

PERUBAHAN MORFOLOGI STRUKTUR MIKRO PADUAN Cu-Zn 70/30 YANG DILAKUKAN TMCP DI SUHU 300°C DENGAN VARIASI WAKTU TAHAN PEMANASAN

Eka Febriyanti^{1,*}, Ahmad Fadli², Amin Suhadi³, Rini Riastuti⁴

^{1,3}Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi PUSPIPTEK, Serpong, 16314, Indonesia

^{2,4}Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

*E-mail: eka.febriyanti@bppt.go.id

Diterima: 06-03-2018

Direvisi: 04-05-2018

Disetujui: 01-06-2018

ABSTRAK

Paduan Cu-Zn 70/30 sering diaplikasikan untuk berbagai bidang industri salah satunya adalah *core* dan *tank radiator* otomotif, komponen munisi maupun perangkat bangunan dan arsitektur sehingga sangat rentan terpapar oleh lingkungan air laut dan amonia. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan metode TMCP dengan canai hangat untuk meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Cu-Zn 70/30. *Thermo-Mechanical Controlled Processing (TMCP)* adalah salah satu metode rangkaian pengontrolan pemanasan dan pembentukan dengan tujuan meningkatkan kualitas sifat material. Proses canai dilakukan dengan metode bolak-balik dengan deformasi sebesar 60% (30%-30%) dimana pada setiap *pass*-nya paduan Cu-Zn dipanaskan terlebih dahulu pada suhu 300°C dengan waktu tahan berbeda mulai dari 30, 60, dan 120 menit. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa semakin lamanya waktu pemanasan kemudian dideformasi lebih lanjut maka terjadi penurunan ukuran butir dari 92,2 µm menjadi 36,5 µm. Selain itu, juga ditemukan adanya peningkatan *annealed twin*, *deformed twin*, dan butir-butir kecil dan baru yang mengindikasikan adanya rekristalisasi dinamis sebagian.

Kata kunci: Paduan Cu-Zn 70/30, TMCP, canai, waktu tahan, ukuran butir

ABSTRACT

Cu-Zn alloy (70/30) used extensively for core and tank automotive radiator, ammunition component, and architectural hardware so that susceptible to exposure of corrosive environments such as seawater and ammonia environments. Therefore, this research focuses on the study of mechanical properties and corrosion resistance Cu-Zn 70/30 by implementing warm rolling TMCP method. Thermo-Mechanical Controlled Processing (TMCP) is one method consists of controlled heating and controlled forming to produce high quality materials. Rolling process was conducted in reversible way with deformation degree of 60% (30%-30%) and before each pass of the rolling the material is heated up to temperature 300°C with different holding time from 30, 60, and 120 minutes. The results showed that as the longer holding time of the heating and was continued by further deformation, it affects the grain size to be much smaller from 92.2 µm to 36.5 µm. In addition, it is also found an increasing of annealed twin, deformed twin, as well as finer and newer grains that indicate partial dynamic recrystallization.

Keywords: Cu-Zn 70/30 alloy, TMCP, rolling, anneal time, grain size

1. PENDAHULUAN

Thermomechanical Control Process (TMCP) ialah proses deformasi material dengan pengontrolan ataupun perekayasaan proses perlakuan panas dan struktur mikro guna menghasilkan produk dengan sifat-sifat mekanis yang lebih baik lagi. Salah satu jenis TMCP yang sedang dikembangkan ialah TMCP menggunakan metode canai yang dilakukan pada rentang suhu TMCP ialah $0.35T_m < T_m < 0.5T_m$ [1]. Material yang mengalami pengerjaan hangat (*warm working*) akan mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) dan rekristalisasi sebagian[2]. Dengan mengatur kondisi proses seperti suhu, % deformasi, dan mesin canai pada pengerjaan hangat, maka akan dihasilkan butir yang halus. Semakin halusnya butir maka batas butir yang terbentuk akan banyak sehingga pergerakan dislokasi akan terhambat.

Pada penelitian oleh Eka Febriyanti[3], dilakukan TMCP pada suhu pengerjaan hangat 300°C , 400°C , dan 500°C dengan media pendingin udara dan metode canai bolak-balik sebanyak dua kali *pass*. Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa semakin besarnya % deformasi, maka butir semakin halus. Hasil penelitian tersebut sesuai dengan metode penghalusan butir menggunakan parameter Hall-Petch, namun persentase deformasi actual tidak sesuai dengan teoritis. Berdasarkan hal tersebut, perlu untuk mempelajari mekanisme penghalusan butir melalui proses canai hangat dengan pengontrolan suhu pemanasan sebelum sampel diberikan pengerjaan canai hangat.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari evolusi struktur mikro pada paduan Cu-Zn (70/30) setelah dilakukan proses canai hangat di suhu 300°C dengan metode *double pass reversible*.

