

## PENGARUH PENINGKATAN % REDUKSI TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK PADUAN KUNINGAN Cu-Zn 70/30 SETELAH PROSES *WARM ROLLING* PADA SUHU 400°C

### THE EFFECT OF % REDUCTION ENHANCEMENT TO MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Cu-Zn BRASS 70/30 ALLOY *WARM ROLLING* AT 400°C

Eka Febriyanti<sup>b</sup>, Amin Suhadi<sup>b</sup>, Dedi Priadi<sup>a</sup>, Rini Riastuti<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Depok, 16424

<sup>b</sup>Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, BPPT, Puspiptek Serpong, 15314

E-mail : <sup>b</sup>eka.febriyanti@bppt.go.id, <sup>b</sup>amin.suhadi@bppt.go.id

<sup>a</sup>dedi@metal.ui.ac.id, <sup>a</sup>rini.riastuti@yahoo.com

#### Abstrak

Paduan Cu-Zn 70/30 banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena memiliki sifat yang unggul dan belum ada penggantinya. Untuk memperoleh paduan Cu-Zn 70/30 dengan sifat mekanik yang lebih baik maka dilakukan riset baik modifikasi dari jenis material yang sudah ada ataupun material baru agar sesuai dengan kebutuhan industri. Untuk mengurangi biaya produksi, namun tetap menghasilkan sifat mekanik yang baik tanpa penambahan paduan maka dikembangkan metode penghalusan butir. Salah satu alternatif proses fabrikasi untuk mengoptimalkan sifat mekanik paduan Cu-Zn 70/30 yaitu dengan metode *warm rolling*. *Warm rolling* yang dilakukan pada pelat paduan Cu-Zn 70/30 menggunakan % reduksi dari 29,03%, 34,4%, dan 38,16% pada suhu 400°C secara *double pass reversible*. Hasil metalografi didapat ukuran butir yang semakin menurun sebesar 30,03  $\mu\text{m}$  di bagian tepi dan 33,45  $\mu\text{m}$  di bagian tengah pada % reduksi 38,16%. Hasil uji tarik dengan % reduksi 38,16% menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) sebesar 478 MPa, *yield strength* (YS) sebesar 434 MPa, dan persentase elongasi sebesar 9%. Untuk hasil uji kekerasan menghasilkan nilai kekerasan sebesar 135,8 HV di bagian tepi dan 128,4 HV di bagian tengah pada % reduksi 38,16%.

**Kata Kunci** : Paduan Cu-Zn 70/30, butir halus, sifat mekanis, *warm roll*

#### Abstract

*Cu-Zn 70/30 alloys are widely used in many industrial products because of its superior characteristic and there is no substitute. To obtain Cu-Zn alloy material whose better mechanical properties then it is done research in the form of new material or modification material from existing types of materials to appropriate with industry necessary. To minimize production cost, but it still produce good mechanical properties without the addition of alloy then it is developed grain refinement method which refers to Hall-Petch law. One of fabrication process alternative to optimize the mechanical properties of Cu-Zn 70/30 alloy namely warm rolling. Warm rolling is conducted to Cu-Zn 70/30 alloy in various reduction percentage at a level of 29,03%, 34,4%, and 38,16% at 400°C by double pass reversible method. By metallographic examination is obtained decreasing of grain size of 30,03  $\mu\text{m}$  at the edges and of 33,45  $\mu\text{m}$  in the central part sample on 38,16% deformation degree. Meanwhile, by tensile testing can be seen that Cu-Zn 70/30 alloy material with 38,16% deformation degree produces ultimate tensile strength (UTS) value of 478 MPa, yield strength (YS) value of 434 MPa, and*

*elongation percentage value of 9%. The hardness value obtained approximately around 135,8 HV to 128,4 HV in the edges to the middle part of material on 38.16% % reduction.*

**Keywords :** *Cu-Zn 70/30 alloy, fine grain, mechanical properties, warm rolling*

Diterima (received) : 21 Juli 2016, Direvisi (Revised) : 14 Oktober 2016, Disetujui (Accepted) : 25 November 2016

## PENDAHULUAN

Saat ini, kuningan secara luas diterapkan dalam berbagai aplikasi teknologi, dan kuningan termasuk logam paling umum yang digunakan dalam kelompok logam non-ferrous. Oleh karena sifat khususnya, kuningan banyak diaplikasikan untuk berbagai bidang industri seperti diantaranya industri sipil, industri persenjataan, industri pesawat terbang, bodi mesin, motor mobil, industri elektrik, bodi kapal, industri kimia, dll bahkan dalam produksi instrumen musik.

Untuk memperoleh material paduan Cu-Zn 70/30 yang memiliki sifat mekanis yang optimal dan ringan maka dilakukan riset dalam menghasilkan material baru ataupun modifikasi dari jenis material yang sudah ada agar sesuai dengan kebutuhan industri. Untuk meminimalisir biaya produksi namun tetap menghasilkan sifat mekanis yang baik tanpa penambahan paduan maka dikembangkan metode penghalusan butir yang mengacu pada hukum Hall-Petch. Dengan metode penghalusan butir didapatkan sifat mekanis material yang tinggi terutama kekuatan luluh dan kekerasan<sup>[1]</sup>.

