REKAYASAMESIN V13 N3
eISSN 2477-6041 artikel 14, pp. 763 – 772, 2022

EVALUASI PERLAKUAN *EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING* (ECAP) DENGAN RUTE Bc PADA BATANG TITANIUM (Ti-*ROD*) DENGAN ANALISIS DIFRAKSI SINAR-X

Ibrahim Purawiardi
Peneliti
Pusat Riset
Teknologi Kekuatan Struktur
Badan Riset dan Inovasi Nasional
ibrahimpurawiardi@gmail.com

I Nyoman Gede Putrayasa Astawa
Peneliti
Pusat Riset Metalurgi
Badan Riset dan Inovasi Nasional
mank_71@yahoo.com

In this study, commercial titanium rod was treated by equal-channel angular pressing (ECAP) with Bc route and two passes. This treatment was then evaluated by means of x-ray diffraction (XRD) analytical method. The evaluation was concentrated in crystal structure and residual lattice strain investigations. There were no significant crystal structure change before and after ECAPed. However, there were significant change in residual lattice strain after ECAPed. Before ECAPed, this titanium rod consisted of two lattice strains i.e. 0.0052 and 0.0009. After ECAPed, longitudinal lattice strain reduced from 0.0052 to 0.0036 after first pass and reduced again to 0.0025 after two passes. Meanwhile, shear lattice strain changed from 0.0009 to 0.0032 after first pass and was then annihilated after two passes. These results show that ECAP treatment can reduce and eliminate lattice strains on titanium rod. This study also shows that the reduction of lattice strains implicates to the increasing of its hardness value.

Keywords: *Titanium, Rod, ECAP, Bc Route, Crystal Structure, Lattice Strain, Hardness.*

1. PENDAHULUAN

Logam titanium merupakan logam yang banyak digunakan di berbagai bidang industri seperti dirgantara, biomedis, elektronik, dan lain sebagainya [1]. Keunggulan dari titanium terletak pada kekuatan bahannya, terutama kekuatan mekaniknya [1]. Titanium umumnya dijual secara komersial dalam bentuk paduan dengan bahan lainnya. Namun, tingginya harga bahan paduan titanium menyebabkan ilmuwan mulai berfikir untuk meningkatkan kekuatan mekanik tanpa harus menambahkan logam paduan yang lain. Salah satu metode yang dapat dilakukan adalah metode deformasi plastis paksa. Metode deformasi plastis paksa (*severe plastic deformation* atau cukup disingkat SPD saja) merupakan cara yang cukup efektif untuk meningkatkan sifat mekanik pada logam titanium murni tanpa harus menambahkan unsur paduan yang lain dan juga tanpa harus merubah ukuran diameternya [2].

Salah satu metode SPD yang dapat diaplikasikan pada batang logam titanium murni adalah perlakuan *equal-channel angular pressing* (ECAP) [3]. Prinsip kerja dari ECAP sendiri adalah sampel logam pejal yang berbentuk silinder (*rod*) dilewatkan pada saluran silinder yang berbelok dengan sudut belokan tertentu sambil ditekan secara paksa dengan beban tertentu [4]. Ilustrasi proses ECAP ini dapat dilihat pada Gambar 1.a. Dengan proses perlakuan tersebut, diharapkan terjadi pemadatan atom sehingga berimplikasi pada peningkatan sifat mekaniknya, terutama nilai kekerasannya.

Beberapa riset tentang aplikasi ECAP pada batang titanium (*titanium rod*) sendiri sudah banyak yang dipublikasikan. Umumnya riset hanya membahas seputar efek perlakuan ECAP termasuk rute dan jumlah ulangannya (*pass*) terhadap peningkatan sifat mekaniknya. Penyebab peningkatan sifat mekanik akibat dari perlakuan ECAP yang umumnya dibahas adalah terjadinya perubahan ukuran butir (*grain*) menjadi lebih kecil dan seragam [5-7]. Namun, jarang sekali yang membahas perubahan nilai tegangan sisa selama proses ECAP. Hal ini disebabkan karena tegangan sisa sulit sekali diukur dan dikuantifikasi. Namun, meskipun demikian, tegangan sisa masih dapat diprediksi keberadaannya dari adanya regangan sisa. Hal ini disebabkan adanya tegangan sisa selalu diikuti pula dengan adanya regangan sisa. Regangan sisa sendiri dapat diidentifikasi

Corresponding Author: ibrahimpurawiardi@gmail.com Received on: February 2022 Accepted on: April 2022
DOI: https://doi.org/10.21776/jrm.v13i3.1194

keberadaannya dari regangan kisi. Dan, regangan kisi dapat diidentifikasi menggunakan teknik difraksi sinar-x (XRD) [8].