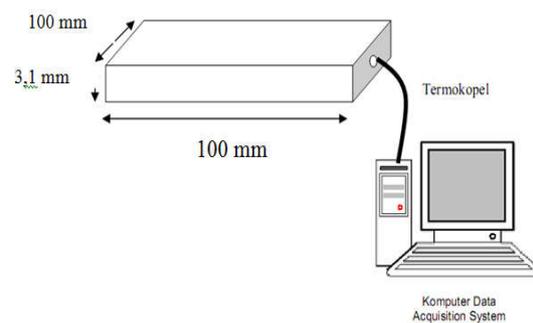
2. METODE PENELITIAN

Paduan Cu-Zn yang digunakan merupakan klasifikasi *paduan Cu-Zn (70/30)* (Cu-Zn 70/30) dengan komposisi sampel uji hasil *Optical Emission Spectroscopy* seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi sampel uji paduan Cu-Zn 70/30

Unsur	Penelitian (wt%)	UNS C 26000 (wt%)[4]
Cu	69,5	69,5-72
Zn	30,7	sisia
Fe	0,026	~ max. 0,05
Sn	0,0062	~ max. 0,03
Al	< 0,002	~ max. 0,03
Ni	-	~ max. 0,2
As	< 0,001	~ max. 0,02
Pb	< 0,005	~ max. 0,05
Si	< 0,005	~ max. 0,01
Mn	0,0052	~ max. 0,04
P	< 0,003	~ max. 0,05
Sb	-	~ max. 0,01
Bi	-	~ max. 0,04

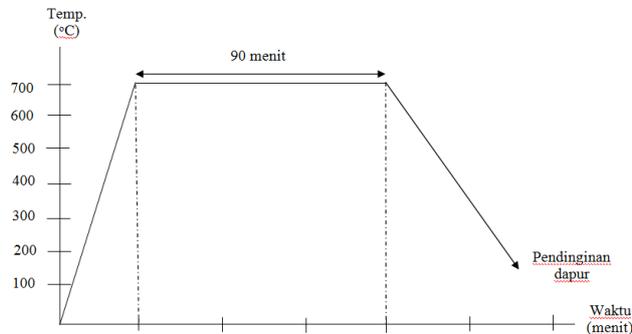
Sampel uji penelitian merupakan lembaran pelat dengan dimensi ukuran panjang 100 mm; lebar 50 mm; dan tebal 3,1 mm. Sampel diberi lubang sedalam kurang lebih 5 mm dan diameter lubang kurang lebih 2 mm sebagai tempat untuk meletakkan kawat pengukur suhu sampel uji (*Thermocouple*) Tipe K. Kawat *Thermocouple* berfungsi sebagai alat untuk mengukur suhu sampel. Pengukuran suhu menggunakan *Data Acquisition System* yang dilengkapi dengan *Lutron Software* yang terhubung dengan komputer. Rangkaian percobaan dapat dilihat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Contoh rangkaian pengujian canai hangat [6 di tesis kancil]

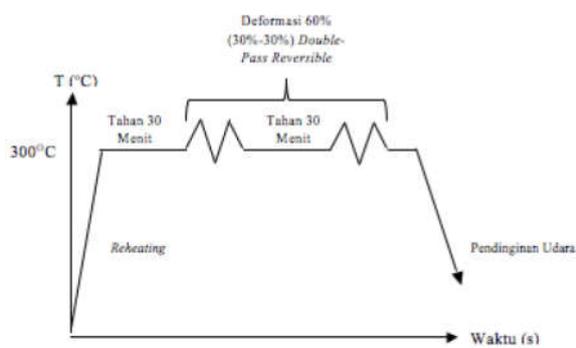
Proses *Thermo-Mechanical Controlled Processing* (TMCP) merupakan rangkaian proses pembentukan (deformasi) dan pemanasan secara simultan untuk mendapatkan kualitas sifat material yang meningkat, seperti kekerasan dan kekuatan tarik[2 di tesis kancil]. Seluruh sampel paduan Cu-Zn 70/30 yang telah dipreparasi lalu dimasukkan ke dalam dapur pemanas (*furnace*) kemudian dipanaskan hingga suhu 700°C dan

ditahan selama 90 menit, selanjutnya didinginkan menuju suhu ruang (25°C) dengan pendinginan dapur seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.