Beberapa proses perubahan bentuk logam konvensional seperti *multi-pass* canai, tempa, dan ekstrusi, menghasilkan produk dengan ketebalan yang paling tipis dan ketebalan paling kecil. Hal ini menyebabkan produk tersebut tidak bisa digunakan untuk aplikasi struktural<sup>[1]</sup>. Oleh karena itu, untuk menghasilkan logam bulk tanpa terjadi perubahan bentuk dan peningkatan biaya produksi maka proses fabrikasi material semakin berkembang pesat yang mengarah pada metode penghalusan butir. Salah satu alternatif proses fabrikasi yang berkembang yaitu proses perubahan bentuk hangat (*warm forming*)<sup>[2]</sup>.

*Warm forming* adalah salah satu metode perlakuan terhadap material logam untuk menghasilkan mikrostruktur yang halus pada material logam dan paduannya dengan suhu kerja berada di antara suhu pengerjaan panas (*hot forming*) dan suhu pengerjaan dingin (*cold forming*). Kisaran suhu pengerjaan hangat berada pada rentang di

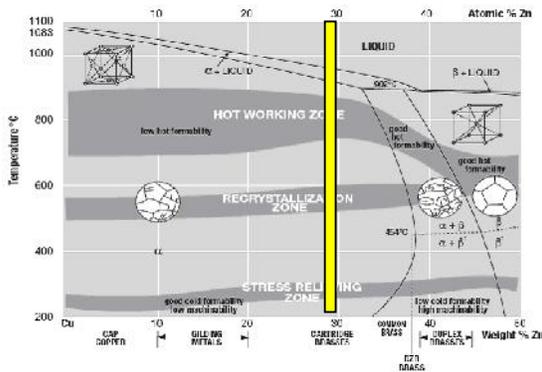
atas suhu ruang, namun lebih rendah dibandingkan suhu rekristalisasi. Berdasarkan rentang suhu operasi pengerjaan hangat, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan regangan/*strain hardened* dan sebagian mengalami rekristalisasi<sup>[2]</sup>.

Pada proses pengerjaan hangat tidak lagi dibutuhkan perlakuan panas lainnya. Selain menghasilkan butir yang lebih halus, proses ini akan mengalami pembentukan sub-butir (*subgrain*) yang berukuran *micrometer* maupun *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar atau kasar. Sebagai hasil pembentukan sub-butir, sifat mekanis dari material akan meningkat.

Jika dibandingkan dengan proses pengerjaan panas yang membutuhkan energi panas yang besar dan mahal, proses pengerjaan hangat ini dapat menghasilkan material yang mendekati dimensi akhir yang diinginkan. Sedangkan jika dibandingkan dengan proses pengerjaan dingin, metode pengerjaan hangat membutuhkan gaya deformasi yang lebih rendah, memberikan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap daerah transversal dan menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah<sup>[3]</sup>.

Untuk paduan Cu-Zn 70/30, rentang pengerjaan *warm forming* berada pada suhu 0,4 s/d 0,6 T<sub>m</sub> (*melting point*) yaitu berkisar antara 382°C-573°C<sup>[4]</sup>. Pada diagram biner Cu-Zn seperti yang terlihat pada Gambar 1 menunjukkan bahwa pada kondisi pemanasan di suhu 400°C paduan *cartridge brass* (Cu-Zn 70/30) yang digunakan sebagai bahan dalam penelitian ini berada pada rentang antara daerah *stress relieve* dan daerah rekristalisasi. Menurut Izumi Osamu yang melakukan penelitian pada kuningan alfa menunjukkan bahwa tidak ada perubahan besar butir dari perlakuan anil pada suhu 150°C. Lalu pada suhu 250°C terjadi perubahan struktur butir menjadi polygon, walaupun tempat pengintian baru terjadi pada area yang paling padat dislokasinya. Kemudian pertumbuhan butir

baru terjadi pada suhu 350°C di sekitar bidang geser kristal<sup>[5]</sup>.



Gambar 1.  
Diagram Biner Cu-Zn<sup>[6]</sup>

Oleh karena fenomena pada paduan kuningan alfa setelah pemanasan di suhu > 350°C belum banyak diketahui maka dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk mempelajari hubungan antara penghalusan butir (*grain refinement*) terhadap perubahan sifat mekanis pada pelat paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan proses *warm rolling* di suhu 400°C dengan metode *double pass reversible* sebanyak 29,03%; 34,4%; dan 38,16%.

## BAHAN DAN METODE

Sampel yang digunakan adalah paduan Cu-Zn 70/30 dengan komposisi yang ditampilkan pada Tabel 1.

