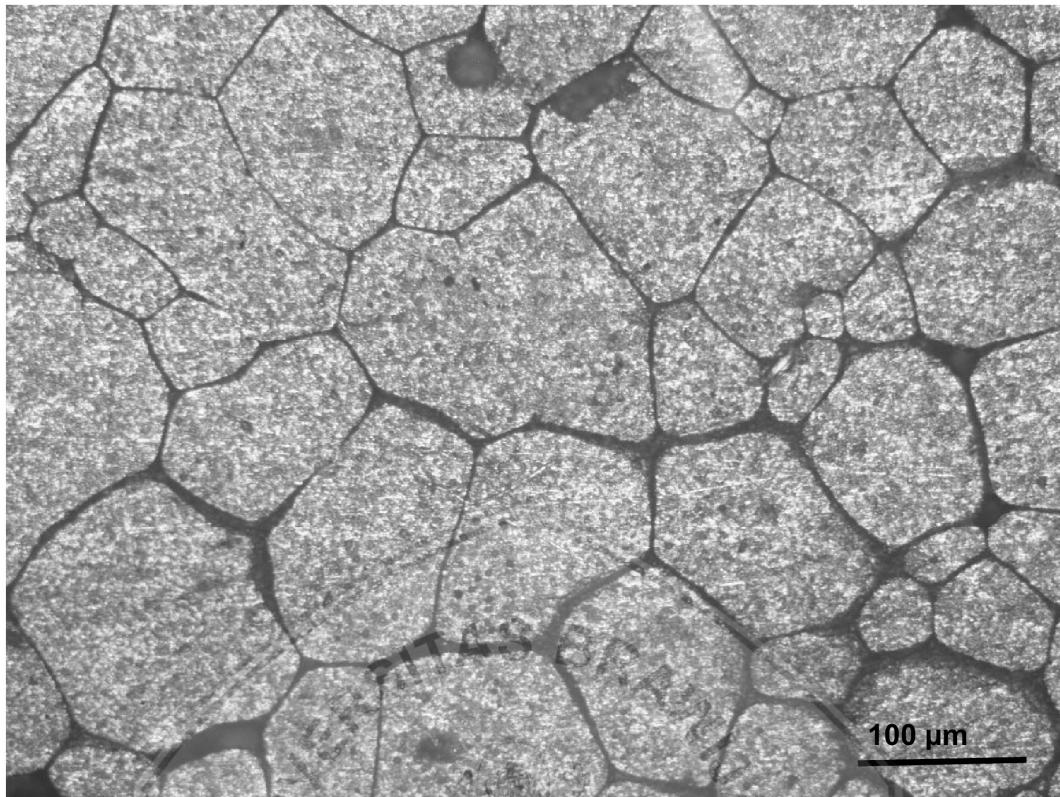
Simulasi proses ECAP dengan perangkat lunak elemen hingga menunjukkan regangan tertinggi kedua terjadi pada bagian dalam spesimen. Tegangan kisi maksimum pada aluminium setelah proses ECAP di tengah spesimen (posisi 4), hal ini disebabkan oleh tegangan geser. Tegangan geser di bagian tengah spesimen lebih tinggi dibandingkan dengan sisi spesimen yang lain. Tegangan geser pada aluminium menyebabkan dislokasi yang meningkat pada aluminium, dislokasi pada logam (aluminium) akan meningkatkan regangan kisi pada logam.

Regangan kisi tertinggi kedua pada aluminium ada di sisi bawah spesimen, di sisi ini terjadi gesekan tinggi antara spesimen dan cetakan. mengurangi gesekan antara spesimen dan cetakan adalah faktor yang paling penting dalam proses ECAP jika gesekan ke proses ECAP lebih tinggi dan untuk mengurangi gesekan harus menggunakan pelumas yang tepat. Pelumas harus memiliki gesekan rendah dan dapat menahan tekanan yang sangat tinggi.

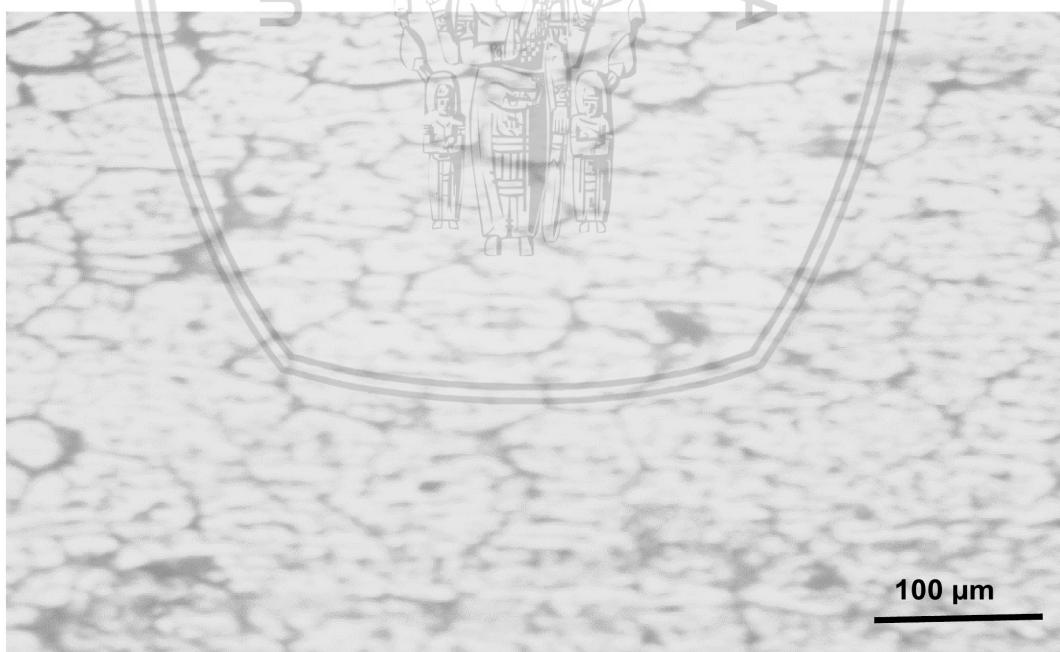
Sisi lain dari spesimen yang memiliki strain kisi besar adalah sisi dalam, di sisi ini terjadi konsentrasi tegangan, konsentrasi tegangan akan membuat tegangan lebih tinggi terjadi dan membuat dislokasi lebih tinggi pula.

### 5.3.3 Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik

Pengamatan dengan mikroskop optik dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik logam (*metallurgical microscope*). Hasil foto micro pada aluminium hasil proses ecap dapat dilihat pada gambar 5.27. Hasil foto mikro menunjukkan butir pada aluminium memanjang, hal ini menunjukkan terjadi proses deformasi karena regangan geser. Regangan geser menyebabkan ukuran butir juga menjadi lebih kecil.



Gambar 5.27 Struktur Mikro Aluminium Hasil Annealing



Gambar 5.28 Struktur mikro Aluminium setelah mengalami proses ECAP

Ukuran butir aluminium setelah proses annealing adalah 156 μm sedangkan alumium setalah proses ECAP adalah 142 μm. Perbedaan ukuran butir antara sebelum proses ECAP dan sesudah tidak banyak tetapi terjadi perbedaan kekerasan yang cukup tinggi hal ini karena pada saat proses ECAP

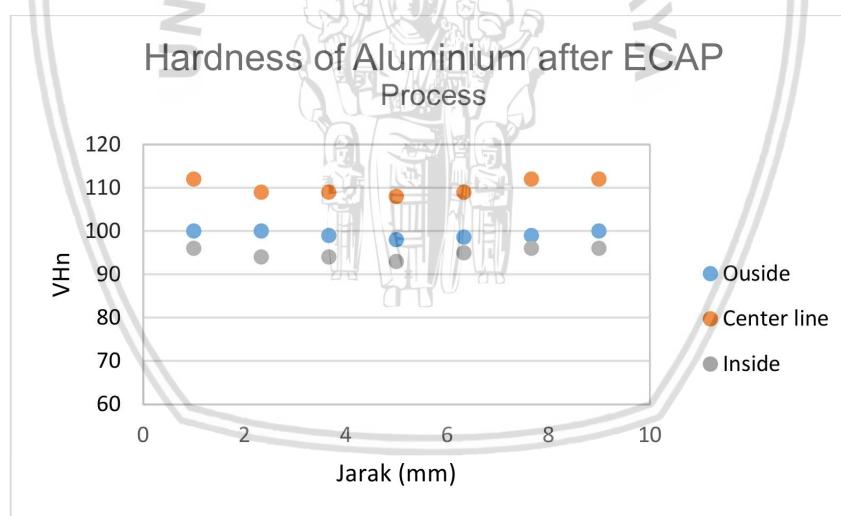


mengalami proses regangan yang cukup tinggi sehingga kekerasannya meningkat. Kenaikan ini disebabkan oleh kenaikan jumlah dislokasi makin tinggi dislokasi makin keras logam tersebut. Kenaikan dislokasi dapat dilihat kenaikan regangan kisi pada aluminium hasil proses ECAP.

Hasil foto mikro dengan mikroskop optik menunjukkan terjadi perbedaan ukuran butir pada potongan melintang aluminium. Pola distribusi ukuran butir sesuai dengan perhitungan data dari X-RD. Hal ini menunjukkan X-RD tidak dapat digunakan untuk mengukur ukuran butir dengan akurat tetapi dapat digunakan untuk memprediksi distribusi ukuran butir pada aluminium hasil ECAP. Ketidak akuran ini terjadi karena keterbatasan peralatan yang digunakan (mesin X-RD) karena lebar sudut antar difraksi  $0.2^\circ$  sehingga kemungkinan peak terpengaruh oleh puncak yang lain sangat besar sehingga pengukuran FWHM kurang akurat yang berakibat perhitungan terhadap ukuran butir kurang akurat..

### 5.3.3 Pengujian Keras Mikro

Pengujian microhardness pada penampang melintang aluminium setelah proses ECAP ditunjukkan pada gambar 5.29.



Gambar 5.29 Kekerasan Aluminium setelah mengalami proses ECAP

Kekerasan aluminium pada penampang melintang aluminium setelah mengalami proses menunjukkan kekerasan tertinggi terjadi pada garis tengah billet, sedangkan pada bagian luar (1 mm dari tepi) memiliki kekerasan yang lebih tinggi daripada sisi dalam. Distribusi kekerasan pada aluminium sesuai dengan distribusinya pada pemodelan ECAP. Kekerasan tertinggi terjadi di garis tengah potongan pekerjaan. Sedangkan yang terendah terjadi pada bagian dalam billet. Distribusi kekerasan pada garis tengah depent pada jarak ke tepi, kekerasan pada highert tepi daripada di tengah. Hal ini disebabkan adanya gesekan antara billet

dan die. Itu terjadi di luar dan di dalam billet. Distribusi kekerasan ini terkait dengan distribusi regangan, dapat diamati bahwa strain yang meningkat menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi.(Hatch 1995).

#### 5.4 Proses Semi Solid Forming

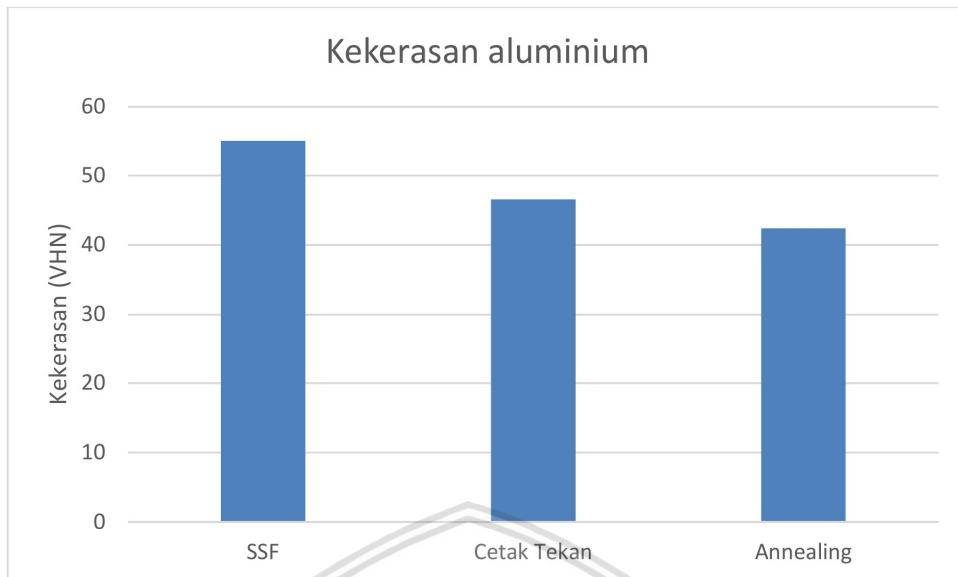
Proses pembentukan pada logam pada logam yang memiliki dua fasa (fasa padat dan fasa cair) dikenal dengan proses semi solid forming (SSF). Proses ini dilakukan pada logam yang dipanaskan sampai temperatur semi solid pada aluminium 5052 pemanasan dilakukan sampai temperatur 650 °C.



