

**ANALISIS SAMPEL ALUMINIUM HASIL PROSES *EQUAL*
CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP) BERBASIS
PARAMETER TERKONTROL MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

M. Randi. A Saputra
3334200050

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

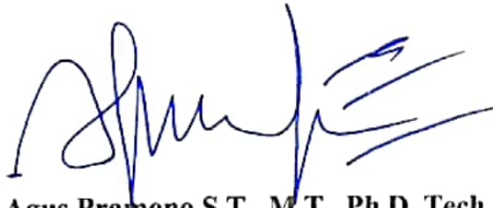
**ANALISIS SAMPEL ALUMINIUM HASIL PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* (ECAP) BERBASIS
PARAMETER TERKONTROL MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

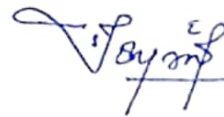
Pembimbing I



Prof. Ir. Agus Pramono S.T., M.T., Ph.D, Tech.

NIP. 197608182008011012

Pembimbing II



Survana, S.T., M.Si.

NIP. 197402162001121001

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS SAMPEL ALUMINIUM HASIL PROSES *EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING* (ECAP) BERBASIS PARAMETER TERKONTROL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

M. Randi. A Saputra

3334200050

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal

21 Juni 2024

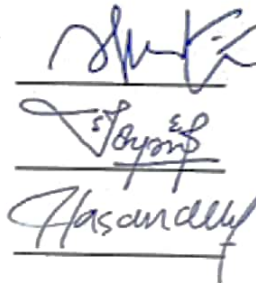
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji I : Prof. Ir. Agus Pramono S.T., M.T., Ph.D, Tech

Penguji II : Suryana, S.T., M.Si.

Penguji III : Dr. Indah Uswatun Hasanah, S.Si., M.T.



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik



Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi

Abdul Aziz, ST., MT., Ph.D.

NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Analisis Sampel Aluminium Hasil Proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) Berbasis Parameter Terkontrol menggunakan Metode Elemen Hingga
Nama Mahasiswa : M. Randi. A Saputra
NIM : 3334200050
Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 10 Juli 2024



M. Randi. A Saputra
NIM. 3334200050

ABSTRAK

Equal channel angular pressing (ECAP) merupakan proses manufaktur yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik material dengan deformasi superplastis untuk mendapatkan ukuran butir sangat halus (*ultra fine grain*). Penguatan yang terjadi akibat adanya penumpukan dislokasi berupa kembaran (*twinning*). Proses ECAP memiliki proses yang sangat kompleks sehingga banyak parameter yang dapat memengaruhi karakteristik sampel hasilnya. Diantara sekian parameter, sudut *channel* dan temperatur menjadi bahasan dalam penelitian ini. Simulasi parameter sudut *channel* dan temperatur penting dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan pada sampel hasil proses ECAP. Kedua parameter tersebut dapat disimulasikan dengan *engineering software* berbasis *finite element method* yaitu ANSYS. Untuk dapat dilakukan simulasi, diperlukan *software* penunjang untuk membuat geometri 3D berupa Autodesk AutoCAD. Adapun geometri yang dibuat sejumlah 3 sesuai dengan banyaknya variasi sudut *channel*. Geometri tersebut diimpor sebagai bahan untuk dapat melakukan *set-up* simulasi. Simulasi sudut *channel die* dilakukan pada sudut 90°, 105°, dan 120°, sedangkan variasi temperatur yang digunakan diantaranya adalah 25°C, 100°C, dan 200°C. Hasilnya diketahui bahwa perbedaan sudut *channel* memberikan pengaruh secara signifikan terhadap tegangan ekuivalen, tegangan geser maksimum, dan homogenitas regangan dibandingkan dengan variasi temperatur. Tegangan geser maksimum tertinggi ke terendah dihasilkan oleh sudut *channel* 90°, 105°, dan 120° secara berurutan sebesar 165,65; 148,15 dan 128,62 MPa untuk temperatur ruang. Sedangkan rata-rata tegangan ekuivalen tertinggi ke terendah juga dihasilkan oleh sudut *channel* 90°, 105°, dan 120° secara berurutan sebesar 294,19; 263,14; dan 229,39 MPa untuk temperatur ruang dengan distribusi yang sama seperti tegangan geser maksimum. Adapun homogenitas regangan tertinggi didapatkan pada sampel ECAP dengan sudut *channel* 120° dan temperatur 200°C dengan indeks ketidakhomogenan bernilai 2,25.

