

## STUDI KARAKTERISTIK PELAT TEMBAGA TERHADAP Pengerolan DINGIN

Yoddy A. Nuhgraha  
Jurusan Teknik Mesin Politeknik TEDC Bandung  
E-mail: [yan\\_nuhgraha@yahoo.com](mailto:yan_nuhgraha@yahoo.com)

### Abstrak

Proses pengerolan dingin pada pelat tembaga (Cu) dilakukan untuk mengetahui perubahan-perubahan yang terjadi baik dari segi sifat mekaniknya maupun struktur mikro tembaga. Uji keras menggunakan metoda mikro Vickers dilakukan untuk melihat hubungan kekerasan sampel tembaga terhadap deformasi plastis yang diterimanya. Kekerasan sampel meningkat dari 96.7 VHN menjadi 116.7 VHN setelah diberikan total deformasi sebesar 0.69. Nilai kekerasan menurun drastis setelah dilakukan proses *annealing* pada berbagai temperatur di bawah dan di atas fasa rekristalisasinya yaitu 39.6 VHN ~ 57.6 VHN. Melalui metoda metalografi, struktur mikro sampel memperlihatkan butir yang memanjang dan pipih (elongasi) yang menandakan telah terjadi deformasi plastis pada logam tersebut. Arah elongasi butirannya akan mengikuti arah deformasi yang dilakukan. Pada struktur mikro sampel yang telah dianil bentuk butirannya relatif bulat (*equiaxial grain*) yang menandakan telah terjadi proses rekristalisasi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan kekerasan dengan perubahan struktur butir karena deformasi plastis yang menyebabkan terjadinya dislokasi butir, dengan kata lain mekanisme ini dinamakan dengan *strain hardening*. Uji tarik untuk melihat kekuatan luluhnya tidak dilakukan.

Kata kunci: tembaga, roll dingin, uji keras, struktur mikro, metalografi, rekristalisasi, dislokasi, *annealing*.

### Abstract

*Cold rolling process on copper (Cu) plate been done to know changes that happen on mechanical properties and microstructure of the copper plate. Hardness test is using microvickers to know correlation of the sample with plastic deformation. Hardness sampel increased from 96.7 VHN into 116.7 VHN after being given total deformation of 0.69. The hardness drastically decrease after annealed in various temperature below dan above recrystalization phase are 39.6 VHN ~ 57.6 VHN. Through metallography method, microstructure sampel shows elongated grains which mean that plastic deformation has occur at the copper. The elongation direction of the grains follow the direction of the deformation. Annealed microstructure of the samples shows equiaxial grains which mean recrystalization process has occur. From the above result can be concluded that there are influence from the change of grain structure caused by plastic deformation which cause dislocation of the grains, in other words this mechanism is called strain hardening. The strain test to determine yield strength was not done.*

*Key words: copper, cold rolling, hardnes test, microstructure, metallography, recrystallization, dislocation, annealing.*

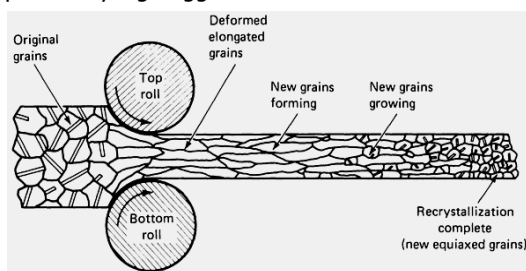
## 1. Pendahuluan

### 1.1 Pengerolan

*Rolling* biasanya merupakan proses pertama yang digunakan untuk mengubah material menjadi produk kasar. Material yang tebal di *roll* menjadi *blooms*, *billets*, atau *slab* atau bentuk-bentuk ini

bisa dibuat langsung dari *continuous casting*. Definisi *rolling* secara sederhana yaitu melewati logam diantara dua roda atau lebih dan dikenai gaya tekan yang tinggi sehingga terjadi deformasi plastis pada

logam. Proses ini merupakan proses pembentukan logam yang umum digunakan karena kemudahannya dalam mengontrol dan menghasilkan bentuk yang presisi serta produktifitas yang tinggi. Dalam prosesnya jumlah deformasi yang dapat dikenakan tergantung dari koefisien friksi dari permukaan logam dengan permukaan roda *roll*. Terlalu banyak deformasi akan menyebabkan bidang kontak menjadi selip, dan jika terlalu sedikit akan menyebabkan biaya produksi yang tinggi.