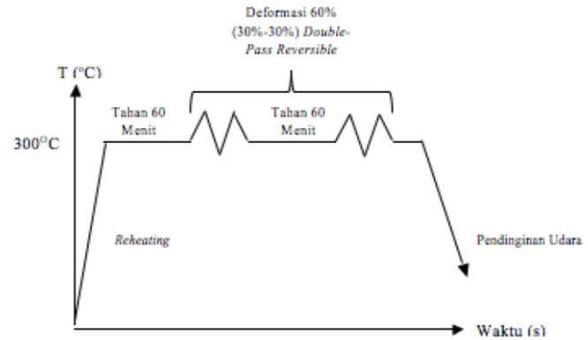
Gambar 2. Diagram tahapan homogenisasi di suhu 700°C selama 90 menit [6 di tesis kancil]

Setelah itu dilakukan proses pencanaian hangat menggunakan mesin canai (*rolling*) *Ono Roll* kapasitas 20 Ton dengan kecepatan sebesar 133,34 mm/s dan diameter rol sebesar 52 mm pada suhu 300°C, deformasi 60%, serta waktu tahan yang bervariasi untuk masing-masing sampel paduan Cu-Zn 70/30, yang ditunjukkan oleh diagram tahapan proses TMCP di bawah ini:



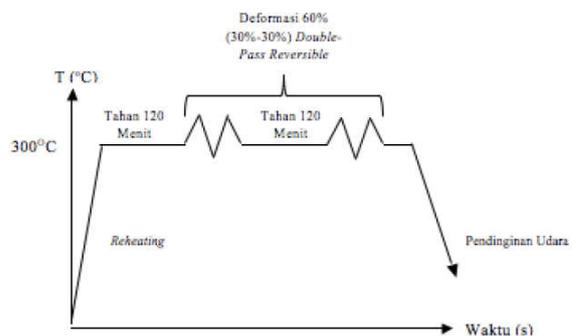
Gambar 3. Diagram tahapan TMCP sampel 1 paduan Cu-Zn 70/30

Gambar 3 menunjukkan bahwa sampel 1 diberi perlakuan awal seperti yang terlihat pada Gambar 2, lalu dilakukan deformasi canai pada suhu 300°C sebesar 60% (30%-30%) *double-passreversible* dengan waktu tahan pemanasan selama 30 menit, kemudian didinginkan dengan media udara.



Gambar 4. Diagram tahapan TMCP sampel 2 paduan Cu-Zn 70/30

Gambar 4 menunjukkan bahwa Sampel 2 diberi perlakuan awal seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2, lalu dilakukan deformasi canai pada suhu 300°C sebesar 60% (30%-30%) *double-passreversible* dengan waktu tahan pemanasan selama 60 menit kemudian didinginkan dengan media udara.



Gambar 5. Diagram tahapan TMCP sampel 3 paduan Cu-Zn 70/30

Gambar 5 menunjukkan bahwa Sampel 3 diberi perlakuan awal seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2, lalu dilakukan deformasi canai pada suhu 300°C sebesar 60% (30%-30%) *double-passreversible* dengan waktu tahan pemanasan selama 120 menit kemudian didinginkan dengan media udara.

Tabel 2. Pengodeansampelujipaduan Cu-Zn 70/30

No.	Kode	Suhu (°C)	Waktu Tahan (menit)	% Teori	Ket. Coolin g
1	0	700	90	-	Dapur
2	1	400	30	60 (30-30)	Udara
3	2	400	60	60 (30-30)	Udara
4	3	400	120	60 (30-30)	Udara