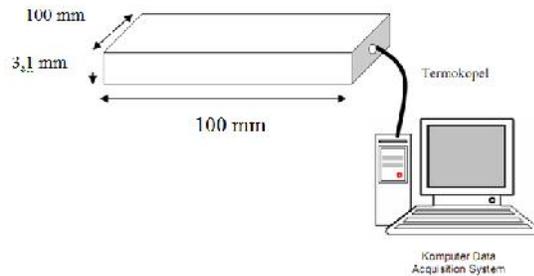
Tabel 1.  
Komposisi Sampel Paduan Cu-Zn 70/30

Unsur	Penelitian (wt%)	Target* (wt%)
Cu	69,5	69,5-72
Zn	30,7	sisa
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

\* Target : standard

Pengujian komposisi material paduan Cu-Zn 70/30 dilakukan dengan menggunakan *optical emission spectroscopy* (OES) di laboratorium.

Ukuran benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat berdimensi 100 mm x 100 mm x 3,1 mm seperti yang ditampilkan pada Gambar 2, lalu dihubungkan dengan kawat termokopel tipe K berdiameter 2 mm. Pengukuran temperatur menggunakan *data acquisition system* yang dihubungkan dengan perangkat komputer.

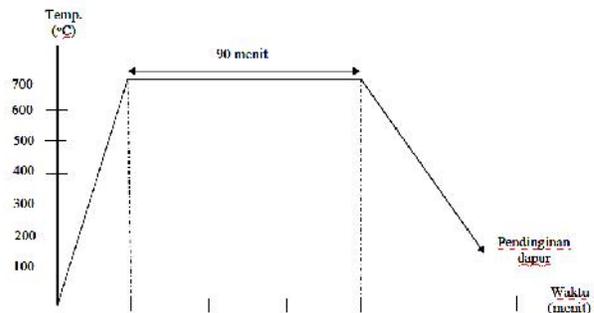


Gambar 2.

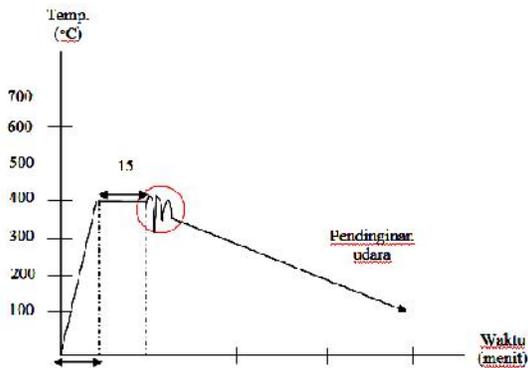
Contoh Rangkaian Pengujian Canai Hangat

Proses deformasi *warm rolling* didahului dengan pemanasan sampel pada dapur karbolit dengan suhu 700°C selama 90 menit, yang kemudian dilanjutkan proses *rolling* pada mesin rol kapasitas 20 tonF dengan parameter deformasi *rolling double pass reverse*, secara bolak-balik berturut-turut sebanyak 29,03%; 34,4%; dan 38,16% yang dilanjutkan dengan pendinginan udara.

Penelitian ini diawali dengan pemanasan awal sampel dari suhu ruang ke suhu 700°C selama 30 menit lalu ditahan selama 90 menit untuk proses homogenisasi yang bertujuan untuk menghasilkan ukuran butir yang lebih seragam. Kemudian dilanjutkan dengan pendinginan dalam oven ke suhu ruang seperti yang terlihat pada Gambar 3. Selanjutnya dilakukan pemanasan ke suhu 400°C dengan waktu 15 menit dan ditahan selama 15 menit lalu dilakukan *warm rolling* secara *double pass reversible* dengan % reduksi 29,03%; 34,4%; dan 38,16% kemudian dilanjutkan dengan pendinginan di udara, tahapan proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3.  
Diagram Tahapan Homogenisasi di Suhu 700°C selama 90 Menit



Gambar 4.  
Diagram Tahapan Warm Rolling pada Suhu 400°C dengan Metode Double Pass Reversible

Pengamatan struktur mikro melalui proses metalografi berdasarkan standard ASTM E3-01<sup>[7]</sup>. Proses metalografi diawali dengan pemotongan sampel sesuai dengan permukaan yang akan diamati. Kemudian dilanjutkan dengan proses mounting yaitu membungkus sampel kedalam resin dimana daerah sampel yang akan diamati bedrada pada permukaan. Selanjutnya dilakukan proses pengampalsan (grinding) dan pemolesan. Proses selanjutnya adalah proses etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir pada benda uji dengan menggunakan zat etsa ferric klorida atau 10% FeCl<sub>3</sub> yang terdiri atas 10 gr FeCl<sub>3</sub> dan 100 ml alkohol 96%. Kemudian dilakukan pengamatan struktur mikro dan ukuran butir rata-rata menggunakan mikroskop optik.

