



PENGARUH ANNEAL HARDENING DAN % REDUKSI WARM ROLLING TERHADAP 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

^bBalai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan
E-Mail: * eka.febriyanti@bppt.go.id

Masuk Tanggal : 03-02-2016, revisi tanggal : 25-04-2016, diterima untuk diterbitkan tanggal 30-04-2016

Intisari

Paduan tembaga memiliki banyak kegunaan dalam bidang industri. Namun, dalam aplikasinya membutuhkan sifat mekanis yang tinggi. Oleh karena paduan tembaga sulit dilakukan pengerasan secara konvensional seperti *alloying*, *precipitation hardening*, dan *dispersion hardening* maka yang dilakukan adalah dengan mekanisme *anneal hardening* melalui proses anil pada suhu 150-300 °C. Pada penelitian ini, paduan Cu-Zn 70/30 dilakukan *warm rolling* pada suhu 300 °C dengan presentase reduksi 50% dan 60%. Karakterisasi yang dilakukan setelah proses di atas adalah uji kekerasan secara mikro, uji tarik, pengamatan metalografi, dan analisa dengan FESEM (*field emission scanning electron microscope*). Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa efek *anneal hardening* muncul pada suhu 300 °C yang diikuti dengan peningkatan nilai kekerasan dan kekuatan tarik, namun persen elongasinya menurun. Dengan semakin besarnya % reduksi *warm rolling* diikuti dengan proses *anneal* yang dilakukan terhadap paduan Cu-Zn 70/30 mengakibatkan terjadinya *anneal hardening*. Hal ini disebabkan karena adanya unsur Zn yang tersegregasi dalam dislokasi dan teramati dengan FESEM sebagai pita-pita deformasi (*deformation band*). Dengan meningkatnya % reduksi yang diberikan pada paduan juga akan menghasilkan pita-pita deformasi yang semakin rapat dan tebal.

Kata Kunci: Paduan Cu-Zn 70/30, Warm rolling, Anneal hardening, % reduksi, Pita deformasi

Abstract

Copper alloy has many uses in industry. However, in its application requires high mechanical properties. Therefore, copper alloys has been hardened conventionally by solution and/or precipitation hardening and dispersion hardening then is experienced with anneal hardening mechanism through an annealing process at 150-300 °C. In this research, Cu-Zn 70/30 alloys was subjected to warm rolling with 50% and 60% in reduction percentage followed by annealing. Several examinations was done after warm rolling such as microhardness testing, tensile testing, metallography, and FESEM (*field emission scanning electron microscope*). The results show that anneal hardening was occurred in the temperature of 300 °C followed by increasing of hardness value, tensile strength, and decreasing of elongation. Anneal hardening mechanism in Cu-Zn 70/30 was obtained by increasing % reduction during warm rolling and anneal process. This is caused by Zn element which is segregated into dislocation and observed with FESEM analysis as deformation band. With increasing of % reduction to Cu-Zn 70/30 alloy will also results denser and thicker deformation bands.

Keywords: Cu-Zn 70/30 alloy, Warm rolling, Anneal hardening, % reduction, Deformation band

1. PENDAHULUAN

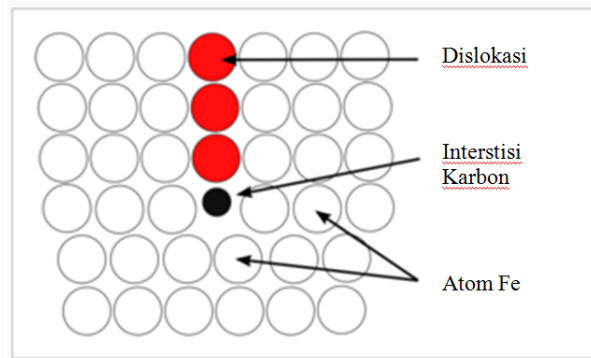
Paduan tembaga banyak digunakan sebagai material kontak pegas karena sifat konduktivitas, ketahanan korosi, mampu bentuk, perilaku non magnetik, dan kekuatan luluh terhadap rasio modulus elastis—yang tinggi, namun paduan tembaga memiliki

ketahanan yang rendah terhadap pelunakan pada suhu *moderate*^[1]. Selain itu, tembaga juga sulit dikeraskan secara konvensional dengan *alloying*, *precipitation hardening*, dan *dispersion hardening*^[2]. Oleh karena itu, hal ini menjadi masalah yang cukup besar bagi industri.

Beberapa tahun terakhir telah dilihat upaya besar yang ditujukan untuk mengeksplor perbaikan sifat material seperti kekuatan, konduktivitas, dan dapat mempertahankan kekuatan pada suhu tinggi dalam paduan tembaga^[1]. Salah satu mekanisme yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik dari paduan tembaga fasa tunggal yaitu penguatan yang dilakukan ketika paduan tembaga dalam kondisi hasil *rolling* lalu dianil pada suhu 150-300 °C yang disebut dengan *anneal hardening*. Namun, mekanisme yang bertanggung jawab terhadap *anneal hardening* yang terjadi di rentang suhu tersebut belum dapat sepenuhnya dipahami^[3].