Gambar 1 Skema proses *rolling*

Jumlah reduksi atau deformasi yang dicapai dalam pengerolan pelat biasanya dihitung dari pengurangan tebal dan dapat dihitung menggunakan rumus:

$$R = (t_0 - t_1)/t_0 \times 100\%$$

dimana:

R = reduksi dalam persen

$t_0$  = tebal awal

$t_1$  = tebal akhir

Mesin yang digunakan dalam pengerolan disebut *rolling mill*, terdiri dari satu pasang atau lebih *roll* yang digerakkan oleh motor melalui mekanisme *screw-down* yang dapat mentransmisikan gaya torsi ke *roll*. Berdasarkan temperatur pengoperasiannya proses *rolling* dapat dibedakan menjadi dua yaitu *roll* panas (*hot rolling*) dan *roll* dingin (*cold rolling*).

**a. Roll panas** dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi daripada temperatur rekristalisasi logam *roll*. Pada proses ini deformasi tidak akan menyebabkan perubahan tingkat kekerasannya. Semakin tinggi temperatur operasi akan semakin kecil pula tegangan alir dari bahan. Sehingga energi deformasi akan semakin kecil pada temperatur tinggi. Oleh karena itu pengerolan dengan benda kerja yang berukuran besar dapat dimungkinkan dengan total deformasi yang besar pula. Bentuk produk hasil pengerolan panas antara lain *plate, rod, bar, profil* dan *rail*.

**b. Roll dingin** dilakukan pada temperatur kamar (*room temperature*) atau di bawah temperatur rekristalisasi. *Rolling* dingin menyebabkan adanya mekanisme penguatan seiring dengan menurunnya keuletan. Benda kerja akan menjadi lebih kuat, lebih keras tetapi rapuh (*brittle*). Hal ini disebabkan oleh tegangan alir benda kerja semakin tinggi dengan adanya penumpukan dislokasi yang mempunyai energi dalam yang besar. Bentuk produk dari proses pengerolan dingin antara lain *sheet, strip, dan foil*. Sebagian besar produk hasil pengerolan dingin dilakukan proses lanjutan yaitu pemanasan untuk mendapatkan sifat-sifat yang sesuai aplikasi dan spesifikasinya. Biasanya dengan dianil agar sesuai dengan aplikasi dan spesifikasinya.

### 1.2. Annealing

Hasil pengerjaan dingin akan menghasilkan beberapa akibat. Perubahan bentuk butir, fenomena *strain hardening* dan perubahan kepadatan dislokasi adalah beberapa contoh akibat yang dihasilkan. Hal yang disebutkan di atas dapat dikembalikan ke keadaan awal sebelum dilakukan proses pengerjaan dingin dengan proses pemanasan yang disebut *Annealing*. Pada proses *Annealing*, terjadi 3 tahapan proses yang terjadi,

- *Recovery*, proses pengurangan *internal strain* akibat berkurangnya densitas dislokasi.
- Rekristalisasi, proses terbentuknya formasi baru yang bersifat bebas regangan dan berbentuk ekuiaxial serta memiliki densitas dislokasi yang rendah.
- Pertumbuhan butir, proses membesarnya butir baru yang terbentuk pada proses rekristalisasi.