Gambar 5.30 Aluminium hasil proses SFF

##### 5.4.1 Uji Keras

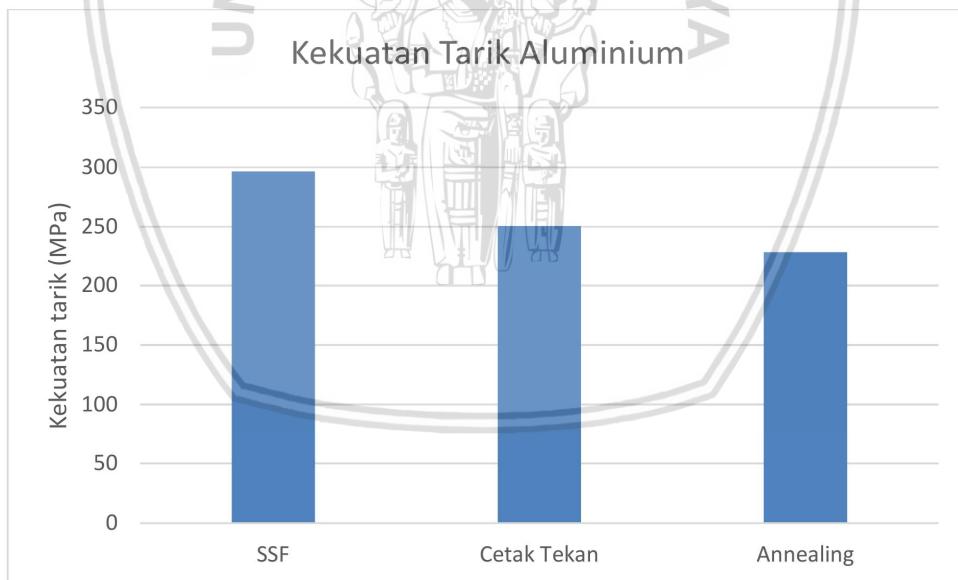
Kekerasan aluminium hasil proses CAP dapat dilihat pada gambar 5.31, kekerasan aluminium hasil semisoild forming lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium hasil proses cetak tekan. Hal ini karena perbedaan proses dimana aluminium cetak tekan dihasilkan dari logam cair sedangkan proses SSF dihasilkan dari logam semi padat yang memiliki ukuran butir kecil.



Gambar 5.31 Kekerasan Aluminium hasil proses SSF

#### 5.4.2 Uji Tarik

Hasil uji tarik terhadap aluminium hasil proses semi solid forming dapat dilihat pada gambar 5.28. Dari hasil uji tarik menunjukkan kekuatan tarik aluminium hasil proses SSF dapat dilihat pada gambar 5.32



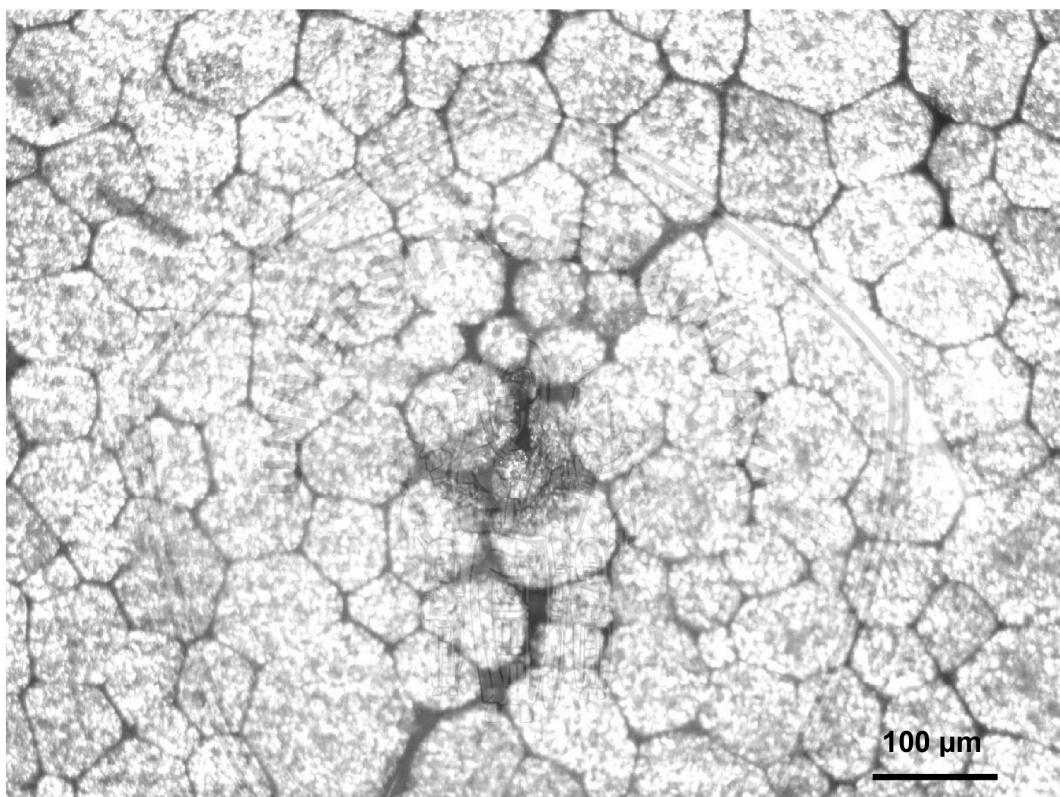
Gambar 5.32 Kekuatan Tarik Aluminium

Aluminium hasil proses *semi solid forming* memiliki kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium hasil anneal maupun aluminium hasil proses cetak tekan. Hal ini menunjukkan perubahan struktur mikro hasil proses ECAP berpengaruh terhadap kekuatan tarik aluminium. Menurut Ashouri (Ashouri et al. 2008) hal ini disebabkan oleh ukuran butir aluminium hasil pemanasan proses ECAP lebih kecil daripada aluminium *annealing*, hal inilah yang menyebabkan

kekuatan tarik aluminium hasil proses SSF lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium setelah proses *annealing*.

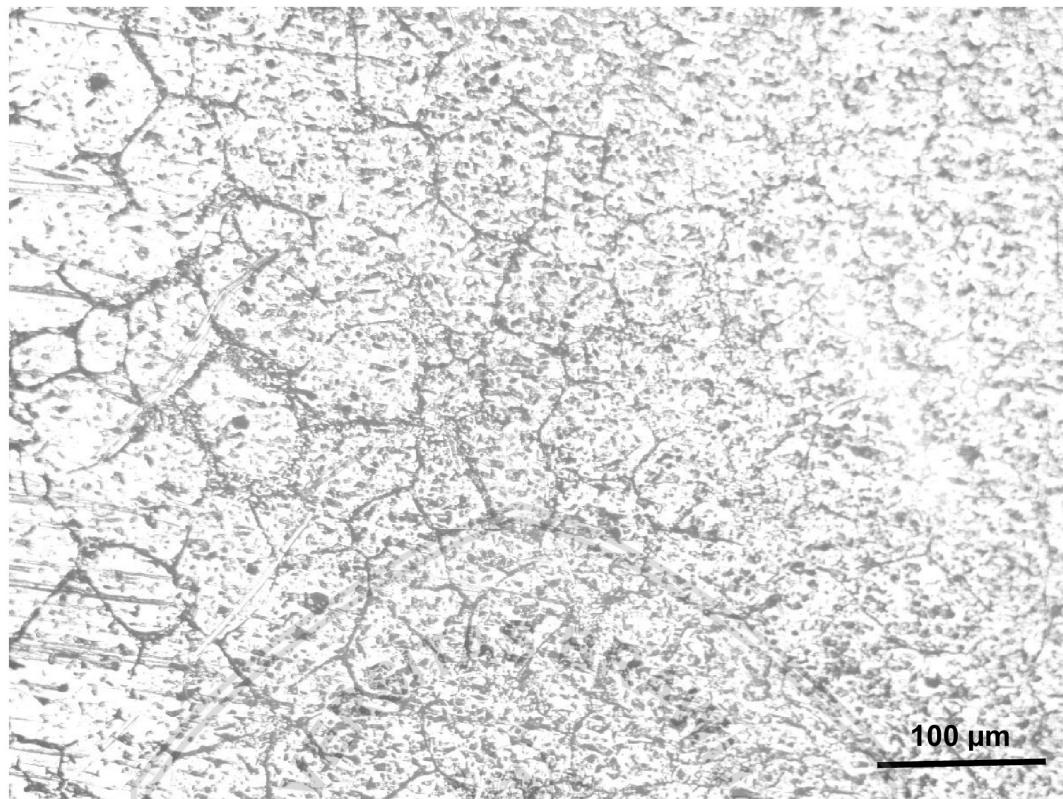
#### 5.4.3 Foto Mikro

Foto struktur aluminium sebelum proses SFF dapat dilihat pada gambar 5.33 sedangkan struktur mikro aluminium setelah SFF dapat dilihat pada gambar 5.34. Dari hasil pengukuran ukuran butir dengan metod ASTM E 112 diketahui ukuran butir aluminium sebelum proses SFF adalah 116  $\mu\text{m}$  sedangkan ukuran butir aluminium adalah proses SFF adalah 114  $\mu\text{m}$ .



Gambar 5.33 Struktur mikro Aluminium sebelum SFF

Kekerasan dan kekuatan tarik pada logam berhubungan dengan ukuran butir. Pada aluminium hasil proses SFF memiliki kekerasan dan kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium setelah annealing. Dari hasil pengukuran ukuran butir pada aluminium hasil SFF lebih kecil dari aluminium hasil annealing, logam dengan ukuran butir yang lebih kecil mempunyai kekuatan tarik lebih tinggi hal ini sesuai dengan hukum Hall-Petch.



Gambar 5.34 Struktur mikro Aluminium hasil SFF

Peningkatan kekuatan ini karena pada logam yang memiliki ukuran butir yang lebih kecil memiliki batas butir yang lebih banyak, dengan banyaknya batas butir maka dislokasi akan lebih banyak tertahan (lebih sulit untuk bergerak). Pergerakan dislokasi inilah yang mempengaruhi kekerasan dan kekuatan tarik makin susah dislokasi untuk bergerak makin keras dan kuat logam tersebut.