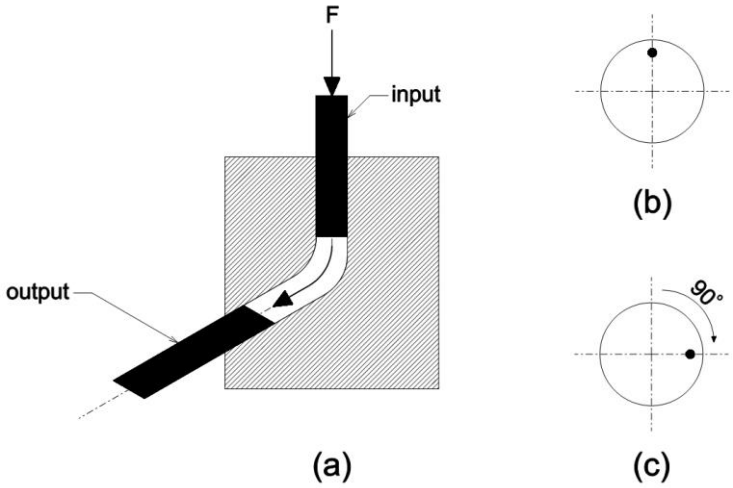
Oleh sebab itu, studi kali ini mencoba untuk mengetahui penyebab peningkatan sifat mekanik (yaitu nilai kekerasan) pada batang titanium akibat perlakuan ECAP dari sudut pandang regangan kisi, dimana studi ini jarang sekali dilakukan. Selanjutnya, untuk melakukan analisis regangan kisi digunakan metode analisis khusus, yaitu metode Plot Williamson-Hall. Selain itu, pada studi kali ini juga dilakukan analisis struktur kristalnya. Kombinasi analisis struktur kristal dan regangan kisi yang ditampilkan pada studi ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam evaluasi hasil perlakuan ECAP pada batang titanium yang berguna untuk proses kontrol kualitas.

2. METODE DAN BAHAN

2.1 Bahan dan Karakterisasi

Sampel merupakan batang pejal titanium murni (Ti - *rod*) dengan diameter 13.5 mm dan panjang 65 mm sebanyak tiga buah. Sampel diperoleh dari Nilaco, Jepang dengan kemurnian 99.5 % Ti. Sampel pertama tidak diberikan perlakuan ECAP. Sampel kedua diberi perlakuan ECAP rute Bc dengan satu kali ulangan (*pass*). Sampel ketiga diberi perlakuan ECAP rute Bc dengan dua kali ulangan (*pass*). Mekanisme ECAP rute Bc ini dapat dilihat pada Gambar 1.

Ketiga sampel kemudian dikarakterisasi dengan difraktometer sinar-x (XRD) merek *Brüker* dengan *tube* Co-Kα (λ = 1.78901 Å). Rentang sudut 2θ yang digunakan adalah 30º - 120º. Setelah dikarakterisasi XRD, nilai sudut 2θ dan lebar setengah puncak difraksi (FWHM) kemudian dihitung menggunakan perangkat lunak *Highscore Plus* (HSP). Setelah itu, ketiga sampel kemudian dianalisis struktur kristalnya dengan persamaan 1 dan persamaan 2. Setelah itu, regangan kisinya juga dihitung menggunakan metode plot Williamson-Hall. Selanjutnya, ketiga sampel diukur nilai kekerasannya dalam skala Brinell menggunakan alat uji kekerasan merek *AFFRI* dengan beban tekan 187.3 kgf [9].



Gambar 1: (a) Mekanisme ECAP rute Bc dengan sudut belokan 120º pada sampel. (b) Posisi sampel tampak atas pada ulangan (*pass*) pertama. (c) Posisi sampel tampak atas pada ulangan (*pass*) yang kedua.

2.2 Analisis Struktur Kristal

Setelah dikarakterisasi menggunakan XRD, sampel kemudian dianalisis struktur kristalnya. Analisis struktur kristal dilakukan untuk mengetahui struktur kristal beserta parameter kisinya. Analisis struktur kristal heksagonal dan orthorhombik secara berturut-turut dilakukan menggunakan prinsip-prinsip persamaan (1) dan persamaan (2) sebagai berikut [10]

$$Sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{3a^2}(h^2 + \square k + k^2) + \frac{\lambda^2}{4c^2}(l^2) \quad (1)$$

$$Sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a^2}(h^2) + \frac{\lambda^2}{4b^2}(k^2) + \frac{\lambda^2}{4c^2}(l^2) \quad (2)$$

dengan $Sin^2\theta$ dihitung dari nilai sudut 2θ; *a*, *b*, *c* adalah nilai parameter kisi; dan *h*, *k*, *l* adalah indeks Miller dari bidang-bidang kristal.

2.3 Plot Williamson-Hall

Plot Williamson-Hall merupakan teknik yang saat ini paling banyak digunakan untuk menganalisis pelebaran puncak difraksi sinar-x [11-18]. Prinsip metode ini pada sampel padatan logam adalah pelebaran puncak difraksi sinar-x (*B*, dalam radian) diakibatkan oleh adanya efek regangan kisi. Prinsip ini kemudian dirumuskan dalam sebuah persamaan berikut [18]

$$B = 4\varepsilon \tan\theta \tag{3}$$

$$B \cos\theta = 4\varepsilon \sin\theta \tag{4}$$

dimana ε adalah regangan kisi dan θ adalah sudut difraksi yang terbentuk dalam derajat. Persamaan (4) kemudian dapat dianggap sebagai persamaan linier $y = ax$ dengan y adalah $B \cos\theta$, x adalah $4 \sin\theta$, dan a atau gradiennya adalah ε. Agar analisis lebih mudah dilakukan, plot Williamson-Hall kemudian dapat dibuat dengan absis (sumbu-*x*) adalah $4 \sin\theta$ dan ordinat (sumbu-*y*) adalah $B \cos\theta$. Sehingga, dengan plot Williamson-Hall ini, nilai regangan kisi (ε) dapat diperoleh dari nilai gradien persamaan garis regresi liniernya.

