

PENGARUH *THERMOMECHANICAL CONTROLLED PROCESSED* (TMCP) TERHADAP PENGHALUSAN BUTIR DAN SIFAT MEKANIK PADUAN Cu-Zn 70/30

Eka Febriyanti^{a,b,*}, Dedi Priadi^a, Rini Riasuti^a

^aDepartemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

^bBalai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi Kekuatan Struktur (BPPT), PUSPIPTEK, Serpong, 16314, Indonesia

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

Masuk Tanggal : 27-09-2015, revisi tanggal : 04-12-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal 15-12-2015

Intisari

Paduan Cu-Zn 70/30 secara luas digunakan dalam banyak produk industri karena sifatnya yang unggul dan belum ada penggantinya. Untuk memperoleh material paduan Cu-Zn 70/30 dengan sifat mekanik tinggi maka dilakukan riset baik berupa material baru maupun 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. Salah satu alternatif proses fabrikasi untuk mengoptimalkan sifat mekanik paduan Cu-Zn 70/30 yaitu dengan metode *thermomechanical controlled process* (TMCP). TMCP yang dilakukan pada pelat paduan Cu-Zn 70/30 menggunakan variasi persentase deformasi sebanyak 32,25%, 35,48%, dan 38,7% dari proses *hot rolling* pada suhu 500 °C secara *double pass reversible*. Untuk paduan Cu-Zn 70/30, range pengerjaan TMCP berada pada 0,4 s/d 0,6 T_m yaitu berkisar antara suhu 382 °C-573 °C. Hasil metalografi didapat ukuran butir yang semakin menurun sebesar 29,53 μm di bagian tepi dan 33,47 μm di bagian tengah pada derajat deformasi 38,7%. Hasil Uji tarik dengan derajat deformasi 38,7% menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) sebesar 533 MPa, *yield strength* (YS) sebesar 435 MPa, dan persentase elongasi sebesar 10%. Untuk hasil pengujian kekerasan menghasilkan kekerasan sebesar 155 HV untuk bagian tepi dan 146 HV untuk bagian tengah pada derajat deformasi 38,7%.

Kata Kunci: Paduan Cu-Zn 70/30, Hall-Petch, Butir halus, Sifat mekanis, TMCP

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 higher 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 thermo mechanical controlled processed (TMCP) method. TMCP is conducted to Cu-Zn 70/30 alloy in various deformation percentage at a level of 32.25%, 35.48%, and 38.7% at 500°C by double pass reversible method. For Cu-Zn 70/30 alloy the range suhu of TMCP is between 0.4-0.6 melting temperature or between 382°C-573°C. By metallographic examination is obtained decreasing of grain size of 29.53 μm at the edges and of 33.47 μm in the central part sample on 38.7% deformation degree. Meanwhile, by tensile testing can be seen that Cu-Zn 70/30 alloy material with 38.7% deformation degree produces ultimate tensile strength (UTS) value of 533 MPa, yield strength (YS) value of 435 MPa, and elongation percentage value of 10%. The hardness value obtained approximately around 155 HV to 146 HV in the edges to the middle part of material on 38.7% deformation degree.

Keywords: Cu-Zn 70-30 alloy, Hall-Petch, Fine grain, Mechanical properties, TMCP

1. PENDAHULUAN

Paduan Cu-Zn 70/30 secara luas digunakan dalam banyak produk industri karena sifatnya yang unggul dan belum ada penggantinya. Beberapa karakteristik unggul yang dimiliki oleh paduan Cu-Zn 70/30 antara lain bersifat lunak, ulet, kuat, mudah dibentuk, dan sifat mekanisnya dapat dengan mudah ditingkatkan baik dengan pengerjaan dingin maupun *solid solution alloying*^[1]. Oleh karena itu, untuk memperoleh material paduan Cu-Zn 70/30 yang ringan namun memiliki sifat mekanis yang optimal maka dilakukan riset baik berupa material baru maupun 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^[2].