## BAB VI

### KESIMPULAN dan SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

1. Hasil modelling proses ECAP dengan sudut *channel* ( $\Phi$ ) =  $105^\circ$ , radius fillet dalam ( $\psi_1$ ) = 1,5 mm, radius fillet dalam ( $\psi_2$ ) = 5 mm, dan gesekan 0,025 yang menghasilkan aluminium dengan ukuran butir kecil dan homogen.
2. Hasil pengukuran distribusi kekerasan aluminium hasil proses ECAP dengan cetakan yang dihasilkan dari proses modeling didapatkan bahwa pada potongan melintang menunjukkan kekerasan aluminium paling tinggi terjadi pada sisi luar dan sisi dalam aluminium.
3. Struktur mikro aluminium hasil proses ECAP berbentuk memanjang dengan besar butir 142  $\mu\text{m}$ .
4. Kekerasan aluminium hasil proses SSF adalah 55.15 HRH sedangkan kekuatan tariknya 296.6 Mpa lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium hasil proses *annealing*. Ukuran butir aluminium sebelum SSF adalah 156  $\mu\text{m}$  sedangkan ukuran butir aluminium setelah proses SFF adalah 114  $\mu\text{m}$

#### 6.2 Saran

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut pada proses ECAP dengan 2 dan 4 langkah
2. Dilakukan penelitian dengan ukuran benda kerja lebih besar sehingga dapat digunakan untuk membuat produk yang cukup besar

## DAFTAR PUSTAKA

- Aminnudin, Mardjono Siswosuwarno, and Arif Basuki. 2003. "Kerapatan Dislokasi Pada Aluminium Yang Dideformasi Plastis Dengan Laju Regangan Tinggi." ITB.
- Ashouri, S., M. Nili-Ahmabadi, M. Moradi, and M. Iranpour. 2008. "Semi-Solid Microstructure Evolution during Reheating of Aluminum A356 Alloy Deformed Severely by ECAP." *Journal of Alloys and Compounds* 466 (1–2): 67–72. doi:10.1016/j.jallcom.2007.11.010.
- Balasundar, I., and T. Raghu. 2010. "Effect of Friction Model in Numerical Analysis of Equal Channel Angular Pressing Process." *Materials and Design* 31 (1). Elsevier Ltd: 449–57. doi:10.1016/j.matdes.2009.05.029.
- Benzerga, A A, and Y Bre. 2005. "The Stored Energy of Cold Work : Predictions from Discrete Dislocation Plasticity" 53: 4765–79. doi:10.1016/j.actamat.2005.07.011.
- Binder, Kurt, Gerhard Inden, Yves J. M. Bréchet, Reinhard Kampmann, Efim Brener, Martin Kunz, Luc Delaey, Wilfried Kurz, and Peter Fratzl. 2001. *Phase Transformation in Materials*. Edited by Gernot Kostorz. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
- Callister, William D., David G Rethisch, William D Jr. Callister, David G. Rethwisch, William D. Callister, Jr., and David G Rethisch. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction. Materials Science and Engineering*. 7th ed. Vol. 94. Danver: John Wiley and Sons. doi:10.1016/0025-5416(87)90343-0.
- Chan Choi, Jae, and Hyung Jin Park. 1998. "Microstructural Characteristics of Aluminum 2024 by Cold Working in the SIMA Process." *Journal of Materials Processing Technology* 82 (1–3): 107–16. doi:10.1016/S0924-0136(98)00026-0.
- Cho, W.G., and C.G. Kang. 2000. "Mechanical Properties and Their Microstructural Evaluation in the Thixoforming Process of Semisolid Aluminium Alloy." *J. Mater. Proc. Technol.* 105 (1): 269–77. doi:10.1016/S0924-0136(00)00577-X.
- EI-Danaf, Ehab A. 2008. "Mechanical Properties and Microstructure Evolution of 1050 Aluminum Severely Deformed by ECAP to 16 Passes." *Materials Science and Engineering A* 487 (1–2): 189–200. doi:10.1016/j.msea.2007.10.013.
- Fan, Z. 2002. "Semisolid Metal Processing." *International Materials Reviews* 47 (2). Taylor & Francis: 49–85. doi:10.1179/095066001225001076.
- Furukawa, Minoru, Yoshinori Iwahashi, Zenji Horita, Minoru Nemoto, Nikolai K. Tsenev, Ruslan Z. Valiev, and Terence G. Langdon. 1997. "Structural Evolution and the Hall-Petch Relationship in an Al-Mg-Li-Zr Alloy with Ultra-Fine Grain Size." *Acta Materialia* 45 (11): 4751–57. doi:10.1016/S1359-6454(97)00120-1.
- Gurau, Gheorghe, Carmela Gurau, and Dinel Tanase. 2009. "Severe Plastic Deformed Pure Aluminum by Equal Channel Angular Pressing." *Materials Science and Engineering A*, 0–2.
- Hashim, J, L Looney, and M S J Hashmi. 2002. "Particle Distribution in Cast Metal

- Matrix Composites — Part I.” *Journal of Materials Processing Technology* 123 (January): 251–57.
- Hatch, John E. 1995. *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy*. ohio: ASM International. doi:10.1361/appm1984p001.
- Hirt, Gerhard, and Reiner Kopp. 2009. *Thixoforming: Semi-Solid Metal Processing*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/9783527623969.
- Hull, D, and DJ Bacon. 2011. *Introduction to Dislocations*. 5th ed. Oxford.
- Hutton, David V. 2004. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. 1st ed. New York: Mc Graw-Hill Book Co.
- Iwahashi, Y., Z. Horita, M. Nemoto, and T.G. Langdon. 1997. “An Investigation of Microstructural Evolution during Equal-Channel Angular Pressing.” *Acta Materialia* 45 (11): 4733–41. doi:10.1016/S1359-6454(97)00100-6.
- Iwahashi, Yoshinori, Zenji Horita, Minoru Nemoto, and Terence G Langdon. 1998. “The Process of Grain Refinement in Equal-Channel Angular Pressing.” *Acta Materialia* 46 (9): 3317–31. doi:10.1016/S1359-6454(97)00494-1.
- Iwahashi, Yoshinori, Jingtao Wang, Zenji Horita, Minoru Nemoto, and Terence G Langdon. 1996. “Principle of Equal-Channel Angular Peessing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials.” *Scripta Materialia* 35 (2): 143–46. doi:10.1016/1359-6462(96)00107-8.
- Jiang, Jufu, Ying Wang, Jianjun Qu, Zhiming Du, Yi Sun, and Shoujing Luo. 2010. “Microstructure Evolution of AM60 Magnesium Alloy Semisolid Slurry Prepared by New SIMA.” *Journal of Alloys and Compounds* 497 (1–2). Elsevier B.V.: 62–67. doi:10.1016/j.jallcom.2010.02.099.
- Kalpakjian, Serope, Steven R. S.R. Schmid, and Hamidon Musa. 2009. *Manufacturing Engineering and Technology*. Singapore: Prentice Hall.
- Kang, C. G., P. K. Seo, and Y. P. Jeon. 2005. “Thixo Diecasting Process for Fabrication of Thin-Type Component with Wrought Aluminum Alloys and Its Formability Limitation.” *Journal of Materials Processing Technology* 160 (1): 59–69. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.03.032.
- Karpuz, P., C. Simsir, and C. Hakan Gur. 2009. “Investigating the Effects of Hardening of Aluminium Alloys on Equal-Channel Angular pressing—A FInite-Element Study.pdf.” *Material Science and Engineering A* 503: 148–51.
- Lloyd, D. J., H. Lagace, A. McLeod, P.L. L Morris, D.J. LLyod, H. Lagage, A. McLeod, and P.L. L Morris. 1989. “Microstructural Aspects of Aluminium-Silicon Carbide Particulate Composites Produced by a Casting Method.” *Materials Science and Engineering A* 107 (C): 73–80. doi:10.1016/0921-5093(89)90376-6.
- Luis-Pérez, C. J., R. Luri-Irigoyen, and D. Gastón-Ochoa. 2004. “Finite Element Modelling of an Al-Mn Alloy by Equal Channel Angular Extrusion (ECAE).” *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (1–3): 846–52. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.115.
- Luri, R., C. J. Luis Pérez, D. Salcedo, I. Puertas, J. León, I. Pérez, and J. P. Fuertes. 2011. “Evolution of Damage in AA-5083 Processed by Equal Channel Angular Extrusion Using Different Die Geometries.” *Journal of Materials Processing Technology* 211 (1). Elsevier B.V.: 48–56. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.08.032.

- Ming-xing, Wang, Pang Jin-hui, and L I U Zhi-yong. 2010. "Grain Refining Action of Ti Existing in Electrolytic Low-Titanium Aluminum with Al-4B Addition for Superheated Al Melt." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 20 (6). The Nonferrous Metals Society of China: 950–57. doi:10.1016/S1003-6326(09)60241-7.
- Nakashima, Kiyotaka, Zenji Horita, Minoru Nemoto, and T.G. Langdon. 2000. "Development of a Multi-Pass Facility for Equal-Channel Angular Processing to High Total Strains." *Materials Science & Engineering A* 281 (1–2): 82–87. doi:10.1016/S0921-5093(99)00744-3.
- Patil Basavaraj, V., Uday Chakkingal, and T. S. Prasanna Kumar. 2009. "Study of Channel Angle Influence on Material Flow and Strain Inhomogeneity in Equal Channel Angular Pressing Using 3D Finite Element Simulation." *Journal of Materials Processing Technology* 209 (1): 89–95. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.01.031.
- Porter, D. A., and K. E. Easterling. 1992. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2nded. Chapman & Hall. doi:10.1007/978-1-4899-3051-4.
- Rusz, S, and K Malanik. 2007. "Using Severe Plastic Deformation to Prepare of Ultra Fine - Grained Materials by ECAP Method." *Reading* 28 (11): 683–86.
- Ryan, Thomas P. 2011. *Statistical Methods for Quality Improvement*. 3rd ed. New Jersey: John Willey and Sons.
- Sabirov, I. O. Kolednik, RZ Valiev, R Pippan, R.Z. Valev, and Pippan R. 2005. *Equal Channel Angular Pressing of Metal Matrix Composites : Effect on Particle Distribution and Fracture Toughness*. *Acta Materialia*. Vol. 53. doi:10.1016/j.actamat.2005.07.010.
- Santosa, Abel D., Ferreira Duarte, Ana Reisa, Barata da Rochaa, Rui Netoa, and Ricardo Paivaa. 2001. "The Use of Finite Element Simulation for Optimization of Metal Forming and Tool Design." *Journal of Materials Processing Technology* 119.
- Segal, V.M. 1999. "Equal Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation." *Materials Science and Engineering: A* 271 (1): 322–33. doi:10.1016/S0921-5093(99)00248-8.
- Singh, P. S., R. L. Narayan, Indrani Sen, D. C. Hofmann, and U. Ramamurty. 2012. "Effect of Strain Rate and Temperature on the Plastic Deformation Behaviour of a Bulk Metallic Glass Composite." *Materials Science and Engineering A* 534: 476–84. doi:10.1016/j.msea.2011.11.096.
- Sirong, Yu, Li Dongcheng, and N. Kim. 2006. "Microstructure Evolution of SIMA Processed Al2024." *Materials Science and Engineering A* 420 (1–2): 165–70. doi:10.1016/j.msea.2006.01.061.
- Soliman, Mahmoud S., Ehab A. El-danaf, and Abdulhakim A. Almajid. 2012. "Enhancement of Static and Fatigue Strength of 1050 Al Processed by Equal-Channel Angular Pressing Using Two Routes." *Materials Science and Engineering A* 532. Elsevier B.V.: 120–29. doi:10.1016/j.msea.2011.10.072.
- Stoica, G. M., D. E. Fielden, R. McDaniels, Y. Liu, B. Huang, P. K. Liaw, C. Xu, and T. G. Langdon. 2005. "An Analysis of the Shear Zone for Metals Deformed by Equal-Channel Angular Processing." *Materials Science and Engineering A* 410–411: 239–42. doi:10.1016/j.msea.2005.08.186.
- Suo, Tao, Yulong Li, Qiong Deng, and Yuanyong Liu. 2007. "Optimal Pressing

- Route for Continued Equal Channel Angular Pressing by Finite Element Analysis." *Materials Science and Engineering A* 466 (1–2): 166–71. doi:10.1016/j.msea.2007.02.068.
- Suo, Tao, Yulong Li, Yazhou Guo, and Yuanyong Liu. 2006. "The Simulation of Deformation Distribution during ECAP Using 3D Finite Element Method." *Materials Science and Engineering A*. doi:10.1016/j.msea.2006.06.035.
- Suryanaraya, C., M.G. Norton, and M. Suryanarayana, C., Grant Norton. 1998. *X-Ray Diffraction A Practical Approach. Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53. New York: Phenom Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Valiev, Ruslan Z. 1997. "Structure and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metasi." *Material Science and Engineering A* 234–236: 59–66. doi:10.1016/S0921-5093(97)00183-4.
- Wang, G., S. D. Wu, L. Zuo, C. Esling, Z. G. Wang, and G. Y. Li. 2003. "Microstructure, Texture, Grain Boundaries in Recrystallization Regions in Pure Cu ECAE Samples." *Materials Science and Engineering A* 346 (1–2): 83–90. doi:10.1016/S0921-5093(02)00521-X.
- Xu, Cheng, Steven Schroeder, Patrick B. Berbon, and Terence G. Langdon. 2010. "Principles of ECAP-Conform as a Continuous Process for Achieving Grain Refinement: Application to an Aluminum Alloy." *Acta Materialia* 58 (4). Acta Materialia Inc.: 1379–86. doi:10.1016/j.actamat.2009.10.044.
- Zhang, Zuogui, Yoshimi Watanabe, Icksoo Kim, Xiangfa Liu, and Xiufang Bian. 2005. "Microstructure and Refining Performance of an Al-5Ti-0.25C Refiner before and after Equal Channel Angular Pressing." *Metallurgical and Materials Transactions*.

