

OPTIMASI PROSES ANNEALING PADA PROSES FINE DRAWING UNTUK MEMPERBAIKI SIFAT MEKANIS PRODUK KAWAT TEMBAGA

Iwan Setyadi¹ dan M. Syawal²

¹Pusat Teknologi Industri Proses (PTIP)-BPPT

Gedung Teknologi 2 Lantai 3, Kawasan Puspiptek Serpong-Tangerang, 15314

²Departemen Teknik Mesin, FTI-ITBU

Jl. Mawar Merah, Malaka, Klender Jakarta Timur, 13460

E-mail : i1setyadi2810@gmail.com, bayu120688@gmail.com

Diterima: 06 Januari 2015

Diperbaiki: 04 April 2015

Disetujui: 03 Juni 2015

ABSTRAK

OPTIMASI PROSES ANNEALING PADA PROSES FINE DRAWING UNTUK MEMPERBAIKI SIFAT MEKANIS PRODUK KAWAT TEMBAGA. Kawat tembaga banyak digunakan untuk membuat kabel untuk keperluan listrik dan elektronik. Kawat tembaga dibuat dengan proses penarikan yang melalui serangkaian cetakan *conical drawing* untuk mengurangi diameter kawat sesuai dengan diameter yang diinginkan. Salah satu permasalahan industri pembuat kawat adalah mahal nya energi. Dalam penelitian ini, percobaan yang dilakukan ditujukan untuk mendapatkan kondisi proses *annealing* yang optimal guna menghemat pemakaian energi. Penelitian ini dilakukan dengan menghilangkan proses *annealing* awal dalam proses penarikan kawat dan diganti dengan mengoptimalkan suhu proses *annealing* akhir. Dari hasil penelitian diketahui bahwa pada suhu *annealing* 380 °C didapatkan sifat mekanis optimum kawat tembaga, dimana diperoleh elongasi 29 %, kekuatan *yield* 15,59 kg/mm², kekuatan tarik 24,57 kg/mm² dan *softability* 147 gram. Hasil ini sesuai standar, dimana elongasi minimal sebesar 27%, kekuatan *yield* minimal 15,3 kg/mm², kekuatan tarik minimal 21,4 kg/mm² dan *softability* maksimal 220 gram.

Kata kunci: Proses penarikan, Kawat tembaga, Suhu *annealing*, Kekuatan tarik, *Softability*

ABSTRACT

ANNEALING PROCESS OPTIMIZATION IN THE PROCESS OF DRAWING FINE FOR IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER WIRE PRODUCTS. Copper wire used to make cables for uses such as electrical and electronics. Copper wire is cold-drawn through a series of conical drawing dies to reduce the diameter of the wire to the required diameter. One of the main problem encountered by the copper wire industry is energy saving. In this research, attempts were made to obtain the optimum conditions of annealing process in order to obtain efficiency of the energy. A research is conducted on fine drawing by means of elimination of initial annealing in wire drawing process and replacing with optimization of final annealing temperature. The results indicate that at annealing temperature of 380 °C, the optimum mechanical properties of copper wire can be achieved by gaining 29 % elongation, Yield strength of 15.59 kg/mm², tensile strength of 24.57 kg/mm², and softability of 147 grams. These results are conform to required values for Copper Standard which required a minimum elongation of 27%, yield Strength of 15.3 kg/mm², tensile strength of 21.4 kg/mm², and maximum softability of 220 grams.

Keywords: Drawing process, Copper wire, Annealing temperature, Tensile strength, Softability

PENDAHULUAN

Kawat merupakan komponen logam yang Dewasa ini kawat banyak digunakan untuk komponen dibuat dengan proses penarikan (*drawing process*). listrik, elektronik, otomotif dan konstruksi.

Untuk keperluan komponen listrik dan elektronik jenis kawat yang digunakan adalah kawat tembaga dan kawat aluminium. Namun demikian kawat tembaga memiliki daya hantar listrik ataupun panas tertinggi, karena tembaga memiliki sifat konduktor yang sangat baik.