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^[2]. 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 *thermomechanical controlled process* (TMCP)^[2].

TMCP merupakan proses perubahan bentuk suatu material dengan cara memberikan deformasi plastis yang cukup besar dan suhu yang terkontrol terhadap material dengan tujuan menghasilkan butir halus pada material^[2]. Atau dengan kata lain TMCP merupakan kombinasi dari perlakuan *mechanical (mechanical working)*, proses pemulihan (*recovery process*), rekristalisasi (*recrystallisation*), dan pertumbuhan butir (*grain growth*)^[3]. Secara umum proses termomekanik ini terdiri dari proses pemanasan awal (*reheating*), pengerjaan panas (*hot worked*), serta pendinginan (*cooling*). Peningkatan kekuatan dan ketangguhan dalam TMCP diperoleh dari adanya mekanisme penghalusan butir (*grain refinement*) dengan proses deformasi panas yang terkontrol (*controlled anneal*) dan pendinginan yang terkontrol (*controlled cooling*)^[4].

Pengerjaan *warm rolling* merupakan salah satu metode TMCP yang dapat memberikan keuntungan seperti kebutuhan akan gaya deformasi yang lebih rendah, namun menghasilkan rasio deformasi yang lebih besar, menghasilkan deformasi yang lebih seragam terhadap arah transversal, menghasilkan struktur mikro dengan tegangan sisa yang lebih rendah, dan kemudahan pengontrolan dimensi yang lebih baik dibandingkan *cold roll*^[5]. Apabila dibandingkan dengan proses *hot roll*, proses ini akan menghasilkan efisiensi penggunaan energi yang lebih tinggi, kualitas permukaan dan pengendalian dimensi yang lebih baik, serta elemen yang terbuang akibat proses dekarburisasi atau oksidasi yang lebih rendah^[6].

Deformasi *warm rolling* dilakukan pada suhu kerja di antara *hot rolling* dan *cold rolling* yang bertujuan untuk menghasilkan butiran yang halus. Suhu *warm rolling* berada pada range di atas suhu ruang, namun lebih rendah dibandingkan suhu rekristalisasi yaitu 0,4-0,6 Tm (*melting temperature*)^[7].

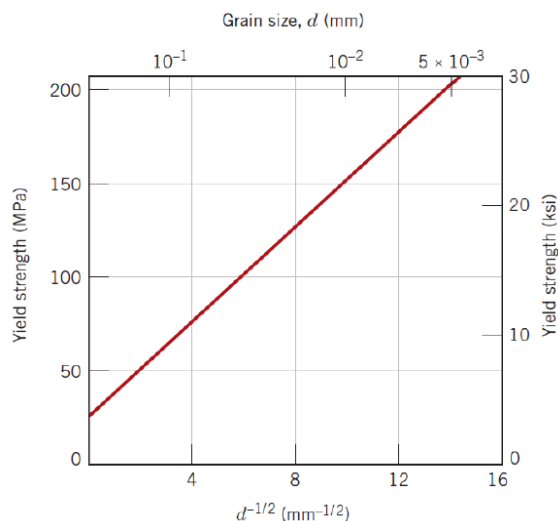
Berdasarkan *range* suhu pengerjaan *warm rolling*, setelah terjadi deformasi plastis, material sebagian mengalami pengerasan regangan dan sebagian mengalami rekristalisasi. Selain menghasilkan butir yang lebih halus, proses *warm rolling* menyebabkan material mengalami pembentukan sub-butir (*subgrain*) yang berukuran *micrometer* maupun *sub-micrometer* pada butir yang berukuran lebih besar atau kasar. Sebagai hasil pembentukan sub-butir maka sifat mekanis dari material ini akan meningkat^[8].