Namun, pada penerapannya jarang ditemukan pola garis regresi linier $y = ax$. Pola yang sering ditemukan adalah $y = ax + b$ dimana b adalah titik potong pada ordinat. Namun, pola $y = ax + b$ dapat ditoleransi dan dianggap sebagai $y = ax$ dengan syarat nilai titik potong b bernilai sangat mendekati nol.

Di dalam perhitungannya, pelebaran puncak difraksi (*B*) dihitung dari besarnya nilai lebar setengah puncak difraksi (FWHM), dimana nilai FWHM dalam satuan °2θ kemudian dikonversi menjadi satuan radian (rad).

Tabel 1: Hasil karakterisasi XRD berupa nilai-nilai sudut 2θ dan lebar setengah puncak (FWHM).

λ = 1.78901 Å (Co-Kα)

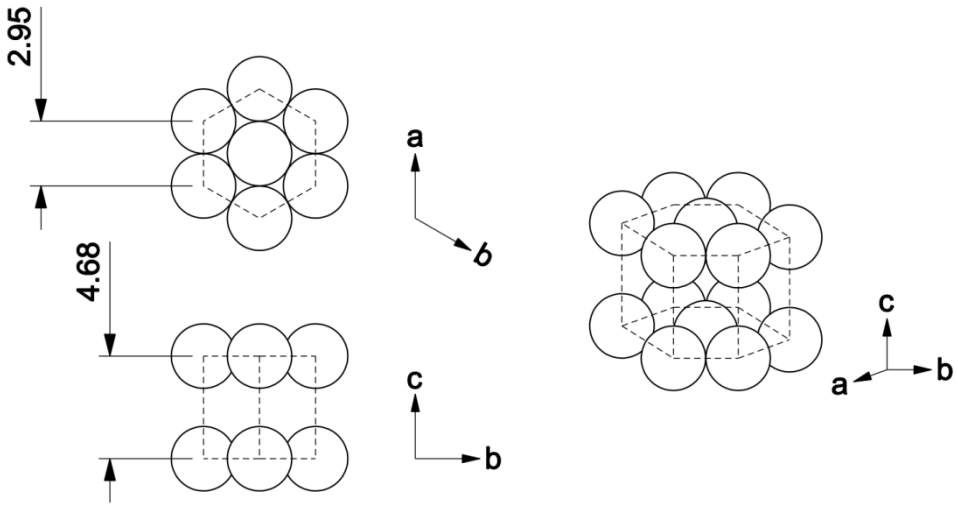
NO. PUNCAK DIFRAKSI	SEBELUM ECAP		SETELAH ECAP (1 *PASS*)		SETELAH ECAP (2 *PASS*)	
	2θ (°)	FWHM (°2θ)	2θ (°)	FWHM (°2θ)	2θ (°)	FWHM (°2θ)
1	34.3127	0.4487	34.3449	0.1309	34.4112	0.1122
2	40.9306	0.3739	40.9263	0.2057	40.9704	0.2244
3	44.9283	0.2617	44.9013	0.1309	44.9267	0.2617
4	46.9660	0.2991	46.9724	0.1309	46.9322	0.1683
5	62.3689	0.2244	62.3334	0.2617	62.4146	0.3365
6	74.6463	0.3739	74.5355	0.2617	74.6053	0.4487
7	84.2720	0.5235	84.2150	0.5983	84.3071	0.5983
8	88.6241	0.5983	88.5781	0.5235	88.7407	0.5983
9	91.4863	0.5983	91.3344	0.5235	91.4090	0.5235
10	93.0962	0.4487	92.9280	0.5235	93.0282	0.5983
11	94.6376	0.4487	99.7265	0.5983	99.5506	0.5983
12	97.7893	0.4487	105.5693	0.5983	105.8535	0.5983
13	99.6379	0.5235	114.3767	0.8974	114.3400	0.8974
14	105.7398	0.8974				
15	114.4701	0.8974				

Tabel 2: Hasil analisis struktur kristal heksagonal.

SEBELUM ECAP		SETELAH ECAP (1 *PASS*)		SETELAH ECAP (2 *PASS*)	
a = 2.9547 Å *c* = 4.6821 Å		*a* = 2.9547 Å *c* = 4.6821 Å		*a* = 2.9511 Å *c* = 4.6821 Å	
2θ (°)	***hkl***	**2θ (°)**	***hkl***	**2θ (°)**	***hkl***
34.3127		34.3449		34.4112	
40.9306	100	40.9263	100	40.9704	100
44.9283	002	44.9013	002	44.9267	002
46.9660	101	46.9724	101	46.9322	101
62.3689	102	62.3334	102	62.4146	102
74.6463	110	74.5355	110	74.6053	110
84.2720	103	84.2150	103	84.3071	103
88.6241	200	88.5781	200	88.7407	200
91.4863	112	91.3344	112	91.4090	112
93.0962	201	92.9280	201	93.0282	201
94.6376		99.7265	004	99.5506	004
97.7893		105.5693	202	105.8535	202
99.6379	004	114.3767	104	114.3400	104
105.7398	202				
114.4701	104				

3. HASIL DAN DISKUSI

Hasil pengujian XRD pada ketiga sampel uji dapat dilihat pada Tabel 1. Data-data difraksi yang ditampilkan pada Tabel 1 adalah sudut-sudut 2θ dan lebar setengah puncak (FWHM). Nilai sudut 2θ digunakan baik dalam evaluasi struktur kristal maupun evaluasi regangan kisi. Sementara nilai FWHM digunakan khusus dalam evaluasi regangan kisi.