Kata Kunci: Simulasi ECAP, aluminium AA1100, tegangan, sudut *channel*, temperatur.

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Sampel Aluminium Hasil Proses *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) Berbasis Parameter Terkontrol menggunakan Metode Elemen Hingga”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mengerjakan tugas akhir pada program sarjana di Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA.

Dalam menyelesaikan studi hingga penulisan skripsi ini, penulis banyak menerima bantuan baik pengajaran, bimbingan, dan arahan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Bapak Rahman Faiz Suwandana, S.T., M.S. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Ibu Tri Partuti, S.Si., M.Si. selaku Koordinator Seminar Proposal Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi sekaligus dosen wali penulis yang telah membimbing penulis selama kuliah.
4. Bapak Prof. Ir. Agus Pramono S.T., M.T., Ph.D, Tech. selaku pembimbing I dan Bapak Suryana, S.T., M.Si. selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk diskusi, memberikan kritik, saran, bimbingan, arahan, serta motivasi dalam melakukan penelitian hingga penyusunan skripsi ini.
5. Kedua orang tua penulis yaitu Bapak Kusnadi dan almarhumah Ibu Elin Nurlina yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan.
6. Keempat saudara kandung, adik dan kakak yang memberikan motivasi, mendoakan serta memberikan dukungan untuk penulis.
7. Teman-teman 8/9 BBS, Dul Bedul, Mujaer, Damkar, Asisten Gambar Teknik, Asisten Laboratorium Metalurgi, serta golongan

atau partai lainnya yang tergabung dalam Teknik Metalurgi 2020 yang telah memberikan dukungan dan semangat selama menjalani perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih terdapat kekurangan, sehingga penulis sangat menantikan kritik dan saran. Besar harapan penulis dengan menyusun skripsi ini dapat membantu penulis menjadi sebuah acuan penelitian dan bermanfaat bagi teman-teman ataupun pihak lain yang memerlukannya. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Cilegon, Juni 2024

M. Randi. A Saputra

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup.....	5
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Analisis Elemen Hingga	7
2.2 Tegangan dan Regangan.....	8
2.2.1 Tegangan Normal dan Regangan Normal.....	9
2.2.2 Tegangan Geser dan Regangan Geser.....	11
2.2.3 Tegangan Tarik	12
2.2.4 Tegangan Tekan.....	13
2.2.5 Tegangan Ekuivalen (<i>Von mises</i>).....	14

2.3	Deformasi.....	15
2.4	Mekanisme Penguatan Logam.....	16
2.5	<i>Severe Plastic Deformation</i>	18
2.6	<i>Equal Channel Angular Pressing</i>	20
2.7	Aluminium	28
2.8	ANSYS	30
BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Diagram Alir Penelitian	34
3.2	Alat, Komponen dan Data.....	35
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan	35
3.2.2	Komponen dan Data yang Digunakan	35
3.3	Prosedur Penelitian	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Analisa Sensitivitas <i>Mesh</i>	40
4.2	Investigasi Evolusi Struktur Mikro Aluminium	41
4.3	Simulasi Parameter Sudut <i>Channel</i> dan Temperatur	46
4.3.1	Distribusi dan Pengukuran Tegangan Geser	46
4.3.2	Pengukuran Tegangan Ekuivalen.....	50
4.4	Homogenitas Regangan	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA		59
LAMPIRAN.....		64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses *severe plastic deformation* (SPD) menggunakan tekanan tinggi dan berbagai gaya mengalami perkembangan yang pesat dan telah menjadi metode manufaktur yang populer. Proses ini menghasilkan butiran halus dalam struktur mikro material, yang meningkatkan sifat mekaniknya. Teknologi SPD utama meliputi ECAP (*equal channel angular pressing*), HPT (*high pressure torsion*), dan ARB (*accumulative roll bonding*) [1]. Sudah banyak teknologi SPD saat ini yang telah dikembangkan untuk memproduksi beberapa komponen dalam skala industri. Perusahaan Metallicum yang berspesialisasi dalam logam berstruktur nano mengidentifikasi bahwa ada lebih dari 100 pasar spesifik untuk nanomaterial di bidang kedirgantaraan, transportasi, peralatan medis, produk olahraga, pemrosesan makanan dan bahan kimia, elektronik, hingga pertahanan [2]. Contoh produk proses ECAP sudah diaplikasikan dalam memproduksi *sputtering target* berbahan aluminium dan tembaga berbutir sangat halus. Selain itu, proses ini juga digunakan dalam memproduksi komponen untuk kedirgantaraan dan transportasi berupa *turbocharger*, hingga roda kendaraan untuk pesawat dari paduan aluminium paduan. Produk-produk lainnya yang dapat diproduksi dengan proses ECAP diantaranya adalah *micro-bolt*, *connecting rod*, *forged rings*, hingga *dental implants* untuk keperluan medis [3].

