

***Fi Makrifat Al Jawahir* Karya Reyhan Al Biruni: Kitab Rujukan Teknologi Manufaktur Logam Dunia**

Agus Pramono

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon-Banten

agus.pramono@untirta.ac.id

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Submitted: 07 April 2022 | Revision Required: 15 April 2022 | Published: 15 Juni 2022 |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|

Abstract

The Muslim scientist who became the scientific reference on the manufacturing sector was Reyhan al-Biruni. The processing of wrought iron and the manufacture of steel from cast iron is carried out through the carbonization process. The element carbon has a very significant influence on the strength of the metal. The maximum solubility of Fe_3C in iron is: 6.67%. This is a series of calculations of the composition of the atomic weight of each constituent element, which is the atomic weight of Fe = 56, the atomic weight of Carbon 12. Calculation of steel compounds $\text{Fe}_3\text{C} = 56 \times 3 = 180$. The solubility of Carbon in steel is 6.67, coming from $2/180 \times 100\% = 6.67\%$. Metal processing that has received worldwide attention today is the ECAP method, which is capable of producing significant mechanical strength. The stages of the ECAP process start from the process of applying a compressive force to the sample that is placed in the mold. A special characteristic of ECAP is the ability to introduce fine grain refinement into large bulk samples. Capable of reducing the size of

fine grains to the size of nanometers, resulting in a material that is able to provide maximum physical and mechanical properties. ECAP combines compressive stress and tensile stress in the mold. The ECAP formula was previously found in the book of *Fi Makrifat Al Jawahir* by Reyhan Al Biruni. The book it was explained in great detail that when metal is bent there will be an increase in its strength because of the reaction between metals

Keywords: *Fi Makrifat Al Jawahir, Reyhan Al Biruni, equal channel angular pressing, metal, ultrafine-grained*

Abstrak

Ilmuan muslim yang menjadi rujukan keilmuan bidang manufaktur adalah Reyhan Al-Biruni. Proses pengolahan besi tempa serta pembuatan baja dari besi tuang dilakukan melalui proses karbonisasi. Unsur carbon memberikan pengaruh yang sangat signifikan pada kekuatan logam. Hitungan kadar kelarutan Fe_3C dalam besi maksimal sebesar: 6.67%. Hal ini merupakan rangkaian dari kalkulasi perhitungan dari komposisi berat atom masing-masing unsur penyusunnya, yang mana berat atom Fe = 56, berat atom Karbon 12. Kalkulasi senyawa baja $\text{Fe}_3\text{C} = 56 \times 3 = 180$. Kadar kelarutan Karbon dalam baja 6.67, berasal dari $2/180 \times 100\% = 6.67\%$. Pengolahan logam yang mendapat perhatian dunia saat ini adalah metode ECAP, mampu menghasilkan kekuatan mekanik yang signifikan. Tahapan proses ECAP dimulai dari proses pemberian gaya tekan kedalam sampel yang diletakkan di dalam cetakan. Karakteristik khusus ECAP memiliki kemampuan untuk memperkenalkan penyempurnaan butir halus ke dalam sampel massal yang besar. Mampu mengurangi ukuran butir halus mencapai ukuran nanometer, sehingga menghasilkan bahan yang mampu memberikan sifat fisik dan mekanik yang maksimal. ECAP menggabungkan tegangan tekan dan tegangan tarik dalam cetakan. Formula ECAP sebelumnya sudah terdapat pada kitab *Fi Makrifat Al Jawahir* karya Reyhan Al Biruni. Pada kitab tersebut dijelaskan sangat rinci bilamana logam

dibengkokkan maka akan terjadi peningkatan kekuatannya karena hasil dari reaksi antar logam.

Kata Kunci: *Fi Makrifat Al Jawahir, Reyhan Al Biruni, equal channel angular pressing, logam, butir halus*

INTRODUCTION

Karya kitab yang membahas tentang proses pengolahan besi, merupakan Ilmuan muslim bidang manufaktur baja yaitu: Al-Biruni [Hakim MS, 1989]. Proses pengerjaan logam menggambarkan pengolahan besi tempa serta pembuatan baja dari besi tuang yang dilakukan melalui dan proses karbonisasi. Berdasarkan referensi pembuatan besi baja oleh [Dieter, 1988] dijelaskan bahwa unsur carbon memberikan pengaruh yang sangat signifikan pada kekuatan logam. Kandungan karbon yang dapat bersenyawa dengan besi (Fe) menurut kaidah referensi [Sri Atie Djaprie, 1990] adalah 6,67%. Hal ini berdasarkan penelusuran oleh ilmuan muslim, Musya al Khawarizmi, bilangan tersebut diambil dari rujukan, Q.S Al Hadid yaitu; (ا) Alif = 1, (ال) Lam = 30, (هـ) Haq = 8, (ذ) Dzal = 4, (ي) Yak = 10, (د) Dzal = 4. Total jika dikonversi ke bilangan algoritma maka hasil kalkulasinya akan menjadi; $1.30 + 8 + 4 + 10 + 4 = 56$ (56 merupakan berat atom Fe) kata ALLAH yg terdapat pada Q.S Al Hadid dari awal sampai akhir sejumlah 26 yang mana merupakan nomor atom besi. Fenomena tersebut merupakan hasil kontemplasi Musya Al-Khawarizmi selama menuntut ilmu di majelis ilmu Syaikh Jabar Ibn Hayyan. Bahkan dalam hujahnya pula Syaikh Jabar Ibn Hayyan memodifikasi dan mengoreksi teori Aristoteles mengenai dasar atom logam, yang tetap tidak berubah dan tidak bisa bereaksi dengan atom lain. Dan hal tersebut dibuktikan oleh Penerapan dan kalkulasi atom Fe yang mampu bereaksi dengan atom karbon membentuk senyawa pada besi.