Gambar 2: Struktur kristal heksagonal yang terdeteksi pada sampel batang titanium (satuan dalam Å).

Tabel 3: Hasil analisis struktur kristal orthorhombik.

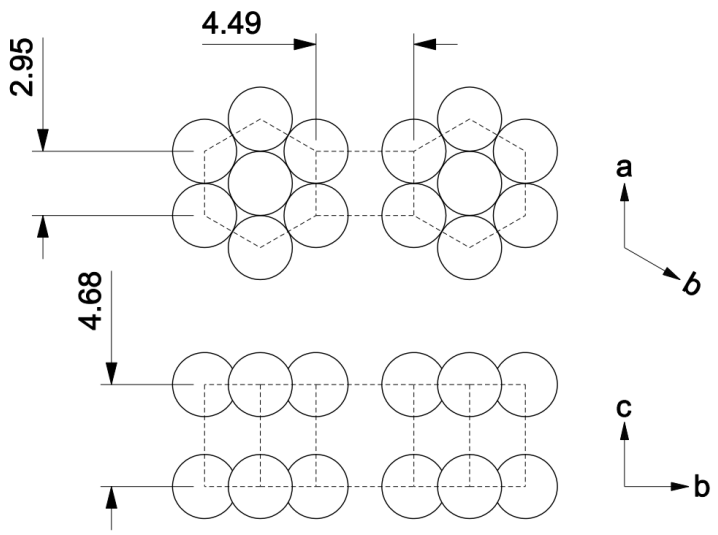
SEBELUM ECAP		SETELAH ECAP (1 *PASS*)		SETELAH ECAP (2 *PASS*)	
a = 2.9507 Å *b* = 4.4894 Å *c* = 4.6821 Å		*a* = 2.9539 Å *b* = 4.4894 Å *c* = 4.6821 Å		*a* = 2.9523 Å *b* = 4.4951 Å *c* = 4.6821 Å	
2θ (°)	***hkl***	**2θ (°)**	***hkl***	**2θ (°)**	***hkl***
34.3127	100	34.3449	100	34.4112	100
40.9306	101	40.9263	101	40.9704	101
44.9283	002	44.9013	002	44.9267	002
46.9660	020	46.9724	020	46.9322	020
62.3689	112	62.3334	112	62.4146	112
74.6463	200	74.5355	200	74.6053	200
84.2720	130	84.2150	130	84.3071	130
88.6241	023	88.5781	023	88.7407	023
91.4863	202	91.3344	202	91.4090	202
93.0962	220	92.9280	220	93.0282	220
94.6376	212	99.7265	004	99.5506	004
97.7893	221	105.5693	040	105.8535	040
99.6379	004	114.3767	114	114.3400	114
105.7398	040				
114.4701	114				