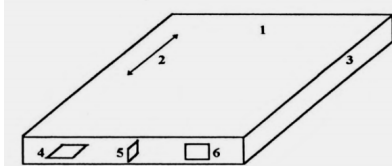
### 1.3 Metalografi

Proses yang diberikan pada bahan seperti *coldrolling* dan anil melibatkan bahan pada pemberian panas dan gaya mekanik. Pemberian panas dan gaya mekanik akan menyebabkan perubahan struktur mikro bahan. Perubahan struktur mikro akan berpengaruh terhadap sifat bahan.

a. Manfaat utama metalografi:

- Mengamati perubahan struktur mikro akibat proses yang dilakukan ditujukan terutama untuk pengontrolan kualitas komponen.
  - Menganalisis perubahan struktur mikro, dimensi cacat, penjalaran retak dan menghubungkannya dengan prediksi kerusakan komponen.
- b. Informasi yang didapat dengan pengamatan metalografi:
- Butiran kristal: ukuran, bentuk butiran
  - Homogenitas: Segregasi dan ketidak seimbangan fasa

- Senyawa mikro: Identifikasi, mengenali bentuk dan penyebaran (endapan, lapisan, globul)
  - Inklusi: Jenis, ukuran dan distribusinya
  - Cacat: Porositas, penyusutan, retakan
  - Regangan: Deformasi setempat, distorsi
- Pengamatan dilakukan pada mikroskop optik dan hasilnya dilakukan pengambilan gambar untuk dianalisa lebih lanjut.
- c. Sampling  
 Dilakukan pada benda kerja yang akan dianalisa berdasarkan daerah kritis atau menarik untuk diteliti serta mewakili sifat bahan secara keseluruhan; misal ada cacat/retak akibat tegangan, cuplikan dipilih pada daerah cacat tersebut dan daerah sekitarnya setiap jarak tertentu.
- d. Pemotongan:
- Sampling metalografi umumnya berukuran kecil
  - Diperhatikan pengaruh panas dan deformasi pada permukaan sampel dan harus dapat dihilangkan pada proses selanjutnya
  - Metode; patahkan (bahan *brittle*), gunting (bahan tipis dan lunak), gergaji (untuk bahan kekerasan sedang <350 Brinell), abrasi (lunak dan keras, tergantung jenis bahan pengabrasi)



Gambar 2 Ilustrasi arah pemotongan sampel

1. Permukaan benda kerja hasil rol
2. Arah pengerolan
3. Tebal benda kerja
4. Pemotongan memanjang searah pengerolan
5. Pemotongan tegak lurus permukaan rol
6. Potongan transversal

e. *Mounting*

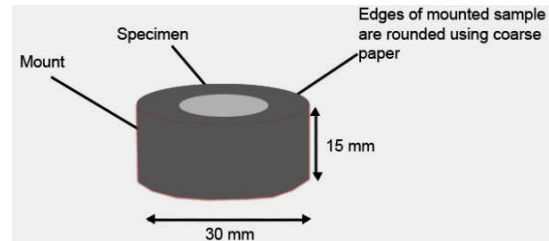
Cetakan *mounting* umumnya memiliki diameter sekitar 25 mm (1 inch), 32 mm (1,25 inch), atau 38 mm (1,5 inch), atau disesuaikan dengan *stage* dari mikroskop

Persyaratan bahan *mounting*:

1. Tidak mudah pecah
2. Pengkerutan tidak besar
3. Kekerasan tinggi
4. Tahan terhadap panas selama gerinda dan poles
5. Tahan kimiawi pelumas, pelarut, etsa.

Teknik *mounting* bisa dilakukan menggunakan teknik pemanasan atau suasana temperatur kamar. Spesimen yang tidak tahan panas tidak

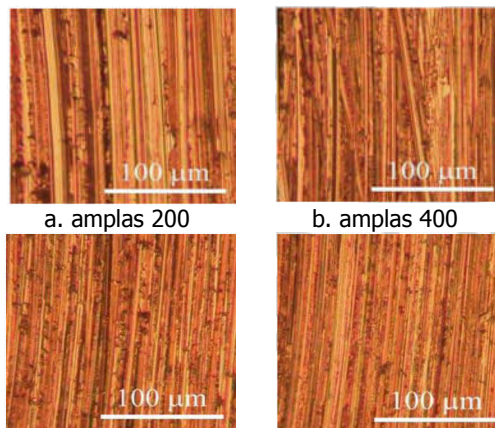
boleh dimounting panas, harus menggunakan *mounting* dingin. *Mounting* dingin biasanya dilakukan menggunakan polimer tertentu.