## LAMPIRAN LAMPIRAN



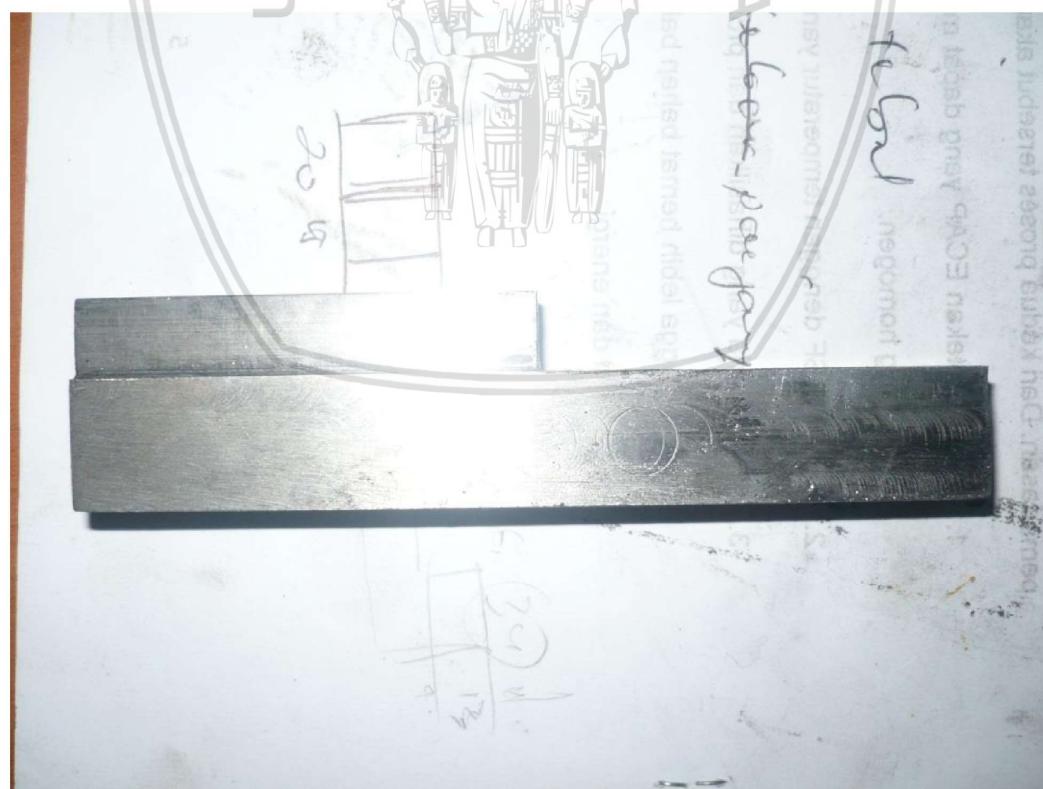
**Lampiran 1 Cetakan ECAP**



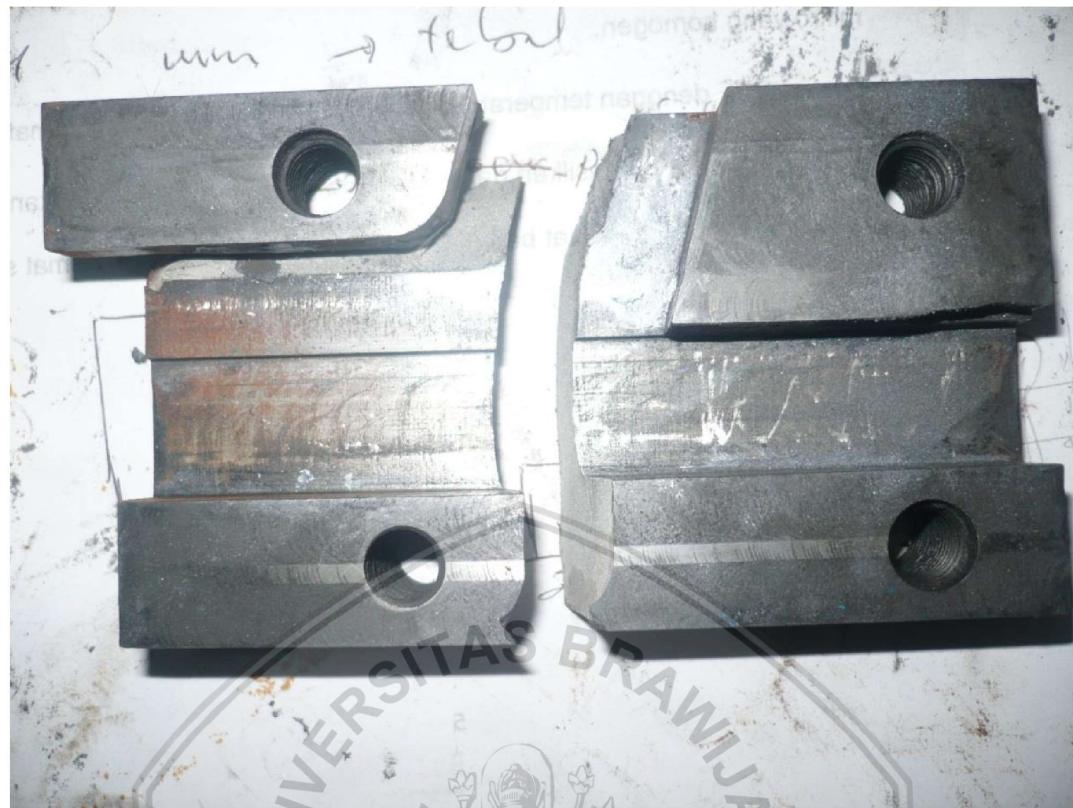
Gambar Desain Cetakan (awal)



Gambar Cetakan Desain 2



Gambar Penekan untuk Cetakan desain 2





Gambar Kerusakan pada Cetakan Desain 2 (2 buah, keduanya rusak)

Lampiran 2 Mesin Press Hidrolik untuk Proses ECAP



Cetakan CAP pada Mesin Hydraulik

Lampiran 3 Cetakan ECAP



Gambar Aluminium hasil proses ECAP pada cetakan

Lampiran 5 Annealing Aluminium pada Dapur Listrik



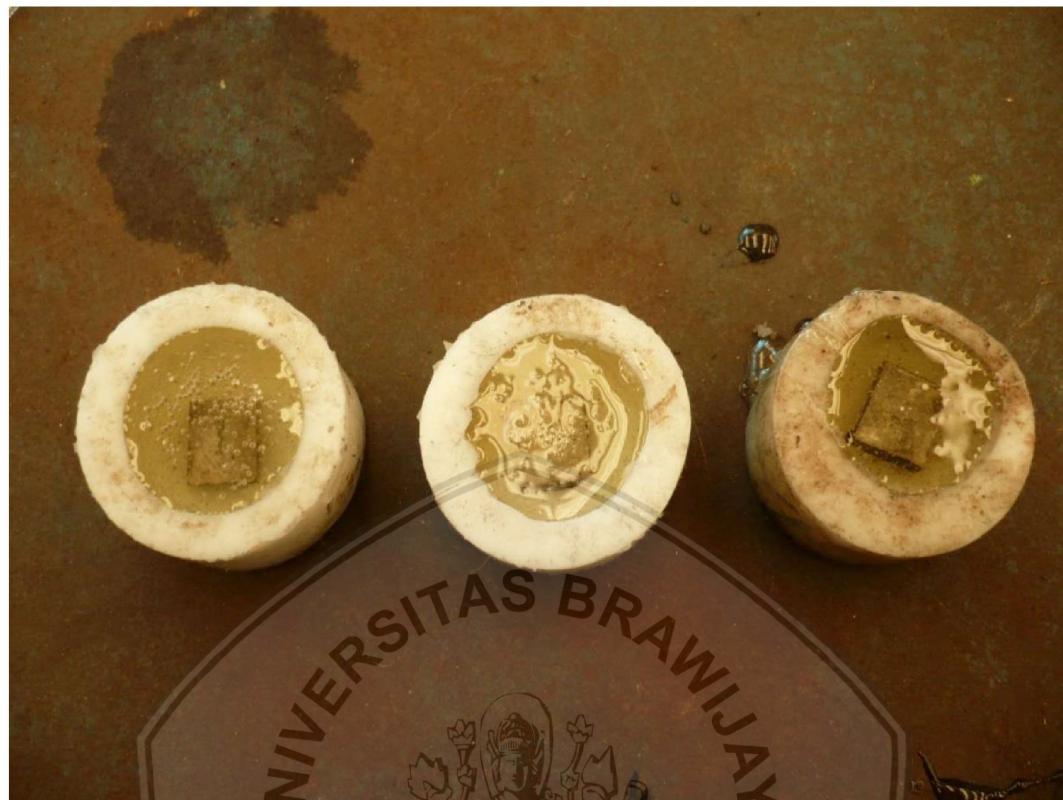
Gambar Annealing Aluminium pada dapur Listrik