Pada umumnya, material dengan butir yang halus yang memiliki butir kecil bersifat lebih keras dan kuat dibandingkan material dengan butir kasar karena butir halus memiliki area batas butir total yang lebih luas untuk menghalangi pergerakan dislokasi. Nilai kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi akan berdampak pada menurunnya keuletan dan ketangguhan dari material. Untuk sebagian besar material, kekuatan tarik (σ_y) bervariasi dengan ukuran butir sesuai dengan persamaan (1) dan Gambar 1^[1].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1)$$

Persamaan (1) disebut dengan persamaan Hall Petch[1], dimana d adalah diameter butir akhir rata-rata, σ_0 adalah *flow stress material* pada ukuran butir sangat besar (MPa), dan k_y adalah koefisien penguatan (MPa m^{-1/2}).

Tujuan dari penelitian adalah untuk mempelajari hubungan antara penghalusan butir (*grain refinement*) terhadap perubahan sifat mekanis sebagai implementasi hukum Hall-Patch pada pelat paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan proses *warm rolling* dengan metode *double pass reversible* sebanyak 32,25%; 35,48%; dan 38,7%.



Gambar 1. Hubungan antara ukuran butir, $d^{-1/2}$ dengan kekuatan luluh (MPa)^[1]

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Benda uji yang digunakan adalah paduan Cu-Zn 70/30 dengan hasil komposisi yang terlihat pada Tabel 1. Pengujian komposisi material paduan Cu-Zn 70/30 dilakukan dengan menggunakan OES (*optical emission spectroscopy*) pada DTMM FTUI.

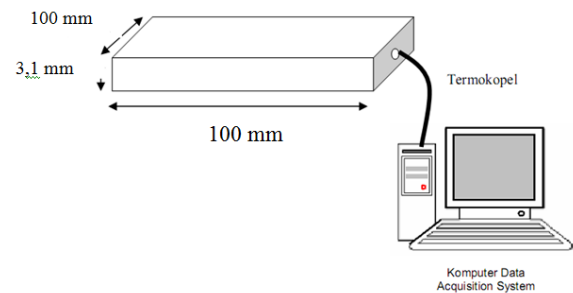
Tabel 1. Komposisi benda uji paduan Cu-Zn 70/30

Unsur	Penelitian (%berat)	Target* (%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

* Target : standard PINDAD

Ukuran benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat berdimensi 100 mm x

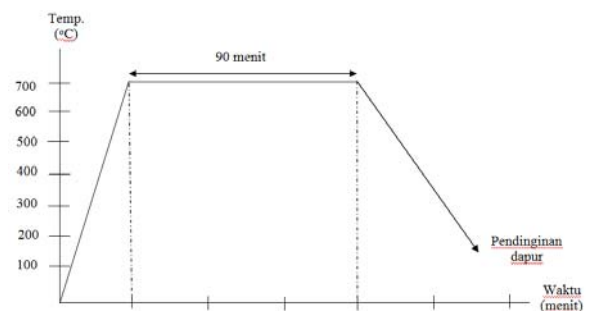
100 mm x 3,1 mm seperti yang ditampilkan pada Gambar 2, lalu dihubungkan dengan kawat termokopel tipe K berdiameter 2 mm. Pengukuran suhu menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan perangkat komputer.



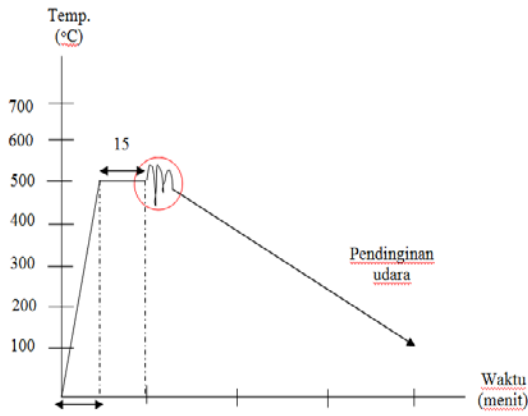
Gambar 2. Contoh rangkaian pengujian *warm rolling*^[9]

Proses deformasi *warm rolling* didahului dengan pemanasan sampel pada dapur karbolit dengan suhu 700 °C selama 90 menit, yang kemudian dilanjutkan proses *roll* pada mesin *OnoRoll* kapasitas 20 tonF dengan parameter deformasi *roll double pass reverse*, secara bolak-balik sebanyak 32,25%; 35,48%; dan 38,7% yang dilanjutkan dengan pendinginan udara.