Setelah dilakukan proses canai hangat lalu dilakukan pengamatan metalografi yang bertujuan untuk pengamatan dan melihat perubahan dari mikrostruktur material sebelum dan sesudah deformasi sehingga dapat dihubungkan dengan sifat mekaniknya. Pengamatan metalografi mengacu pada standard ASTM E3-01[5]. Tahap pertama yaitu sampeldi-*mounting* untuk memudahkan penanganan. Lalu, dilanjutkan dengan pengamplasan sampel yang dimulai dari *mesh* terkecil hingga terbesar (halus-kasar) dari #400, #600, #800, #1000, dan #1500. Kemudian dilakukan proses pemolesan yang bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang sangat halus dan mengkilap bebas dari sisa goresan atau deformasi pengamplasan sebelumnya. Proses pemolesan dilakukan menggunakan mesin poles dan media poles serbuk TiO₂ hingga tercapai permukaan yang halus dan mengkilap. Setelah itu dilakukan proses etsa menggunakan 10% FeCl₃ dengan komposisi 10 gr FeCl₃ dan 100 ml Alkohol 96% untuk memunculkan jejak batas butir pada mikrostruktur sampel sehingga dapat diamati dengan mikroskop optic perbesaran 100X, 200X, dan 500 morfologi dari butir dan batas butir yang terbentuk.

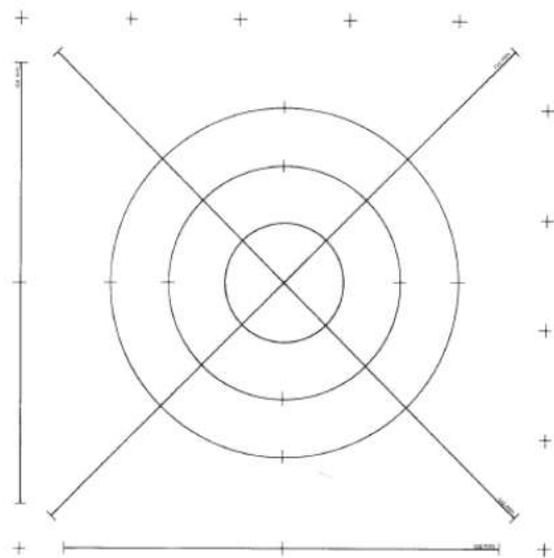


Gambar 6. Mikroskop optik

Setelah dilakukan pengamatan metalografi lalu dilakukan pengukuran besar butir yang mengacu pada standard ASTM E112[6]. Morfologi butir terdiri dari besar butir, bentuk butir, dan juga fasadimana dengan mengetahui ukuran butir, bentuk butir, dan jenis fasa maka dapat mengidentifikasi sifat mekanik dari

material. Besar butir yang diamati setelah pengetsaan ada beberapa jenis diantaranya adalah besar butir *equiaxed* dan *non-equiaxed* atau *elongated*. Sedangkan pengukuran besar butir dihitung dengan menggunakan metode *Heyn Intercept*.

Prinsip metode *Heyn Intercept* adalah dengan membuat beberapa garis atau tiga lingkaran yang memiliki diameter masing-masing 79.5 mm, 53 mm, dan 26.5 mm kemudian dijumlahkan seperti yang terlihat pada Gambar 7. Lalu perpotongan antara beberapa garis atau ketiga lingkaran tersebut dengan batas butir mikrostruktur ditentukan lalu dijumlahkan sehingga dengan variabel yang telah ditentukan tersebut dapat dimasukkan kedalam perhitungan (rumus 1,2,dan 3) untuk mendapatkan nomor butir ASTM G-nya.



Gambar 7. Pengukuran batas butir equiaxed dengan metode *heyen intercept* [6]

Setelah itu, banyaknya batas butir yang berpotongan (P) dengan ketiga lingkaran tersebut dihitung. Lalu, dimasukkan ke rumus berikut:

$$PL = (P \times M) \div Lt \quad (1)$$

$$L3 = 1 \div PL \quad (2)$$

$$G = [-6,643 \log(L3) - 3,2877] \quad (3)$$

Dimana:

P = jumlah titik potong (P) batas butir dari total garis yang dalam hal ini berbentuk lingkaran

PL = jumlah titik potong per satuan panjang

M = perbesaran (jika 200x, nilai M=200)

LT = panjang garis total (500 mm)

L3 = panjang garis perpotongan (mm)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persamaan 4 maka didapatkan hasil pengukuran ketebalan benda uji setelah dilakukan canai pada suhu 300°C:

$$\% \text{ reduksi} = ((hf - ho) \div ho) \times 100\% \quad (4)$$

Sedangkan untuk menghitung besar (ϵ) dan laju regangan ($\dot{\epsilon}$) maka menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\epsilon = 1,155 \ln(ho \div hf) = 1,155 \ln[1 \div (1 - (5))]$$

$$\dot{\epsilon} = \epsilon \times vR \div \sqrt{[R(ho - hf)]} \quad (6)$$

dimana vR adalah kecepatan roll(mm/s) dan R adalah jari-jari roll(mm). Pada penelitian ini, digunakan kecepatan roll sebesar 8m/menit atau 133,34 mm/detik dan besar jari-jari rol adalah 52 mm.