Untuk mengetahui perubahan sifat mekanik dilakukan pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Pengujian tarik menggunakan mesin uji tarik *Servopulser Shimadzu* mengacu pada standar ASTM E8<sup>[8]</sup>. Dari hasil uji tarik diperoleh data kekuatan tarik (UTS), kekuatan luluh (YS), dan nilai keuletan.

Kemudian dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode Vicker's dengan menggunakan standar ASTM E 92<sup>[9]</sup>. Karena ketebalan material benda uji yang tipis yaitu sebesar 3,1 mm, maka dilakukan pengujian metode kekerasan secara mikro untuk mengetahui distribusi kekerasan baik di bagian tepi maupun di bagian tengah hasil *warm rolling*.

Selanjutnya setelah dilakukan proses *warm rolling* maka dilakukan pengukuran

tingkat deformasi melalui persamaan sebagai berikut :

$$\% Deformasi = \frac{H_0 - H_f}{H_0} \quad (1)$$

dimana :

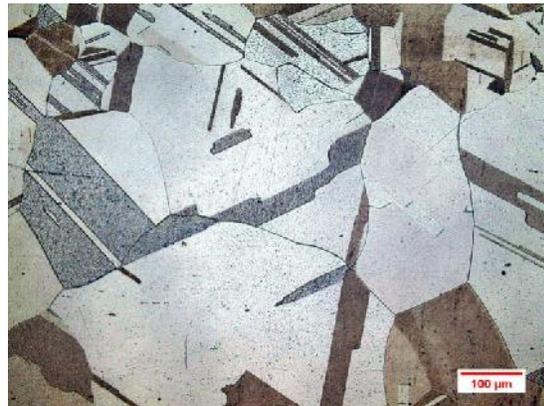
% deformasi = % reduksi, H<sub>0</sub> = tebal awal benda uji (mm), H<sub>f</sub> = tebal akhir benda uji (mm). Sedangkan untuk menghitung besar regangan yang terjadi saat proses *warm rolling* maka digunakan persamaan berikut <sup>[10]</sup>:

$$\epsilon = 1.155 \ln (h_0/h_f) = 1.155 \ln [1/(1-r)] \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = \epsilon \times \frac{v_R}{\sqrt{[R(h_0-h_f)]}} \quad (3)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Paduan Cu-Zn 70/30 yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat yang sebelumnya telah mengalami proses homogenisasi di suhu 700°C selama 90 menit seperti yang terlihat pada Gambar 5.

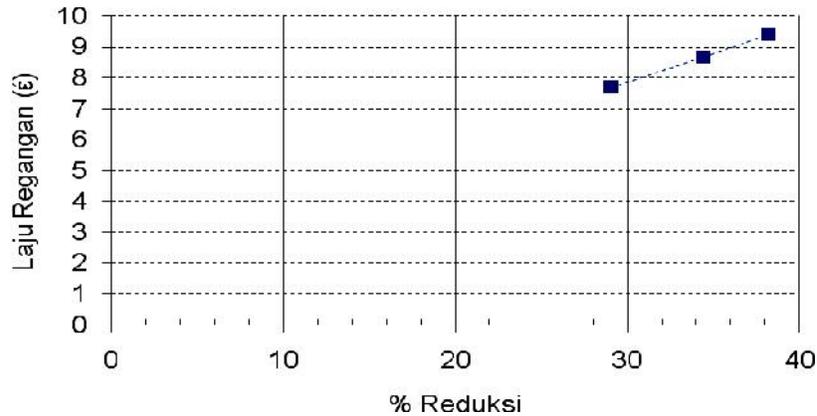


Gambar 5.  
Foto Mikrostruktur Sampel Paduan Cu-Zn 70/30 setelah Homogenisasi 700°C selama 90 Menit. Etsa 10% FeCl<sub>3</sub>

Hasil pengukuran besar butir menunjukkan bahwa diameter butir rata-rata dari pelat yang dihomogenisasi mencapai 71,82 µm dengan suktur mikro paduan Cu-Zn 70/30 terdiri dari butiran dengan twin berbentuk garis-garis sejajar <sup>[11-13]</sup>.

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara % reduksi dengan laju regangan *warm rolling* pada material paduan Cu-Zn 70/30. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya % reduksi hingga mencapai 38,16% menunjukkan tren positif

terhadap peningkatan laju regangan hingga 9,4.

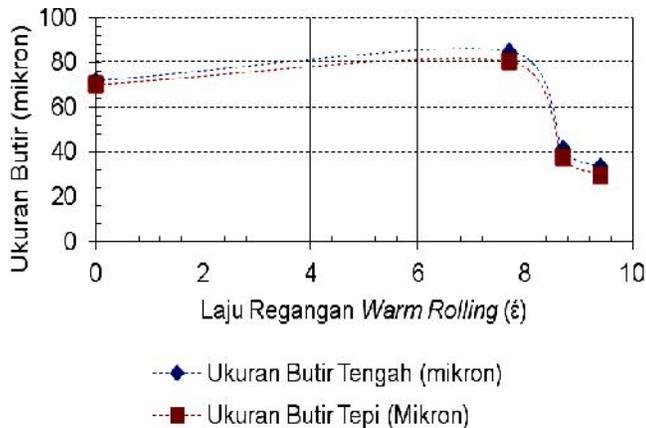


Gambar 6.

