



## PENGARUH SUHU DAN PERSENTASE REDUKSI TERHADAP *LIMIT DRAWING RATIO (LDR)* PADA PROSES *METAL FORMING* PADUAN 70Cu-30Zn

Amin Suhadi<sup>a</sup>, Eka Febriyanti<sup>\*a,b</sup>, Tri Handayani<sup>a</sup>, Rini Riastuti<sup>b</sup>

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

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

E-mail : [\\*eka.febriyanti@bppt.go.id](mailto:eka.febriyanti@bppt.go.id)

Masuk Tanggal : 04-08-2016, revisi tanggal : 24-08-2016, diterima untuk diterbitkan tanggal 31-08-2016

### Intisari

Penentuan nilai parameter LDR (*limit drawing ratio*) pada proses *metal forming* sangat berpengaruh terhadap kualitas produk, karena itu sebelum melakukan proses pengubahan bentuk diperlukan data mengenai batas kemampuan dari logam untuk menerima gaya pada proses tersebut. Pada penelitian ini digunakan paduan Cu-Zn dengan komposisi 70% Cu dan 30% Zn yang banyak dipakai pada proses pengubahan bentuk terutama *deep drawing*. Paduan 70Cu - 30Zn dilakukan proses *warm rolling* pada berbagai suhu dan persentase reduksi, kemudian dilakukan uji *deep drawing* dengan metode *swift cup* sesuai standar ASTM E 643-15. Untuk mencari nilai LDR, dilakukan simulasi menggunakan FEM (*finite element method*) dan perhitungan hasil *swift cup* dengan rumus sesuai standar ASTM E 643-15. Karakterisasi yang dilakukan adalah pengamatan struktur mikro dan uji keras. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa nilai LDR tidak dipengaruhi oleh % reduksi tetapi sangat dipengaruhi oleh suhu saat pengerjaan dilakukan, dimana makin tinggi suhu proses *metal forming*, makin tinggi nilai LDR akan dihasilkan.

**Kata Kunci:** Pembentukan logam, Paduan 70Cu-30Zn, Limit drawing ratio (LDR)

### Abstract

In *metal forming*, LDR parameter determination has an important role on the quality of the product. Therefore, characteristic data such as load bearing capacity limit of material should be known prior to the *metal forming* process. In this research, 70Cu-30Zn alloy with 70% Cu and 30% Zn which is widely done in *metal forming* especially *deep drawing* is used as samples. The samples are *warm rolled* at various temperatures and reduction percentages and then *deep drawn* by *swift cup* method based on ASTM E 643-15. To find LDR value, further analysis are done by FEM (*finite element method*) simulation and calculation for *swift cup* result based on formula as stated in ASTM E 643-15 standard. Characterization is conducted by hardness test and micro structure examinations. Result of this research show that the LDR value is not significantly affected by reduction percentage but strongly affected by working temperature, where the highest temperature of *metal forming* has been given, the highest limit drawing ratio (LDR) could be obtained.

**Keywords:** *Metal forming*, 70Cu-30Zn alloy, Limit drawing ratio (LDR)

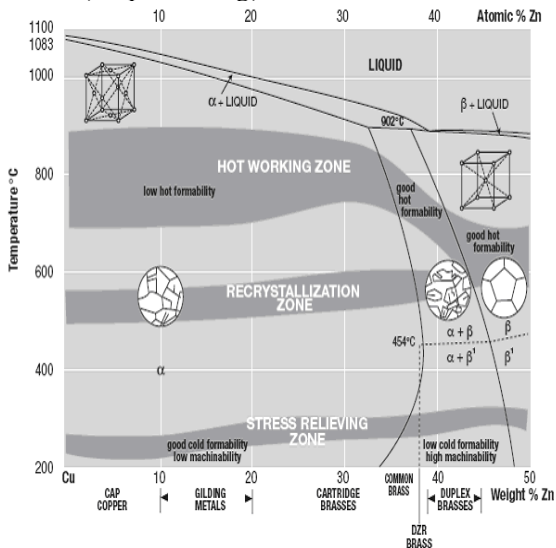
## 1. PENDAHULUAN

Pada proses *metal forming*, karakteristik material sangat menentukan baik buruknya kualitas hasil proses. Hal ini terjadi karena pada proses *metal forming* terdapat banyak gaya yang bekerja dengan arah yang berbeda, sehingga permasalahannya apabila kualitas logam yang diproses tidak sesuai dengan parameter yang diberikan maka dapat terjadi

robek atau deformasi ke arah yang tidak dikehendaki.