Proses produksi kawat tembaga melalui beberapa tahapan, dimulai dari penyiapan bahan baku yang berupa batang tembaga (*Copper Rod*), dan kemudian dibentuk menjadi kawat sesuai dengan diameter yang diinginkan melalui beberapa tahapan (*pass*) proses penarikan (*drawing process*) melalui *conical drawing dies*.

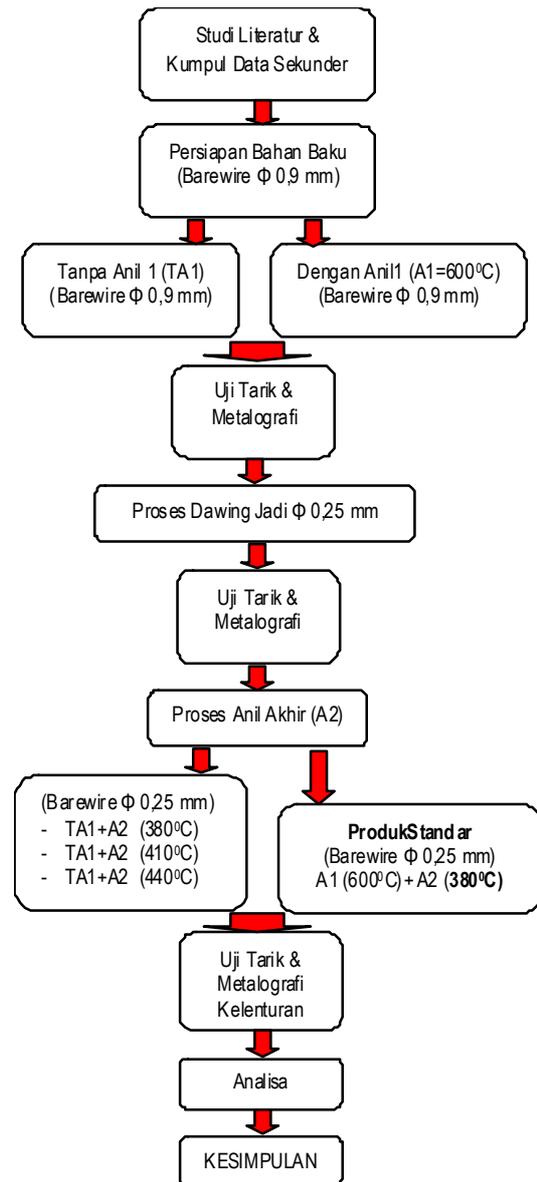
Penilaian kualitas produk kawat tembaga yang dihasilkan ditentukan oleh kesesuaiannya dengan spesifikasi yang disyaratkan oleh pengguna. Biasanya mengacu pada suatu standar tertentu, seperti standar *Japan Industrial Standard (JIS)*, terutama terkait sifat mekanis hasil uji tarik dan uji kelenturan.

Salah satu permasalahan di industri, khususnya industri pembuat kawat adalah masalah mahalnya energi. Beberapa upaya dilakukan untuk penghematan pemakaian energi dengan melakukan efisiensi proses namun kualitas tetap terjaga. Diantaranya adalah mengoptimalkan proses *annealing* dalam proses produksi kawat. Tujuan penelitian ini adalah membantu salah satu industri pembuat kawat untuk mengurangi konsumsi energi listriknya dengan cara mengurangi proses *annealing* dalam proses penarikan kawat yang semula dilakukan 2 kali yaitu diawal proses untuk *annealing copper rod bar (A1)* dan diakhir proses (A2), menjadi hanya 1 kali proses *annealing* pada akhir proses penarikan. Dengan mendapatkan kondisi optimum proses *annealing* akhir diharapkan kualitas kawat yang diproduksi tetap terjaga, sementara itu secara kualitatif pemakaian energi listrik akan berkurang karena proses pemanasan yang dilakukan pada saat *annealing* pertama sudah tidak diperlukan lagi.