Hitungan kadar kelarutan Fe_3C dalam besi maksimal sebesar: 6.67%. Hal ini merupakan rangkaian dari kalkulasi perhitungan dari komposisi berat atom masing-masing unsur penyusunnya, yang mana berat atom Fe = 56, berat atom Karbon 12. Kalkulasi senyawa baja

$\text{Fe}_3\text{C} = 56 \times 3 = 180$. Kadar kelarutan Karbon dalam baja 6.67, berasal dari $\frac{2}{180} \times 100\% = 6.67\%$ [Gus Pram, 2021]. Dalam kaitan aplikasi, merujuk pada kitab lainnya yang mengupas tentang pembuatan pedang yaitu: Al-hadid (Kitab tentang Besi) yang ditulis Al-Jildaki, mengungkapkan begitu banyak informasi seputar tingkat kemampuan masyarakat Muslim di era keemasan dalam pengolahan besi dan baja. Hal ini diungkapkan pula oleh Prof Ahmad Y Al-Hassan dalam sebuah artikel "*The Origin of Damascus Steel In Arabic Sources*", menjelaskan bahwa hampir semua pedang di dunia Islam terbuat dari 'Besi Damaskus'. Salah satu ciri khas pedang dari Damaskus dihiasi dengan pola hias/*firind*. Menurut Al-Kindi, *firind* dapat ditemukan dalam semua jenis besi buatan. Sedangkan, pedang yang terbuat dari besi alami tak memiliki pola hias atau *firind*. Al-Biruni dalam kitabnya Al-jamahir secara menarik menjelaskan latar belakang dibalik pembuatan pola hias pada pedang. Al Qalqashandi dalam kitab Subh Al-Asha yang mengawali lahirnya teknologi nano-metalurgi. Jika ditelusuri melalui prosesnya, kaidah ilmu metalurgi di bidang nanoteknologi adalah penyempurnaan kreasi Pedang Damaskus (DS) Khalifah Salahudin al Ayubi yang merupakan hasil penyempurnaan pedang Zulfikar. Dari konfigurasinya, bentuk pedang DS adalah tumpukan pelat yang dijepit dan pelat berputar searah sehingga pedang DS tidak bermata dua. Ini telah diverifikasi oleh Prof. Peter Paufler dari Dresden University of Technology, studi penelitian tentang sifat fleksibilitas pedang Khalifah Salahudin al Ayubi ternyata dipengaruhi oleh tabung nano karbon (CNT) yang saat ini sedang dikembangkan oleh para ilmuwan metalurgi & material di seluruh dunia. Metodologi pembuatan pedang Salahudin al Ayubi sendiri terdapat dalam kitab Subh Al-Asha karya Shihab al-Din al-Qalqashandi. Dilihat dari aspek aturan pembentukan logam (teknik pembentukan logam). Sejalan dengan ilmu pengetahuan, murid Al Qashhandi, Ibnu Ishaq al-Kindi, melanjutkan studinya tentang metalurgi. Salah satu bukunya adalah "Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir" buku ini membahas tentang proses karbonisasi besi tempa dan pembuatan baja dari besi tuang yang juga dikembangkan oleh ahli metalurgi Rusia Dimitry Chernov [Golovin, 1968]. Dalam bab

tentang pembuatan pedang terdapat metodologi proses yang menjelaskan pembentukan logam yang di dalamnya terdapat struktur nano. Menurut Al-Kindi, cemara dapat ditemukan di semua jenis besi buatan.