Proses ECAP adalah suatu proses yang dapat dilakukan untuk menghasilkan sifat mekanik yang unggul melalui teknik penghalusan butir [4]. Proses ini dapat digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik logam, seperti kekuatan, kekerasan, dan *ductility*. Material yang dilakukan proses ini umumnya diaplikasikan untuk produk logam dengan sifat mekanik unggul akibat struktur mikro dengan ukuran butir sangat halus. ECAP adalah proses pembentukan logam yang melibatkan deformasi plastis berulang dengan cara memaksa logam melalui dua saluran dengan sudut yang berbeda. Pada prosesnya, terdapat banyak parameter yang akan mempengaruhi hasil produk. Struktur mikro hasil proses ECAP dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti rute proses (pemutaran sampel antar *passes*), geometri cetakan seperti sudut *channel*, variabel proses seperti kecepatan penekanan, pelumasan dan temperatur serta sifat material, seperti kekuatan dan perilaku pengerasan [5]. Pada proses ECAP, sudut *channel* dan temperatur proses adalah dua faktor yang dapat disimulasikan dengan perangkat *computer aided engineering* (CAE). Sudut *channel* menentukan tingkat deformasi yang terjadi, sedangkan temperatur proses menentukan kemudahan deformasi. Parameter optimal untuk mencapai homogenitas regangan maksimum yaitu sudut *channel* = 90°, *corner angle* = 15°, dan koefisien gesek = 0,3 [6]. Sedangkan temperatur kamar dapat menghasilkan sifat mekanik yang lebih tinggi akibat dari ukuran butir yang lebih halus [7].

Banyak penelitian yang dilakukan untuk mengoptimalkan proses ECAP agar didapatkan parameter yang terbaik. Namun pada kondisi aktualnya, sangat sulit untuk mengamati perilaku atau respon sampel ketika diproses ECAP secara *real-time* karena prosesnya menggunakan *die* untuk mendeformasi sampel. Akibatnya, karakterisasi sampel proses ECAP hanya dilakukan saat sebelum dan

sesudah proses ECAP dilakukan lalu kemudian dibandingkan. Dengan simulasi proses ECAP berbasis *finite element analysis* (FEA), dapat dilakukan pengamatan bagaimana kondisi sampel ketika dilakukan proses ECAP secara *real-time*. Metode FEA dapat digunakan dalam rekayasa dan pemodelan matematika untuk mempelajari atau menganalisis fenomena tertentu dengan cara membagi suatu struktur menjadi bagian-bagian kecil. Dengan metode FEA, dapat dilakukan prediksi bagaimana sampel memberikan respons ketika dilakukan proses ECAP.