Beberapa penelitian tentang *anneal hardening* antara lain dilakukan pada paduan coran tembaga yang menunjukkan bahwa *ordering* atom merupakan mekanisme yang paling bertanggung jawab untuk menghasilkan efek pengerasan^[4]. Selain itu, penelitian lebih rinci baru-baru ini juga dilakukan terhadap paduan Cu-Al dan menghasilkan kesimpulan bahwa mekanisme pengerasan didominasi oleh segregasi *solute*^[1]. Mekanisme *anneal hardening* pada paduan Cu-Zn berbeda dengan mekanisme pengerasan lainnya seperti *solute clusters*, *ordered clusters*, dan *precipitation hardening*. Selain itu, penelitian sebelumnya terhadap *anneal hardening* pada paduan Cu-Zn juga menunjukkan bahwa jumlah penguatan meningkat dengan penambahan % reduksi *cold rolling* dan dengan penambahan konsentrasi elemen paduan^[1,3-4].

Mekanisme *anneal hardening* pada paduan Cu-Zn sering dianalogikan dengan fenomena atmosfer cottrell biasanya muncul dalam logam berstruktur kristal BCC, seperti besi atau nikel dengan atom pengotor (*impurity*) yang kecil, seperti karbon atau nitrogen. Fenomena cottrell berhubungan dengan atom interstisi yang sedikit mendistorsi kisi lalu menghasilkan medan tegangan sisa yang mengelilingi interstisi. Selanjutnya, medan tegangan yang muncul dapat direlaksasi dengan difusi atom interstisi menuju dislokasi yang mengandung gap kecil pada intinya seperti yang terlihat pada Gambar 1. Namun, setiap atom terdifusi masuk ke dalam inti dislokasi maka akan tetap terkunci di sana. Oleh karena itu, setiap dislokasi yang tertahan oleh atom interstisi maka dibutuhkan sedikit tambahan gaya untuk melepaskan dislokasi sebelum *yield* sehingga menghasilkan *upper yield point* dalam grafik tegangan versus regangan^[5].



Gambar 1. Ilustrasi atmosfer cottrell, dimana atom karbon tersegregasi dalam dislokasi^[11]

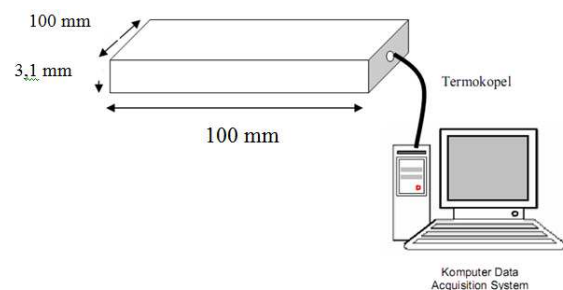
Oleh karena itu, tujuan dari penelitian yang dilakukan saat ini adalah untuk menemukan kondisi % reduksi optimal yang menyebabkan efek *anneal hardening* dalam paduan Cu-Zn 70/30 pada suhu *warm rolling* 300 °C.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Paduan Cu-Zn 70/30 dalam penelitian ini memiliki komposisi seperti yang terlihat pada Tabel 1. Pengujian komposisi material paduan Cu-Zn 70/30 dilakukan dengan menggunakan OES (*optical emission spectroscopy*).

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

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

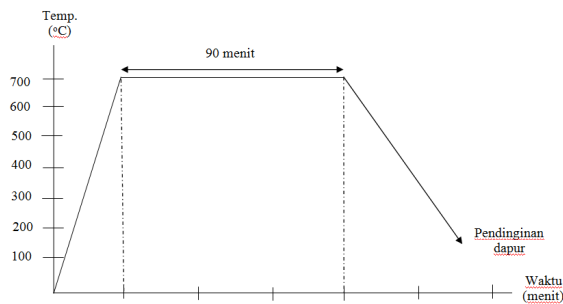


Gambar 2. Ilustrasi rangkaian pengujian *warm rolling*^[6]

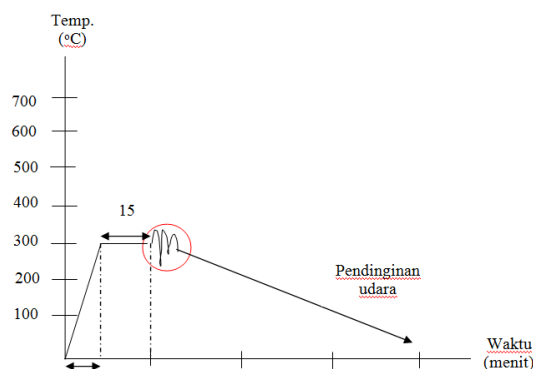
Ukuran sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat berdimensi 100 mm x 100 mm x 3,1 mm seperti yang ditampilkan pada Gambar 2, lalu dihubungkan dengan kawat termokopel tipe K berdiameter 2 mm.

Sedangkan pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan data *acquisition system* yang dihubungkan dengan perangkat komputer.

Proses deformasi *warm rolling* didahului dengan pemanasan sampel pada dapur karbolit dengan suhu 700 °C selama 90 menit, dilanjutkan proses *roll* dengan menggunakan mesin *roll* kapasitas 20 tonF dan parameter deformasi *rolling double pass reverse* dengan % reduksi sebesar 50% dan 60% yang dilanjutkan dengan pendinginan udara.