Banyak penelitian yang sudah dilakukan berupaya untuk meningkatkan kualitas produk kawat baik yang berbahan baku tembaga [1-5] maupun yang bukan tembaga [6-9] seperti pengaruh temperatur anil pada tekstur kawat tembaga [1] dan pada ketidakhomogenan struktur kawat tembaga [2] serta pengaruh anil pada strain hardened tembaga [4]. Penelitian yang dilakukan ini lebih bersifat aplikatif pada industri kawat tembaga. Fokusnya adalah mengotimalkan proses *annealing* untuk mencapai persyaratan teknis yang diminta dalam rangka penghematan energi.

METODE PERCOBAAN

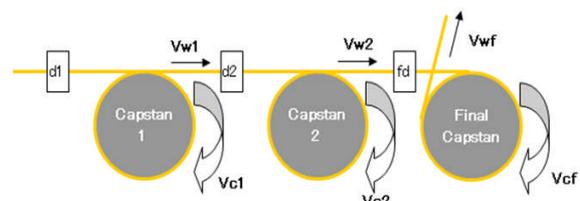
Adapun metodologi penelitian yang dilakukan dapat dilihat dari diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Tembaga

Tembaga merupakan jenis material logam *non-ferrous* yang memiliki struktur kristal kubik pemusatan sisi *Face Centered Cubic (FCC)*. Berat jenis tembaga adalah 8,94 gram/cm³ dan mempunyai titik lebur 1085 °C. Tembaga memiliki konduktifitas listrik dan panas terbaik kedua setelah perak, sangat mudah dibentuk karena bersifat sangat ulet/liat (*ductille*) baik dengan *rolling*



Gambar 2. Proses penarikan (*drawing Process*) pada kawat tembaga [14]

maupun *drawing* untuk menghasilkan kawat, namun sukar di *machining*. Di samping itu tembaga memiliki ketahanan korosi yang sangat baik dalam kondisi apapun [10-11].

Proses Penarikan Kawat Tembaga

Proses penarikan kawat tembaga atau yang biasa disebut *drawing process* adalah proses perubahan ukuran diameter kawat tembaga dari ukuran yang besar menjadi ukuran yang lebih kecil. Proses ini didasarkan atas perubahan bentuk plastis dari benda kerja, sehingga tidak ada material yang terbuang. Berbeda dengan proses pemotongan logam dimana sebagian dari material akan terbuang [12-13].

Gambar 2 menunjukkan skema proses penarikan kawat, dimana $d_{1,2}$.. adalah *drawing dies* 1, 2 dan seterusnya, $V_{w1,2}$.. adalah kecepatan penarikan kawat pada rol 1, 2, dan seterusnya, $V_{c1,2}$... adalah kecepatan motor 1, 2 dan seterusnya.

Ada 4 tahap proses penarikan (*drawing*) [14] :

1. *Heavy Drawing Process*, Proses penarikan kawat tembaga dari ukuran 8,00 mm menjadi ukuran yang lebih kecil antara 1,80 mm sampai dengan 4,00 mm.
2. *Medium Drawing Process*, , ukuran diameter kawat yang akan ditarik berkisar antara 1,80 mm sampai dengan 4,00 mm, dan diameter setelah ditarik adalah 0,23 mm sampai dengan 2,30 mm.
3. *Fine Drawing Process*, dimana kawat tembaga yang akan ditarik dengan ukuran diameter antara 0,30 mm sampai dengan ukuran 0,90 mm

dan akan menghasilkan kawat tembaga berdiameter antara 0,075 mm sampai dengan 0,20mm.

4. *Extra Fine Drawing Process*, proses paling akhir dengan diameter antara 0,10 mm sampai dengan 0,35 mm menjadi diameter 0,028 mm sampai dengan 0,10 mm.