Hubungan antara % reduksi dengan laju regangan *warm rolling* paduan Cu-Zn 70/30

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara laju regangan *warm rolling* pada material paduan Cu-Zn 70/30 dengan ukuran butir (micron). Dari gambar tersebut terlihat bahwa

dengan semakin meningkatnya laju regangan *warm rolling* menyebabkan ukuran butir yang semakin halus, baik di bagian tepi maupun tengah seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7.

Hubungan antara ukuran butir ( $\mu\text{m}$ ) dengan laju regangan *warm rolling* paduan Cu-Zn 70/30

Ukuran butir terkecil diperoleh di suhu *warm rolling* 400°C dengan laju regangan 9,4. Hal tersebut dapat dilihat pada mikrostruktur butir dari hasil perlakuan deformasi tersebut pada Gambar 8a dan 8b. Laju regangan yang semakin tinggi dapat mempengaruhi jumlah inti atau kecepatan pengintian. Dari laju regangan yang lebih tinggi akan didapatkan lebih banyak inti per satuan volume untuk rekristalisasi sehingga didapatkan ukuran butir yang lebih kecil [11,14-18]. Dengan semakin

besar laju regangan *warm rolling* maka semakin halus dan semakin kecil butir yang terbentuk seperti yang terlihat pada Gambar 7.

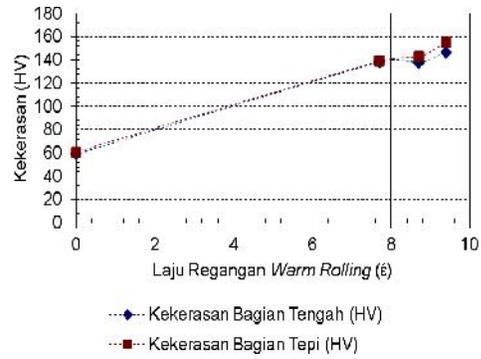
Pada Gambar 8 menunjukkan bahwa ukuran butir bagian tepi lebih halus dibandingkan bagian tengah. Hal tersebut disebabkan karena nilai rendah (merupakan rasio ketebalan/diameter benda uji terhadap panjang kontak antara *roller* dan benda uji) sehingga menghasilkan regangan

permukaan yang lebih tinggi dibandingkan bagian tengah. Perbedaan regangan antara bagian tepi dan tengah menghasilkan aliran yang tidak homogen sehingga ukuran butir di bagian tepi setelah rekristalisasi lebih halus dibandingkan bagian tengah<sup>[19]</sup>.



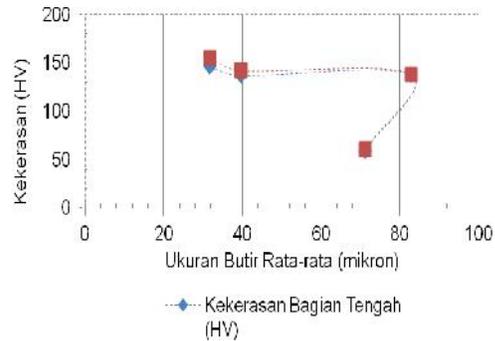
Gambar 8. Foto mikrostruktur untuk paduan Cu-Zn 70/30 hasil *hot roll* pada  $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan deformasi 38,16% (a) Bagian tepi, (b) Bagian tengah. Etsa : 10%  $\text{FeCl}_3$

Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya laju regangan, maka kekerasan material paduan Cu-Zn 70/30 baik di bagian tepi maupun tengah meningkat.



Gambar 9. Hubungan antara nilai kekerasan (HV) dengan laju regangan hasil *warm rolling* paduan Cu-Zn 70/30

Pengaruh ukuran butir rata-rata terhadap nilai kekerasan dapat dilihat pada Gambar 10. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa dengan semakin besar ukuran butir rata-rata maka kekerasan bagian tepi maupun tengah menurun, namun penurunannya tidak signifikan.



Gambar 10. Hubungan antara ukuran butir rata-rata, ( $\mu\text{m}$ ) dan kekerasan mikro (HV) dari paduan Cu-Zn 70/30 yang diproses *warm rolling* di suhu  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Perbedaan kekerasan yang tidak signifikan disebabkan karena presentase reduksi actual masih di bawah persentase reduksi kritis, meskipun terjadi peningkatan laju regangan *warm rolling* dan penurunan ukuran butir akibat pemanasan adiabatik<sup>[19]</sup>.