Gambar 3. Diagram tahapan homogenisasi pada suhu 700 °C selama 90 menit^[7]

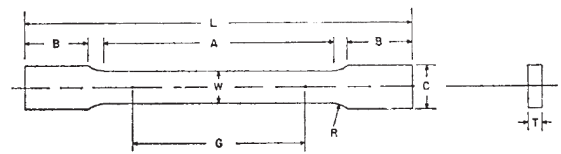


Gambar 4. Diagram tahapan *warm rolling* pada suhu 300 °C dengan metode *double pass reversible*

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. Setelah itu dilakukan pemanasan ke suhu 300°C dengan waktu 15 menit dan ditahan selama 15 menit lalu dilakukan *warm rolling* secara *double pass reversible* dengan % reduksi sebesar 50% dan 60% selanjutnya dilakukan pendinginan di udara, tahapan proses seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Proses *warm rolling* dilanjutkan dengan pengujian tarik. Sampel uji tarik mengacu pada standard ASTM E8^[8] dengan menggunakan

mesin uji tarik *Servopulser Shimadzu* (Gambar 5).



Gambar 5. Sampel uji tarik dari paduan Cu-Zn 70/30 dimana L = minimal 100 mm, G = 25 mm, dan C = 10 mm

Untuk menghitung nilai kekuatan tarik maksimum (UTS, *ultimate tensile strength*), kekuatan luluh (YS, *yield strength*), dan ϵ (elongasi) dari material paduan Cu-Zn 70/30 menggunakan persamaan sebagai berikut^[2]:

$$\sigma_{UTS} = F_{max}/A_0 \quad (1)$$

$$\epsilon = (l_{max}-l_0)/l_0 \quad (2)$$

Dari sampel paduan Cu-Zn 70/30 pada posisi searah *roll* dilakukan analisa morfologi struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan FE-SEM (*field emission scanning electron microscope*). Perubahan morfologi struktur Cu-Zn 70/30 merupakan pengamatan perubahan bentuk butir, aliran deformasi material, dan cacat-cacat mikro baik di permukaan maupun di dalam butir yang mungkin timbul dari proses *warm rolling*. Preparasi sampel uji berdasarkan ASTM E3 – 01^[9]. Larutan etsa yang digunakan adalah ferric klorida atau 10% FeCl₃ yang terdiri atas 10 gr FeCl₃ dan 100 ml alkohol 96%^[6].

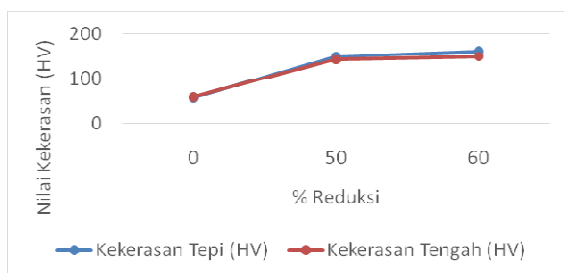
Pengujian kekerasan dilakukan secara mikro menggunakan metode Vicker's sesuai standar ASTM E92^[10] pada bagian tepi maupun di bagian tengah paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm rolling* yang memiliki ketebalan $\leq 3,1$ mm.

3. HASIL DAN DISKUSI

Gambar 6 menunjukkan hubungan antara % reduksi *warm rolling* dengan nilai kekerasan pada paduan Cu-Zn 70/30. Kekerasan paduan meningkat seiring dengan meningkatnya % reduksi karena adanya *deformation strengthening*. Nilai kekerasan maksimum yang dapat dicapai adalah 161,5 HV pada % reduksi 60%.

Peningkatan nilai kekerasan secara signifikan dari kondisi paduan awal tanpa perlakuan dan setelah *warm rolling* dengan 60% reduksi berhubungan dengan adanya fenomena *anneal hardening* yang ditunjukkan dengan adanya pita-pita deformasi (*deformation band*) dalam struktur paduan Cu-

Zn 70/30. Kekerasan awal paduan Cu-Zn 70/30 sekitar 60 HV. Sedangkan setelah *warm rolling* kekerasan mencapai 161,15 HV di bagian tepi dan 150,38 HV di bagian tengah. Hasil penelitian S.Nestorovic, dkk.^[4] yang melakukan *cold rolling* pada ingot tembaga murni dan ingot tembaga (dengan kandungan aluminium 8%) dan % reduksi sebesar 30%, 50%, dan 70% lalu dilanjutkan proses anil sampai suhu rekristalisasinya. Ketika suhu mencapai 180-300 °C menunjukkan adanya *anneal hardening* dari kedua ingot tembaga yang berdampak pada meningkatnya kekuatan dan kekerasan.

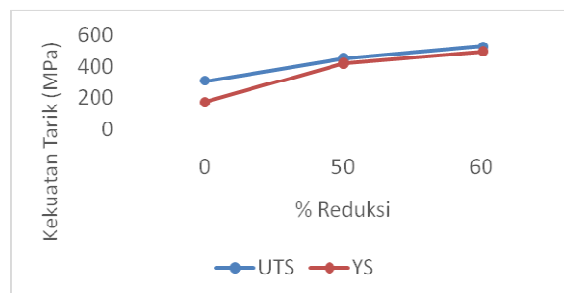


Gambar 6. Hubungan antara % reduksi dengan kekerasan (HV) pada bagian tepi dan tengah dari paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan *warm rolling* pada suhu 300 °C