3.1 Evaluasi Struktur Kristal

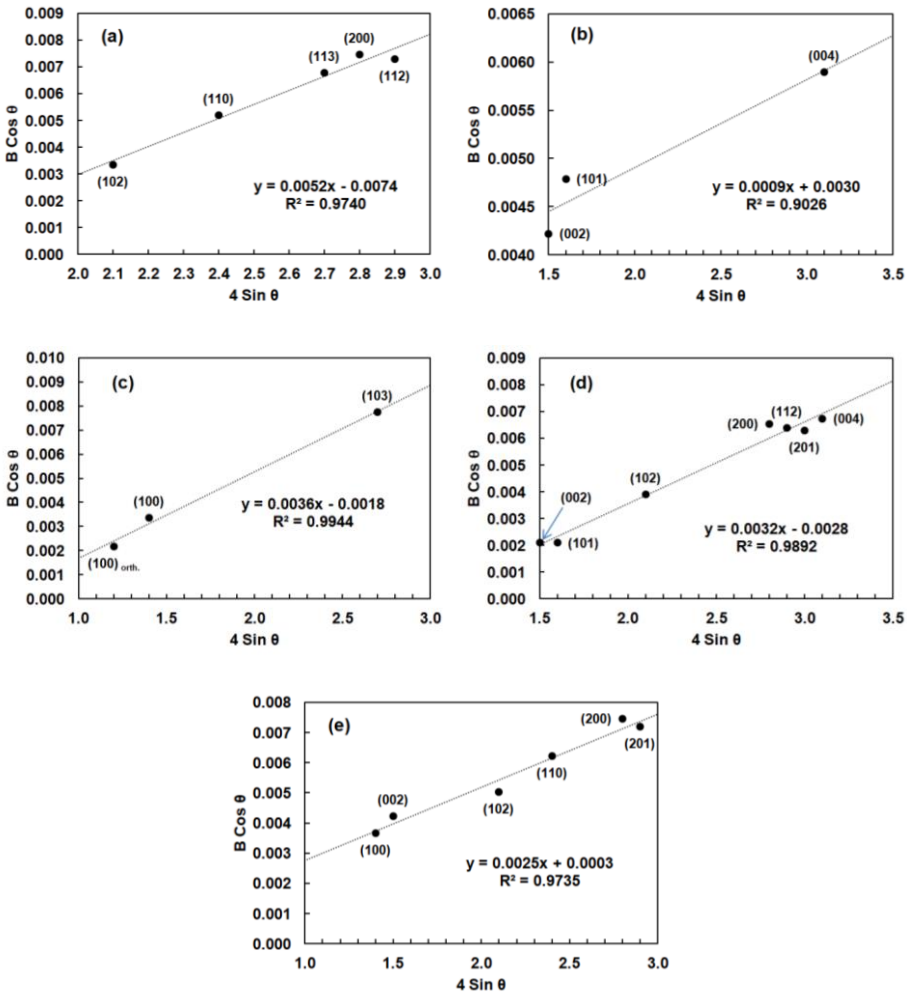
Evaluasi struktur kristal dilakukan terlebih dahulu dengan menginvestigasi struktur kristal heksagonal menggunakan prinsip dari persamaan (1). Hasil investigasi struktur heksagonal pada ketiga sampel batang titanium dapat dilihat pada Tabel 2. Jika diperhatikan pada Tabel 2, kisaran parameter kisi struktur heksagonal pada ketiga sampel uji memiliki kisaran yang relatif identik pada *a* = 2.95 Å dan *c* = 4.68 Å. Kisaran parameter kisi ini menunjukkan karakteristik dari fasa α-Ti (CPDS # 4770 dan 10379; *a* = 2.95 Å, *c* = 4.686 Å; *space group*: P 6(3)/mmc) [19-20] yang merupakan struktur kristal dasar dari logam titanium pada kondisi stabil. Ilustrasi dari struktur kristal heksagonal ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Jika diperhatikan kembali Tabel 2, masih terdapat puncak difraksi yang belum teridentifikasi bidangnya (*hkl*). Hal ini memunculkan dugaan adanya struktur kristal lain disamping struktur heksagonal pada ketiga sampel. Hasil identifikasi pada Tabel 3 menunjukkan adanya struktur kristal selain heksagonal, yaitu struktur kristal orthorhombik. Nilai parameter kisi dari struktur orthorhombik ini berkisar pada *a* = 2.95 Å, *b* = 4.49 Å dan *c* = 4.68 Å. Jika dilihat parameter kisi *a* dan *c* baik pada struktur heksagonal dan orthorhombik, kisaran nilainya relatif identik. Hal ini menimbulkan dugaan bahwa nilai parameter kisi *b* pada struktur orthorhombik timbul akibat adanya jarak antar unit-sel struktur heksagonal, sehingga menghasilkan struktur semu orthorhombik (*pseudo-orthorhombic*). Ilustrasi dari fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 3.

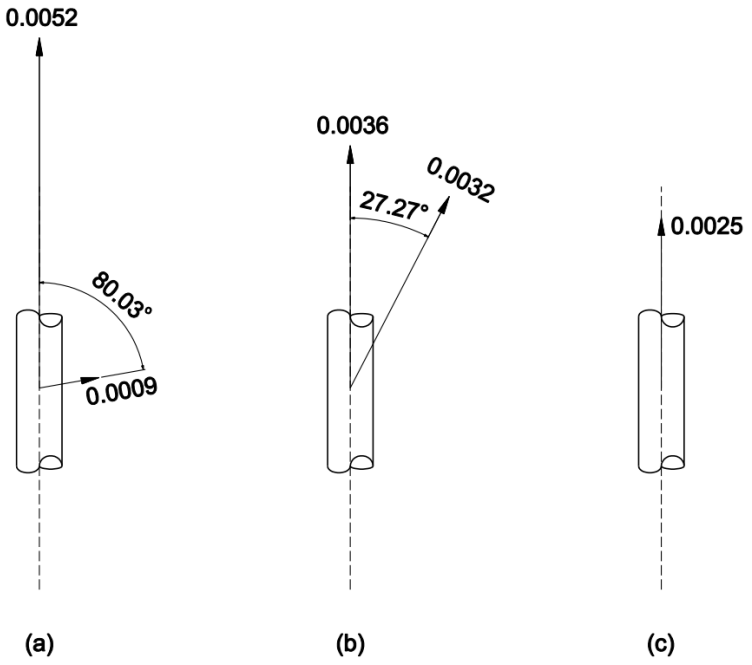
Jika diperhatikan baik pada Tabel 2 maupun Tabel 3, baik pada sampel sebelum dan sesudah ECAP, ketiga sampel baik dalam struktur heksagonal maupun orthorhombik, memiliki kisaran nilai parameter kisi (*a*, *b*, *c*) yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa dari evaluasi struktur kristal, proses perlakuan ECAP rute Bc pada batang titanium tidak merubah struktur kristalnya secara signifikan.