Cu-Zn merupakan paduan tembaga yang banyak digunakan untuk komponen otomotif karena memiliki sifat kombinasi antara kekuatan, ketahanan terhadap korosi, dan sifat mampu bentuk yang baik. Berdasarkan diagram Cu-Zn seperti yang terlihat pada Gambar 1, fasa  $\alpha$  bersifat stabil hingga konsentrasi Zn di dalam Cu mencapai 35 %berat<sup>[1-2]</sup>.

Karakteristik dari fasa  $\alpha$  antara lain mempunyai struktur kristal FCC bersifat ulet, nilai kekerasan rendah, mudah dilakukan pengerjaan dingin<sup>[1]</sup> dengan kisi FCC sebesar  $\alpha=3,70 A^{o[2]}$  dan dapat dirol ke dalam lembaran yang sangat tipis, serta mampu dilakukan proses penarikan dalam (*deep drawing*).



Gambar 1. Diagram biner Cu-Zn dan suhu rekristalisasi<sup>[1-3]</sup>

Sifat mampu bentuk lembaran melalui proses *deep drawing* dinyatakan dengan LDR (*limit drawing ratio*). LDR adalah perbandingan antara diameter benda uji (*blank*) maksimum/kritis terhadap diameter penekan (*punch*) yang masih dapat membentuk mangkuk yang baik. Persamaan LDR adalah sebagai berikut<sup>[4]</sup>:

$$LDR = \frac{D_{maks}}{d} \quad (1)$$

dimana rasio batas penarikan LDR merupakan rasio dari diameter benda uji (*blank*) terbesar yang berhasil ditarik ( $D_{maks}$ ) terhadap diameter penekan/*punch* ( $d$ ). Sedangkan besarnya gaya dorong (*punch pressure*) yang diberikan pada material dari mesin universal *sheet metal machine* dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut<sup>[4]</sup>:

$$P^* = 0.25 \times \left[ \left( \frac{D}{d} - 1 \right) 2 + \frac{0.5 \times d}{100s} \right] \times \sigma_{UTS} \quad (2)$$

Keterangan :

- $P^*$  = *punch pressure* (ton)
- $D$  = diameter *blank* (mm)
- $d$  = diameter *punch*/penekan (mm)
- $s$  = tebal lembaran (mm)
- $\sigma_{UTS}$  = tegangan tarik maksimum benda uji ( $kg/mm^2$ )

Nilai LDR menunjukkan kemampuan bahan untuk diubah bentuk dengan kedalaman

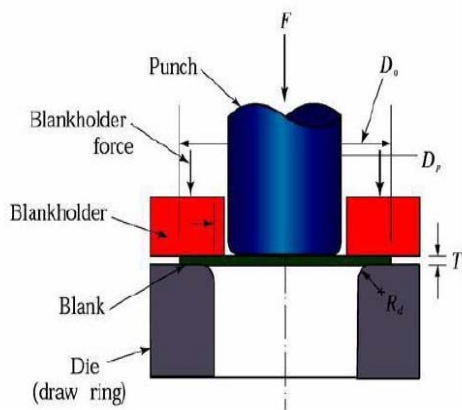
tertentu tanpa terjadinya robek. Faktor-faktor yang mempengaruhi *deep drawing* dapat dibagi menjadi dua bagian, yaitu kondisi pengujian dan material yang digunakan. Kondisi pengujian termasuk di dalamnya geometri, bahan peralatan tekan, tekanan jepit, kecepatan drawing, dan pelumasan. Sedangkan faktor material yaitu ketebalan, besar butir, dan anisotropi plastis. Faktor utama yang menentukan hasil *deep drawing*<sup>[4]</sup> yaitu:

1) Sifat anisotropi plastis (R) yaitu sifat ketahanan bahan terhadap penipisan. Makin besar nilai R suatu bahan berarti ketahanan terhadap deformasi ke arah ketebalan juga besar sehingga kemampuannya untuk dilakukan proses *deep drawing* semakin baik, dimana diperoleh nilai LDR yang lebih besar.