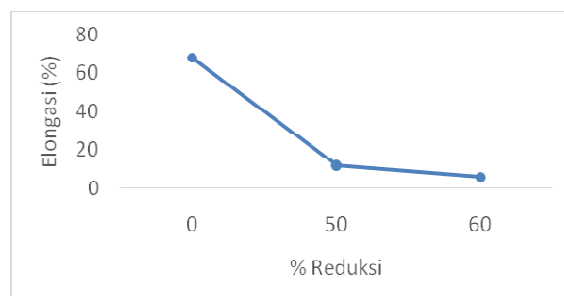
Pada penelitian lainnya S.Nestorovic^[3] melakukan pembuatan produk dengan proses metalurgi serbuk dari paduan tembaga Cu-4%Zn, Cu-8%Zn, Cu-5%Ni-2%Sn, dan tembaga murni lalu dilanjutkan dengan *cold rolling* pada 30%, 50%, dan 70% reduksi menghasilkan peningkatan kekerasan dengan bertambahnya % reduksi. Setelah dianil pada rentang suhu 50 sampai dengan 500 °C, ternyata didapatkan kekerasan optimal pada suhu 180-400 °C. Pada suhu di bawah 180 °C terjadi *anneal hardening* yang ditandai dengan meningkatnya kekerasan, kemudian menurun setelah mencapai suhu 400 °C yang disebabkan adanya pertumbuhan butir.

Menurut S.Nestorovic^[4] pada penelitian terhadap tembaga murni dan paduan Cu-8%Zn menunjukkan bahwa paduan Zn dapat meningkatkan suhu rekristalisasi di atas 350 °C dibandingkan tembaga murni untuk % reduksi 30%, 50%, dan 70%. Sedangkan pada % reduksi mencapai 70% nilai kekerasan pada paduan Cu-Zn 92/8 sangat tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa efek *anneal hardening* akan semakin meningkat dengan peningkatan % reduksi *cold rolling*. Fenomena *anneal hardening* yang diikuti dengan peningkatan kekerasan pada paduan Cu-Zn 92/8 terjadi di bawah suhu rekristalisasi pada rentang suhu 180-300 °C dan rentang waktu anil 120-240

menit. Fenomena *anneal hardening* terjadi karena tersegregasinya unsur paduan yang terlarut dalam Cu ke arah dislokasi yang dianalogikan dengan pembentukan atmosfer Cottrell pada larutan padat interstisi. Hal ini menyebabkan tegangan alir meningkat karena pengikatan atom paduan terlarut dalam dislokasi. Efek *anneal hardening* terjadi di bawah suhu rekristalisasi pada rentang suhu 177-377 °C yang diikuti dengan peningkatan kekerasan. Selanjutnya proses peningkatan kekerasan semakin bertambah dengan peningkatan % reduksi *cold rolling*^[11]. Atau dengan kata lain efek *anneal hardening* tercapai ketika paduan Cu dalam kondisi *cold rolling* dilanjutkan dengan perlakuan panas^[1,4]. Efek *anneal hardening* biasanya terjadi pada material Cu-Zn dalam rentang suhu 152-300 °C selama 120 sampai dengan 240 menit pemanasan^[3].



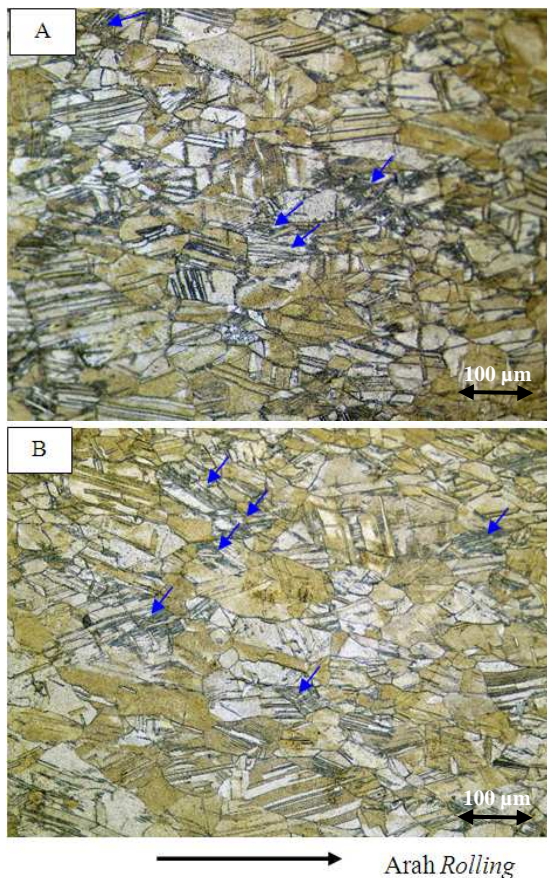
Gambar 7. Hubungan antara % reduksi dengan UTS maupun YS (MPa) pada paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan *warm rolling* pada suhu 300 °C



Gambar 8. Hubungan antara % reduksi dengan elongasi (%) pada paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan *warm rolling* pada suhu 300 °C

Gambar 7 menunjukkan hubungan nilai kekuatan tarik maksimum (UTS) dan kekuatan luluh (YS) terhadap % reduksi *warm rolling*. Hal ini dapat dilihat bahwa UTS dan YS^[12] meningkat dengan bertambahnya % reduksi. Sedangkan, dari hubungan antara persentase elongasi dan % reduksi menunjukkan bahwa semakin meningkatnya % reduksi *warm rolling* maka persentase elongasi material paduan Cu-Zn 70/30 semakin menurun seperti yang terlihat pada Gambar 8.