Sementara itu, pedang yang terbuat dari besi alami tidak memiliki pola dekoratif atau firnds. Namun, buku tersebut belum secara spesifik menjelaskan materi yang digunakan. Murid terbaik Ibnu Ishaq al Kindi adalah Reyhan al-Biruni dalam bukunya Al-Jamahir yang merupakan buku lanjutan dari gurunya (Al Kindi) yang menjelaskan secara detail latar belakang pembuatan pola hias pada pedang. Potongan-potongan baja, ditumpuk satu di atas yang lain, diikat bersama oleh kawat logam, dan ditempa dan digabungkan dan dimanipulasi untuk membuat pola, maka disebut "pola gabungan". Saat seseorang bersiap untuk menempa bilah, pola warna dibuat oleh kandungan metalurgi berbeda yang terkandung dalam tumpukan paduan. Mangan akan menghasilkan warna gelap/hitam; Nikel akan menghasilkan warna silver yang cerah, Chromium akan menghasilkan warna abu-abu muda dan *high carbon steel* akan menghasilkan warna abu-abu gelap. Ada kandungan karbon sedang (*medium carbon steel*), Baja dengan titik leleh tertinggi akan ditempatkan dekat dengan dinding luar tiang (yang akan menyebabkan lebih cepat panas), titik leleh terendah harus lebih dekat ke tengah tumpukan. Bila tiang pancang sudah berwarna merah, maka logam tersebut siap untuk disambung dengan cara pembebanan gaya atau biasa disebut dengan las. Dengan membuang tumpukan dan memalunya hingga setengah dari ketebalan aslinya, bilah menjadi terlalu panas dan akan retak selama proses pengerasan. Pemadaman pisau disertai dengan pendinginan yang akan menyebabkan struktur molekul logam mengkristal dan mengeras [Gus Pram, 2021]. Artikel ini membahas keterkaitan antara teknologi manufaktur dari era zaman keemasan Islam sampai saat ini dimana aplikasi dari teknologi manufaktur dikembangkan oleh barat terutama Rusia untuk pengembangan perangkat kemiliteran.

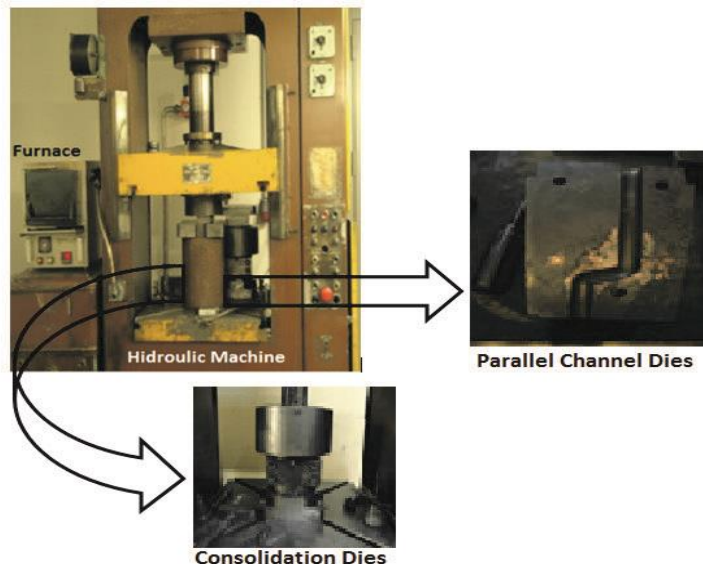
METHODS

Metode ini membahas proses manufaktur yang dikembangkan oleh Barat dan Rusia, yaitu metode *equal channel angular pressing* (ECAP), dimana secara konsep dan formula sudah dijelaskan di referensi oleh Ibnu Reyhan Albiruni antara abad ke-10 yang telah di formulasikan pada kitab *Fi Makrifat Al Jawahir*. Dimana di Rusia dikembangkan oleh Vladimir Seagal pada tahun 1975.

Equal channel angular pressing (ECAP)

ECAP pertama kali dikembangkan oleh Vladimir Segal, dengan nama *equal channel angular extrusion* (ECAE) dikembangkan pada tahun 1972 dan pertama kali dijelaskan melalui laporan penelitian di laboratorium Minsk-Russian (1974), dengan tema *methods of stress – strain analysis in metal forming* penelitian intensif dilakukan di Physical Technical Institute Academy of Sciences of Buelorussia, Minsk. Kajian mengarah pada pengembangan dan penerapan teknologi ECAE untuk ilmu material yang berbeda jenis. Pada awal 1990-an dengan perkembangan pada penghalusan butir nano-struktur bahan, ECAE menjadi objek upaya besar dan penelitian pada proses yang sangat meningkat dan dilaporkan pada konsorsium engineering pada tanggal 14-18 September 1981. Publisher: Roskilde, oleh Risø National Laboratory di Denmark [Segal, 1999]. Ruslan Valiev di Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University Federasi Russia mengembangkan dan menyempurnakan proses tersebut menjadi *equal channel angular pressing* (ECAP) [Valiev, 1993]. Perbedaan antara ECAE dengan ECAP terletak pada perangkat mesin yang digunakan. ECAE menggunakan mesin konvensional sedangkan ECAP menggunakan mesin hidrolik, seperti disajikan pada gambar 1. Perbaikan prosedur dari ECAE oleh Segal menjadi ECAP oleh Valiev telah banyak menghasilkan perkembangan, terutama secara aplikasi dimana aplikasi banyak diterapkan pada produk *engineering* dan perangkat kemiliteran. Dari progress ECAP yang ditemukan oleh Segal dan dikembangkan oleh Valiev, beberapa ilmuwan duniapun turut mengembangkan eksperimen ECAP ini, seperti: Zenji Horita (Jepang), Terence Langdon (Inggris), Lembit Kommel (Estonia), Yuri

Estrin (Australia), Roberto Figueiredo (Brazil), Hyoung Seop Kim (Korea), Gerhard Wilde (German), Michael Zehetbauer (Austria), Yuntian T. Zhu (Cina). Khusus untuk negara Amerika (USA) karena belum ada ilmuan yang expert di bidang tersebut maka melibatkan ilmuan Jepang Megumi Kawasaki dibantu Ilmuan Inggris Terence Langdon dan Terry C. Lowe.