Selain itu, menurut Zainul Huda dan Ooi So Peng<sup>[20]</sup> yang melakukan canai dingin pada aluminum komersial murni kemudian dilanjutkan dengan anil menjelaskan bahwa terdapat hubungan kuat antara ukuran butir dari material yang terekristalisasi dengan presentase deformasi. Ketika peningkatan

presentase deformasi di bawah deformasi kritis, ukuran butir meningkat lalu menurun dengan meningkatnya persentase deformasi di atas deformasi kritis. Untuk deformasi ringan (kurang dari deformasi kritis 30%) pada material yang terekristalisasi, ukuran butir meningkat, dan kekerasan menurun. Sedangkan pada deformasi berat (di atas deformasi kritis 30%) pada material yang terekristalisasi, ukuran butir berkurang, dan kekerasan meningkat.

Kenaikan kekerasan versus peningkatan ukuran butir berhubungan dengan densitas dislokasi yang semakin meningkat di dalam butir dan berdampak pada bertambahnya nilai kekerasan material karena batas butir semakin meningkat dengan ukuran butir yang semakin halus<sup>[21]</sup>.

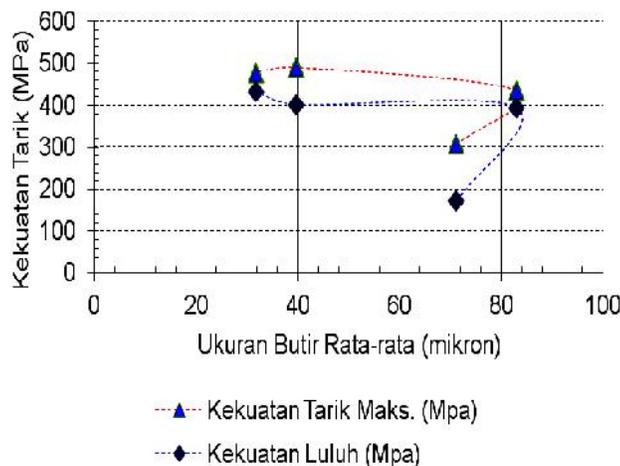
Setelah proses canai hangat melewati suhu 400°C dengan laju regangan 7,7 maka peningkatan kekerasan pada paduan Cu-Zn 70/30 dipengaruhi oleh pengerasan regang karena *proses rolling* dan ukuran butir yang semakin kecil (*strengthening by grain size reduction*). Ukuran butir besar akan menurunkan kekerasan seperti yang terlihat pada Gambar 10 hal ini dikarenakan dengan semakin besarnya  $d^{-1/2}$  maka ukuran butirnya semakin halus yang menyebabkan batas butir akan semakin banyak<sup>[22]</sup>.

Hal ini sesuai dengan pernyataan A.Najafi<sup>[22]</sup> yang menyatakan bahwa dengan semakin besarnya presentase deformasi aktual berarti laju regangan canai hangat yang terjadi semakin tinggi dan menghasilkan ukuran butir yang semakin halus sehingga semakin banyak dislokasi yang bertumpuk di

dalam butir dan menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan dan kekuatan material.

Ukuran butir yang besar menghasilkan nilai kekerasan yang rendah. Hal ini dikarenakan ukuran butir membesar maka jumlah batas butir menurun. Batas butir merupakan tempat dimana dislokasi berhenti karena batas butir mempunyai energi tertinggi untuk memindahkan dislokasi. Oleh karena itu, ketika batas butir menurun, maka dislokasi mudah bergerak dan material paduan Cu-Zn 70/30 mudah untuk berdeformasi yang artinya kekerasan akan turun. Namun, ketika ukuran butirnya lebih halus maka dislokasi sulit untuk bergerak dan material sulit untuk berdeformasi karena batas butirnya banyak. Hal ini menyebabkan kekerasan material menjadi lebih tinggi karena energi yang diperlukan untuk proses deformasi menjadi lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Suryadi, dkk<sup>[23-24]</sup> yang melakukan proses ECAP lalu dilanjutkan dengan anil pemanasan pada paduan Cu-Zn 70/30.

Dengan ukuran butir yang semakin halus pada laju regangan *warm rolling* yang lebih tinggi (Gambar 7), menghasilkan kekerasan (Gambar 10), kekuatan luluh (*yield*), dan kekuatan tarik maksimum yang lebih tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 11 dimana ukuran butir yang semakin halus menunjukkan tren positif terhadap peningkatan kekuatan luluh dari material benda uji paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm roll*.



Gambar 11.

Hubungan antara ukuran butir rata-rata ( $\mu\text{m}$ ) dengan kekuatan tarik (MPa) dari paduan Cu-Zn 70/30 yang diproses *warm rolling*

Pada Gambar 11 menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya ukuran butir maka terjadi penurunan kekuatan tarik maksimum (UTS). Selain itu, nilai UTS terendah tercapai ketika proses deformasi *warm rolling* mencapai laju regangan 7,7. Hal ini berhubungan dengan ukuran butir yang semakin meningkat dengan penurunan laju regangan *warm rolling* seperti yang terlihat pada Gambar 7.