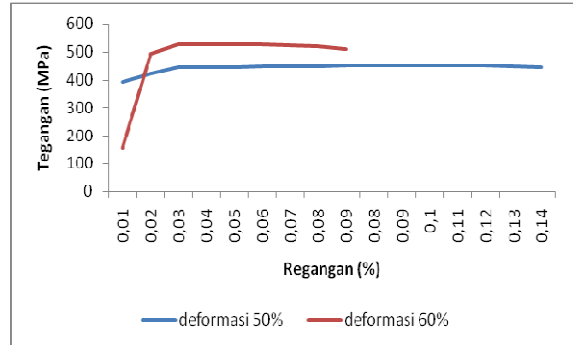
Dalam penelitian ini pengaruh dari *anneal hardening* masih sangat tinggi dalam paduan ketika deformasi *warm rolling* pada suhu 300 °C dengan persentase reduksi 60%. Hal ini ditandai dengan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik, dimana dengan semakin meningkatnya persentase reduksi maka kekuatan tarik semakin meningkat. Kekuatan tarik maksimum (UTS) meningkat dari 308 MPa menjadi 525 MPa dan kekuatan luluh (YS) meningkat dari 174,54 MPa menjadi 494,05 MPa seperti yang terlihat pada Gambar 7. Sedangkan nilai elongasinya menurun secara drastis dari 68% ke 12% pada persentase reduksi 50% seperti yang terlihat pada Gambar 8.



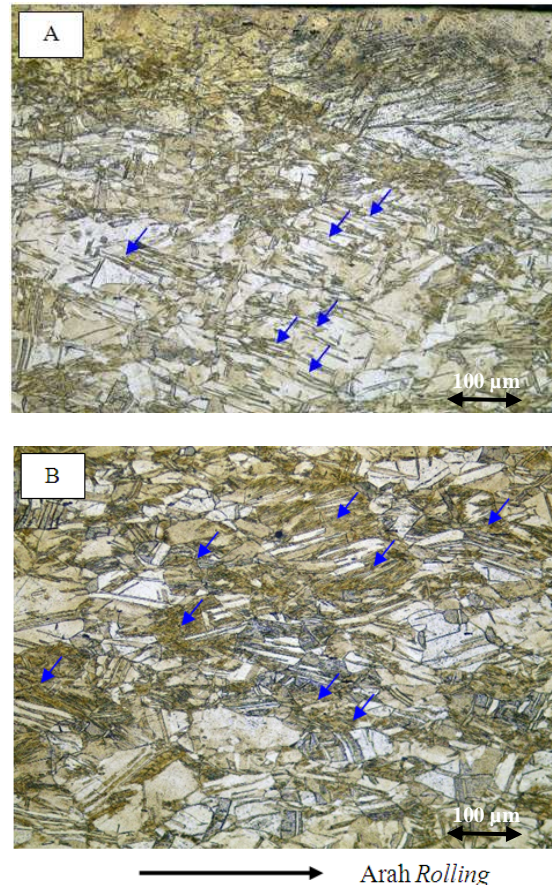
Gambar 9. Struktur mikro paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm rolling* pada suhu 300 °C dengan 50 % reduksi dengan mikroskop optik; (a) Bagian tepi, (b) Bagian tengah. Garis-garis berwarna hitam menggambarkan pita deformasi yang semakin banyak (ditunjukkan dengan panah). Etsa $FeCl_3$ 10%

Gambar 9 menunjukkan mikro struktur dari paduan Cu-Zn 70/30 hasil proses *warm rolling* dengan 50 % reduksi. Pada gambar tersebut terlihat adanya garis-garis berwarna hitam di dalam butir. Garis-garis berwarna hitam tersebut adalah pita-pita deformasi (*deformation band*) yang dihasilkan dalam paduan setelah proses *anneal* dan dilanjutkan

dengan *warm rolling* pada suhu 300°C. *Deformation band* merupakan bukti bahwa paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan *warm rolling* telah mengalami *anneal hardening*^[13,14,15]. Mekanisme *anneal hardening* diakibatkan oleh tersegregasinya unsur paduan Zn dalam dislokasi^[4].



Gambar 10. Grafik uji tarik pada paduan Cu-Zn 70/30 yang dilakukan *warm rolling* pada suhu 300 °C dengan % reduksi 50 dan 60



Gambar 11. Pengamatan struktur mikro untuk paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm rolling* pada suhu 300 °C, 60% reduksi (A) Bagian tepi, (B) Bagian tengah Etsa : $FeCl_3$ 10%. Garis-garis sejajar dan berwarna hitam menggambarkan *deformation band* yang semakin banyak