Penelitian ini diawali dengan pemanasan awal benda uji 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 tungku ke suhu ruang seperti yang terlihat pada Gambar 3. Selanjutnya dilakukan pemanasan ke suhu 500 °C dengan waktu 15 menit dan ditahan selama 15 menit dan selanjutnya dilakukan *warm rolling* secara *double pass reversible* dengan derajat deformasi 32,25%; 35,48%; dan 38,7% kemudian dilanjutkan dengan pendinginan di udara, tahapan proses seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

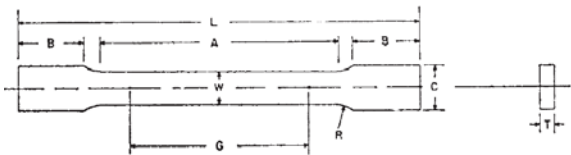


Gambar 3. Diagram tahapan homogenisasi pada suhu 700 °C selama 90 menit



Gambar 4. Diagram tahapan warm rolling pada suhu 500 °C dengan metode double pass reversible

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik (UTS), kekuatan luluh (YS), dan nilai keuletan. Sampel uji tarik mengacu pada standard ASTM E8^[11] dengan menggunakan mesin uji tarik Servopulser Shimadzu (Gambar 5).



Gambar 5. Sampel uji tarik dimana L = minimal 100 mm, G = 25 mm, dan C = 10 mm

Untuk menghitung nilai UTS (*ultimate tensile strength*), YS (*yield strength*), dan elongasi dari material paduan Cu-Zn 70/30 menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_{UTS} = F_{max}/A_o \quad (2)$$

$$\epsilon = (l_{max}-l_o)/l_o \quad (3)$$

Pengujian kekerasan menggunakan metode Vicker's dengan menggunakan standar ASTM E 92^[12]. Karena ketebalan material benda uji yang tipis yaitu sebesar $\leq 3,1$ mm, maka dilakukan pengujian metode kekerasan secara mikro untuk mengetahui distribusi kekerasan baik di bagian tepi maupun di bagian tengah hasil hot rolling.

3. HASIL DAN DISKUSI

Setelah dilakukan proses warm rolling maka dilakukan pengukuran tingkat deformasi melalui persamaan sebagai berikut :

$$\% \text{ Deformasi} = \frac{H_o - H_f}{H_o}$$

dimana : % deformasi = derajat deformasi, H_o = tebal awal benda uji (mm), H_f = tebal akhir benda uji (mm). Sedangkan untuk menghitung besar regangan yang terjadi saat

proses hot roll maka digunakan persamaan berikut ^[1]:

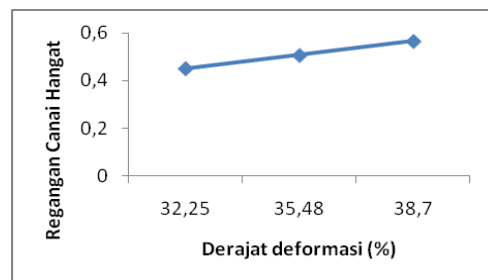
$$\epsilon = 1.155 \ln (h_o/h_f) = 1.155 \ln [1/(1-r)]$$

Sedangkan data derajat deformasi (%) dan regangan warm rolling dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran dimensi benda uji dan regangan setelah warm rolling