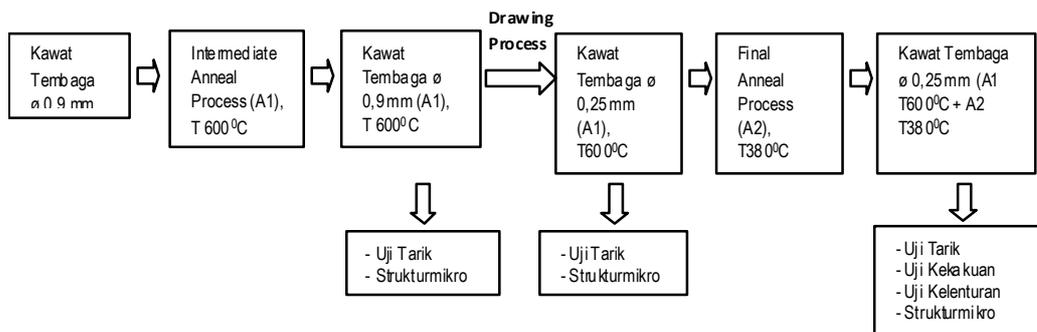
Pelaksanaan Proses Penarikan Kawat

Pelaksanaan proses penarikan dilakukan dari bahan baku berdiameter 0,9 mm ditarik menjadi kawat berdiameter 0,25 mm dengan menggunakan *drawing dies* yang terdiri atas 11 langkah reduksi, di mana perpass reduksinya $\pm 20\%$.

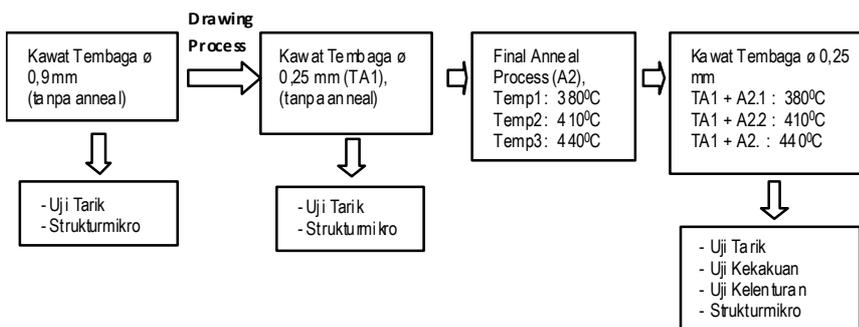
Proses Annealing

Proses *annealing* merupakan proses perlakuan panas yang ditujukan untuk melunakan dan menaikan kembali keuletan benda kerja agar dapat dideformasi lebih lanjut. Pada dasarnya proses *annealing* dan *stress relief annealing* mempunyai kesamaan, yakni bahwa kedua proses tersebut dilakukan masih pada batasan rekristalisasi.

Dalam hal ini, proses *annealing* yang dilakukan yaitu sebelum *Inline Drawing Process* dan sesudah *Inline Drawing Process*. Menurut Marty Weiser dalam artikelnya yang berjudul *Annealing Copper Wire* [14] menjelaskan bahwa pada umumnya suhu yang optimum untuk proses *anneal* pada kawat tembaga adalah 1/2 dari suhu lebur kawat tembaga itu sendiri. Sehingga suhu



Gambar 3. Diagram alir pelaksanaan proses *annealing* saat ini (ada 2 x *annealing*) dalam proses penarikan kawat tembaga.



Gambar 4. Diagram alir pelaksanaan proses *annealing* yang dimodifikasi (hanya 1 x *annealing*) dalam proses penarikan kawat tembaga.

proses *annealing* yang akan digunakan saat memanaskan kawat tembaga yaitu pada suhu antara 350 °C hingga 600 °C, yang kemudian dilanjutkan dengan mendinginkan kawat tembaga dengan menggunakan air dan udara. Tujuannya adalah untuk melunakkan kawat tembaga agar mudah digulung.