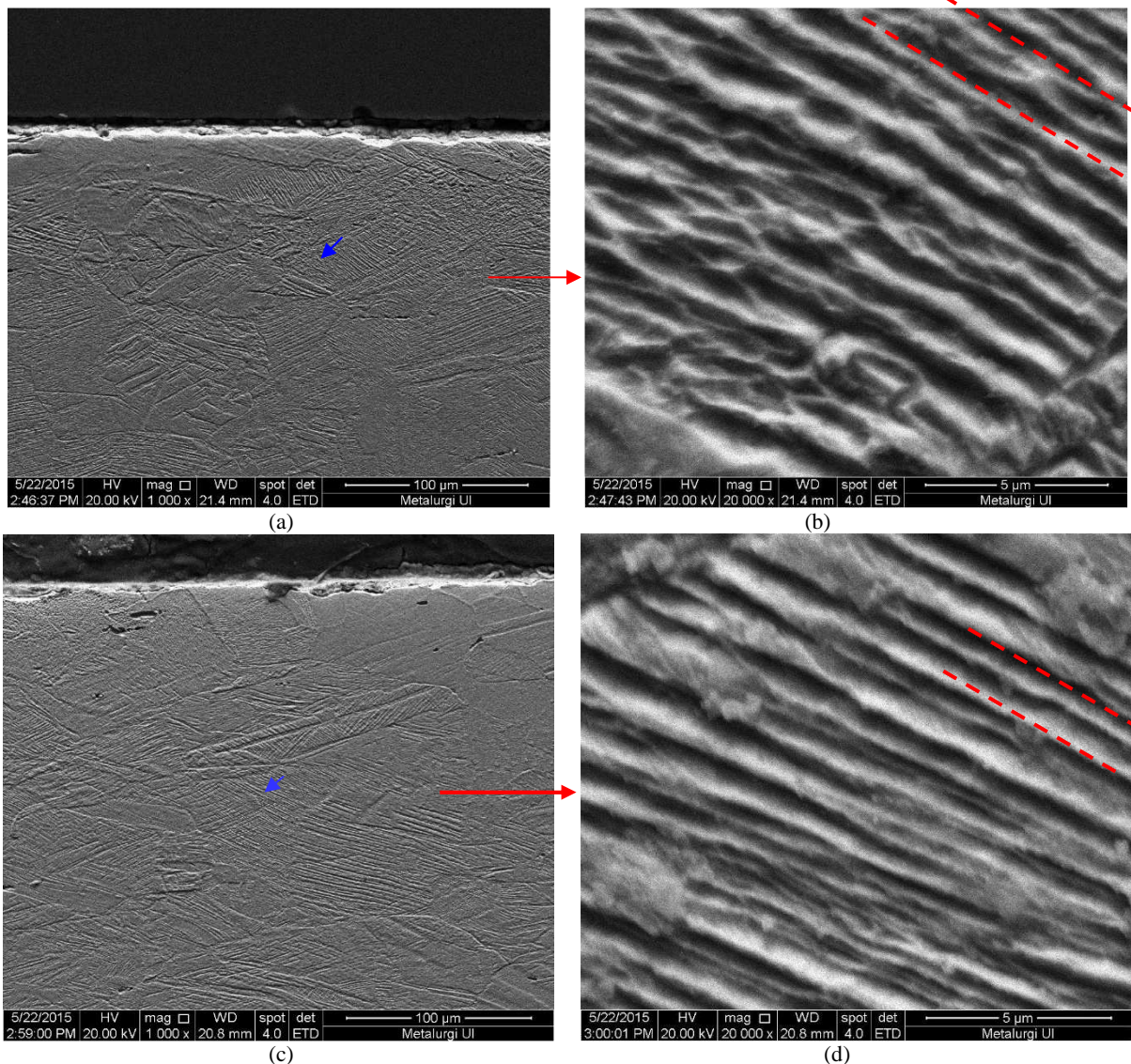
Gambar 11 menunjukkan mikro struktur dari paduan Cu-Zn 70/30 hasil proses *warm rolling* dengan 60% reduksi. Garis-garis sejajar yang menunjukkan *deformation band* semakin

jelas terlihat pada 60 % reduksi baik pada bagian tepi maupun tengah.