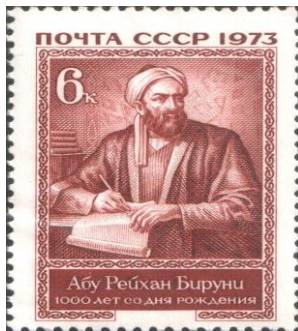


Gambar 1. Perangkat manufaktur modern *equal channel angular pressing* (ECAP) yang dilakukan di *Laboratorium Advance Manufacture Forming* - Institute Technology Tallinn Estonia

Fi Makrifat Al Jawahir (Reyhan Al Biruni)

Dalam konsep ECAP yang dijelaskan oleh para ilmuan mulai dari Vladimir Seagal, Ruslan Valiev sampai pada Lembit Kommel [Pramono, 2022] bahwa metode ECAP melalui 3 tahapan fase eksperimen, yaitu; penekanan yang dilakukan oleh mesin hidrolik press, yang ke dua ada pembengkokan dari cetakan dan terjadinya reaksi. Reaksi disini adalah proses bersatunya senyawa-unsur yang dipadukan akibat dari pemanasan dan penekanan [Pramono, 2016]. Metode ECAP yang dieksplorasi oleh Vladimir Segal (1974) dilanjutkan oleh Ruslan Valiev (1998) banyak memiliki kesamaan dengan eksperimen yang dilakukan oleh Reyhan Al-biruni (973). Lahir pada 4 September 973 – 13 Desember 1048). Disamping mengembangkan manufaktur untuk pembuatan perangkat perang seperti pedang, manjanik

baju besi, ia merupakan matematikawan, astronom, fisikawan, serta seorang filsuf. Al Biruni juga seorang pengajar sains di Baitul hikmah, Lembaga Pendidikan eksperimen riset dan pusat sains yang didirikan oleh putera Khalifah Harun Al Rasyid yaitu: Khalifah Al-Ma'mun. Eksperimen terkait metode manufaktur terakhir dilakukan oleh Raihan Al-Biruni di daerah India



ditemani muridnya yaitu; Mahmud Al-Ghazni dalam eksperimen dan studi literturnya. Disamping bereksperiment mereka juga mempelajari bahasa, falsafah dan memperdalam agama melalui tasawuf yang diajarkan gurunya Syekh Jafar Ibn Hayyan. Sedangkan Vladimir Segal lahir pada 24 Maret 1927 di St. Petersburg, Rusia ayahnya Solomon Segal dan Ibunya Loseva.

(a)

(b)

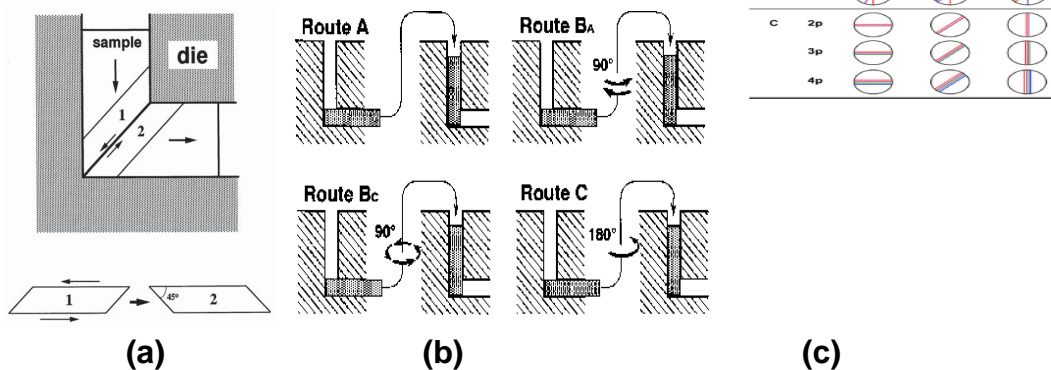
(c)

Gambar 2. Pengembangan teknologi manufaktur logam oleh: a) Reyhan Al Biruni via Al Fiqu b) Vladimir Segal via ECAE c). Ruslan Valiev via ECAP

Dia adalah seorang ahli Fisika mekanik dan juga menguasai beberapa bahasa seperti bahasa perancis, german dan bahasa Arab. Untuk Bahasa Arab ini dikarenakan Seagal harus menguasai referensi Fi Makrifat Al Jawahir agar memahami eksperimen pada uraian metodologinya. Seagal seorang peneliti dan bertugas sebagai pengajar di Physical Technical Institute Academy of Sciences Minsk-Russian, yang dahulu bernama Uni-Sovyet. Pada mulanya dia mengembangkan teknik konvensional hingga akhirnya mampu menemukan teknologi ECAE sebagai dasar dari teknologi *severe plastic deformation* (SPD). Setelah sukses dengan penelitian ECAP kemudian Seagal pindah ke Johnson Matthey Electronics, Spokane, Washington Amerika untuk mengembangkan risetnya dan mejadi penajar di beberapa universitas di Amerika. Menikah dengan wanita amerika Dr. Natalia Marion, dan meninggal pada 20 April 2007.