Lampiran 5 Setting Temperatur pada Dapur Listrik



Gambar Waktu pemanasan aluminium untuk proses SSF

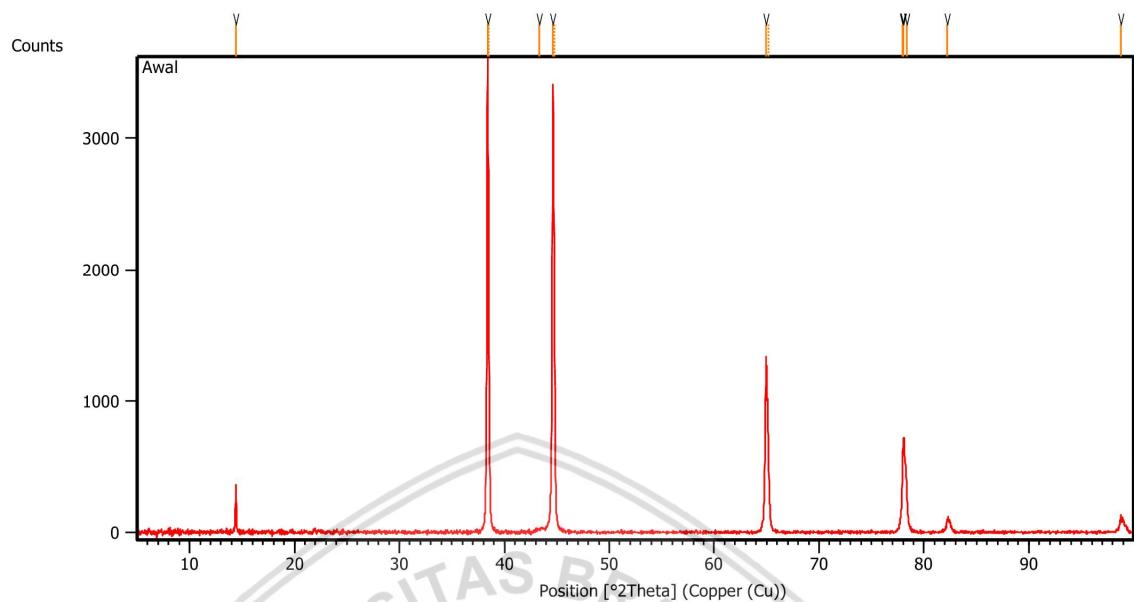
**Lampiran 6 Mounting Aluminium**



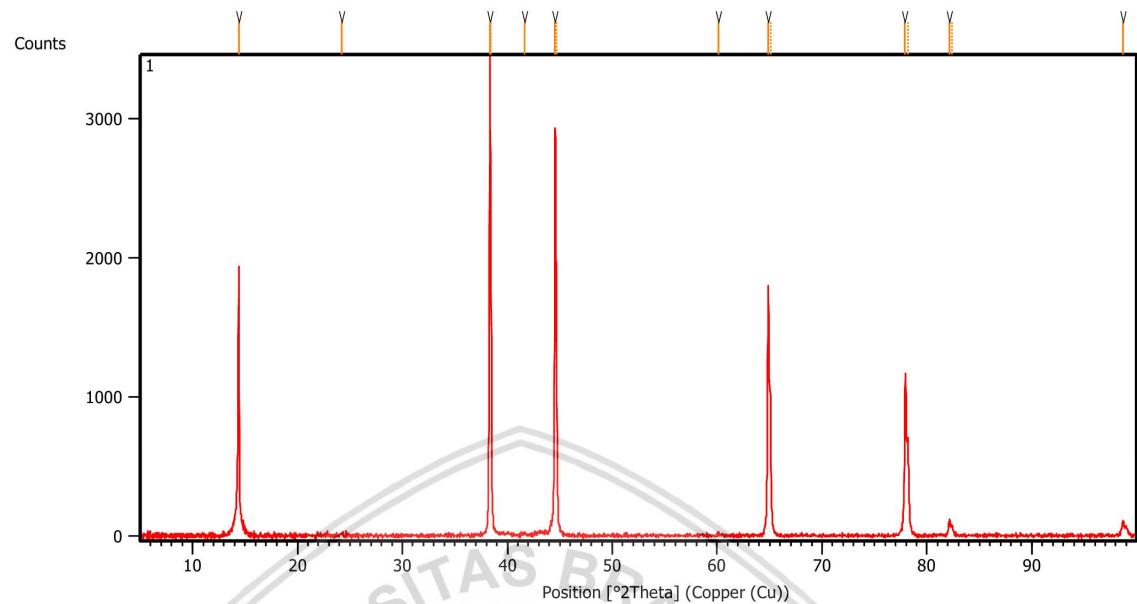
Gambar Mounting potongan aluminium untuk pengamatan struktur mikro

**Lampiran 7 Data X-RD****DATA X-RD**

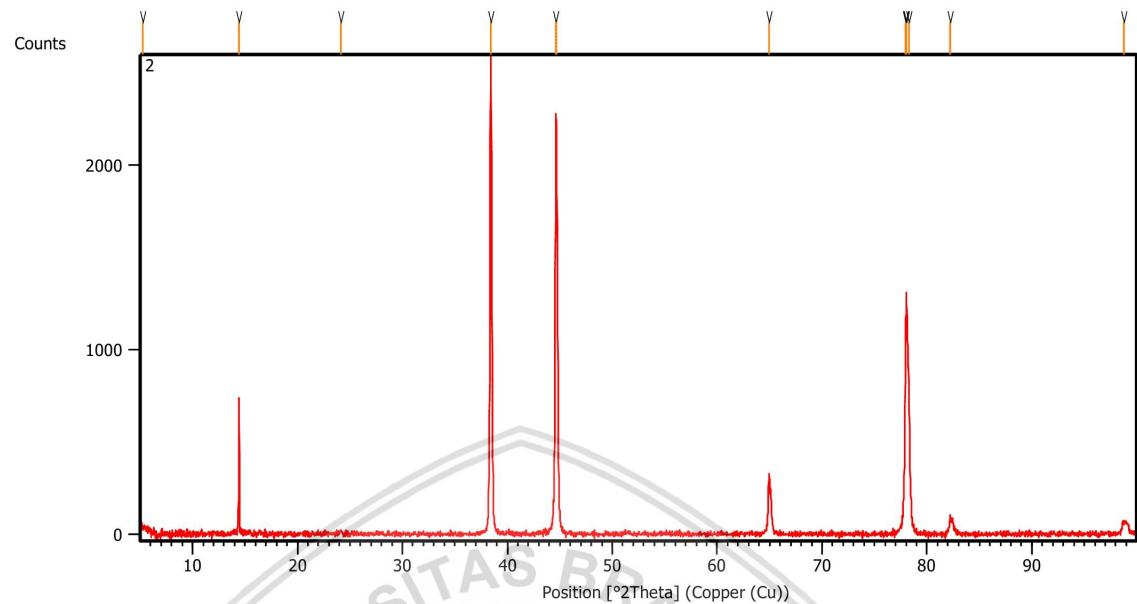
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	5/14/2014 9:49:00 AM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	99.9874
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2500
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractometer Type	XPert MPD
Diffractometer Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

**Full Annealing****Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.4137	360.25	0.0836	6.14530	10.05
38.4060	3583.93	0.1632	2.34193	100.00
38.5121	2287.83	0.0612	2.34153	63.84
43.3442	24.58	0.6528	2.08587	0.69
44.6265	3343.67	0.1632	2.02886	93.30
44.7566	2201.25	0.0816	2.02830	61.42
64.9577	1313.04	0.1836	1.43448	36.64
65.1512	734.46	0.1632	1.43424	20.49
77.9776	586.98	0.1224	1.22431	16.38
78.0726	721.69	0.0612	1.22306	20.14
78.3335	379.12	0.1632	1.21964	10.58
82.2540	104.34	0.2040	1.17115	2.91
98.7443	103.87	0.2040	1.01495	2.90

**Spesimen 1****Peak List:**

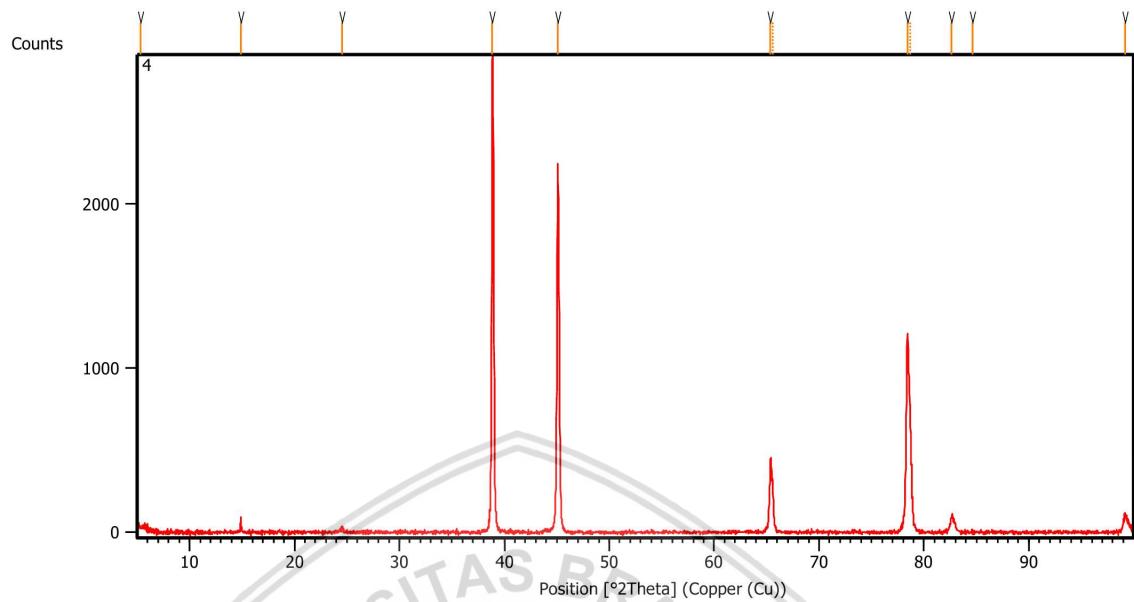
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.3963	1944.57	0.0836	6.15268	57.36
24.2477	11.97	0.2676	3.67068	0.35
38.3337	3390.24	0.1020	2.34618	100.00
38.4600	1792.57	0.0816	2.34458	52.87
41.6555	21.08	0.2448	2.16644	0.62
44.5536	2969.04	0.1020	2.03201	87.58
44.6895	1680.05	0.1020	2.03119	49.56
60.1366	34.89	0.1224	1.53743	1.03
64.8617	1764.80	0.1428	1.43637	52.06
65.0718	1002.16	0.1020	1.43580	29.56
77.9103	1079.43	0.1836	1.22520	31.84
78.1728	719.22	0.1020	1.22478	21.21
82.1441	110.63	0.1224	1.17244	3.26
82.3906	75.86	0.1224	1.17246	2.24
98.6729	88.39	0.2448	1.01549	2.61

**Spesimen 2**

Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.2413	51.45	0.4015	16.86092	2.15
14.4319	734.53	0.0669	6.13758	30.65
24.1416	19.60	0.2007	3.68658	0.82
38.3940	2396.40	0.1171	2.34458	100.00
44.6169	2231.92	0.1224	2.02928	93.14
44.7146	2074.80	0.0816	2.03010	86.58
64.9488	281.96	0.1632	1.43466	11.77
77.9569	1057.88	0.1224	1.22459	44.14
78.0712	1257.87	0.0612	1.22308	52.49
78.2820	725.96	0.1632	1.22031	30.29
82.1922	82.02	0.1632	1.17187	3.42
98.7264	58.52	0.4896	1.01508	2.44