Proses ECAP disimulasikan menggunakan *finite element method* (FEM) yang merupakan metode numerik untuk melakukan FEA. Metode ini akan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan proses ECAP dengan membagi geometri komponen sampel dan *die* menjadi bagian-bagian kecil. Dalam penelitian ini, hasil dari simulasi akan memberikan informasi berupa perilaku sampel aluminium AA1100 ketika diproses ECAP yang disajikan dalam besaran tegangan dan regangan terhadap setiap peralihan sampel. Simulasi yang dilakukan menggunakan *engineering software* berupa ANSYS. ANSYS menyelesaikan permasalahan model matematika sesuai dengan *set up* simulasi yang dilakukan pengguna. Adapun ANSYS yang digunakan adalah ANSYS Workbench dengan sistem analisis *static structural*. Sistem ini merupakan produk ANSYS untuk melakukan simulasi pada struktur benda padat untuk diamati respons benda ketika menerima suatu beban. Penelitian dilakukan dengan mengamati respons sampel aluminium AA1100 ketika melalui *die channel* dengan sudut tertentu, dan temperatur tertentu. Sehingga diharapkan dapat diketahui bagaimana perbedaan respons sampel ketika dilakukan proses ECAP dengan parameter yang telah disebutkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana cara memvalidasi adanya bidang geser pada sampel ECAP ketika dilakukan penekanan?
2. Bagaimana pengaruh variasi sudut *channel* dan temperatur penekanan terhadap distribusi dan besaran tegangan geser pada sampel aluminium AA1100 hasil ECAP?
3. Bagaimana pengaruh variasi sudut *channel* dan temperatur penekanan terhadap distribusi dan besaran tegangan ekivalen pada sampel aluminium AA1100 hasil ECAP?
4. Bagaimana tegangan geser dan tegangan ekivalen yang dialami sampel aluminium AA1100 ketika dilakukan penekanan pada proses ECAP?
5. Bagaimana homogenitas sampel aluminium AA1100 hasil ECAP dengan 1 kali siklus penekanan berdasarkan distribusi regangan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensimulasikan proses ECAP dengan melakukan variasi dalam *set up*-nya berupa variasi sudut *channel* dan temperatur prosesnya. Adapun tujuan khusus penelitian ini diantaranya:

1. Memvalidasi adanya bidang geser pada sampel ketika dilakukan penekanan dengan angka tegangan geser.

2. Menganalisis pengaruh sudut *channel* dan temperatur penekanan terhadap distribusi dan besaran tegangan geser pada sampel hasil ECAP.
3. Menganalisis pengaruh sudut *channel* dan temperatur penekanan terhadap distribusi dan besaran tegangan ekuivalen pada sampel hasil ECAP.
4. Menganalisis besaran tegangan geser dan tegangan ekuivalen ketika dilakukan penekanan proses ECAP.
5. Menganalisis homogenitas regangan plastis pada sampel hasil ECAP dengan variasi sudut *channel* dan temperatur penekanan.

1.4 Ruang Lingkup

1. Geometri sampel dan *die* dibuat dengan *software 3D modelling* berupa Autodesk AutoCAD.
2. Simulasi dilakukan dengan *software ANSYS Workbench* versi 2023 dan 2024 R1 dengan sistem analisis *static structural* .
3. Beberapa data yang didapatkan dari hasil simulasi kemudian diolah menggunakan *software* seperti Microsoft Office Excel, dan Origin Pro.
4. Jenis material sampel yang digunakan untuk penelitian simulasi adalah aluminium murni seri AA1100.
5. Variabel bebas
 - a. Sudut *channel*: 90°, 105°, dan 120°
 - b. Temperatur proses: 25°C, 100°, dan 200°C
6. Variabel kontrol yaitu nilai koefisien gesek sebesar 0,07

7. Variabel terikat yaitu *output* hasil simulasi berupa gambar dan nilai tegangan yang dialami sampel.
8. Penelitian dilakukan dengan perangkat komputer pribadi dan fasilitas komputer di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten.