Gambar 3 Ilustrasi mounting

f. Pengampelasan

- Penghalusan permukaan dengan ampelas nomor 200, 400, 600, 800, 1000, 1500, dan 2000.
- Pengampelasan awal tergantung kekasaran sampel awal
- Selama pengampelasan selalu didinginkan dengan air yang mengalir.
- Arah ampelas selalu membentuk sudut antara 45-90°, terhadap arah ampelas sebelumnya.
- Bahan ampelas yang umum adalah SiC atau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- Emery adalah campuran Al oksida dan Fe oksida dengan kekerasan kurang dari SiC.

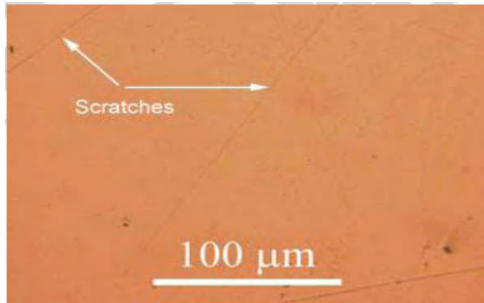


Gambar 4 Penampang pengampelasan permukaan tembaga

g. Pemolesan

Jenis poles;

1. Poles Mekanik; Menggunakan kain dengan suspensi seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> atau intan.
- Hal yang harus diperhatikan;
- Gerakan sampel
  - Tekanan poles
  - Pencucian dan pengeringan
  - Penyimpanan



Gambar 5 Permukaan sampel tembaga yang dipoles

## 2. Poles Elektrolitik

Untuk bahan yang konduktif dan sulit dipoles secara mekanik. Variabelnya adalah arus, tegangan, elektrolit dan jenis logam. Caranya dengan memberikan sebuah logam lain yang lebih katodik, dipasang pada jarak tertentu dari sampel yang diamati sebagai anoda dan akan terkikis.

Keuntungan:

1. Kehalusan permukaan bebas goresan yang sulit dicapai secara mekanik.
2. Untuk logam yang sulit dipoles secara mekanik; amat lunak atau amat keras.
3. Waktu yang dibutuhkan jauh lebih efisien dari poles mekanik.

Kelemahan:

1. Larutan elektrolit bersifat korosif dan bersifat eksplosif.
2. Untuk logam 2 fase, sulit karena ada 2 macam fase dengan potensial yang bisa berbeda.
3. Bagian pinggir sampel mounting lebih cepat terserang daripada bagian tengah.
4. Sampel yang dimounting harus dilubangi agar konduktif.

## h. Pengetsaan

Prinsipnya adalah proses korosi terkontrol oleh elektrolit antara daerah permukaan dengan potensial yang berbeda. Jenis etsanya adalah sebagai berikut:

### 1. Etsa Kimia

- a) Memunculkan mikrostruktur bahan kristalin berdasarkan reaksi kimia secara diferensial.
- b) Laju reaksi kimia bagian butir berbeda dengan bagian batas butir. Batas butir di bawah mikroskop optik tampak sebagai garis gelap.
- c) Dan pertimbangan pemilihan zat kimia, dipertimbangkan faktor untuk tidak memperbesar rongga, menimbulkan pit, menghasilkan segregasi dan lain-lain.
- d) Penentuan hal tersebut tak hanya dari teori, melainkan juga berdasarkan trial yang dilakukan.