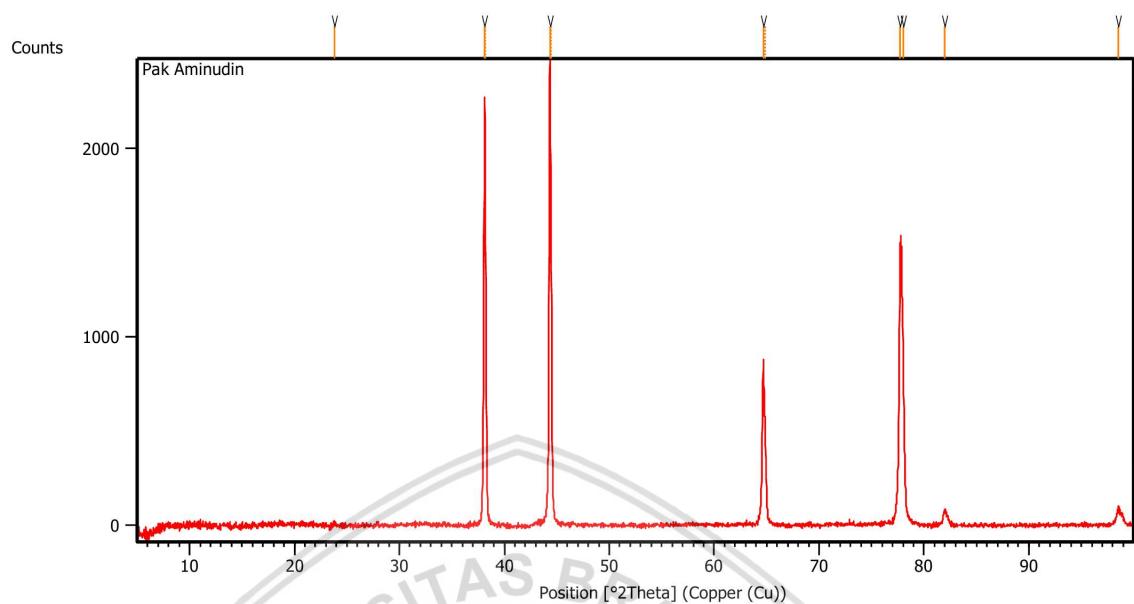
## Specimen 3



## Peak List:

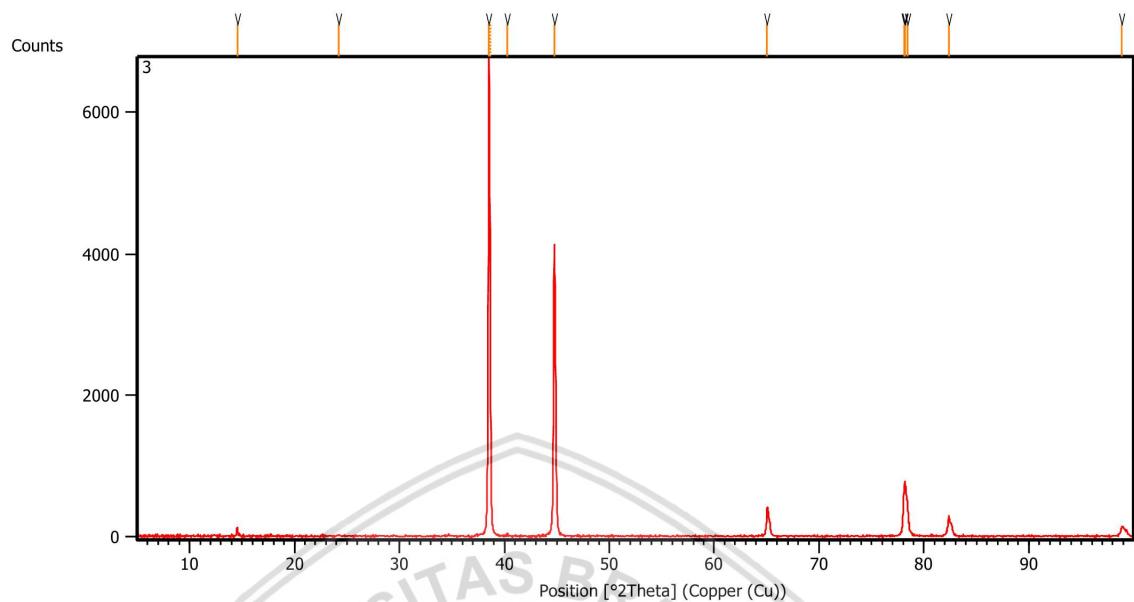
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.3080	34.14	0.8029	16.64915	1.24
14.8714	66.25	0.0669	5.95718	2.41
24.5100	28.37	0.2676	3.63199	1.03
38.8628	2752.12	0.2342	2.31737	100.00
45.0875	2210.88	0.1338	2.01085	80.33
65.3612	430.54	0.1836	1.42660	15.64
65.5952	252.03	0.1224	1.42561	9.16
78.4246	1175.52	0.2040	1.21845	42.71
78.6502	805.61	0.2040	1.21854	29.27
82.6166	90.07	0.1632	1.16692	3.27
84.5870	17.07	0.0612	1.14470	0.62
99.1816	105.06	0.3264	1.01164	3.82

## Spesimen 4

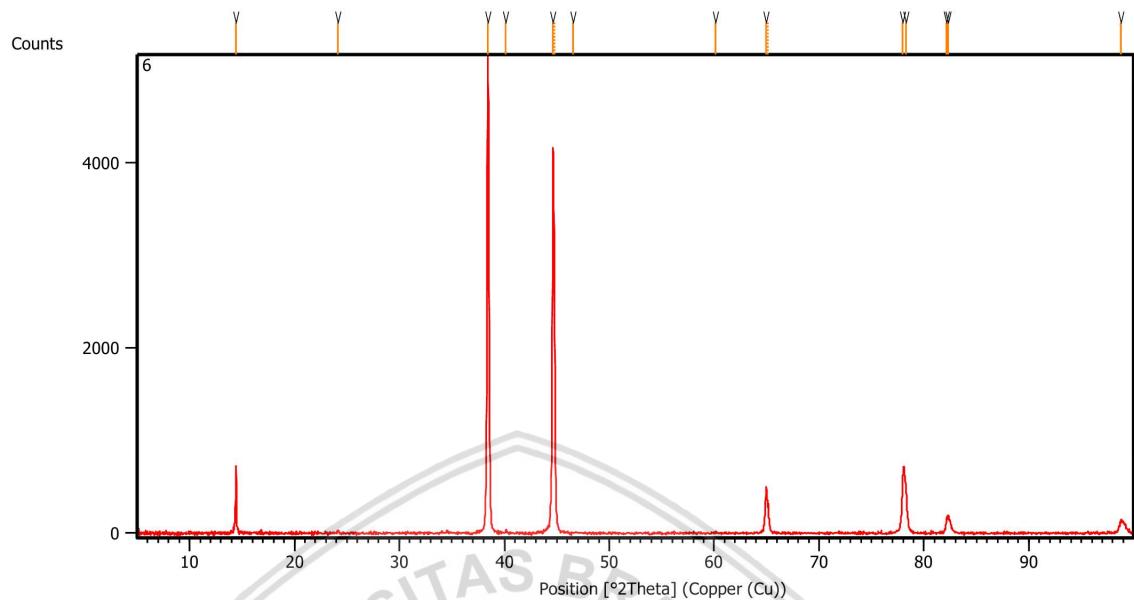


## Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23.8041	15.68	0.2676	3.73807	0.63
38.1220	2266.53	0.1836	2.35872	91.64
38.2211	1545.36	0.0612	2.35868	62.48
44.3466	2473.21	0.2040	2.04102	100.00
44.4602	1618.79	0.0816	2.04113	65.45
64.6746	836.10	0.1632	1.44007	33.81
64.8617	505.17	0.1224	1.43994	20.43
77.7218	1371.53	0.1428	1.22770	55.46
78.0159	934.17	0.1632	1.22381	37.77
81.9339	76.99	0.2856	1.17491	3.11
98.5272	79.73	0.4080	1.01660	3.22

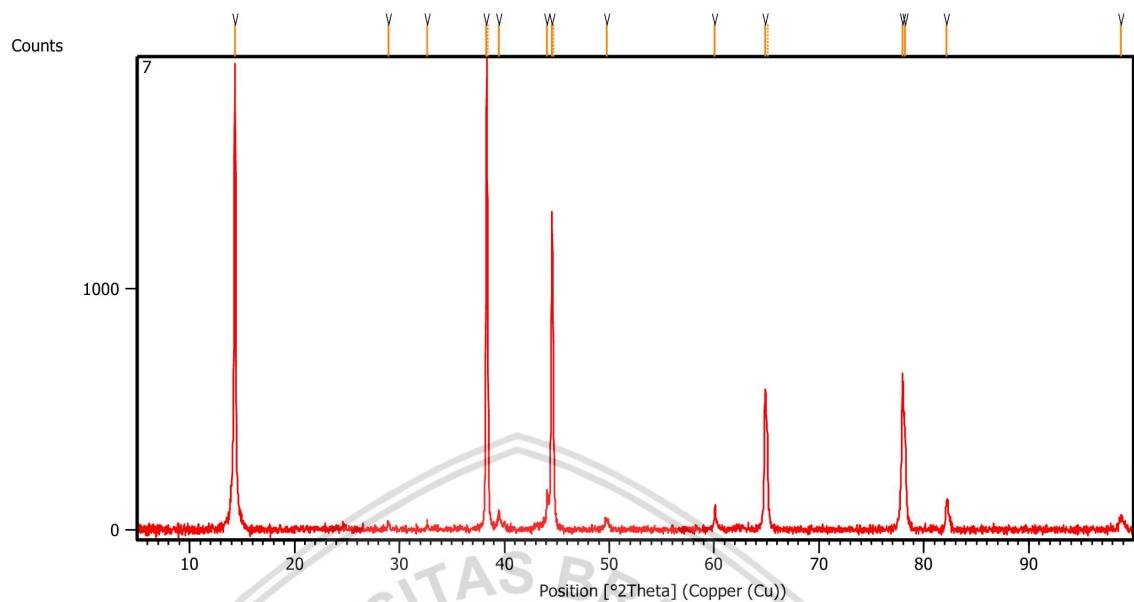
**Spesimen 5****Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.5525	129.32	0.0669	6.08700	1.96
24.2415	17.91	0.4015	3.67160	0.27
38.5338	6603.59	0.1428	2.33446	100.00
38.6486	3888.65	0.0816	2.33357	58.89
40.2801	38.85	0.1224	2.23718	0.59
44.7576	4018.10	0.1632	2.02323	60.85
65.0623	411.08	0.0816	1.43243	6.23
78.0899	626.54	0.1020	1.22283	9.49
78.1923	782.80	0.0816	1.22149	11.85
78.4238	468.21	0.1632	1.21846	7.09
82.3588	284.30	0.1020	1.16992	4.31
98.8646	138.88	0.1632	1.01403	2.10

**Spesimen 6****Peak List:**

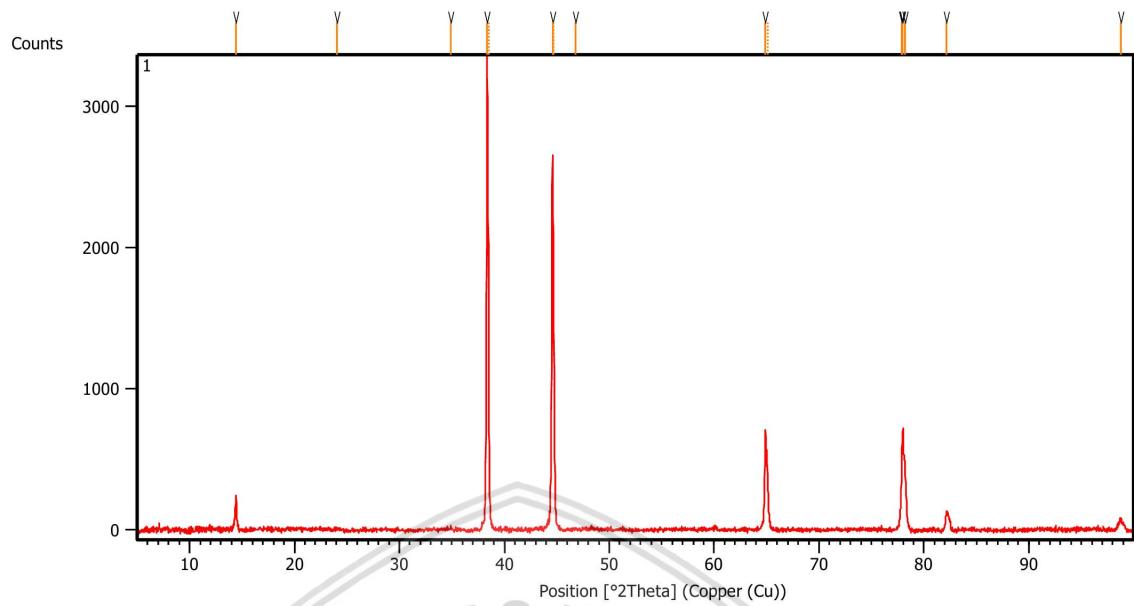
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.4343	732.78	0.0836	6.13654	14.30
24.1275	24.99	0.1673	3.68869	0.49
38.4171	5123.76	0.2175	2.34322	100.00
40.1351	34.58	0.1338	2.24679	0.67
44.6251	3806.21	0.1632	2.02892	74.29
44.7562	3208.47	0.1224	2.02831	62.62
46.5760	6.58	0.5712	1.94838	0.13
60.1080	9.77	0.4896	1.53809	0.19
64.9526	458.34	0.1224	1.43458	8.95
65.1409	306.56	0.1224	1.43444	5.98
77.9737	625.54	0.0816	1.22436	12.21
78.2871	469.59	0.1632	1.22025	9.16
82.1523	158.66	0.1632	1.17234	3.10
82.2960	193.54	0.1224	1.17066	3.78
98.7554	145.36	0.1224	1.01486	2.84