1.5 Sistematika Penulisan

Penyajian skripsi ini menggunakan sistematika penulisan yang terdiri dari bagian awal, bagian utama, dan bagian akhir skripsi. Bagian awal skripsi memuat halaman judul, kata pengantar, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, dan daftar lampiran yang dimuat untuk mempermudah menemukan hal-hal yang diinformasikan. Bagian utama skripsi terbagi atas 5 bab dan sub bab yaitu yang membahas hal-hal mengenai penelitian. Bab I memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup, dan sistematika penulisan skripsi. Bab II memuat dan menjelaskan landasan teori, yang mendukung untuk memecahkan masalah penelitian. Adapun landasan teori yang dimuat membahas tentang dasar analisis elemen hingga, tegangan, regangan, *severe plastic deformation*, *equal channel angular pressing*, aluminium, dan ANSYS. Bab III menjelaskan metode penelitian yang meliputi diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta prosedur penelitian. Bab IV memuat isi pembahasan mengenai data yang didapat dari hasil penelitian simulasi yang dilakukan. Bab V sebagai bab terakhir mengulas poin penting dari pembahasan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan. Selain itu juga dituliskan saran untuk penelitian serupa selanjutnya. Bagian akhir skripsi memuat daftar pustaka dan lampiran yang berisi contoh perhitungan, data hasil penelitian berupa data, dan berupa gambar hasil simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pramono, S. Suryana, A. Alfirano, A. A. Alhamidi, A. Trenggono, and A. Milandia, "Perlakuan Panas Komposit berbasis Aluminium/ Zirconium Hasil Equal Channel Angular Pressing (ECAP) - Paralel Channel," *Met. Indones.*, vol. 43, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.32423/jmi.2021.v43.1-8.
- [2] R. Valiev, "Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties," *Nat. Mater.*, vol. 3, no. 8, pp. 511–516, 2004, doi: 10.1038/nmat1180.
- [3] R. Kapoor, *Severe Plastic Deformation of Materials*, no. February 2017. 2017. doi: 10.1016/B978-0-12-801300-7.00020-6.
- [4] R. Z. Valiev and T. G. Langdon, "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 51, no. 7, pp. 881–981, 2006, doi: 10.1016/j.pmatsci.2006.02.003.
- [5] S. Wiyono, "Karakterisasi Baja ST 41 Hasil Proses Hot Equal Channel Angular Pressing (HECAP)," *Tek. Mesin Untirta*, vol. II, no. 1, pp. 55–63, 2016.
- [6] M. A. Agwa, M. N. Ali, and A. E. Al-Shorbagy, "Optimum processing parameters for equal channel angular pressing," *Mech. Mater.*, vol. 100, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1016/j.mechmat.2016.06.003.
- [7] A. Yamashita, D. Yamaguchi, Z. Horita, and T. G. Langdon, "Influence of pressing temperatur on microstructural development in equal-channel angular pressing," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 8, pp. 1989–1997, 2000, doi: 10.1007/s11661-999-0009-9.
- [8] R. D. Cook, *Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. 1990. doi: 10.1358/dof.1998.023.03.450862.
- [9] R. D. Cook and H. Saunders, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis (2nd Edition)," *J. Press. Vessel Technol.*, vol. 106, no. 1, pp. 127–127, 1984, doi: 10.1115/1.3264300.
- [10] M. Yaich, Y. Ayed, Z. Bouaziz, and G. Germain, "A 2D finite element analysis of the effect of numerical parameters on the reliability of Ti6Al4V machining modeling," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 509–543,

2020, doi: 10.1080/10910344.2019.1698606.