2) Koefisien pengerasan regang (n). Nilai n juga berpengaruh terhadap nilai LDR meskipun tidak sebesar pengaruh R.

3) Pelumasan. Pelumasan yang baik terutama di daerah *blank holder* dan radius *dies* akan menurunkan gesekan sehingga dapat meningkatkan nilai LDR, karena dengan adanya pelumas maka efisiensi deformasi akan semakin besar. Ukuran lain yang dipakai untuk menunjukkan mampu bentuk material uji adalah ketinggian mangkuk yang dapat diukur dari material uji hasil penelitian *deep drawing*.

Pengujian yang digunakan untuk mendapatkan nilai LDR adalah *swift cup test* yang mengacu pada standar ASTM E 643-15<sup>[5]</sup> seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Pada pengujian *swift cup* untuk menentukan LDR, lembaran plat dengan diameter berbeda ditekan sampai gaya tertentu sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan. Pengujian *swift cup* dapat diperpendek dengan perkiraan bahwa nilai LDR dari kebanyakan material berada pada rentang nilai  $2 \pm 0,2$ . Menurut William D Calister<sup>[1]</sup> nilai LDR yang diperoleh dari pengujian *swift cup* menunjukkan kemampuan material untuk diubah bentuk dengan kedalaman tertentu tanpa terjadinya robek. Nilai LDR yang semakin besar ditunjukkan oleh dimensi mangkuk yang makin tinggi tanpa adanya robekan di bagian bawah mangkuk yang dihasilkan dari pengujian *swift cup*. Dari pengujian ini diketahui bahwa material dengan nilai LDR yang tinggi memiliki mampu bentuk tarik dalam (*deep drawability*) yang baik.



Gambar 2. Pengujian *Swift Cup* untuk mengukur mampu bentuk logam<sup>[5-6]</sup>

Oleh karena itu, untuk mengantisipasi kemungkinan kegagalan ketika proses *metal forming* maka dilakukan penelitian *deep drawing* menggunakan pengujian *swift cup* yang bertujuan untuk menentukan LDR dengan menggunakan standar ASTM E 643-15. Dari hasil pengujian *swift cup* diharapkan dapat diketahui batas maksimum kemampuan dari logam yang bersangkutan untuk menerima gaya dalam proses *metal forming* agar tidak robek. Pada penelitian ini logam yang digunakan adalah paduan dengan kadar Cu (dalam % berat) 70 dan kadar Zn 30 atau lebih dikenal dengan paduan *cartridge brass* atau *yellow alpha brass*<sup>[7]</sup>. Paduan 70Cu-30Zn secara luas digunakan dalam industri karena memiliki mampu bentuk yang tinggi terutama pada proses *deep drawing*<sup>[8]</sup>.

## 2. PROSEDUR PERCOBAAN

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah paduan 70Cu-30Zn dengan komposisi kimia ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan 70Cu-30Zn yang digunakan dalam penelitian ini

Unsur	Paduan 70Cu-30Zn (% berat)	Spesifikasi ASTM B36M-13 <sup>[9]</sup> (% berat)
Cu	69,5	69,5-72
Zn	30,7	sisia
Fe	0,026	~ maks. 0,05
Sn	0,0062	~ maks. 0,03
Al	< 0,002	~ maks. 0,03
Ni	-	~ maks. 0,2
As	< 0,001	~ maks. 0,02
Pb	< 0,005	~ maks. 0,05
Si	< 0,005	~ maks. 0,01
Mn	0,0052	~ maks. 0,04
P	< 0,003	~ maks. 0,05
Sb	-	~ maks. 0,01
Bi	-	~ maks. 0,04

Sebelum dilakukan pengujian untuk menentukan nilai LDR, paduan 70Cu-30Zn diberi perlakuan panas dan reduksi yang berbeda seperti ditampikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Deskripsi pengujian sampel uji *deep drawing* pada paduan 70Cu-30Zn

Benda Uji	Deskripsi Pengujian
E	400°C + reduksi 60%
F	400°C + reduksi 70%
H	500°C + reduksi 60%
I	500°C + reduksi 70%

Penelitian mampu bentuk dengan *deep drawing* salah satunya dapat dilakukan dengan pengujian *swift cup*. Pada pengujian ini paduan 70Cu-30Zn berbentuk lingkaran diberi tekanan dan dijepit sehingga menjadi berbentuk mangkuk, dengan menggunakan mesin uji *deep drawing* seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Alat USM (*universal sheet metal*) untuk pengujian mampu bentuk *deep drawing*