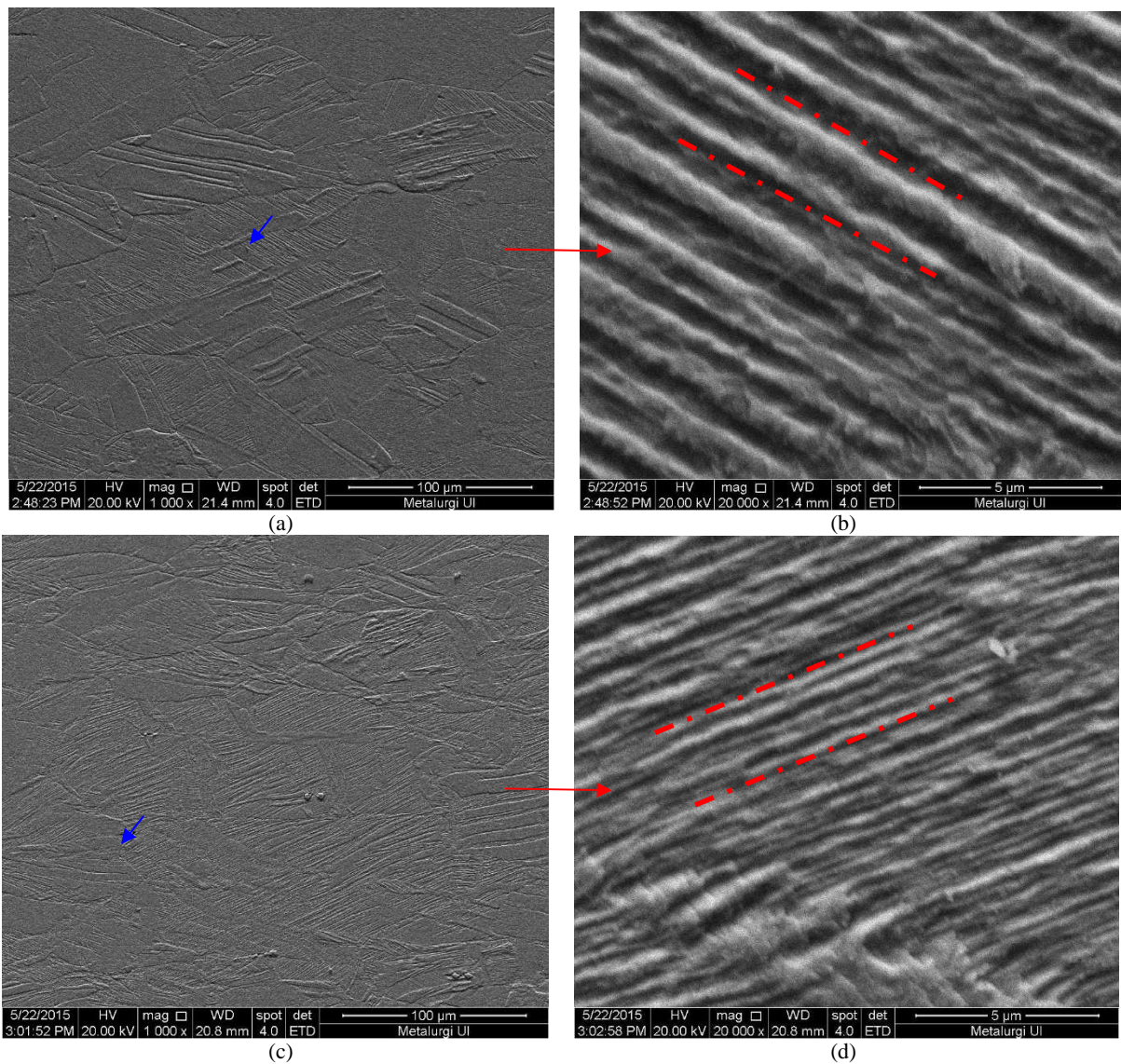
Deformation band dalam Gambar 9(a) - 9(b) dan Gambar 11(a)- 11(b) merupakan struktur yang terbentuk karena regangan yang besar¹⁵⁻²⁰. Garis-garis yang muncul tersebut nantinya akan berkembang menjadi *shear band* apabila deformasi *warm rolling* dilakukan pada % reduksi yang lebih tinggi lagi. Selain itu, garis-garis sejajar tersebut juga akan memotong butir nantinya yang disebut dengan *microband*. Dislokasi bergerak akibat beban yang diberikan terhadap paduan Cu-Zn 70/30 menghasilkan garis-garis mikro. Daerah tersebut merupakan kumpulan dari dislokasi-dislokasi dari tiap-tiap butir yang menuju ke batas butir. Dislokasi berhenti di batas butir karena dislokasi tidak dapat bergerak lagi. Fenomena tersebut akan meningkatkan nilai kekerasan, kekuatan tarik,

dan penurunan elongasi^{2,13,16,17}. Menurut Humphreys¹⁷ paduan Cu-Zn 70/30 termasuk logam dengan energi salah susun rendah dan akan memperlihatkan *deformation band* pada deformasi dengan regangan kurang dari 0,8. Untuk proses *rolling*, *deformation band* akan membentuk sudut 30° terhadap arah dan bidang *rolling*.

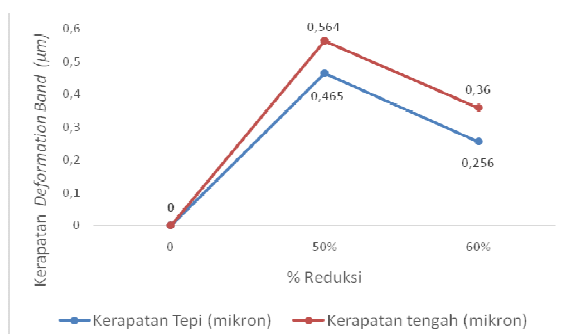
Gambar 12(a) - 12(b) dan Gambar 13(a) - 13(b) menunjukkan hasil pengamatan FE-SEM. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan semakin besarnya % reduksi maka garis-garis sejajar yang menggambarkan *deformation band* akan semakin rapat dan teramati lebih jelas bahkan menyerupai struktur berbentuk lapisan. Selain itu, ukuran ketebalan garis sejajar juga terlihat semakin lebar.



Gambar 12. Pengamatan *deformation band* dalam paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm rolling* pada suhu 300 °C, pada bagian tepi dengan % reduksi dan perbesaran; (a)50%-1000X; (b)50%-20000X, perbesaran dari area (a) yang ditandai panah biru; (c) 60%-1000X; (d) 60%-20000X, perbesaran dari area (c) yang ditandai panah biru. Etsa : FeCl₃ 10%



Gambar 13. Pengamatan *deformation band* dalam paduan Cu-Zn 70/30 hasil *warm rolling* pada suhu 300 °C, pada bagian tengah dengan % reduksi dan perbesaran; (a)50%-1000X; (b)50%-20000X, perbesaran dari area (a) yang ditandai panah biru; (c) 60%-1000X; (d) 60%-20000X, perbesaran dari area (c) yang ditandai panah biru. Etsa : FeCl₃



Gambar 14. Hubungan antara % reduksi *warm rolling* dengan kerapatan *deformation band* yang terbentuk dalam paduan Cu-Zn 70/30

Dengan semakin meningkatnya % reduksi *warm rolling* maka *deformation band* yang terbentuk semakin banyak, yang artinya densitas dislokasi yang terdapat dalam *deformation band* semakin meningkat. Peningkatan densitas dislokasi secara

mikroskopik dibuktikan dengan penurunan jarak antar *deformation band* atau dapat disebut jarak antar *deformation band* yang satu dengan lainnya semakin rapat atau jarak antar *deformation band* semakin rendah yang terjadi pada deformasi yang lebih tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 14^[17, 21-24].