Tabel 3. Hasil pengukuran dimensi benda uji sebelum dan sesudah proses pencanaian pada temperatur 300°C dengan media pendingin udara

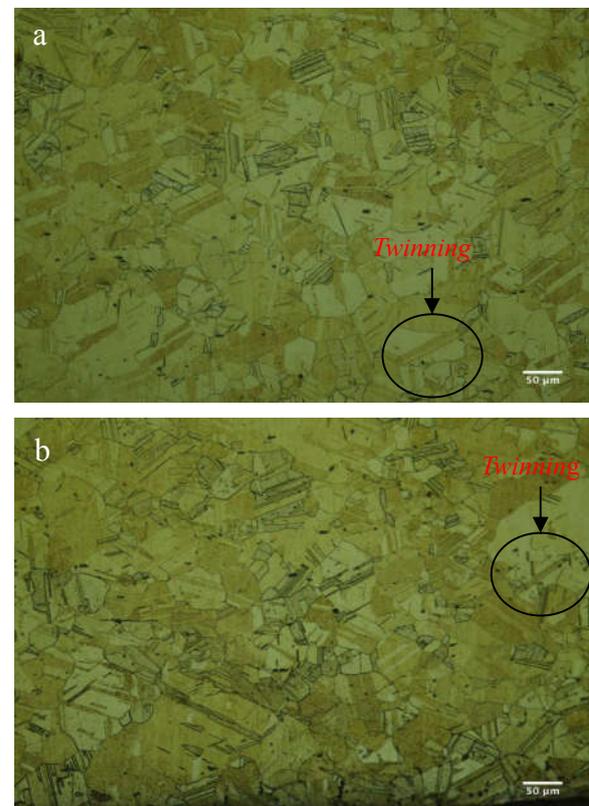
Kode	Ho (m)	Hf (mm)	% aktual	% teor	ϵ aktual	$\dot{\epsilon}$ aktual
0	3,1	-	-	-	0	0
1	3,1	1,8	41,94	-	0,63	10,19
2	3,1	1,7	45,16	60	0,69	10,85
3	3,1	1,7	45,16	-	0,69	10,85

Pada Tabel 3 menunjukkan adanya perbedaan antara ketebalan akhir teoritis (Hfteoritis) dengan ketebalan akhir aktual (Hf) dari sampel. Perbedaan dan ketidaksesuaian antara ketebalan akhir teoritis dan actual ini dapat disebabkan oleh adanya mekanisme roll

flattening pada proses canai. Ketika sampel masuk ke dalam *roller* terjadi interaksi *roller* dengan sampel dimana *roller* melakukan gaya atau tekanan sehingga sampel menerima reaksi. Jika sampel memiliki kekerasan yang cukup tinggi, reaksi tersebut akan meningkat sehingga mengakibatkan rol mengalami deformasi secara elastis[7].

3.1. Hasil Pengamatan Metalografi

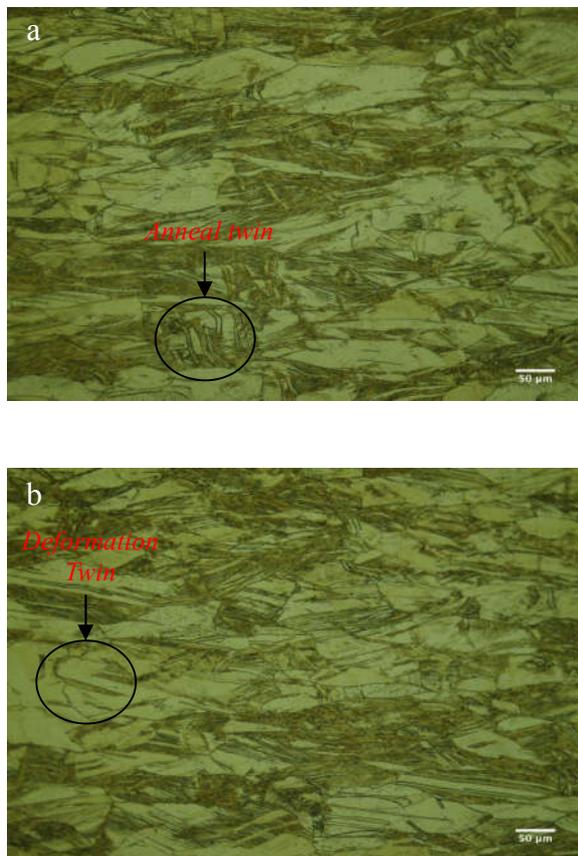
Struktur mikro Sampel 0 yaitu paduan Cu-Zn 70/30 yang homogenisasi pada suhu 700°C selama 90 menit ditunjukkan pada Gambar 8. Pada Gambar 8 terlihat bahwa butir berbentuk *equiaxed*, serta terdapat butir yang cukup seragam akibat pengaruh proses homogenisasi.