Uji kekerasan bertujuan untuk mengetahui pengaruh nilai kekerasan material paduan 70Cu-30Zn dengan nilai LDR dan ketinggian mangkuk yang dihasilkan dari penelitian *deep drawing*. Metode pengujian kekerasan yang dipakai yaitu metode kekerasan Vickers dengan menggunakan standar ASTM E 92<sup>[10]</sup>. Karena ketebalan paduan 70Cu-30Zn rendah ( $\leq 3,1$  mm) maka digunakan metode kekerasan mikro.

Pengamatan metalografi dilakukan untuk menganalisa hubungan antara struktur mikro dari paduan 70Cu-30Zn dengan nilai LDR dan ketinggian mangkuk yang dihasilkan dari penelitian *deep drawing*. Preparasi material uji metalografi berdasarkan ASTM E3 - 01<sup>[11]</sup>. Persiapan paduan 70Cu-30Zn sebelum pengamatan metalografi meliputi pencetakan sampel, pengamplasan, dan pemolesan sampel

sampai mendapatkan permukaan yang lebih halus dan mengkilap serta bebas goresan akibat pengamplasan. Proses selanjutnya yaitu etsa yang bertujuan untuk memunculkan jejak batas butir dan morfologi struktur butir pada paduan 70Cu-30Zn dengan menggunakan etsa ferric klorida atau 10% FeCl<sub>3</sub> yang terdiri atas 10 gr FeCl<sub>3</sub> dan 100 ml alkohol 96%.

### 3. HASIL DAN DISKUSI

#### A. Hasil LDR (*Limit Drawing Ratio*)

LDR merupakan mampu bentuk lembaran yang diamati melalui proses *deep drawing*, dan didefinisikan sebagai batas kemampuan material pelat untuk mampu mengalir ketika diberi gaya serta diukur berdasarkan perbandingan antara diameter *blank* maksimum/kritis terhadap diameter *punch* yang masih dapat membentuk mangkuk yang baik.

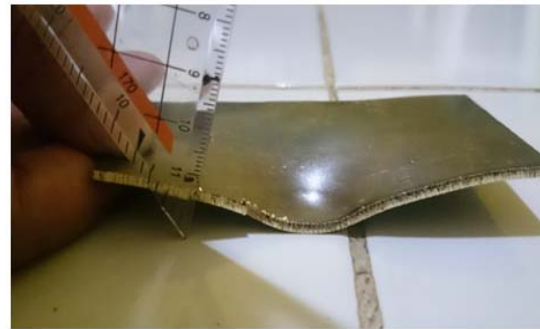
Sebelum melakukan penelitian *deep drawing* maka perlu dilakukan perhitungan awal nilai gaya  $P^*$  (*blank pressure*) menggunakan persamaan (1) dan (2). Data hasil proses *deep drawing* ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengukuran nilai  $P^*$  dan LDR

Paduan 70Cu- 30Zn	Suhu (°C)	% Reduksi	$P^*$ (ton)	LDR
E	400	60	3,00	2,60
F		70	3,57	2,60
H	500	60	3,09	2,63
I		70	3,67	2,63

Paduan 70Cu-30Zn hasil *deep drawing* dengan pengujian *swift cup* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3. Dari hasil pengujian *swift cup* didapatkan nilai LDR sebesar 2,60 dari paduan 70Cu-30Zn yang dilakukan *warm rolling* dengan % reduksi 60 – 70% pada suhu 400°C. Pada suhu pengerjaan 500 °C dengan % reduksi 60 dan 70% nilai LDR yang diperoleh lebih tinggi sebesar 2,63. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun persentase reduksi berbeda ternyata memberi nilai LDR yang relatif sama, namun peningkatan suhu deformasi pada 500 °C (Gambar 5a dan 5b) memiliki sifat mampu bentuk (*deep drawability*) yang lebih baik dibandingkan suhu 400°C (Gambar 4a dan 4b). Paduan 70Cu-30Zn yang diproses pada suhu 500 °C dengan reduksi sebesar 70% menghasilkan ketinggian mangkuk lebih besar seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Tabel 4 menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya persentase reduksi *warm rolling*

mencapai 70% maka terjadi peningkatan tinggi mangkuk yang dihasilkan mencapai 10,31 mm.