Gambar 3: Struktur kristal heksagonal dan orthorhombik semu (*pseudo-orthorhombic*) yang terdeteksi pada sampel batang titanium (satuan dalam Å).



Gambar 4: Plot Williamson-Hall pada sampel batang titanium. (a) dan (b) Sebelum perlakuan ECAP. (c) dan (d) Setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 1 *pass*. (e) Setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 2 *pass*.



Gambar 5: Distribusi arah regangan kisi pada sampel batang titanium. (a) Sebelum perlakuan ECAP. (b) Setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 1 *pass*. (c) Setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 2 *pass*.

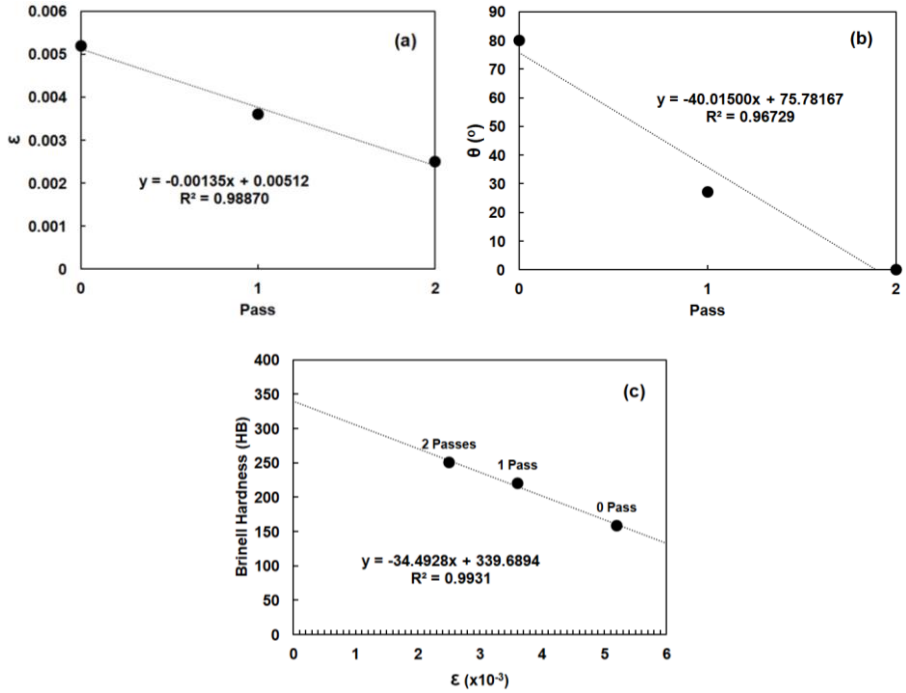
3.2 Evaluasi Regangan Kisi

Selain pada struktur kristalnya, evaluasi dari perlakuan ECAP rute Bc pada batang titanium juga dilakukan pada sisi regangan kisinya. Untuk melakukan evaluasi regangan kisi, diperlukan plot Williamson-Hall. Plot ini dapat dilihat pada Gambar 4. Jika dilihat pada Gambar 4, sampel sebelum perlakuan ECAP dan sampel setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 1 *pass* memiliki dua variasi regangan kisi (ε). Sementara sampel setelah perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 2 *pass* hanya memiliki satu regangan kisi saja.

Jika regangan kisi yang bernilai lebih besar diasumsikan berada pada posisi sumbu longitudinal, dan regangan kisi yang bernilai lebih kecil diasumsikan berada pada posisi sumbu geser, maka akan diperoleh ilustrasi arah regangan kisinya seperti pada Gambar 5, dengan nilai sudut antara dua regangan kisi didapatkan dari hubungan nilai *Cos* antara nilai regangan kisi pada sumbu longitudinal dan nilai regangan kisi pada sumbu geser (lihat Gambar 5.a dan Gambar 5.b).

Jika dilihat pada Gambar 6.a, terlihat adanya hubungan linier antara regangan kisi pada sumbu longitudinal dengan jumlah *pass*, dimana semakin banyak jumlah *pass* maka akan terjadi reduksi nilai regangan kisinya. Dengan hubungan persamaan linier $y = -0.00135\,x + 0.00512$, dimana y merupakan regangan kisi pada sumbu longitudinal dan x merupakan jumlah *pass*, maka secara teoritis saat $y = 0 \rightarrow x = 3.79 \approx 4$ *pass*. Artinya, jika ingin menghilangkan regangan kisi yang tersisa pada sumbu longitudinal pada batang titanium diperlukan perlakuan ECAP rute Bc dengan pengulangan sebanyak 4 *pass*. Namun, hal ini tidak mungkin dilakukan, karena setelah 3 *pass*, sampel batang titanium mengalami patah, sehingga perlakuan ECAP rute Bc pada batang titanium ini hanya dapat dilakukan hingga maksimum 2 *pass* saja. Dengan fakta ini, maka secara efektif, meskipun tidak dapat menghilangkan regangan kisi sisa pada sumbu longitudinal, proses ECAP rute Bc ini masih mampu untuk mereduksi nilai regangan kisi pada sumbu longitudinal hingga menjadi bernilai setengahnya.