DISCUSSION

Tahapan proses ECAP dimulai dari proses pemberian gaya tekan kedalam sampel yang diletakkan di dalam cetakan. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan oleh [Agus Pramono, 2016] Proses ECAP memiliki kemampuan untuk memperkenalkan penyempurnaan butir halus ke dalam sampel massal yang besar. Mampu mengurangi ukuran butir halus mencapai ukuran nanometer, sehingga menghasilkan bahan yang mampu memberikan sifat fisik dan mekanik yang maksimal. ECAP menggabungkan tegangan tekan dan tegangan tarik dalam cetakan untuk menghasilkan produk dengan deformasi tingkat tinggi [Pramono, 2014], yang ditunjukkan pada gambar 3 a.



Gambar 3. Mekanisme prosedur regime ECAP a) Desain cetakan yang bekerja gaya tekan jalur 1 dan gaya Tarik jalur 2 b) Route jalur siklus ECAP c) Siklus penekana 2p (pressing) 12x tekan - 4p 4x tekan

Pada gambar 3. b merupakan route/jalur-jalur yang diputar berdasarkan jenis material dan sifat mekanik yang dimiliki; route A material diputar secara acak tanpa mengacu orientasi sudut putar, route B_A merupakan route yang diputar 90° bolak-balik. Route B_C. Adalah jalur putaran sampel logam 90° searah dan route C merupakan jalur putaran sampel 180°. Pada gambar C merupakan alur pergerakan dislokasi yang menghasilkan difusi antar unsur logam. 1p-4p merupakan jumlah siklus tekanan, 1 p adalah 1 kali siklus penekanan sedang 4p merupakan 4 x tekanan. XYZ merupakan indeks miller pergerakan sel satuan saat terjadi difusi.

Kaidah narasi teori ECAP secara substansi sudah terdapat Kitab “Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir” dalam narasi proses karbonisasi besi tempa dan pembuatan baja dari besi tuang. Pada paparan referensi tersebut dibahas bagaimana eksperimen pandai besi di dunia Islam yang bahannya banyak diimpor dari Sarandib (kini wilayah Srilanka). Sedangkan pedang asli dari dunia Muslim, besi dan bajanya berasal dari Khurasan, Basrah, Damaskus, Mesir, dan Kufah. Pada eksperimen lanjutan terdapat sebuah formula yang mana hal ini dijadikan rujukan Vladimir Seagal dalam mengembangkan metode ECAP. Narasi eksperimen pada kitab Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir karya Reyhan Al Biruni, adalah sebagai berikut:

زیدود تویني لول أبيا دوينو ماليقي فيبيثي بالأمسيسيا المثكي بيادي سيفول لوهو فال تاوا فهاديهي
ماكولاتون اسأل أركض سوا

Proses pembuatan logam yang paling efektif adalah dengan penekanan berganda, Penekanan berganda yang dimaksud adalah penekanan untuk membengkokkan suatu logam, dengan membengkokkan logam maka akan terjadi reaksi yang mampu meningkatkan sifat mekaniknya.

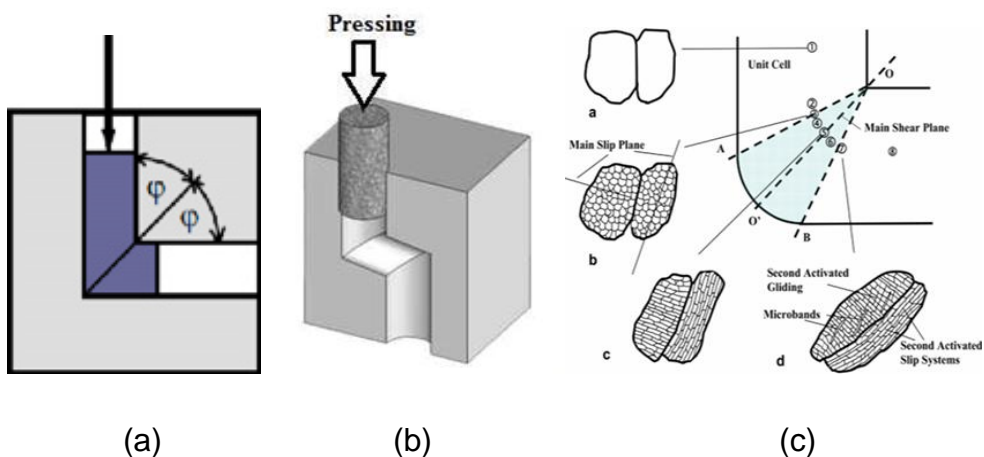
Pada kitab Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir terdapat 3 pattern yang menjelaskan metodologi proses, yaitu; (الملك) Al mil'k = Tegangan, (الفلو) Al Fiqlu = membengkokkan, (الإنفيل) Al infial = Reaksi.