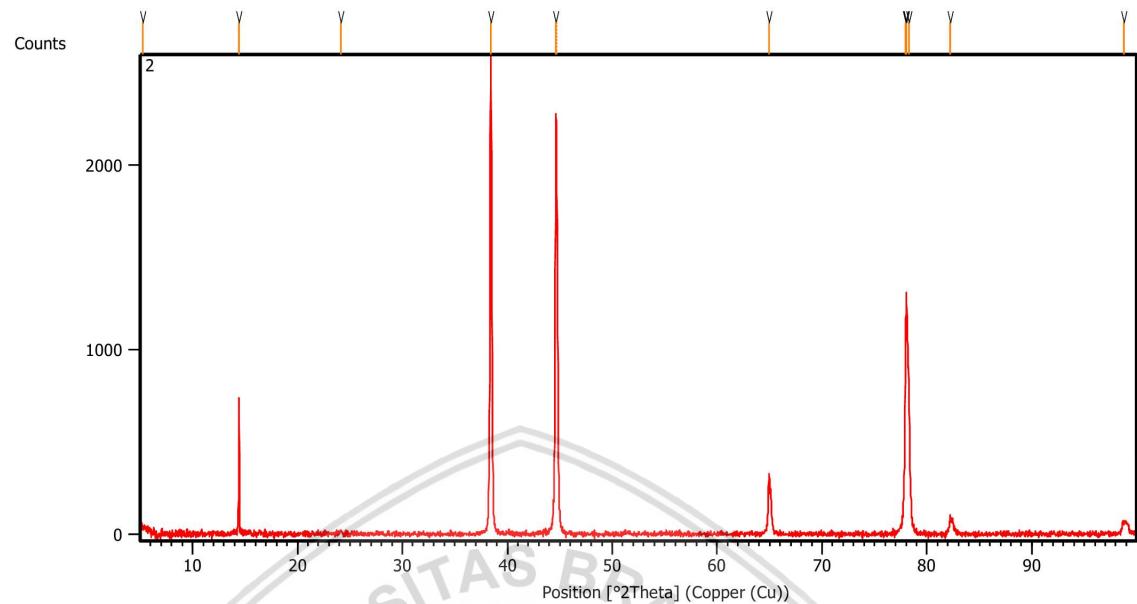
**Spesimen 7****Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.3317	1938.91	0.1004	6.18026	100.00
28.9191	30.70	0.2007	3.08750	1.58
32.6598	20.44	0.2007	2.74191	1.05
38.3080	1876.75	0.1428	2.34770	96.79
38.4238	1138.45	0.0612	2.34670	58.72
39.4785	59.99	0.2040	2.28074	3.09
44.0738	155.77	0.0816	2.05302	8.03
44.5425	1321.31	0.1224	2.03249	68.15
44.6633	805.12	0.1020	2.03232	41.52
49.7590	39.05	0.4080	1.83094	2.01
60.0768	80.86	0.1224	1.53881	4.17
64.8297	534.65	0.1224	1.43700	27.57
65.0723	363.07	0.1224	1.43579	18.73
77.9437	612.45	0.1224	1.22476	31.59
78.2143	400.59	0.1632	1.22120	20.66
82.1004	96.48	0.2448	1.17295	4.98
98.7562	44.18	0.4080	1.01486	2.28

**Spesimen 1 dies 2**

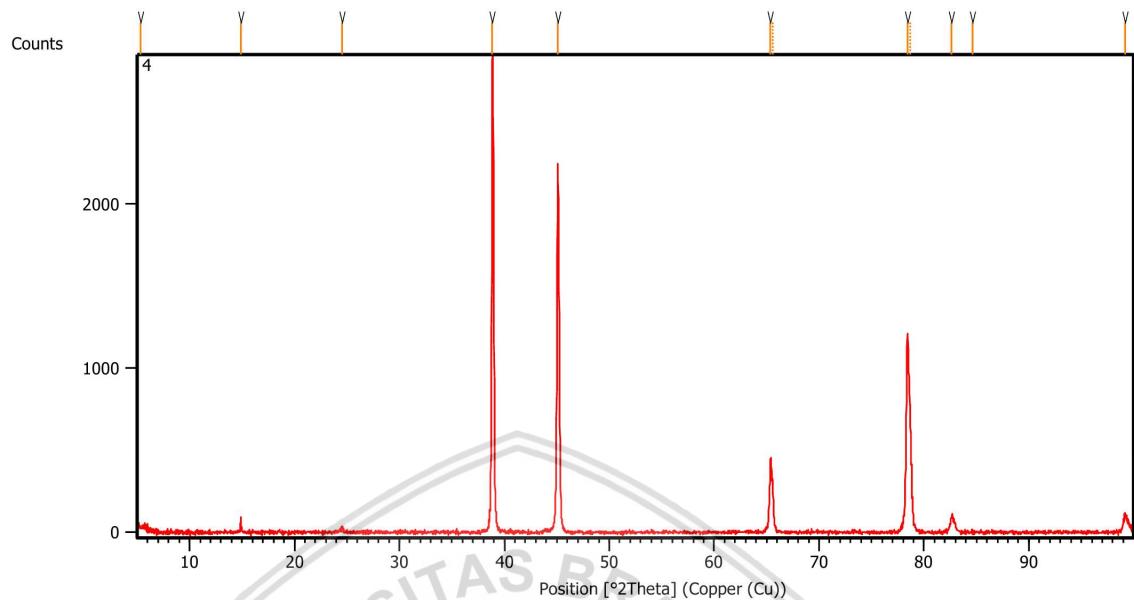
**Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
14.4303	262.89	0.1171	6.13824	8.18
24.0561	9.44	0.4015	3.69948	0.29
34.9263	23.37	0.2007	2.56900	0.73
38.3520	3212.85	0.1428	2.34511	100.00
38.4724	2113.16	0.0612	2.34385	65.77
44.5817	2621.50	0.2040	2.03080	81.59
44.7304	1497.70	0.0612	2.02942	46.62
46.7861	12.16	0.4896	1.94012	0.38
64.8705	617.39	0.1224	1.43620	19.22
65.0826	413.11	0.1224	1.43559	12.86
77.8937	570.30	0.1224	1.22542	17.75
77.9967	712.90	0.0816	1.22406	22.19
78.1797	464.88	0.1632	1.22165	14.47
82.1308	123.37	0.2448	1.17259	3.84
98.7280	76.51	0.4896	1.01507	2.38

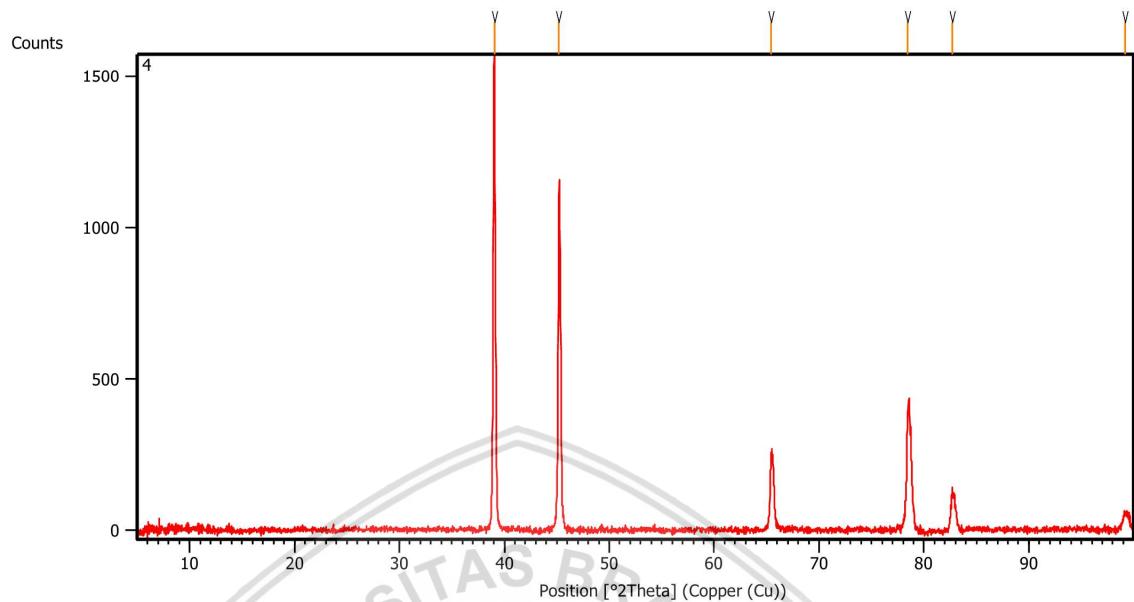
**Spesimen 2 dies 2**

Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.2413	51.45	0.4015	16.86092	2.15
14.4319	734.53	0.0669	6.13758	30.65
24.1416	19.60	0.2007	3.68658	0.82
38.3940	2396.40	0.1171	2.34458	100.00
44.6169	2231.92	0.1224	2.02928	93.14
44.7146	2074.80	0.0816	2.03010	86.58
64.9488	281.96	0.1632	1.43466	11.77
77.9569	1057.88	0.1224	1.22459	44.14
78.0712	1257.87	0.0612	1.22308	52.49
78.2820	725.96	0.1632	1.22031	30.29
82.1922	82.02	0.1632	1.17187	3.42
98.7264	58.52	0.4896	1.01508	2.44

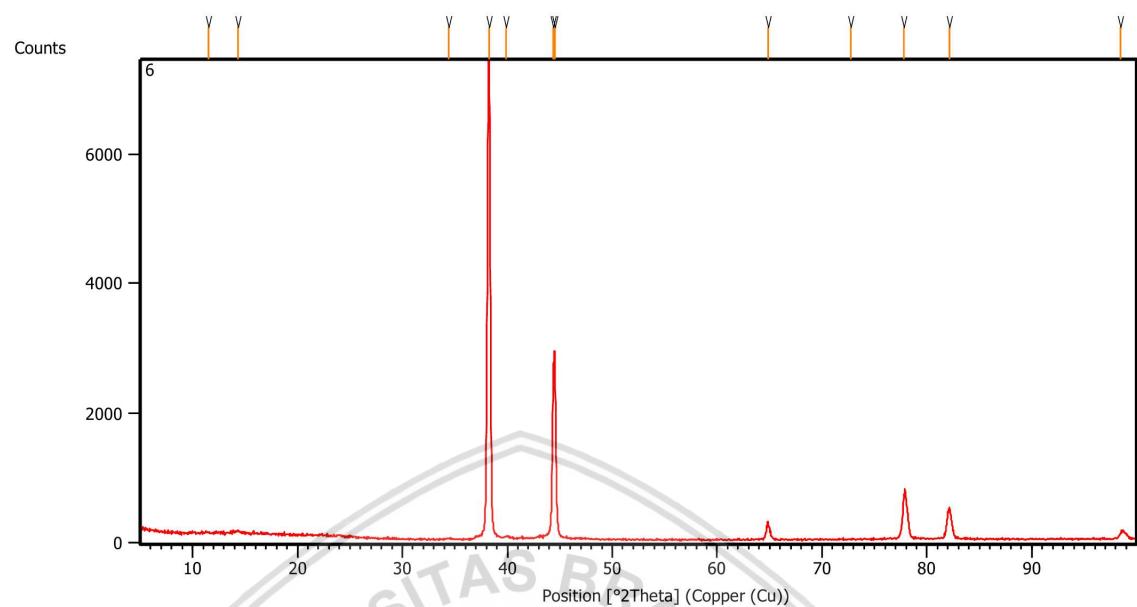
**Specimen 3 dies 2****Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
5.3080	34.14	0.8029	16.64915	1.24
14.8714	66.25	0.0669	5.95718	2.41
24.5100	28.37	0.2676	3.63199	1.03
38.8628	2752.12	0.2342	2.31737	100.00
45.0875	2210.88	0.1338	2.01085	80.33
65.3612	430.54	0.1836	1.42660	15.64
65.5952	252.03	0.1224	1.42561	9.16
78.4246	1175.52	0.2040	1.21845	42.71
78.6502	805.61	0.2040	1.21854	29.27
82.6166	90.07	0.1632	1.16692	3.27
84.5870	17.07	0.0612	1.14470	0.62
99.1816	105.06	0.3264	1.01164	3.82