(a)



(b)

Gambar 4. Potongan melintang dari mangkuk yang dihasilkan dari paduan 70Cu-30Zn hasil *warm roll* pada suhu 400 °C dengan % reduksi; (a) 60%, (b) 70%



(a)



(b)

Gambar 5. Potongan melintang dari mangkuk yang dihasilkan dari paduan 70Cu-30Zn hasil *warm roll* pada suhu 500 °C dengan % reduksi; (a) 60%, (b) 70%

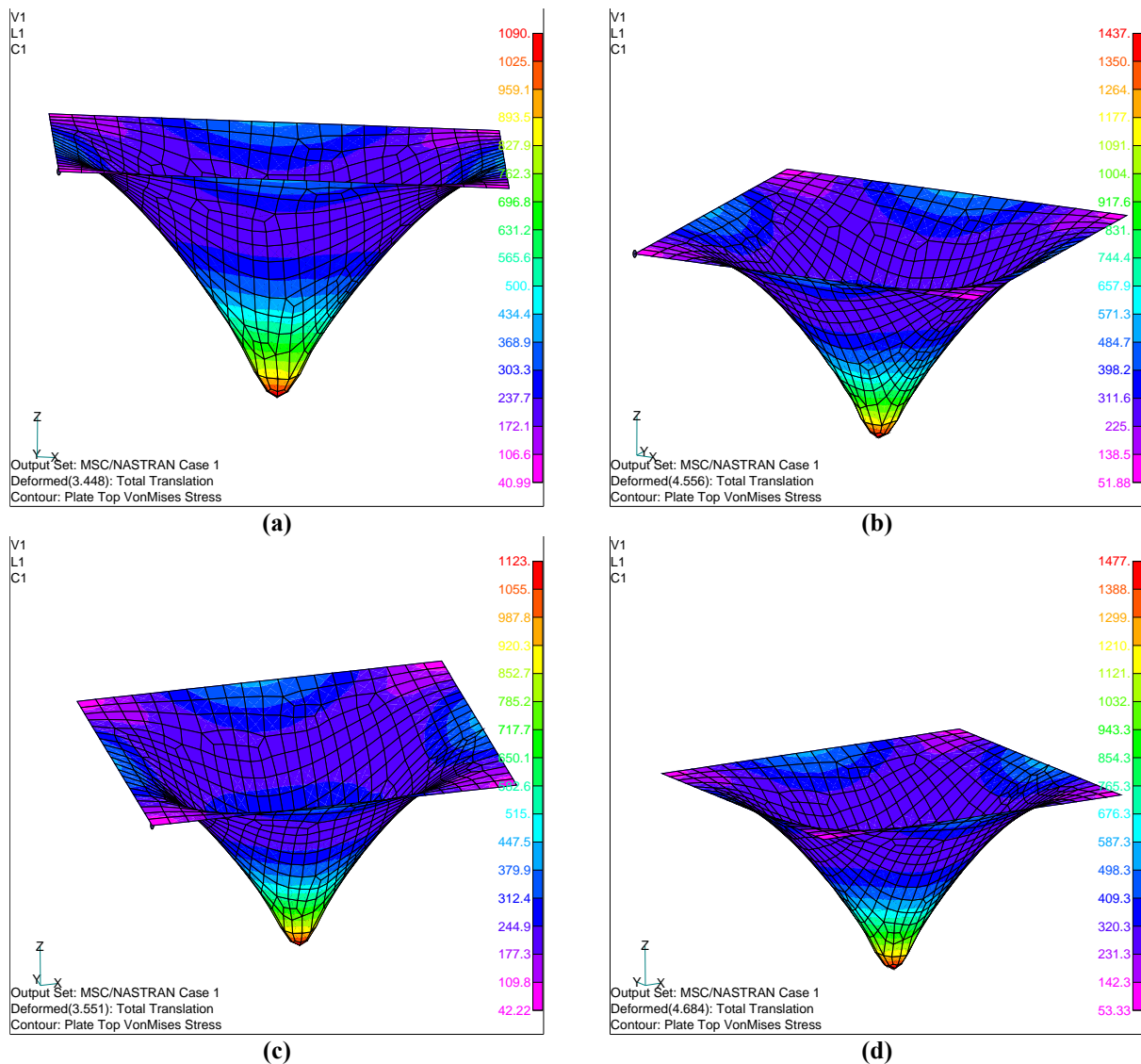
Hal ini mengindikasikan bahwa mampu bentuk (*deep drawability*) terbaik diperoleh dari proses deformasi *warm rolling* pada suhu 500 °C dengan reduksi sebesar 70% dibandingkan suhu 400 °C dengan nilai persentase reduksi yang sama.