Ho (mm)	Hf (mm)	Derajat Deformasi (%)	Regangan Hasil warm Roll
3,1	2,1	32,25	0,449832
3,1	2	35,48	0,506184
3,1	1,9	38,7	0,565428

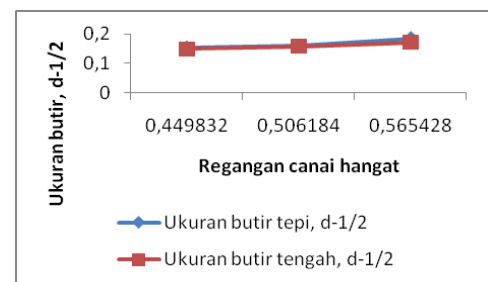
Gambar 6 menunjukkan hubungan antara derajat deformasi (%) dengan regangan warm rolling pada material paduan Cu-Zn 70/30. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya derajat deformasi hingga mencapai 38,7% menunjukkan tren positif terhadap peningkatan regangan hingga 0,565423 yang menyebabkan proses penghalusan butir semakin meningkat, baik di bagian tepi maupun tengah seperti yang terlihat pada Tabel 3 dan Gambar 7.



Gambar 6. Hubungan antara derajat deformasi (%) dengan regangan warm rolling pada material paduan Cu-Zn 70/30

Tabel 3. Pengukuran besar butir (μm) setelah deformasi pada bagian tengah dan tepi

Regangan Warm rolling	d tengah (μm)	d ^{1/2} tengah	d tepi (μm)	d ^{1/2} tepi
0,449832	44,9	0,149	43,12	0,152
0,506184	39,9	0,158	39,5	0,159
0,565428	33,47	0,172	29,53	0,184



Gambar 7. Hubungan antara ukuran butir, $d^{-1/2}$ (μm) dengan regangan hasil canai hangat (warm rolling)

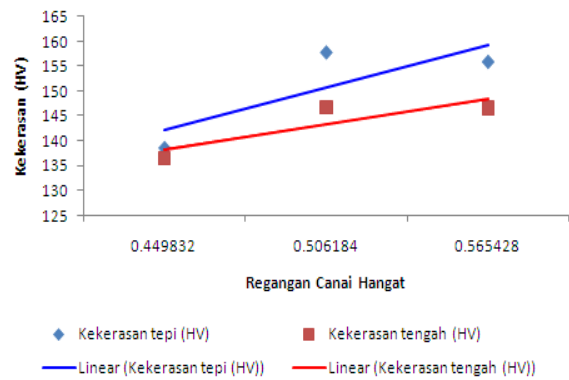
Nilai $d^{-1/2}$ berhubungan dengan persamaan Hall Petch^[7] seperti yang terlihat pada persamaan (1). Ukuran butir terkecil diperoleh di suhu *warm rolling* 500 °C dengan regangan 0,565. Hal tersebut dapat dilihat pada mikrostruktur butir dari hasil perlakuan deformasi pada Gambar 8a dan 8b. Regangan yang semakin tinggi dapat mempengaruhi jumlah inti atau kecepatan pengintian. Dari regangan yang lebih tinggi akan didapatkan lebih banyak inti per satuan volume untuk rekristalisasi sehingga didapatkan ukuran butir yang lebih kecil^[13-18]. Dengan semakin besar regangan *warm rolling* maka semakin halus dan semakin kecil butir yang terbentuk yang ditandai dengan tren ukuran butir, $d^{-1/2}$ (μm) yang semakin besar dengan peningkatan regangan seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 8. Foto mikrostruktur untuk paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm roll* pada $T= 500$ °C dengan deformasi 38,7% (a) Bagian tepi, (b) Bagian tengah. Etsa 10% FeCl_3