4. KESIMPULAN

Proses *warm rolling* pada $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan % reduksi sebesar 50% dan 60% dalam paduan Cu-Zn 70/30 menghasilkan efek *anneal hardening* ditandai dengan adanya peningkatan kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum dan adanya penurunan elongasi dari paduan. Mekanisme peningkatan sifat mekanik ini akibat tersegregasinya unsur Zn dalam dislokasi yang ditandai dengan pembentukan pita-pita deformasi (*deformation band*).

Semakin meningkat % reduksi dalam paduan Cu-Zn 70/30 maka pita-pita deformasi yang dihasilkan memiliki jarak yang semakin rapat antara satu dengan lainnya.

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. 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] Nestrovic, S., "Influence of deformation degree at cold rolling on the anneal hardening effect in sintered copper based alloys," *Journal of Mining and Metallurgy 40B.*, vol.1, hal.101-109, 2004.
- [2] William D. Callister Jr., "An introduction : material science and engineering," *John Wiley & Son, Inc.*, pp. 373, 2007.
- [3] Nestrovic, S., dkk, "Anneal hardening effect in sintered copper based alloy," *Journal Science of Sintering.*, vol.34, pp.169-174, 2002.
- [4] Nestrovic, S., "Influence of time annealing on anneal hardening effect of a cast Cu-Zn alloy," *Journal of Mining and Metallurgy 39.*, vol.3-4B, pp. 489-497, 2003.
- [5] Zhao, J.Z, dkk., "Formation of the Cottrell atmosphere during strain aging of bake hardenable steels," *Metal. And Mater. Trans. A.*, vol. 32A, pp. 417-423, 2001.
- [6] 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.
- [7] Febriyanti, Eka, Dedi Priadi, Rini Riastuti, "Pengaruh thermo mechanical controlled process (TMCP) terhadap penghalusan butir dan sifat mekanik paduan Cu-Zn 70/30," *Majalah Metalurgi.*, vol.30, No.3, pp.141-148, 2015.
- [8] ASTM E8, "Standard test methods for tension testing of metallic materials," 2003.
- [9] ASTM E3, "Standard guide for preparation for metallographic specimens," 2003.
- [10] ASTM E92, "Standard test methods for vickers hardness of metallic materials," 2003.
- [11] Nestorovic, S., D. Markovic, L. 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, Oktober 2003.
- [12] Krishna Chenna, S., dkk, "On the prediction of strength from hardness for copper alloys," *Journal of Materials*, article ID 352578, Hindawi Publishing Corporation, pp.1-6, 2013.
- [13] Somayeh, Pasebani, T.M.Reza, "Nano-grained 70/30 brass strip produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Materials Science and Engineering A.*, vol.527, No.3, pp.491-497, 2010.
- [14] Wang, Y.B., X.Z.Liao, Y.H.Zhao, E.J Lavernia, dkk, "The role of stacking faults and twin boundaries in grain refinement of a Cu-Zn alloy processed by high-pressure torsion," *Materials Science and Engineering A.*, vol.527, pp.4959-4966, 2010.
- [15] Balogh, Levente, Tama's Unga'r, Y.Zhao, Y.T. Zhu, dkk, "Influence of stacking-fault energy on microstructural characteristics of ultrafine-grain copper and copper-Zinc alloys," *Acta Materialia.*, vol.56, pp.809-820, 2008.
- [16] Valiev, R.Z., R.K. Islagaliev, I.V.Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation," *Progress in Materials Science*, vol.45, pp.103-189, 2000.
- [17] Humphreys, F.J., M.Hatherly, "Recrystallization and related annealing phenomena", *Elsevier*, vol. 2nd edition, 2004.
- [18] Sakai, T., A.Belyakov, R.Kaibyshev, H.Miura, John J.Jonas, "Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold, and severe plastic deformation conditions," *Progress in Materials Science*, vol.60, pp.130-207, 2014.
- [19] Balloková, B., T.Kvackaj, P.Hvizdos, M.Besterčí, "Fracture analysis and local mechanical properties of copper processed by ECAR," *Acta Metallurgica-Slovaca Convergence*, vol.3, pp. 259-263, 2013.

- [20] Higuera-Cobos, O.F.,J.M.Cabrera, “Mechanical, microstructural, and electrical evolution of commercially pure copper processed by ECAP,” *Materials Science and Engineering A*, vol.571, pp.103-114, 2013.
- [21] Svetlana Nestorovic, Desimir Markovic, Ljubica Ivanic, “Influence of degree of deformation in rolling on anneal hardening effect of a cast copper alloy,” *Bulletin Material Science © Indian Academy of Sciences*, vol. 26, No. 6, pp. 601–604, 2003.
- [22] 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.
- [23] Verlinden, Berth, Julian Driver, Indradev Samadjar & Roger D.Doherty, “Thermo-mechanical processed of metallic materials,” *Elsevier, Ltd*, 2006.
- [24] Charlie R.Brooks, “Heat Treatment, structure and properties of non-ferrous alloys,” *ASM International*, 2006.