Tabel 4. Hasil pengujian *swift cup* untuk analisa mampu bentuk pada *deep drawing*

Material Paduan 70Cu-30Zn	Suhu (°C)	% reduksi	Tinggi Mangkuk (mm)
E	400	60	10,09
F		70	10,21
H	500	60	10,10
I		70	10,31

## B. Analisis Struktur FEM pada Mangkuk *Deep Drawing*

Dari hasil simulasi FEM terbukti bahwa pada variasi reduksi sebesar 60 dan 70% dan suhu yang diberikan yaitu sebesar 400 dan 500 °C, material mampu mengalir tanpa mengalami robek (Gambar 6). Dari hasil simulasi FEM pada Gambar 6 menunjukkan bahwa tegangan tertinggi diperoleh paduan pada bagian tengah yang langsung bersentuhan dengan *punch* dimana terdapat aliran material terbesar dari bagian ini ke segala arah. Dari analisa tersebut juga terlihat bahwa defleksi terbesar diperoleh pada % reduksi 70 dengan suhu 500 °C (Tabel 5). Ini menunjukkan bahwa hasil simulasi selaras dengan hasil pengujian *swift cup*.



Gambar 6. Analisis FEM (*finite element method*) pada paduan 70Cu-30Zn hasil *deep drawing* menunjukkan besarnya tegangan dan defleksi yang terjadi pada suhu (°C) dan % reduksi; (a) 400-60; (b) 400-70; (c) 500-60; (d) 500-70

Tabel 5. Analisis FEM pada pelat paduan 70Cu-30Zn hasil *deep drawing*

Kode Sampel	Suhu (° C)	% reduksi	$\sigma_{UTS}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Tegangan yang mampu ditahan, $\sigma$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Defleksi yang terjadi (cm)
E	400	60	5000	1090	3,448
F		70	5294	1437	4,556
H	500	60	5094	1123	3,551
I		70	5388	1477	4,684

Nilai kekerasan paduan 70Cu-30Zn hasil proses *deep drawing* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Data hasil uji kekerasan paduan 70Cu-30Zn

Kode Sampel	Suhu (° C)	% reduksi	Kekerasan Tepi (HV)	Kekerasan Tengah (HV)
E	400	60	142,40	137,59
F		70	155,39	146,68
H	500	60	157,68	146,78
I		70	155,81	147,09

Gambar 7 menunjukkan mikrostruktur dari paduan 70Cu-30Zn setelah proses *warm rolling* dengan % reduksi 70 pada suhu 500 °C. Jika dilihat dari diagram biner Cu-Zn pada Gambar 1, maka suhu 500 °C sudah berada pada rentang suhu rekristalisasi, artinya pada suhu tersebut atom-atom di dalam butir mempunyai energi yang cukup untuk mengatur pada posisi yang lebih baik dari semula sehingga butir-butir yang terdeformasi tumbuh menjadi butir yang halus dan *equiaxed*<sup>[1]</sup>. Dengan terjadinya proses rekristalisasi tersebut maka *deep drawability* dari material meningkat. Hal ini dapat terjadi karena tegangan sisa yang terbentuk sudah hilang serta sejumlah dislokasi yang tumbuh ketika deformasi dapat diminimalisir<sup>[3]</sup>. Dengan adanya butiran halus yang berbentuk *equiaxed* maka karakteristik mekanis sama ke segala arah, sehingga apabila dilakukan proses *deep drawing* maka paduan 70Cu-30Zn tersebut mudah terdeformasi dan dapat menghasilkan mangkuk yang memiliki ketinggian maksimal tanpa terjadinya robek.