Tabel 4. Harga kekerasan (HV) setelah deformasi pada bagian tengah dan tepi

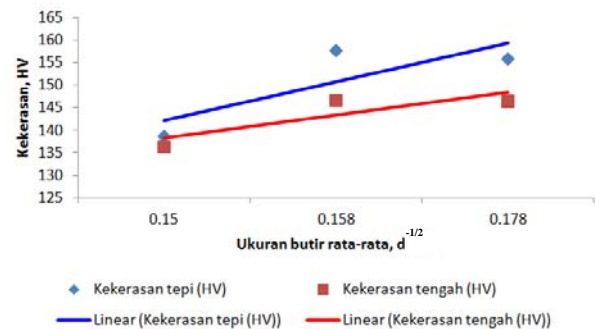
Regangan Warm Rolling	KekerasanTengah (μm)	KekerasanTepi (μm)
0,449832	136,52	138,68
0,506184	146,78	157,68
0,565428	146,68	155,81



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

Tabel 5. Pengukuran besar butir (μm) dan harga kekerasan (HV) pada paduan Cu-Zn 70/30 setelah deformasi di bagian tengah dan tepi

Regangan Hot Roll	$d^{-1/2}$ Butir (rata2)	v Tepi (HV)	v Tengah (HV)
0,449832	0,150	138,68	136,52
0,506184	0,158	157,68	146,78
0,565428	0,178	155,81	146,8



Gambar 10. Hubungan antara ukuran butir rata-rata, $d^{-1/2}$ (μm) dan kekerasan mikro (HV) dari benda uji Cu-Zn 70/30 yang diproses *warm rolling* di suhu 500 °C

Gambar 10 menunjukkan pengaruh ukuran butir rata-rata, $d^{-1/2}$ terhadap nilai kekerasan. Ukuran butir yang besar memiliki nilai $d^{-1/2}$ yang kecil, sehingga 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^[20-21] yang melakukan proses ECAP

lalu dilanjutkan dengan anil pemanasan pada paduan Cu-Zn 70/30.

Sedangkan menurut Zainul Huda dan Ooi So Peng^[22] yang melakukan *cold rolling* pada aluminium komersial murni kemudian dilanjutkan dengan anil menjelaskan bahwa terdapat hubungan kuat antara ukuran butir dari material yang terekristalisasi dengan presentase deformasi/derajat deformasi. Ketika peningkatan presentase deformasi/derajat deformasi di bawah deformasi kritis, ukuran butir meningkat lalu menurun dengan meningkatnya persentase reduksi 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.

Penghalusan butiran yang semakin meningkat disebabkan karena pemanasan adiabatik di permukaan logam semakin tinggi sehingga reduksi ketebalan yang dihasilkan semakin besar dan berdampak pada proses penghalusan butiran yang semakin tinggi. Selain itu proses penghalusan butir pada mekanisme *warm rolling* mengakibatkan nilai Δ rendah (Δ 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^[23].

Dengan semakin halus ukuran butir atau $d^{-1/2}$ (μm) semakin tinggi maka kekerasannya semakin bertambah dan menunjukkan tren positif seperti yang terlihat pada Gambar 10. Selain itu ukuran butir $d^{-1/2}$ (μm) yang semakin halus pada bagian tepi lebih banyak dibandingkan pada bagian tengah karena bagian tepi lebih banyak terkena deformasi selama proses *warm rolling* dibandingkan bagian tengah.

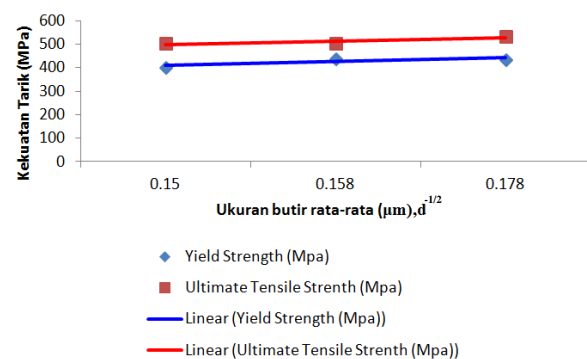
Dengan ukuran butir yang semakin halus ($d^{-1/2}$ yang semakin besar) pada regangan *warm rolling* yang lebih tinggi (Gambar 7), menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi (Gambar 10), yang berdampak pada meningkatnya kekuatan luluh (*yield*) yang lebih tinggi sesuai dengan persamaan Hall-Petch (Persamaan 1), seperti yang terlihat pada Tabel 6 dan 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*.