Gambar 8. Mikrostruktur Sampel 0; a) Samping Tengah, b) SampingTepi, Etsa FeCl3, Perbesaran 200x

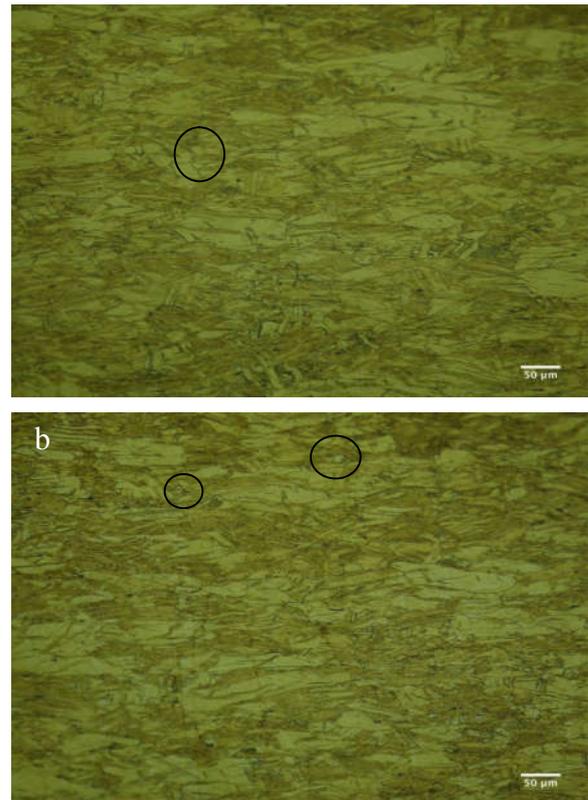
Struktur mikro Sampel 1 yaitu paduan Cu-Zn 70/30 yang diberi perlakuan awal sama seperti Sampel 0 kemudian dilanjutkan deformasi 30%-30% dengan waktu pemanasan 30 menit pada suhu 300°C dapat dilihat pada Gambar 9. Butir mengalami perubahan bentuk dari *equiaxed* menjadi *elongated* pada bidang longitudinal (a dan b). Selain itu, terlihat

adanya *annealing twin* dan *deformation twin* yang diakibatkan oleh rangkaian proses deformasi canai dan *annealing*.



Gambar 9. Mikrostruktur Sampel 1; a) Samping Tengah, b) Samping Tepi, Etsa FeCl₃, Perbesaran 200x

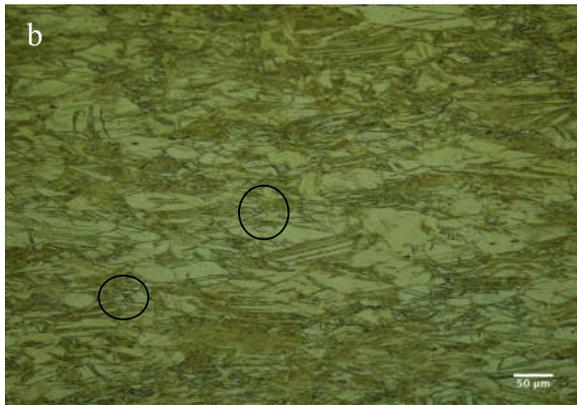
Struktur mikro Sampel 2 yaitu paduan Cu-Zn 70/30 yang diberi perlakuan awal sama seperti Sampel 0 kemudian dilanjutkan deformasi 30%-30% dengan waktu tahan 60 menit pada suhu 300°C dapat dilihat pada Gambar 10. Jika dibandingkan dengan Sampel 2 dengan waktu tahan 30 menit, dapat dilihat bahwa butir mengalami perubahan bentuk menjadi lebih pipih pada semua bidang pengamatan. Selain itu, juga terdapat peningkatan jumlah *annealing twin* dan *deformation twin*. Butir-butir kecil baru juga muncul yang mengindikasikan terjadinya rekristalisasi dinamis sebagian [8-9].