Gambar 11 menunjukkan bahwa dengan semakin besar ukuran butir maka semakin kecil kekuatan luluh. Hal ini sesuai dengan Persamaan Hall-Patch yaitu dengan semakin meningkatnya kehalusan butir atau  $d^{-1/2}$  semakin tinggi maka dapat meningkatkan kekuatan yield material<sup>[10]</sup>.

Material dengan butir yang halus (yang memiliki butir kecil) lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar, karena butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi sesuai dengan Persamaan Hall-Patch<sup>[10]</sup>.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (4)$$

dimana  $y$  merupakan tegangan luluh,  $\sigma_0$  merupakan konstanta material untuk tegangan awal selama pergerakan dislokasi (atau ketahanan kisi terhadap pergerakan dislokasi),  $k_y$  merupakan koefisien penguatan (a konstanta spesifik untuk masing-masing material) dan  $d$  merupakan diameter butir rata-rata

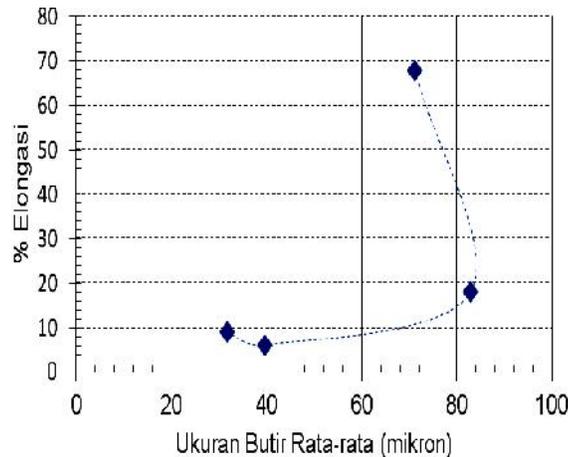
Jadi, dapat disimpulkan bahwa dengan semakin meningkatnya ukuran butir maka berdampak pada menurunnya kekuatan luluh dan UTS dari material paduan Cu-Zn 70/30 yang masing-masing mencapai 395,46 MPa

dan 435,84 MPa dengan semakin meningkatnya laju regangan *warm rolling* seperti yang terlihat pada Gambar 11.

Namun, menurunnya nilai kekuatan baik kekuatan tarik maksimum maupun kekuatan luluh berbanding terbalik dengan persentase elongasi dimana dengan ukuran butir yang semakin besar maka persentase elongasinya semakin tinggi, seperti yang terlihat pada Gambar 12.

Nilai % elongasi yang dihasilkan dari pengujian tarik berkaitan dengan keuletan (*ductility*) suatu material yaitu dengan semakin besarnya persentase elongasi maka secara otomatis keuletan benda uji paduan Cu-Zn 70/30 juga meningkat. Gambar 12 menunjukkan bahwa ukuran butir yang semakin halus atau  $d^{-1/2}$  yang semakin besar maka nilai kekuatan luluh (MPa) material benda uji paduan Cu-Zn 70/30 semakin tinggi. Oleh karena kekuatan luluh berbanding terbalik dengan persentase elongasi sehingga ukuran butir yang semakin halus atau  $d^{-1/2}$  yang semakin besar maka persentase elongasinya semakin rendah seperti yang terlihat pada Gambar 12.

Selain itu, pada % reduksi aktual sebesar 29,03% terjadi pertumbuhan butir abnormal melebihi ukuran butir akibat migrasi batas butir<sup>[14]</sup> mencapai 82,9 mikron. Meskipun ukuran butir melebihi kondisi awal, namun keuletannya masih lebih rendah dibandingkan kondisi awal karena benda uji telah mengalami *strain hardening* akibat proses deformasi *warm rolling*. Sedangkan, pada reduksi actual sebesar 38,16%, oleh karena terjadi fenomena rekritisasi sebagian yaitu timbulnya butir-butir baru di antara butir-butir lainnya seperti yang terlihat pada Gambar 8 (lingkaran) maka % elongasinya meningkat menjadi 7% dibandingkan pada reduksi actual 34,4% yaitu sebesar 6%.



Gambar 12.

Hubungan antara ukuran butir rata-rata dengan % elongasi dari paduan Cu-Zn 70/30 yang diproses *warm rolling*