| No. | Bahan Logam | Kekerasan Hasil ECAP | Kekuatan Hasil ECAP | Keuletan | Butir Halus |
|-----|-------------|----------------------|---------------------|----------|-------------|
| 1 | AA1100 | 52 VH ₁₀ | 149 MPa | 16 % | 2.3 µm |
| 2 | AA5052 | 148 VH ₁₀ | 398 MPa | 1.5 % | 2.0 µm |
| 3 | AA6061 | 88 VH ₁₀ | 250 MPa | 3.0 % | 0.1 µm |
| 4 | AA7075 | 120 VH ₁₀ | 395 MPa | 2.5 % | 0.7 µm |

Keterangan: **AA** (Al-Alloys) Aluminium Paduan
VHN Vickers Hardness Number

Table 1. Distribusi sifat menaik hasil ECAP untuk berbagai jenis aluminium logam seri AA1100,AA5052,AA6061,AA7075

Pada table 1 merupakan hasil dari beberapa jurnal dan internasional konverensi di beberapa negara seperti: di Riga, Latvia “Engineering Materials & Tribology XXII: Baltmattrib pada tahun 2013: by the 22nd International Baltic Conference on Engineering dan Simposium di Universitas Wgeningen Belanda pada tahun 2014. Pada table tersebut disajikan beberapa hasil karakterisasi kekuatan logam seri aluminium dengan menyajikan kekerasan, kekuatan Tarik, keuletan dan ukuran butir halus. Dari hasil yang disajikan terbukti bahwa ECAP cukup memberikan peningkatan yang signifikan. Peningkatan kekuatan ini memberikan bukti secara *scientific* bahwa narasi referensi kitab Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir terbukti meningkatkan sifat mekanik kekuatan logam setelah mendapatkan 3 tahapan pengolahan logam yang dibengkokkan, yaitu (لملك) Al mil’k, disajikan pada gambar 4 a, sedangkan proses pemberian tegangan, (الفقلا) Al Fiqlu disajikan pada gambar 4 b dan terjadinya reaksi (الإنفيل) Al infial, disajikan pada gambar 4 c.



Gambar 4. Tahapan prosedur ECAP: a) pembengkokan oleh desain cetakan b) Pemberian gaya/tegangan c) proses reaksi yang menghasilkan difusi anar logam

Pola bengkokan pada cetakan pada ECAP yang tersaji pada gambar 4 a, merupakan pengkondisian agar logam mudah dibengkokkan, karena dengan pembengkokan tersebut struktur pada logam mampu dikendalikan dengan baik. Terdapat sudut bengkokan yang mana merupakan titik pergerakan deformasi yang mampu

menghasilkan nilai regangan yang berlebih, seperti pada penggunaan formula 1, dibawah ini:

$$\varepsilon = n \frac{2}{\sqrt{3}} \cot(\omega) \dots\dots\dots (1)$$

Nilai regangan (ε) merupakan hasil dari siklus tegangan (n) yang bekerja pada sudut (ω) terbentuk dari proses tegangan. Proses pembengkokan pada logam merupakan proses perubahan jenis tegangan, yaitu tegangan tekan pada gambar 3 a (1) menjadi tegangan tarik ditunjukkan pada gambar 3 a (2). Dari perubahan jenis tegangan inilah akumulasi nilai tegangan menjadi lebih besar sehingga mampu memberikan nilai deformasi yang signifikan pada perubahan karakteristik material logam. Pemberian tegangan merupakan aplikasi dari gaya tekan dan tarik yang diterapkan pada cetakan bersudut, gambar 4. b. dimana pemberian tegangan ini mampu menghasilkan ukuran butir bahan yang dihasilkan mencapai ukuran sub mikrometer, karena dengan pembengkokan dan pemberian tegangan mampu menghasilkan ukuran butir halus mencapai skala nanometer. Sehingga dapat menghasilkan sifat yang tidak biasa [Pramono, 2022]. Penerapan tekanan dalam proses ECAP tegangan geser serta geser murni dan sederhana dari beban monoton untuk pembebanan siklik dan silang dalam cetakan [Segal, 2002].