Pada studi ini dengan peningkatan regangan *warm rolling* mencapai 0,5654 menghasilkan peningkatan kehalusan butir atau $d^{-1/2}$ semakin besar (μm) pada Gambar 7, sehingga berdampak pada peningkatan kekerasan (Gambar 10), dan peningkatan *yield strength* (Gambar 11).

Tabel 6. Pengukuran besar butir (μm) setelah deformasi pada bagian tengah dan tepi

Regangan Canai Hangat	$d^{-1/2}$ butir (rata2) (μm)	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	e (%)
0,449832	0,150	402,04	505,18	21
0,506184	0,158	437,5	502,29	6
0,565428	0,178	435,26	533,05	10

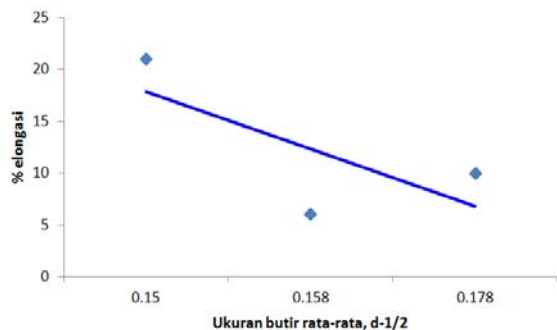


Gambar 11. Hubungan antara tingkat kehalusan butir rata-rata, $d^{-1/2}$ dengan kekuatan tarik (MPa) dari pelat Cu-Zn yang diproses *warm rolling*

Gambar 11 menunjukkan bahwa dengan semakin meningkatnya kehalusan butir atau $d^{-1/2}$ semakin besar, maka menunjukkan tren yang semakin positif terhadap peningkatan kekuatan luluh. Tren positif ini sesuai dengan persamaan Hall-Petch seperti yang terlihat pada Gambar 1, yaitu dengan semakin meningkatnya kehalusan butir atau $d^{-1/2}$ semakin tinggi maka dapat meningkatkan kekuatan luluh material. 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-Petch (Persamaan 1)^[7].

Nilai UTS tertinggi tercapai ketika proses deformasi *warm rolling* mencapai regangan 0,565428. Hal ini berhubungan dengan ukuran butir yang kehalusannya semakin meningkat dengan peningkatan regangan *warm rolling* (Gambar 7). Hal ini berdampak pada meningkatnya kekuatan luluh dan UTS dari material paduan Cu-Zn 70/30 yang masing-masing mencapai 435 MPa dan 533 MPa dengan semakin meningkatnya regangan *warm rolling* seperti yang terlihat pada Gambar 11.

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.



Gambar 12. Hubungan antara tingkat kehalusan butir rata-rata, $d^{-1/2}$ dengan % elongasi dari pelat Cu-Zn yang diproses *warmt rolling*

4. KESIMPULAN

Peningkatan derajat deformasi *warm rolling* mencapai 38,7% dalam paduan Cu/Zn 70/30 menunjukkan adanya tren positif terhadap peningkatan regangan hingga mencapai 0,565423. Dengan semakin besar regangan *hot rolling* maka bentuk butir yang dihasilkan semakin halus ditandai dengan tren ukuran butir, $d^{-1/2}$ (μm) yang semakin besar. Semakin kecil ukuran butir maka nilai $d^{-1/2}$ semakin besar, sehingga menghasilkan kekerasan yang semakin tinggi. Nilai $d^{-1/2}$ yang semakin besar atau ukuran butir semakin kecil maka kekuatan luluh dan kekuatan tarik maksimum semakin meningkat, namun nilai % elongasinya semakin menurun, dan kembali meningkat pada derajat deformasi 38,7%.