## 2. Etsa Elektrolitik

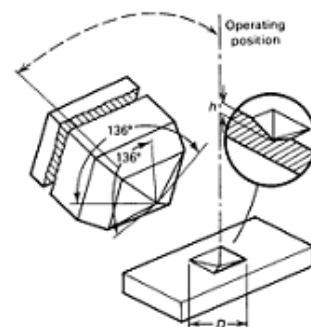
- a) Dilakukan untuk mengetsa logam yang sulit dietsa dengan metode kimia
- b) Untuk memunculkan fasa-fasa tertentu
- c) Menggunakan prinsip reaksi reduksi dan oksidasi. Reduksi pada katoda dan oksidasi pada anoda. Diberikan tegangan dari luar, sampel sebagai anoda dan katoda dari logam lain yang lebih inert, misal platina atau logam lain yang lebih elektronegatif dibanding sampel.
- d) Diperlukan potensial kimia yang lebih rendah daripada poles elektrolitik
- e) Kecenderungan tergantung afinitas deret volta, dengan Hidrogen voltage dianggap nol.
- f) Korosi dengan masing-masing elemen struktur mikro mempunyai laju korosi yang berbeda.

### i. Pengamatan Mikroskop

Mikroskop adalah alat bantu untuk mengamati obyek yang tak dapat diamati dengan mata biasa. Daya pisah atau resolusi adalah kemampuan mikroskop mengamati secara terpisah jarak yang terkecil di antara 2 titik dari suatu obyek. Resolusi makin besar, maka makin besar perbesaran yang dimiliki alat tersebut. Mata manusia mempunyai jarak resolusi 700.000 A sedangkan mikroskop optik mempunyai jarak resolusi 1900 A.

## 1.4 Kekerasan

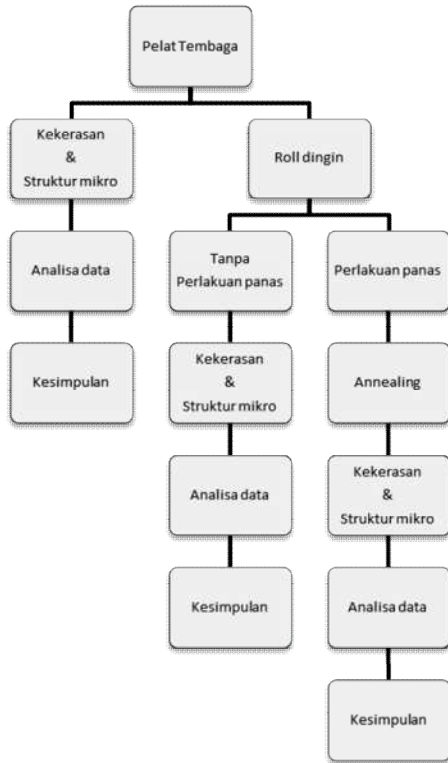
Kekerasan Micro Vickers menggunakan indenter berukuran mikro (lihat Gambar 6), yang memungkinkan pengukuran kekerasan di daerah-daerah yang sangat terbatas seperti permukaan kawat halus, lembaran tipis dan foil. Manfaatnya untuk mengidentifikasi setiap variasi kekerasan yang disebabkan oleh perubahan metalurgi seperti pengerasan, pendinginan, plating, pengelasan, prosesikatan. Permukaan yang akan di uji harus dipoles dengan baik tanpa ada goresan halus untuk meminimalkan kesalahan yang mungkin terjadi saat indentasi.



Gambar 6 Indentor Micro Vickers

## 2. Metoda penelitian

### 2.1. Diagram Alir



Gambar 7 Diagram alir pengerjaan tembaga

**2.2. Roll Dingin**

Hal-hal yang harus dicapai dalam pengerolan dingin pelat tembaga adalah antara lain seperti yang tersebut di bawah ini:

1. Kekerasan tembaga sebelum dan sesudah dilakukan roll dingin; Kekerasannya diuji menggunakan mikro Vicker dan dianalisa hasilnya.
2. Kekerasan tembaga setelah dianil; dalam proses anil menggunakan parameter suhu dan waktu pemanasan, kemudian kekerasannya diuji dan dianalisa.
3. Struktur mikro tembaga sebelum dan sesudah dilakukan roll dingin; struktur mikro hasil roll/dingin difoto dan dianalisa.
4. Struktur mikro tembaga setelah dianil; struktur mikro hasil anil difoto dan dianalisa juga dan dibandingkan dengan hasil roll dingin.