- [11] V. Mercuri, G. Balduzzi, D. Asprone, and F. Auricchio, “Structural analysis of non-prismatic beams: Critical issues, accurate stress recovery, and analytical definition of the Finite Element (FE) stiffness matrix,” *Eng. Struct.*, vol. 213, no. 1, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110252.
- [12] K. Promneewat, C. Leelasukseree, M. Villeneuve, and R. Galler, “Expanding the Scene of Tunnel Behaviour Through the DEM Model: a Case Study from ZaB-Zentrum Am Berg,” *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 168, no. 12, pp. 586–595, 2023, doi: 10.1007/s00501-023-01413-9.
- [13] Y. H. You, X. Y. Kou, and S. T. Tan, “Adaptive meshing for finite element analysis of heterogeneous materials,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 62, pp. 176–189, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2014.11.011.
- [14] G. S. Lewis, D. Mischler, H. Wee, J. S. Reid, and P. Varga, “Finite Element Analysis of Fracture Fixation,” *Curr. Osteoporos. Rep.*, vol. 19, no. 4, pp. 403–416, 2021, doi: 10.1007/s11914-021-00690-y.
- [15] J. M. Gere and S. P. Timoshenko, *Mekanika Bahan Jilid 1 Edisi 4*. 2000.
- [16] W. D. Callister Jr and D. G. Rethwisch, *Material Science and Engineering: an Introduction, 10th Edition*. 2018.
- [17] R. Patel *et al.*, “A Transdisciplinary Approach for Analyzing Stress Flow Patterns in Biostructures,” *Math. Comput. Appl.*, vol. 24, no. 2, p. 47, 2019, doi: 10.3390/mca24020047.
- [18] Anrinal, *Metalurgi Fisik*, 1st ed. Yogyakarta: Andi, 2012.
- [19] T. Nakano, “Mechanical properties of metallic biomaterials,” *Met. Biomed. Devices*, pp. 71–98, 2010, doi: 10.1533/9781845699246.2.71.
- [20] J. S. Nagra, “Modelling Microstructure-Property Relationships in Polycrystalline Metals using New Fast Fourier Transform-Based Crystal Plasticity Frameworks,” 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.25091.45604.
- [21] M. Husna, “Aluminium Fero Nikel Dengan Penguatan Fasa Kedua Dan Struktur Butir,” *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, pp. 1–10, 2008.
- [22] A. Pramono, K. Dhoska, A. Alhamidi, A. Trenggono, and A. Milandia, “Investigation of mechanical properties on composite materials by several of severe plastic deformation (SPD) methods,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*,

vol. 673, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/673/1/012120.

- [23] A. Azushima *et al.*, “Severe plastic deformation (SPD) processes for metals,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 2, pp. 716–735, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.005.
- [24] Y. Beygelzimer, R. Kulagin, and Y. Estrin, *Severe plastic deformation as a way to produce architected materials*, vol. 282. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11942-3_8.
- [25] A. Pramono, L. Kollo, L. Kommel, and R. Veinthal, “High-strength aluminum alloy of ultrafine grained by consolidation-ECAP,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 478, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/478/1/012035.
- [26] A. Pramono, L. Kollo, R. Veinthal, K. Kallip, and J. K. Gomon, “Heat Treatment of Ultrafine Grained AA 6061 Consolidation by Equal Channel Angular Pressing,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 771, pp. 252–256, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.771.252.
- [27] T. G. Langdon, M. Furukawa, M. Nemoto, and Z. Horita, “Using equal-channel angular pressing for refining grain size,” *Jom*, vol. 52, no. 4, pp. 30–33, 2000, doi: 10.1007/s11837-000-0128-7.
- [28] M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon, “Processing of metals by equal-channel angular pressing,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 12, pp. 2835–2843, 2001, doi: 10.1023/A:1017932417043.
- [29] A. I. Alateyah *et al.*, “Optimizing the ECAP processing parameters of pure Cu through experimental, finite element, and response surface approaches,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 62, no. 1, 2023, doi: 10.1515/rams-2022-0297.
- [30] A. Pramono, *Investigation of Severe Plastic Deformation Processes for Aluminum Based Composites*, vol. 1. 2016.
- [31] A. Azushima and K. Aoki, “Properties of ultrafine-grained steel by repeated shear deformation of side extrusion process,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 337, no. 1–2, pp. 45–49, 2002, doi: 10.1016/S0921-5093(02)00005-9.
- [32] F. Al-Mufadi and F. Djavanroodi, “Finite Element Modeling and Mechanical Properties of Aluminum Proceed by Equal Channel Angular Pressing Process,” *Int. J. Mech. Aerospace, Ind. Mechatron. Manuf. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 1402–1407, 2014.
- [33] A. Pramono, L. Kollo, K. Kallip, R. Veinthal, and J. K. Gomon, “Heat

treatment of ultrafine grained high-strength aluminum alloy,” *Key Eng. Mater.*, vol. 604, pp. 273–276, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.604.273.