Kemudian, jika diperhatikan pada Gambar 6.b, terlihat pula adanya hubungan linier antara sudut antar regangan kisi longitudinal-geser (θ) dengan jumlah *pass*. Dengan persamaan linier $y = -40.015\,x + 75.78167$, dimana y merupakan sudut antar regangan kisi longitudinal-geser (θ) dan x merupakan jumlah *pass*, maka secara teoritis saat $y = 0 \rightarrow x = 1.89 \approx 2$ *pass*. Secara aktual, setelah 2 *pass* pun memang tidak ditemukan lagi regangan kisi pada sumbu geser sehingga nilai $\theta = 0$ (lihat Gambar 5.c). Hal ini menunjukkan fakta bahwa selain dapat mereduksi regangan kisi pada sumbu longitudinal, perlakuan ECAP rute Bc dapat menghilangkan regangan kisi yang tersisa pada sumbu geser pada batang titanium.



Gambar 6: Beberapa kurva regresi linier yang berhubungan dengan jumlah *pass* dan regangan kisi. (a) Regangan kisi (ε) pada arah longitudinal sebagai fungsi dari jumlah *pass*. (b) Sudut antar dua arah regangan kisi (θ) sebagai fungsi dari jumlah *pass*. (c) Nilai kekerasan Brinell sebagai fungsi dari regangan kisi (ε) pada arah longitudinal.

3.3 Hubungan Regangan Kisi dengan Nilai Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dengan skala Brinell pada ketiga sampel uji menunjukkan nilai 158.5, 220.0 dan 250.8 pada sampel sebelum perlakuan ECAP, setelah 1 *pass* dan setelah 2 *pass* secara berturut-turut. Bila nilai-nilai kekerasan ini dihubungkan dengan nilai regangan kisi pada sumbu longitudinal, maka akan diperoleh hubungan linier seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.c. Artinya, reduksi nilai regangan kisi pada sumbu longitudinal berimplikasi pada meningkatnya kepadatan batang titanium sehingga meningkatkan nilai kekerasannya. Hal ini menunjukkan bahwa proses perlakuan ECAP rute Bc mampu meningkatkan sifat mekaniknya (dalam hal ini kekerasannya) tanpa harus merusak struktur kristalnya.

Fenomena peningkatan sifat mekanik pasca ECAP ini terjadi karena adanya pengurangan bidang geser setelah perlakuan ECAP. Bila diperhatikan Tabel 3, terdapat pengurangan bidang (*hkl*) dari 15 menjadi 13 buah yang ditandai dengan hilangnya bidang-bidang (212) dan (221) setelah perlakuan ECAP 1 *pass*. Bidang-bidang (*hkl*) tersebut merupakan bidang-bidang geser yang memberikan peluang terjadinya dislokasi [21]. Kemudian, setelah 2 *pass*, tidak terjadi lagi pengurangan bidang geser, namun terjadi peningkatan kerapatan dislokasi [22]. Peningkatan kerapatan dislokasi ini menyebabkan terjadinya kepadatan dislokasi sehingga meningkatkan kepadatan atom yang berimplikasi pada peningkatan nilai kekerasannya [22]. Kerapatan dislokasi ini mencapai puncaknya setelah perlakuan 2 *pass*, sehingga pada saat uji coba 3 *pass*, tidak ada lagi peluang pemadatan dislokasi sehingga sampel mengalami patah (*crack*).

4. KESIMPULAN

Proses perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 2 *pass* pada batang titanium (Ti - *rod*) sangat efektif menurunkan nilai regangan kisi pada sumbu longitudinal dan menghilangkan regangan kisi pada sumbu geser. Reduksi nilai regangan kisi pada batang titanium (Ti - *rod*) akibat perlakuan ECAP rute Bc ini berimplikasi pada peningkatan sifat mekaniknya, yang dalam hal ini adalah nilai kekerasannya. Proses perlakuan ECAP rute Bc sebanyak 2 *pass* juga terbukti tidak merusak struktur kristal pada batang titanium (Ti - *rod*), sehingga metode ini sangat direkomendasikan untuk meningkatkan sifat mekanik batang titanium tanpa harus merusak struktur kristalnya.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pusat Riset Metalurgi - BRIN atas fasilitas riset *equal-channel angular pressing* (ECAP) dan Pusat Riset Material Maju - BRIN atas fasilitas pengujian XRD.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] SAPUTRA, E., IBRAHIM, G. A., HARUN, S., SUPRIYADI, E. A., PATIHAWA, A., "Mekanisme Pembentukan Burr pada Permesinan Frais Mikro Ti 6Al-4V ELI dalam Keadaan Kering", *Rekayasa Mesin*, v. 11, n. 3, pp. 307-312, Des. 2020.

[2] KARDASHEV, B. K., NARYKOVA, M. V., BELEKHTIN, V. I., KADOMTSEV, A. G., "Evolution of Elastic Properties of Ti and its Alloys due to sSevere Plastic Deformation", *Physical Mesomechanics*, v. 23, pp. 193-198, Jul. 2020.

[3] SEMENOVA, I. P., POLYAKOV, A. V., RAAB, G. I., LOWE, T. C., VALIEV, R. Z., "Enhanced Fatigue Properties of Ultrafine-Grained Ti Rods Processed by ECAP-conform", *Journal of Materials Science*, v. 47, pp. 7777-7781, Jul. 2012.