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] Callister Jr., William D. 2007, "An Introduction : Material Science and

Engineering," *John Wiley & Son Inc.*, pp.373, 2007.

- [2] 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, pp.716-735, 2008.
- [3] Joanne, N. 2000. What are TMCP (Thermo-mechanically Controlled Processed) Steel. TWI Ltd, 2000.
- [4] Yuqing, "Ultra-Fine Grained Steel," *Metallurgical Industry Press Trans.*, 2009.
- [5] Yajima et al, "Extensive Application of TMCP-manufactured High Tensile Steel Plates to Ship Hulls and Offshore Structures," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review.*, Vol. 24 No.1, 2007.
- [6] Akbari G. H., C. M. Sellars, "Microstructural Development During Warm Rolling of IF Steel," *Journal of Acta Metallurgica.*, Vol. 45. No.12. pp. 5047-5058, 2000.
- [7] Lange, K, "Plastic Deformation of Metals and Related Properties. Handbook of Metal Forming," Mc.Graw-Hill. New York, 2000.
- [8] Dobatkin S., J. Zrnik, "Ultrafine-Grained Low Carbon Steels by Severe Plastic Deformation," *Journal of Metalurgija.*, Vol. 47. pp.181-186, 2008.
- [9] Febriyanti, Eka, Dedi Priadi, Rini Riastuti, "Pengaruh Peningkatan Derajat Deformasi Hot rolling terhadap Morfologi Struktur Paduan Cu-Zn 70/30," *Prosiding SENAMM VIII.*, pp.10-16 : Yogyakarta, 2015.
- [10] ASTM E3. Standard Guide for Preparation for Metallographic Specimens, 2013.
- [11] ASTM E8. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2013.
- [12] ASTM E92. Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials, 2013.
- [13] F. J. Humphreys, and M.Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena," *Pergamon Press.*, 2004.
- [14] Nestorovic S., Desimir Markovic, Ljubica Ivanic, "Influence of Degree of Deformation in Rolling on Anneal Hardening Effect of A Cast Copper Alloy," *Bulletin Material Science.*, Vol. 26. No. 6. pp. 601-604, 2003.
- [15] 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.

- [16] C. Zheng, N. Xiao, "Microstructure Prediction of The Austenite Recrystallization During Multi-Pass Steel Strip Hot Rolling," *Computational Materials Science.*, Vol. 44. pp.507-514, 2008.
- [17] Verlinden, Berth, Julian Driver, Indradev Samadjar & Roger D.Doherty, "Thermo-Mechanical Processed of Metallic Materials," *Pergamon Press Elsevier. Ltd.*, Vol.11, 2007.
- [18] Charlie R.Brooks, "Heat Treatment. Structure and Properties of Non-Ferrous Alloys," *ASM International.*, 2000.
- [19] Y.Liu, F.Zhu, et.al, "Effect of TMCP Parameters on Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloyed Steel," *Iron and Steel Institute of Japan International Journal.*, Vol. 45. No.6. pp.851-857, 2005.
- [20] Edwin Scott, Jr, "ASA Materials Market Digest," pp.1-6, 2009.
- [21] 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. pp.373-378, 2013.
- [22] Zainul Huda, Ooi Soo Peng, "Computation of Critical % Deformation and Its Effect on The Microstructure and Hardness of Commercial Purity Aluminum". *Mems Technology and Devices.*, Stanford Publishing Singapore, pp. 385-391, 2007.
- [23] William F.Hosford, Robert M.Caddell, "Metal forming Mechanics and Metallurgy," *Prentice Hall-Inc.*, 2009.