Pemberian tegangan pada ECAP menurut [Segal, 1997] memperkenalkan tegangan geser sederhana pada logam melalui cetakan saluran yang memaksimalkan regangan [Valiev, 2000]. Besarnya regangan yang diperoleh dengan 1 siklus lintasan merupakan keuntungan utama dari metode ECAP. Tegangan geser terjadi pada bidang yang sama selama proses tegangan yang dilalui secara kontinyu, setelah mencapai sudut perpotongan pada cetakan ECAP, sehingga arah luncur berbalik seperti yang dirangkai pada gambar 3 a setelah distribusi regangan seragam, besarnya geser (γ) dapat dihitung dengan asumsi kondisi gesekan [Comwall, 1996].

$$\gamma = 2 \cot\left(\frac{(\phi + \psi)}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{(\phi + \psi)}{2}\right) \dots\dots\dots (2)$$

Regangan efektif (ε) dihitung, yang merupakan hasil ECAP setelah N dilewatkan, diberikan oleh hubungan berikut:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{N}{3^{1/2}} \left[2 \cot \left(\frac{(\phi + \psi)}{2} \right) + \psi \cosh \left(\frac{(\phi + \psi)}{2} \right) \right] \dots\dots\dots (3)$$

Persamaan (3) menjelaskan regangan efektif pada sampel ECAP selama keseluruhan proses. Tekanan internal ECAP di dinding cetakan mampu mempromosikan pada bidang slip, setelah tekanan mencapai sudut tikungan, bahan tegang. Dalam kondisi ini, dislokasi menumpuk dan ukuran butir akhirnya mengecil. Mekanisme penyempurnaan ini adalah dislokasi dalam bentuk kembaran dapat diperhatikan pada gambar 4 c. Mekanisme *twinning* atau kembaran atom bekerja pada suhu rendah, dengan penurunan suhu, sehingga zona slip atom meningkat tajam. Hal ini membuat butiran menjadi lebih halus, sesuai dengan jumlah siklus lintasan yang diperlukan. Pada gambar 4c dijelaskan representasi skema evolusi mikrostruktur yang melewati proses ECAP: (1) butiran kasar sebelum melewati sudut; (2) pergerakan dislokasi karena penyempitan tekanan; (3) bidang gelincir lurus yang mengakibatkan dinding dislokasi berubah menjadi gerakan kembaran; (4) pergerakan slip sekunder dan pita mikro.

Berdasarkan artikel ilmiah yang ditulis oleh Prof. Ruslan Z. Valiev, dari Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University, Ufa 450000, Russian Federation. Beserta partner yaitu: Prof. Terence G. Langdon yang menjadi pengajar di 1) Materials Research Group, School of Engineering Sciences, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK. Dan juga pengajar di 2) Departments of Aerospace & Mechanical Engineering and Materials Science, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-1453, USA. Pada halaman 885-886 [Valiev, 2006] tertulis bahwa “setidaknya, penggunaan ECAP dalam pemrosesan logam, bertujuan untuk menghasilkan paduan logam dengan sifat unggul, memiliki sejarah panjang yang dapat ditelusuri kembali ke pengerjaan logam awal dari Tiongkok kuno [Wang, 2006], pandai besi produksi baja Damaskus berkualitas tinggi di Timur Tengah [Sherby, 2001] dan fabrikasi baja Wootz legendaris di India

kuno [Srinivasan, 2004]. Prinsip-prinsip pemrosesan ECAP mendapat sedikit perhatian lebih lanjut baik di kalangan akademis atau dalam upaya apa pun untuk memanfaatkan teknologi baru ini dalam operasi perangkat kemiliteran dan industri. Sejak pekerjaan awal ini, banyak teknik pemrosesan ECAP yang berbeda telah diusulkan dan dikembangkan serta dievaluasi. Dari berbagai prosedur ECAP, penekanan sudut saluran yang sama merupakan teknik pemrosesan yang sangat menarik karena beberapa alasan. Pertama, dapat diterapkan pada billet yang cukup besar sehingga ada potensi untuk menghasilkan bahan yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi struktural. Kedua, ini adalah prosedur yang relatif sederhana yang mudah dilakukan pada berbagai paduan dan, kecuali hanya untuk konstruksi cetakan, pemrosesan oleh ECAP menggunakan peralatan yang tersedia di sebagian besar laboratorium.



Gambar 5. Penghargaan the best author diberikan kepada Prof. Valiev (kanan) dan Prof. Langdon (kiri) penulis artikel *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement Progress in Materials Science 51*.

ECAP dapat dikembangkan dan diterapkan pada material dengan struktur kristal yang berbeda dan pada banyak material mulai dari paduan yang dikeraskan dengan presipitasi hingga intermetalik dan komposit matriks logam. Keempat, homogenitas yang wajar

dicapai melalui sebagian besar billet yang ditekan asalkan pengepresan dilanjutkan ke regangan yang cukup tinggi. Kelima, proses dapat ditingkatkan untuk pengepresan sampel yang relatif besar dan ada potensi untuk mengembangkan ECAP untuk digunakan dalam prosedur pemrosesan logam komersial. Berbagai fitur menarik ini telah menghasilkan banyak studi eksperimental dan perkembangan baru dalam pemrosesan ECAP selama dekade terakhir. Oleh karena itu, tinjauan ini dirancang untuk menyajikan tinjauan rinci tentang berbagai perkembangan ini dan untuk memberikan informasi tentang status ECAP saat ini sebagai alat pemrosesan dalam fabrikasi padatan curah dengan struktur UFG.

CONCLUSION

Metode ECAP merupakan metode untuk meningkatkan sifat mekanik logam dengan mekanisme proses perlakuan pada logam, dimana hal itu terdapat pada pattern Al-Jamahir fi ma`rifat al-jawahir. Rumusan ECAP yang dikembangkan oleh Segal dan Valiev, sudah dinarasikan pada kitan fi MAkrifat al jawahir terkait dengan teori pembengkokan penekanan dan reaksi pada logam.