Benda kerja yang digunakan adalah tembaga/copper (Cu), dengan struktur kristal FCC dengan

$T_{melting} = 1357.77 \text{ K}$ ,  $T_{rek} = 678.885 \text{ K} \approx 405.735 \text{ }^\circ\text{C}$   
 Dimensi P x L x T = 103.85 x 20 x 5 mm

Ketebalan benda kerja yang direduksi dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini.

Tabel 1 Ketebalan benda kerja, persen reduksi dan total deformasi

# Rolling	t <sub>0</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	% Reduksi	ΣDeformasi
1	5.00	4.5	10.00	0.11
2	4.5	3.7	17.78	0.30
3	3.7	3.3	10.81	0.42
4	3.3	2.9	12.12	0.54
5	2.9	2.5	13.79	0.69

**2.3 Annealing**

Sampel pada Tabel 1 dianil dengan beragam temperatur mulai dari 550 °C, 430 °C, and 300 °C selama 30 menit.

Tabel 2 Proses annealing

t (mm)	T (°C)		
	550	430	300
5.00	*		
4.50	*		
3.70	*		
3.30	*		
2.90	*		
2.50	*	*	*

**2.4. Kekerasan**

Hasil dari pengujian kekerasan menggunakan metoda Micro Vickers adalah sebagai berikut

Tabel 3 Data kekerasan VHN

No	Tebal (mm)	Roll Dingin	Temperatur Anil (°C)		
			550	430	300
1	5.00	96.7*	39.6	-	-
2	4.50	104.1	42.3	-	-
3	3.70	107.5	45.3	-	-
4	3.30	111.3	47.5	-	-
5	2.90	115.3	47.4	-	-
6	2.50	116.7	54.2	52.9	57.6

\* sampel awal

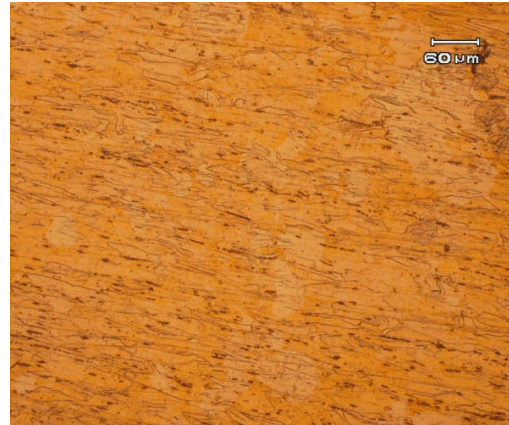
**2.5. Struktur Mikro**



Gambar 9 Struktur awal tembaga tanpa deformasi (sampel 1)



Gambar 10 *Roll* dingin dengan deformasi 0.11 (sampel 2)



Gambar 13 *Roll* dingin dengan deformasi 0.54 (sampel 5)



Gambar 11 *Roll* dingin dengan deformasi 0.30 (sampel 3)



Gambar 14 *Roll* dingin dengan deformasi 0.69 (sampel 6)



Gambar 12 *Roll* dingin dengan deformasi 0.42 (sampel 4)



Gambar 15 Struktur awal tembaga tanpa deformasi dianil pada 550°C (sampel 7)



Gambar 16 *Roll* dingin dengan deformasi 0.11 dianil pada 550°C (sampel 8)



Gambar 19 *Roll* dingin dengan deformasi 0.54 dianil pada 550°C (sampel 11)