Paduan 70Cu-30Zn dengan mikrostruktur butiran yang halus dan terekristalisasi sempurna menyebabkan proses deformasi *deep drawing* menjadi lebih mudah karena adanya *grain boundary sliding* sehingga dapat menghasilkan peningkatan sifat mampu bentuk yang lebih baik<sup>[12-13]</sup>. *Grain boundary sliding* merupakan salah satu dari mekanisme deformasi material dimana terjadi penggantian butir berlawanan dengan butir lainnya pada suhu tinggi. Mekanisme utama dari *grain boundary sliding* adalah pergerakan dislokasi dengan mekanisme *glide* dan *climb*<sup>[1]</sup>.



(a)



(b)

Gambar 7. Foto struktur mikro dengan mikroskop optik untuk paduan 70Cu-30Zn pada suhu 500 °C dengan % reduksi 70 di area; (a) Tepi, (b) Tengah. Etsa 10% FeCl<sub>3</sub>

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pengaruh suhu dan % reduksi pada proses metal forming terhadap nilai LDR pada paduan 70Cu-30Zn dapat disimpulkan bahwa proses deformasi *warm rolling* yang dilakukan pada suhu 500 °C dengan reduksi 70% menghasilkan nilai LDR (*limit drawing ratio*) tertinggi sebesar 2,60 dengan ketinggian mangkuk maksimal yang dihasilkan tanpa terjadinya robekan dari pengujian *swift cup* sebesar 10,31 mm. Kenaikan suhu proses *metal forming* dalam paduan 70Cu – 30Zn lebih berpengaruh terhadap nilai LDR dibandingkan dengan % reduksi. Hal ini terjadi karena pada suhu 500 °C paduan 70Cu-30Zn sudah mengalami rekristalisasi sehingga hambatan dislokasi untuk bergerak ketika mendapatkan beban sudah berkurang dan mampu bentuknya menjadi lebih baik.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti yang telah mendanai penelitian ini pada tahun 2016. Ucapan terima kasih juga kepada Dr.Hamir Hamzah 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] William D.Callister Jr., “An Introduction : Material Science and Engineering,“ *John Wiley & Son Inc.*, hal. 373, 2007.
- [2] P.Villars, L.D.Chalvert, “Pearson Handbook of Chrystallographic Data for Intermetallic Phases”, *American Society for Metals*, Vol.2, 2006.
- [3] Zhiming Li, Liming Fu, Bin Fu, Aidang San, “Effect Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Nano-grained Titanium Produced by Combination Aysmemetric and Symmetric Rolling”, *Material Science and Engineering A*, Vol.568, 2012, hal.309-318, 2012.
- [4] Dieter. E.G., “Mechanical Metallurgy 6th edition, *McGraw-Hill Inc.*, 2009.
- [5] ASTM E643-15, “Standard Test Methods for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material”, *ASTM*, 2003.
- [6] Faraji, G., Mahmud M. Mashhadi, R.Hashemi, “Using The Finite Element Method for Achieving An Extra High Limiting Drawing Ratio (LDR) Of 9 for Cylindrical Components”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 3, Vol. 3, hal. 262-267, 2010.
- [7] D.Ashkenazi, D.Cvikel, A.Stern, dkk., “Metallurgical Characterization of Brass Objects from The Akko 1 shipwreck, Israel”, *Material Characterization*, Vol.92, hal.49-63, 2014.
- [8] W. Ozgowicz, E. Kalinowska, Ozgowicz, B. Grzegorzcyk, ”The Microstructure and Mechanical Properties of The Alloy CuZn30 after Recrystallizion Annealing”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol.40, Issue 1, hal.15-24, 2010.
- [9] ASTM B36M-13, “Standard Specification for Brass Plate, Sheet, Strip, and Rolled Bar”, *ASTM*, 2003.
- [10] ASTM E92, “Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Material”, *ASTM*, 2003.
- [11] ASTM E3-01, “Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens”, *ASTM*, 2003.
- [12] J.A Del Valle, M.T. Perez-Prado, O.A. Ruano, “Symbiosis between Grain Boundary Sliding and Slip Creep to Obtain High-Strain-Rate Superplasticity in Aluminum Alloys”, *Journal of Europe Ceramic Society*, Vol. 27, Issue 11, hal.3385-3390, 2007.
- [13] E.El-Danaf, S.R.Kalidindi, R.D.Doherty, “Influence of Deformation Path on The Strain Hardening Behaviour and Microstructural Evolution in Low SFE FCC Metals”, *International Journal of Plasticity*, Vol.17, hal.1245-1265, 2010.