Berdasarkan artikel ilmiah yang ditulis oleh Ruslan dan Langdon bahwa metode ECAP dalam pemrosesan logam, bertujuan untuk menghasilkan paduan logam dengan sifat unggul merupakan metamorfosa peralihan transfer teknologi yang ditelusuri Kembali dari Tiongkok kuno pandai besi produksi baja Damaskus berkualitas tinggi di Timur Tengah dan fabrikasi baja Wootz legendaris di India kuno.

ECAP dapat dikembangkan dan diterapkan pada material dengan struktur kristal yang berbeda dan pada banyak material mulai dari paduan yang dikeraskan dengan presipitasi hingga intermetalik dan komposit matriks logam.

Prinsip-prinsip pemrosesan ECAP mendapat sedikit perhatian lebih lanjut baik di kalangan akademis atau dalam upaya apa pun untuk memanfaatkan teknologi baru ini dalam operasi perangkat kemiliteran dan industri. Sejak pekerjaan awal ini, banyak teknik pemrosesan ECAP yang berbeda telah diusulkan dan dikembangkan serta dievaluasi

REFERENCES

- Hakim Mohammad Said. (1989). The book most comprehensive in knowledge on precious stones: Al-Beruni's book on mineralogy [al-jamahir fi marifat al-jawahir (Natural sciences) by Muhammad ibn Ahmad Biruni (1989-05-03) Hardcover – 1 Jan. 1750, Amazon, Write a Review. Publisher: Pakistan Hijra Council, ,ISBN-13: 9789698016289.
- George Dieter (1988) Mechanical Metallurgy 3rd edition, Physical metallurgy Strength of materials. Publishing: London: McGraw-Hill, ISBN-13: 978-0070168930.
- George E. Dieter; alih bahasa Ny. Sriati Djaprie (1990) Metalurgi mekanik, jilid 1-2, Terbitan: Erlangga - Jakarta, Edition: III.
- Gus Pram, (2021). *Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam perspektif Islam*, Penerbit DeePublish Djogjakarta, 2 - Agustus.
- A. F. Golovin (1968) The centennial of D. K. Chernov's discovery of polymorphous transformations in steel (1868–1968) Metal Science and Heat Treatment volume 10, 335–340.
- Segal, V.M.; Korbel, A.; Richert, M.; Richert, J., 1999 in: Second RISO International Symposium on Metallurgical Science, Material Science Engineering, A271, 322.
- Valiev, R. Z.; Korznikov, A.V.; Mulyukov, R. R., (1993) Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, Materials Science and Engineering, A168 (2), 141-148.
- Dr.-Tech Ir. Agus Pramono ST., MT (2022) Buku referensi “Material Superplastis - Teknik Pembentukan Lanjut severe plastic deformation (SPD), penerbit Deepublish Jogjakarta
- Agus Pramono (2016) THESIS ON MECHANICAL ENGINEERING E106. Investigation of Severe Plastic Deformation Processes for Aluminum Based Composites, Tallinn Institute of Tecnology Estonia. ISSN 1406-4758/ISBN 978-9949-83-044-2 (publication).
- Agus Pramono, Lauri Kollo, Kaspar Kallip, Renno Veinthal and Jaana-Kateriina Gomon (2014). Heat Treatment of Ultrafine Grained High-Strength Aluminum Alloy. Key Engineering Materials Vol. 604, 273-276.

- Segal, V.M., Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear, *Materials Science and Engineering*, 2002, A338, 331-334.
- Segal, V. M.; Hartwig, K. T.; Goforth, R. E., Ferrasse, S.; (1997). Development of a submicrometer grained microstructure in aluminum 6061 using equal channel angular extrusion, *Journal of Materials Research Society*, 12 (5), 1253- 1261.
- Valiev, R. Z. Islamgaliev, R. K. Alexandrov, I. V., (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, 2000, 45 (2), 103-189.
- Comwall, L. R.; Hartwig, K. T.; Goforth, R. E.; Semiatin, S.L., (1996). The equal channel angular extrusion process for materials processing, *Materials Characterization*, 37 (5), 295-300
- Valiev, R. Z.; Langdon, T. G., Development in the use of ECAP processing for grains refinement. *Reviews on Advanced Material Science*, 2006, 13, 15-26.
- Ruslan Z. Valiev, Terence G. Langdon (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement *Progress in Materials Science* 51, 881–981.
- Wang JT. *Mater Sci Forum* 2006;503–504:363.
- Sherby OD, Wadsworth J. *J Mater Proc Tech* 2001;117:347.
- Srinivasan S, Ranganathan S. India's legendary wootz steel: An advanced material of the ancient world. Bangalore, India: National Institute of Advanced Studies and Indian Institute of Science; 2004.
- Bridgman PW. *Studies in large plastic flow and fracture*. New York (NY): McGraw-Hill; 1952.