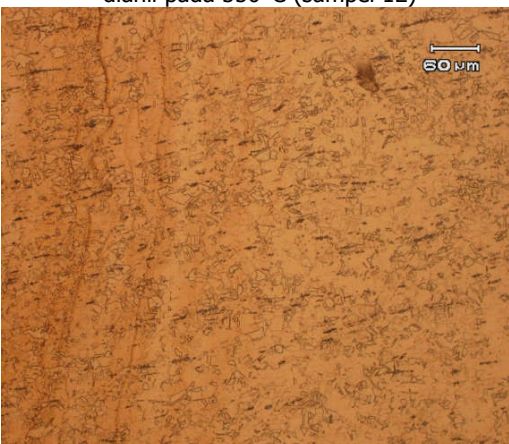
Gambar 17 *Roll* dingin dengan deformasi 0.30 dianil pada 550°C (sampel 9)



Gambar 20 *Roll* dingin dengan deformasi 0.69 dianil pada 550°C (sampel 12)



Gambar 18 *Roll* dingin dengan deformasi 0.42 dianil pada 550°C (sampel 10)



Gambar 21 *Roll* dingin dengan deformasi 0.69 dianil pada 430°C (sampel 13)



Gambar 22 Roll dingin dengan deformasi 0.69 dianil pada 300°C (sampel 14)

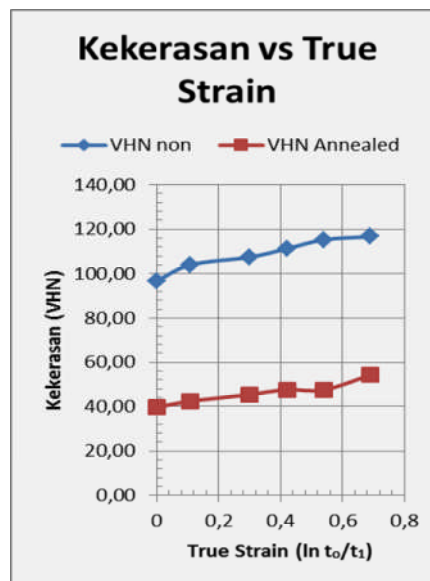
### 3. Analisa

Berdasarkan data yang tercantum dalam Tabel 4 dan gambar-gambar struktur mikro pelat tembaga yang dikenai pengerolan dingin dapat dianalisa bahwa sesuai dengan teorinya bahwa struktur mikro logam akan berbentuk pipih dan memanjang searah dengan arah deformasi plastis yang dilakukan (Gambar 10,11,12,13, dan 14). Semakin besar deformasi plastis yang diberikan maka struktur butirannya akan semakin memipih disertai dengan kenaikan kekerasan logam tersebut karena energi dalam yang ada pada butir sangat besar sehingga akan sulit untuk dilakukan deformasi plastis. Hal ini disebut sebagai *strain hardening*.

Nilai kekerasan dan energi dalam yang tinggi akan menurun setelah dilakukan proses perlakuan panas baik di bawah ataupun di atas temperatur rekristalisasinya. Gambar 16,17,18,19, dan 20 menunjukkan struktur butir yang cenderung bulat (*equiaxial*) yang dihasilkan oleh proses anil di atas temperatur rekristalisasi tembaga (550°C) selama 30 menit. Struktur ini tumbuh diantara butir lama karena adanya pengintian butir baru yang bebas tegangan dan semakin meluas sampai bertemu dengan batas butir yang berdekatan. Pertumbuhan butir baru ini akan menyebabkan penurunan kekerasannya karena adanya pelepasan energi dalam, meskipun ukuran butirnya relatif lebih kecil tetapi akan mempunyai sifat yang kurang lebih sama dengan sampel logam awal.

Temperatur rekristalisasi tembaga didapat dengan menggunakan rumus  $T_{rek} = 0.4 \sim 0.5 \times T_mCu$  dalam Kelvin atau sekitar 250 ~ 400 °C. Hal ini dapat menjawab mengapa pada Gambar 21 dan

gambar 22 sudah terlihat adanya pertumbuhan butir baru, ternyata temperatur anil (430°C and 300°C) masih dalam rentang temperatur rekristalisasinya. Jika di bawah temperatur rekristalisasi maka hanya akan menyebabkan pelepasan energi dalam yang dikandungnya dan dinamakan *stress relieving* yaitu proses pemanasan di bawah temperatur rekristalisasi untuk mengurangi distorsi atau perubahan bentuk yang terjadi setelah proses pembentukan logam.