Gambar 10. Mikrostruktur Sampel 2; a) Samping Tengah, b) Samping Tepi, Etsa FeCl₃, Perbesaran 200x

Struktur mikro Sampel 3 yaitu paduan Cu-Zn 70/30 yang diberi perlakuan awal sama seperti Sampel 1 kemudian dilanjutkan deformasi 30%-30% dengan waktu tahan 120 menit pada suhu 300°C dapat dilihat pada Gambar 11. Jika dibandingkan dengan Sampel 3, butir mengalami perubahan bentuk menjadi sangat pipih pada semua bidang pengamatan dan peningkatan jumlah *annealing twin* dan *deformation twin*. Adanya butir-butir kecil baru yang muncul serta ukuran butir yang lebih kecil dan halus dengan waktu tahan 120 menit mengindikasikan material sudah mengalami rekristalisasi dinamis.





Gambar 11. Mikrostruktur Sampel 3; a) Samping Tengah, b) Samping Tepi, Etsa FeCl₃, Perbesaran 200x

3.2. Hasil Pengukuran Besar Butir

Ukuran diameter butir paduan Cu-Zn 70/30 berubah setelah dilakukan pengerjaan canai pada suhu 300°C. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan butir paduan Cu-Zn dengan menggunakan metode *Heyn Intercept* sesuai dengan standar ASTM E112 yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.

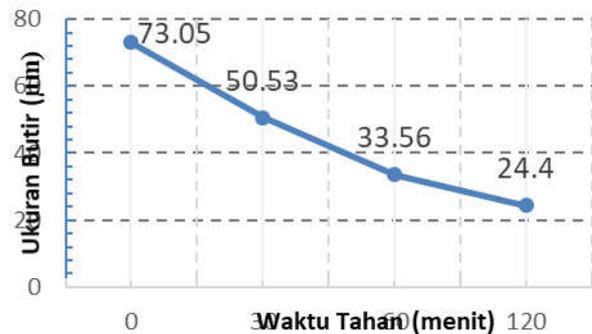
Table 4. Hasil pengukuran besar butir paduan Cu-Zn 70/30

Benda Uji	Deskripsi	G (ASTM)	Perbesaran (kali)	Besar Butir (μm)
A	Homogenisasi 700°C (90 menit)	4,6	200	73,05
B	300°C + 31,61%	5,15	200	50,53
C	300°C + 41,93%	6,85	200	33,56
D	300°C + 48,39%	7,77	200	24,41

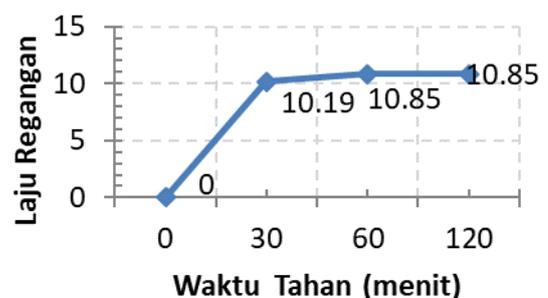
Hubungan Waktu Pemanasan dengan Ukuran Butir

Pada Gambar 12 menunjukkan bahwa dengan semakin lama waktu pemanasan maka ukuran butir yang diperoleh akan semakin kecil atau semakin halus dari diameter butir sebesar 92,2 μm untuk Sampel 0 menjadi 36,5 μm untuk Sampel 3. Hal ini disebabkan karena dengan waktu pemanasan yang sesuai walaupun berada dibawah suhu rekristalisasinya maka material tetap dapat mengalami rekristalisasi sehingga mulai