**Spesimen 4 dies2**

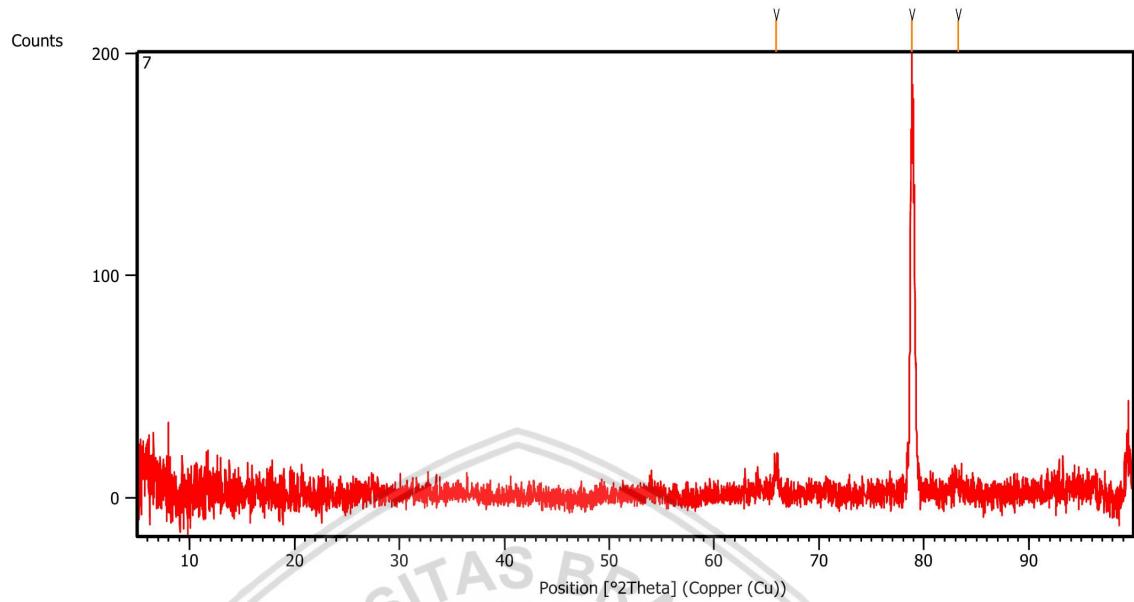
Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
39.0606	1523.97	0.2175	2.30609	100.00
45.1831	1030.58	0.1673	2.00682	67.62
65.4244	259.33	0.1506	1.42655	17.02
78.4423	361.46	0.2676	1.21923	23.72
82.6810	131.34	0.1673	1.16714	8.62
99.1393	56.72	0.3346	1.01280	3.72

**Spesiment 6 dies 2**

Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.5115	13.98	0.4015	7.68724	0.21
14.3118	39.66	0.2007	6.18881	0.59
34.4467	20.64	0.2676	2.60366	0.31
38.3001	6704.42	0.3346	2.35011	100.00
39.9102	18.92	0.3346	2.25893	0.28
44.3458	2153.19	0.1836	2.04105	32.12
44.5311	2688.42	0.1840	2.03467	40.10
64.8380	261.03	0.0836	1.43803	3.89
72.7003	2.29	0.9368	1.30068	0.03
77.8321	680.39	0.3680	1.22725	10.15
82.1495	465.63	0.3346	1.17334	6.95
98.4803	100.47	0.2342	1.01780	1.50

**Spesiment 7 dies 2****Peak List:**

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
65.8727	9.56	0.3346	1.41793	5.47
78.8133	174.93	0.2342	1.21442	100.00
83.2244	5.94	0.8029	1.16090	3.40

**Lampiran 8Analisis Homoginitas ukurab butir dengan metode Taguchi**

**Parameter Taguchi**

	1	2	3
Sudut	90	105	120
Radius fillet dalam	1,5	5,0	10,0
Radius fillet luar	1,5	5,0	10,0
Gesekan	0	0,025	0,05

	Taguchi				Dies			
	1	2	3	4	90	2,5	0,000	1,5
1	1	1	1	1	90	2,5	0,000	1,5
2	1	2	2	2	90	5,0	0,025	1,5
3	1	3	3	3	90	10,0	0,050	1,5
4	2	1	2	3	105	2,5	0,025	1,5
5	2	2	3	1	105	5,0	0,050	1,5
6	2	3	1	2	105	10,0	0,000	1,5
7	3	1	3	2	120	2,5	0,050	1,5
8	3	2	1	3	120	5,0	0,000	1,5
9	3	3	2	1	120	10,0	0,025	1,5

	Maximum	Minimum	Rata-rata	HI
<b>1</b>	0,002500	0,002360	0,002446	0,057113
<b>2</b>	0,002542	0,002110	0,002454	0,175926
<b>3</b>	0,002500	0,002185	0,002443	0,129196
<b>4</b>	0,002518	0,001726	0,002402	0,329715
<b>5</b>	0,002504	0,002159	0,002453	0,140662
<b>6</b>	0,002499	0,002020	0,002411	0,198746
<b>7</b>	0,002530	0,001861	0,002444	0,273643
<b>8</b>	0,002499	0,002403	0,002471	0,038846
<b>9</b>	0,002530	0,002422	0,002468	0,043775

---

**07/01/2013 17:52:26**

---

Welcome to Minitab, press F1 for help.

### Taguchi Design

Taguchi Orthogonal Array Design

L9(3\*\*4)

Factors: 4

Runs: 9

Columns of L9(3\*\*4) Array

1 2 3 4

### Taguchi Analysis: C5 versus A; B; C; D

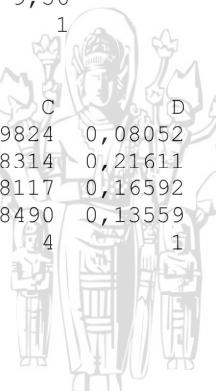
Response Table for Signal to Noise Ratios

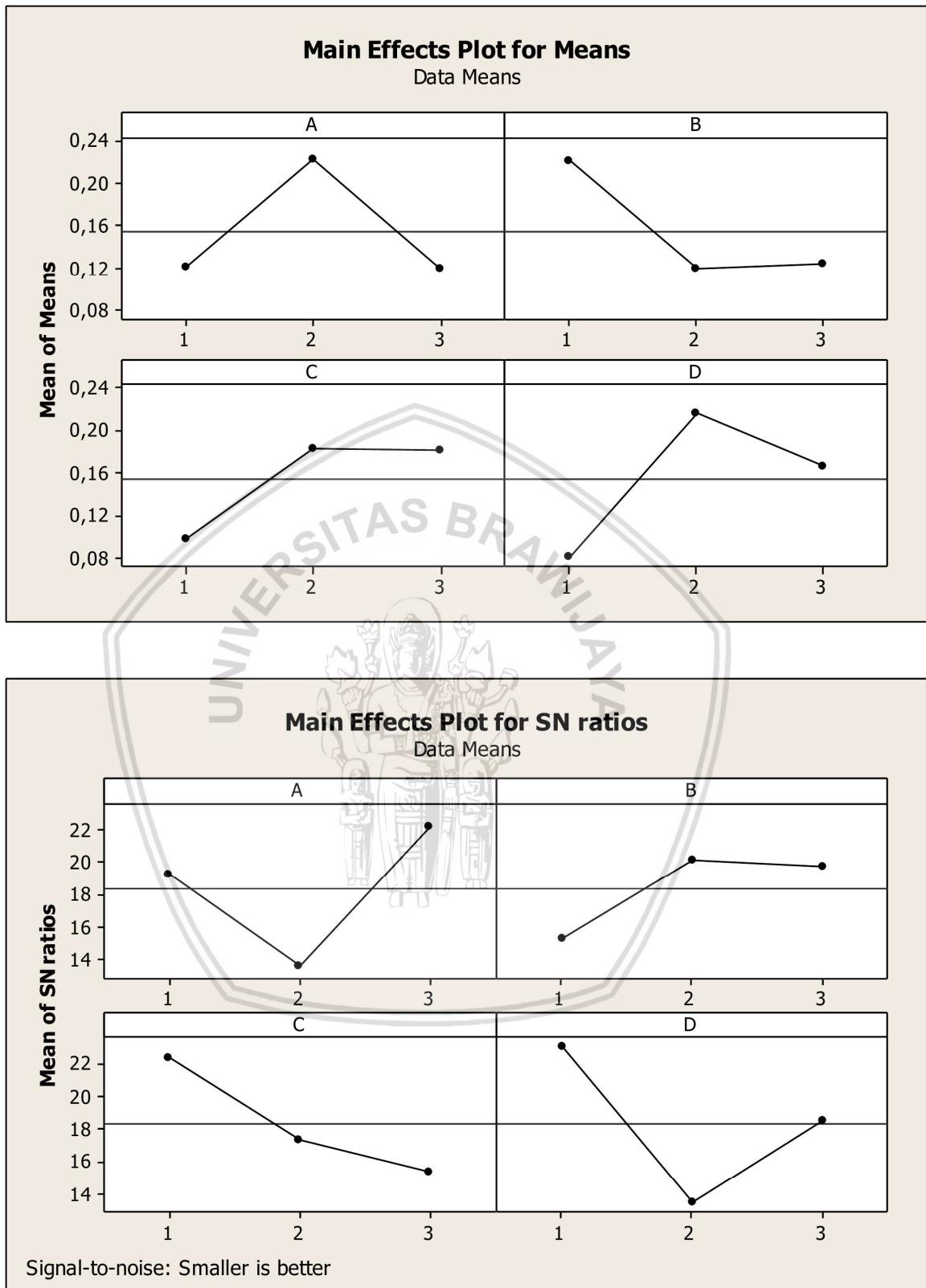
Smaller is better

Level	A	B	C	D
1	19,24	15,25	22,37	23,03
2	13,57	20,11	17,30	13,46
3	22,21	19,66	15,36	18,54
Delta	8,65	4,86	7,01	9,56
Rank	2	4	3	1

Response Table for Means

Level	A	B	C	D
1	0,12075	0,22016	0,09824	0,08052
2	0,22304	0,11848	0,18314	0,21611
3	0,11875	0,12391	0,18117	0,16592
Delta	0,10429	0,10168	0,08490	0,13559
Rank	2	3	4	1

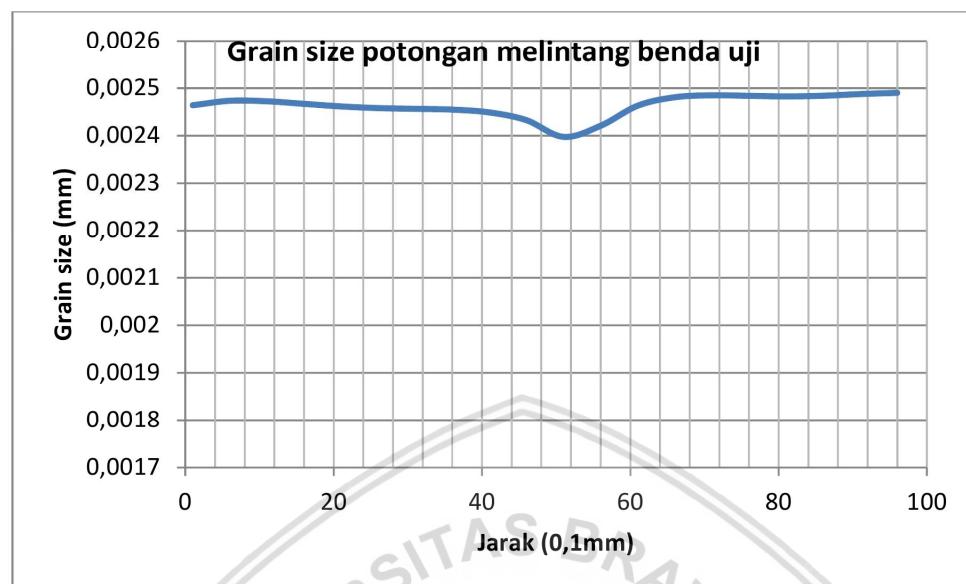




Parameter cetakan paling homogen:

- Sudut channel :  $105^\circ$
- Radius fillet dalam: 1,5 mm
- Radius fillet luar : 10 mm
- Gesekan : 0,025

### Ukuran butir pada potongan melintang aluminium



max      min      average      HI  
0,00249    0,002398    0,002463    0,037469