Gambar 23. Peningkatan nilai kekerasan sesuai dengan kenaikan deformasi plastis

Nilai kekerasannya akan meningkat sesuai dengan kenaikan deformasi plastisnya dan kemudian akan turun drastis jika dikenai proses anil (Gambar 23)

### 4. Kesimpulan

Dari semua hasil serta analisa yang diuraikan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kekerasan logam akan meningkat jika dikenai *roll* dingin.
2. Proses anil akan menyebabkan penurunan kekerasannya atau terjadi pelunakan. Hal ini terjadi dengan cara pemanasan di atas temperatur rekristalisasi logam tersebut sehingga butir baru yang bebas regangan akan tumbuh.
3. Bentuk butir akan semakin pipih sebanding dengan peningkatan deformasi plastisnya.
4. Terlihat adanya struktur kembar anil (*annealing twin*), fenomena ini memainkan peranan yang penting dalam proses rekristalisasi dimana ketika pertumbuhan butir terhenti karena telah bertemu dengan batas butir yang lain kemudian akan memecah (kembar) dan pertumbuhan butir pun kembali berlangsung.

**Daftar Pustaka**

- [1] ASM Handbook Volume 4, "Heat Treating", ASM International, 1991.
- [2] ASM Handbook Volume 8, "Mechanical Testing and Evaluation", ASM International, 2000.
- [3] ASM Handbook Volume 9, "Metallography and Microstructures", ASM International, 2004.
- [4] Callister, William, "Material Science and Engineering", 7<sup>th</sup> Edition, John Wiley & Sons, inc. 2007
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Copper>
- [6] [www.microplating.com/HTML/microSlik.htm](http://www.microplating.com/HTML/microSlik.htm)
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Grain\\_boundary](http://en.wikipedia.org/wiki/Grain_boundary)
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/Single\\_crystal](http://en.wikipedia.org/wiki/Single_crystal)
- [9] <http://irpanhermawan.blogspot.com/p/teori-dislokasi.html>
- [10] <http://ardra.biz/metalurgi/perlakuan-panas-logam/proses-anil-annealing>
- [11] H. K. D. H. Bhadeshia, "Recrystallisation of Practical Mechanically Alloyed Iron–Base and Nickel–Base Superalloys", Materials Science and Engineering A223 (1997) 64-77
- [12] E.A. El-Danaf\*, M.S. Soliman, A.A. Almajid, M.M. El-Rayes, "Enhancement of mechanical properties and grain size refinement of commercial purity aluminum 1050 processed by ECAP" , Materials Science and Engineering A 458 (2007) 226–234
- [13] D. H. Ping and K. Hono, H. Kanekiyo and S. Hirosawa, "Mechanism of grain size refinement of Fe<sub>3</sub>B/Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B nanocomposite permanent magnet by Cu addition", Journal Of Applied Physics Volume 85, Number 4 15 February 1999
- [14] Nofrijon Sofyan, "Teknik Pengamatan Struktur Mikro", Training CMPFA
- [15] Wayne E King, Adam J. Schwartz, "Use of Strain-Annealing to Evolve the Grain Boundary Character Distribution in Polycrystalline Copper", Lawrence Livermore National Laboratory, 1996
- [16] S. Nestorovic, Lj. Ivanic and D. Markovic, "Influence of Time Annealing on Anneal Hardening Effect of A Cast CuZn Alloy", Journal of Mining and Metallurgy, 39 (3-4)B (2003) 489-497
- [17] ASTM, "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys", Designation: E 407 – 99
- [18] D. Hull and D. J. Bacon, "Introduction to Dislocation", 4<sup>th</sup> Ed., Butterworth-Heinemann, 2001