muncul inti-inti butir baru yang bebas regang seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9-11. Inti-inti butir tersebut akan tumbuh akibat difusi dari atom suatu butir menuju butir lainnya dimana pertumbuhan ini dipengaruhi oleh deformasi, suhu, dan waktu pemanasan. Jika inti butir ini tumbuh dan sudah relative besar kemudian dilanjutkan dengan proses deformasi selanjutnya maka akan menghasilkan butir yang lebih kecil dan halus dibandingkan butir sebelumnya melalui rangkaian *controlled rolling* dan *controlled heating* proses TMCP tersebut. Selain itu, melalui proses perlakuan canai pada suhu 300°C dan paduan Cu-Zn 70/30, butir sampel yang awalnya berbentuk *equiaxed* akan memipih karena mengalami elongasi yang menghasilkan pengerasan regang (*strain hardening*) pada struktur mikro paduan Cu-Zn. Namun, dikarenakan pengerjaan dilakukan pada suhu yang memungkinkan terjadinya rekristalisasi dinamis maka pada butir yang terelongasi dapat menghasilkan nukleasi butir baru yang berukuran lebih kecil lalu akhirnya bergabung dan membentuk butir baru yang berukuran lebih halus [10-11].



Gambar 12. Hubungan Waktu Tahan dengan Ukuran Butir Sampel Paduan Cu-Zn 70/30



Gambar 13. Hubungan Waktu Tahan dengan Laju Regangan

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pengerjaan canai hangat pada suhu 300°C metode bolak-balik dapat disimpulkan bahwa proses canai hangat pada suhu 300°C menunjukkan semakin lama waktu pemanasan yang diberikan maka ukuran butir akan semakin mengecil. Sampel uji yang mengalami waktu pemanasan terlama (120 menit) mempunyai diameter rata-rata butir yang paling kecil yaitu 24,41 μm , sampel uji dengan waktu tahan 30 menit mempunyai diameter rata-rata butir sebesar 50,53 μm , sampel uji dengan waktu tahan 60 menit mempunyai diameter butir 33,56 μm dan benda uji dengan tanpa deformasi mempunyai diameter rata-rata 73,05 μm .

Selain itu, proses canai hangat pada suhu 300°C menunjukkan adanya *deformed twin* dan *annealed twin* dengan waktu tahan pemanasan 30, 60, dan 120 menit. Sedangkan pada waktu tahan terlihat adanya butir baru hasil dari rekristalisasi dinamis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti yang memberikan beasiswa sehingga penulis dapat melanjutkan pendidikan S2 DTMM FTUI dan melakukan penelitian. Ucapan terima kasih juga kepada Dr.Barman Tambunan selaku Kepala B2TKS BPPT, Dr. Sri Harjanto selaku Kepala Jurusan DTMM FTUI, dan Dr.Ing.H.Agus Suhartono selaku Kepala Bidang Kajian Material B2TKS, untuk koordinasi dan pemberian ijin dalam menggunakan alat uji laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Frechard, S., dkk, Mechanical Behaviour of Nitrogen-Alloyed Austenitic Stainless Steel Hardened by Warm Rolling, *Material Science and Engineering A*, 2006, Vol. 415, pp.219-224.
- [2] Kozasu, I., *Material Science and Technology: Constitution and Properties of Steels Ed.VCH* (2007), hal.184.
- [3] Febriyanti, Eka, Dedi Priadi, dan Rini Riastuti., Pengaruh Thermo Mechanical Controlled Processed (TMCP) terhadap Penghalusan Butir dan Sifat Mekanik Paduan Cu-Zn 70/30, *Majalah Metalurgi*, 2015, Vol.30, No.3, pp. 141-148.

- [4] ASTM B36M-13, Standard Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar. *American Standard for Testing Materials Press* (2003).
- [5] ASTM E3-01, Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens. *American Standard for Testing Materials Press* (2012).
- [6] ASTM E112, Standard Test Method for Determining Average Grain Size. *American Standard for Testing Materials Press* (2012).
- [7] Harris, John Noel, *Mechanical Working of Metals: Theory and Practice*, Pergamon Press : UK, (1983).
- [8] Humphreys, F.J., dan M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Pergamon Press (2004).
- [9] William D.Callister Jr., *An Introduction : Material Science and Engineering*, John Wiley & Son, Inc., (2007).
- [10] Eka Febriyanti, Dedi Priadi, Rini Riastuti. *Pengaruh Peningkatan Derajat Deformasi Canai Hangat terhadap Perubahan Morfologi Struktur Paduan Cu-Zn 70/30*. Prosiding Seminar Nasional Material dan Metalurgi (SENAMM VIII), (2015), pp.10-16.
- [11] H. L. Walker, *Grain Sizes Produced by Recrystallization and Coalescence in Cold-Rolled Cartridge Brass*, University of Illinois, (1945).