- [34] A. Pramono, L. Kollo, R. Veinthal, K. Kallip, and J. Gomon, “Processing Ultrafine Grained Aluminum by Equal Channel Angular Pressing-Consolidation; Knowledge and Technology Transformation for the development of Severe Plastic Deformation (SPD),” 2014.
- [35] I. Rahardjo, “Kebutuhan dan Penyediaan Energi di Industri Smelter Aluminium,” *Oceania*, no. January 2014, pp. 42–49, 2013.
- [36] F. Fasya and N. Iskandar, “Melt Loss dan Porositas pada Aluminium Hasil Daur Ulang,” *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 3, no. 1, pp. 44–50, 2015.
- [37] Material Property Data, “Online Material Information Resource,” 1996. <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=db0307742df14c8f817bd8d62207368e&ckck=1> (accessed Nov. 04, 2023).
- [38] B. C. Manik, “Pengaruh Penambahan Unsur Silikon dan Magnesium terhadap Sifat Mekanik dan Sifat Kelistrikan Paduan Aluminium Hasil Pengecoran,” *Mater. Sci.*, 2017.
- [39] E. Nugroho and Y. Hudawan, “Pengaruh Variasi Putaran Cetakan dan Penambahan Inokulan Ti-B pada Centrifugal Casting terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Paduan Aluminium A356.0,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 5, no. 1, pp. 57–61, 2017, doi: 10.24127/trb.v5i1.120.
- [40] M. Mačák, P. Vyroubal, T. Kazda, D. Capková, and J. Maxa, “Numerical Modelling of Discharging the Lithium-Sulphur Batteries in Ansys Fluent,” *Adv. Mil. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 163–177, 2022, doi: 10.3849/aimt.01525.
- [41] ANSYS Inc., “ANSYS Manual,” *Theory Reference*, no. November. pp. 1–1286, 1999.
- [42] A. Arriaga *et al.*, “Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS,” *Polym. Test.*, vol. 26, no. 3, pp. 284–305, 2007, doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.10.012.
- [43] K. Kundert, “Wellmap: a file format for microplate layouts,” *BMC Res. Notes*, vol. 14, no. 1, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1186/s13104-021-05573-0.
- [44] J. Ding *et al.*, “The effects of grain boundary misorientation on the

mechanical properties and mechanism of plastic deformation of Ni/Ni₃Al: A molecular dynamics study,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 24, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/ma13245715.

- [45] G. E. Dieter, *Metalurgi Mekanik*, 3rd ed. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1987.
- [46] J. Wongsan-Ngam, N. Noraphaiphaksa, C. Kanchanomai, and T. G. Langdon, “Numerical investigation of plastic strain homogeneity during equal-channel angular pressing of a Cu-Zr Alloy,” *Crystals*, vol. 11, no. 12, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/cryst11121505.
- [47] K. V. Ivanov and E. V. Naidenkin, “Effect of the velocity of equal-channel angular pressing on the formation of the structure of pure aluminum,” *Phys. Met. Metallogr.*, vol. 106, no. 4, pp. 411–417, 2008, doi: 10.1134/S0031918X08100116.
- [48] G. Y. Deng, C. Lu, L. H. Su, X. H. Liu, and A. K. Tieu, “Modeling texture evolution during ECAP of copper single crystal by crystal plasticity FEM,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 534, pp. 68–74, 2012, doi: 10.1016/j.msea.2011.11.042.
- [49] S. Surendarnath, K. Sankaranarayananasamy, and B. Ravisankar, “A comparative study of commercially pure aluminum processed by ECAP using conventional and new die,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 29, no. 10, pp. 1172–1178, 2014, doi: 10.1080/10426914.2014.921700.
- [50] L. Cui, S. Shao, H. Wang, G. Zhang, Z. Zhao, and C. Zhao, “Recent Advances in the Equal Channel Angular Pressing of Metallic Materials,” *Processes*, vol. 10, no. 2181, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/pr10112181>.