## SIMPULAN

Setelah *warm rolling* pada suhu 400°C dengan reduksi 38% terjadi perubahan struktur mikro dengan ukuran butir menurun dari 41,57  $\mu\text{m}$  menjadi 33,45  $\mu\text{m}$  di bagian tengah dan 37,8  $\mu\text{m}$  menjadi 30,03  $\mu\text{m}$  di bagian tepi. Kekuatan tarik maksimum menurun dari 490 MPa menjadi 478 MPa dan kekuatan luluh meningkat dari 402 MPa menjadi 434 MPa. Namun, nilai elongasi meningkat dari 6% menjadi 9%. Selain itu, nilai kekerasan meningkat dari 137,59 HV menjadi 146,68 HV di bagian tengah dan meningkat dari 142,4 HV menjadi 155,39 HV di bagian tepi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti yang memberikan beasiswa sehingga penulis dapat melanjutkan pendidikan S2 DTMM FTUI dan melakukan penelitian. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih 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. Azushima, A., R.Kopp, A.Korkohen, D.Y.Yang, F.Micari, G.D.Lahoti, "Severe Plastic Deformation (SPD) Process for Metals," *CIRP Annuals Manufacture Technology.*, Vol.57, hal. 716-735, 2008. (7->1)
2. S. Dobatkin, J. Zrnik, "Ultrafine-Grained Low Carbon Steels by Severe Plastic Deformation", *Metalurgija*, vol. 47, hal.181-186, 2008 (8 -> 2)
3. G. H. Akbari, C. M. Sellars, "Microstructural Development During Warm Rolling of IF Steel", *Acta Metallurgica*, vol.45, issue 12, hal. 5047-5058, 1997 (9 -> 3)
4. Zuhail A. K, "Effect Of Annealing On Mechanical Properties Of Brass Alloy Type C38500", *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 2015 (2 -> 4)
5. Osamu, Izumi, "Research on The Structure and The Low -Temperature Annealing Effect in Cold-Rolled -Brass,, <http://ci.nii.ac.jp/naid/110004637586/en/> (10 -> 5)
6. Freudenberg, J., Kaumann, A., Klauß, H., Marr, T., Nenkov, K., Subramanya, V. and Schultz, L., "Studies on recrystallization of single-phase copper alloys by resistance measurements", *Acta Materialia*, vol.58, hal. 2324-2329, 2010 (3 -> 6)
7. ASTM E3. *Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens*, 2003. (11->7)
8. ASTM E8, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2003. (12-> 8)

9. ASTM E92, *Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials*, 2003 (13 -> 9)
10. Callister, W. D. Jr., *An Introduction : Material Science and Engineering*, John Wiley & Son, Inc., hal.373, 2007 (3 -> 10)
11. Humphreys, F.J., dan M.Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Pergamon Press, 2004 (14-> 11)
12. Ozgovic, W., dkk, "The Microstructure and Mechanical Properties of The Alloy Cu-Zn 70/30 after Recrystallization Annealing", *Journal of Achieve in Material and Manufacturing (JAMME)*, Vol.40, Issue 1, hal.15-24, 2010 15 ->12)
13. L.J., Radovic, dkk., "The Influence of Thermomechanical Treatment on Recrystallization of Al Mg4,5Cu0,5 Alloy", *Metallurgija Journal of Metallurgy*, hal.83-88, 2008 (16 -> 13)
14. Nestorovic S., Desimir Markovic, Ljubic Ivanic, "Influence of Degree of Deformation in Rolling on Anneal Hardening Effect of A Cast Copper Alloy", *Bulletin Material Science*, vol. 26, no. 6. hal. 601-604, 2003 (17 -> 14)
15. C. Zheng, N. Xiao, "Microstructure Prediction of The Austenite Recrystallization During Multi-Pass Steel Strip Hot Rolling," *Computational Materials Science*, voll. 44. hal.507-514, 2008 (18 -> 15)
16. Harold L.Walker, "Grain Size Produced by Recrystallization and Coalescence in Cold Rolled Cartridge Brass," *Buletin Series No. 359*, University of Illinois., vol.43. no. 21, 2000. (19 -> 16)
17. Charlie R.Brooks, "Heat Treatment. Structure and Properties of Non-Ferrous Alloys," ASM International, 2000 (20 -> 17)
18. Verlinden, Berth, Julian Driver, Indradev Samadjar & Roger D.Doherty, *Thermo-Mechanical Processed of Metallic Materials*, Pergamon Press Elsevier. Ltd, vol. 11, 2007. (21 -> 18)
19. William F.Hosford, Robert M.Caddell, *Metal forming Mechanics and Metallurgy*, Prentice Hall-Inc., 2009 (22->19)
20. Huda, Zainul, dan Ooi Soo Peng,"Computation of Critical % Deformation and Its Effect on The Microstructure of Coomercial Purity Aluminum", *Journal of Department of Mechanical Engineering University of Malaya*, 2002 (23 -> 20)
21. Liu, Y., dkk, "Effect of TMCP Parameters on Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloed Steel", *Iron and Steel Institute of Japan Intl.*, vol.45, issue 6, hal.851-857, 2005
22. Najafi, A., "Effect of Delay Time on Microstructural Evolution during Warm Rolling of Ti-Nb-IF Steel", *Journal Material Science and Technology*, vol.20, issue 1, 2004
23. Edwin Scott, Jr, *ASA Materials Markket Digest*, hal.1-6, 2009 (26 -> 23)
24. Suryadi, Suryadi, R.A.M Napitupulu, Dedi Priadi, Amin Suhadi, E.S. Siradjh, "Effect of Equa Channel Angular Pressing and Post Heating on Microstructure and Hardness of Cu-Zn 70-30," *Journal of Advanced Material Research.*, vol.789. hal.373-378, 2013 (27 -> 24)