[4] MANJUNATH, G. K., UDAYA BHAT, K., PREETHAM KUMAR, G. V., RAMESH, M. R., "Microstructure and Wear Performance of ECAP Processed Cast Al-Zn-Mg Alloys", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 71, pp. 1919-1931, May 2018.

[5] KHELFA, T., MUŇOZ-BOLAŇOZ, J. A., LI, F., CABRERA-MARRERO, J. M., KHITOUNI, M., "Microstructure and Mechanical Properties of AA6082-T6 by ECAP Under Warm Processing", *Metals and Materials International*, v. 26, pp. 1247-1261, Aug. 2020.

[6] MURALITHARAN, A., MADHAVAN, K., SRINIVASAN, R., RAMAMOORTHI, V., PICHUMANI, S., "A Review on Mechanical Properties, Tribological, Corrosion, and Weldability Studies of Aluminum Composites Processed Using Stir Casting and ECAP Methods", In: *Advances in Manufacturing Technology*, v. 1, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Nature Singapore Pte Ltd, pp. 187-192, 2019.

[7] LEI, W. W., LIANG, W., WANG, H. X., GUO, H. W., "Evolution of Texture and Mechanical Properties of Pure Mg Processed by ECAP at Room Temperature", *JOM*, v. 69, pp. 2297-2301, Nov. 2017.

[8] SURYANARAYANA, C., GRANT NORTON, M., *X-Ray Diffraction: a Practical Approach*, New York, Plenum Press, 1998.

[9] GÜL, C., ÇÖMEZ, N., ÇIVI, C., DURMUŞ, H., "Reliability Analysis of Brinell Hardness Results for Aged Alumix321/SiC Composites", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 72, pp. 2311-2318, Apr. 2019.

[10] PURAWIARDI, I., *Analisis XRD untuk Logam Padat*, Bogor, IPB Press, 2020.

[11] DEY, P. C., DAS, R., "Impact of Silver Doping on the Crystalline Size and Intrinsic Strain of MPA-Capped CdTe Nanocrystals: a Study by Williamson-Hall Method and Size-Strain Plot Method", *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 30, n.1, pp. 652-660, Jan. 2021.

[12] ERDOGAN, E., "X-ray Line Broadening Study on Sputtered InGaN Semiconductor with Evaluation of Williamson-Hall and Size-Strain Plot Methods", *Indian Journal of Physics*, v. 93, pp. 1313-1318, Mar. 2019.

[13] ISLAM, S. A. U., IKRAM, M., "Structural Stability Improvement, Williamson Hall Analysis and Band-gap Tailoring through A-site Sr Doping in Rare Earth Based Double Perovskite La_2NiMnO_6", *Rare Metals*, v. 38, pp. 805-813, Mar. 2019.

[14] PUSHKAREV, S. S., GREKHOV, M. M., ZENCHENKO, N. V., "X-ray Diffraction Analysis of Features of the Crystal Structure of GaN/$Al_{0.32}Ga_{0.68}N$ HEMT-Heterostructures by the Williamson-Hall Method", *Semiconductors*, v. 52, pp. 734-738, May 2018.

[15] KULKARNI, A. B., MATHAD, S. N., "Synthesis and Structural Analysis of Co-Zn-Cd Ferrite by Williamson-Hall and Size-Strain Plot Methods", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, v. 27, pp. 37-43, Apr. 2018.

[16] MADHAVI, J., "Comparison of Average Crystallite Size by X-ray Peak Broadening and Williamson-Hall and Size-Strain Plots for VO^{2+} Doped ZnS/CdS Composite Nanopowder", *SN Applied Sciences*, v. 1, pp. 1509, Oct. 2019.

[17] NOROUZZADEH, P., MABHOUTI, K., GOLZAN, M. M., NADERALI, R., "Consequence of Mn and Ni Doping on Structural, Optical and Magnetic Characteristics of ZnO Nanopowders: the Williamson-Hall Method, the Kramers-Kronig Approach and Magnetic Interactions", *Applied Physics A*, v. 126, pp. 154, Feb. 2020.

[18] KAFASHAN, H., "X-ray Diffraction Line Profile Analysis of Undoped and Se-Doped SnS Thin Films Using Scherrer's, Williamson-Hall and Size-Strain Plot Methods", *Journal of Electronic Materials*, v. 48, pp. 1294-1309, Nov. 2018.

[19] CPDS Card No. 4770, Crystallographic and Crystallochemical Database for Minerals and their Structural Analogues, Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, database.iem.ac.ru/mincryst/s_carta.php?TITANIUM+4770. Diakses: Februari 2022.

[20] CPDS Card No. 10379, Crystallographic and Crystallochemical Database for Minerals and their

Structural Analogues, Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, database.iem.ac.ru/mincryst/s_carta.php?TITANIUM+10379. Diakses: Februari 2022.

[21] SURDIA, T., SAITO, S., *Pengetahuan Bahan Teknik*, Jakarta, Pradnya Paramita, 2005.

[22] AHMADI, S., SEDIGHI, M., "Effects of Solution Treatment and Sheath on Mechanical Properties of Al7075 Processed by ECAP", *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 31, n. 9, pp. 4189-4194, May 2017.