Pelaksanaan Proses Annealing Kawat

Diagram alir pelaksanaan proses *annealing* dikelompokkan jadi 2, yaitu diagram alir proses yang berlangsung saat ini dan diagram alir proses yang akan dikembangkan, dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Pelaksanaan Pengujian

Dalam penelitian ini untuk menguji kualitas kawat yang telah diproduksi dengan optimasi proses *annealing* akhir (A2) dilakukan dengan uji tarik, uji metalografi dan uji *softability*. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan harga standar yang telah disepakati.

Proses Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan alat uji *Universal Testing Machine* tipe AI-7000 S GOTTECH. Proses pengujian ini mengacu pada standar NEMAMW-81C dan JIS C 3003: 1999 mengenai *Methods of test for enamelled wires* [15].

Pemeriksaan strukturmikro (metalografi) pada Kawat Tembaga dilakukan dengan menggunakan Mikroskop Metalloplan type 307-107.003 LEITZ WETZLAR GERMANY dan Kamera Nikon Coolpix E4500 4.0 Mega Pixel 4x Zoom yang digunakan untuk pengambilan gambar dari hasil pembesaran mikroskop.

Proses pengujian kelenturan dilakukan dengan menggunakan alat uji khusus yang bernama *Softability tester*. Standar yang digunakan pun sama dengan proses pengujian sebelumnya yaitu standar JIS C 3003 : 1999 mengenai *Methods of test for enamelled wires* [15]. Pengujian ini salah satu uji terpenting kawat tembaga.

Analisis

Analisis dilakukan guna mengetahui kualitas kawat yang dihasilkan melalui optimasi proses *annealing* yang dibandingkan dengan standar yang disyaratkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Tarik dan Uji Kelenturan

Dari hasil uji tarik didapatkan karakteristik elongasi, kekuatan *yield* dan kekuatan tarik, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sampai dengan

Tabel 3. Sedangkan uji kelenturan kawat dilakukan dengan uji *softability*. Hasilnya dapat dilihat pada

Tabel 1. Elongasi kawat tembaga dari hasil uji tarik.

No	Kondisi Proses	Sebelum Penarikan (ø 0,90 mm)	Elongation (%)			
			Setelah Penarikan (ø 0,25 mm)			
			TA2	A2.1	A2.2	A2.3
1	TA1	2	0,96	29	32	35
2	A1 (600°C)	35	21	37	-	-

Customer Standard : min 27%
 Keterangan :
 TA1 : Tanpa proses *annealing* pertama
 TA2 : Tanpa proses *annealing* akhir
 A1 : Dengan proses *annealing* pertama suhu 600°C
 A2.1 : Dengan proses *annealing* akhir suhu 380°C
 A2.2 : Dengan proses *annealing* akhir suhu 410°C
 A2.3 : Dengan proses *annealing* akhir suhu 440°C

Tabel 2. Hasil pengujian tarik kawat tembaga (*yield strength*).

No	Kondisi Proses	Sebelum Penarikan (ø 0,90 mm)	Yield Strength (kg/mm ²)			
			Setelah Penarikan (ø 0,25 mm)			
			TA2	A2.1	A2.2	A2.3
1	TA1	40,22	41,04	15,59	15,63	15,63
2	A1 (600°C)	15,46	26,22	15,56	-	-

Customer Standard : min 15,3 Kg/mm²

Tabel 3. Hasil pengujian tarik kawat tembaga (*tensile strength*).

No	Kondisi Proses	Sebelum Penarikan (ø 0,90 mm)	Tensile Strength (kg/mm ²)			
			Setelah Penarikan (ø 0,25 mm)			
			TA2	A2.1	A2.2	A2.3
1	TA1	46,24	48,82	24,57	24,37	24,78
2	A1 (600°C)	23,32	29,42	24,32	-	-

Customer Standard : min 21,4 Kg/mm²

Tabel 4. Hasil pengujian *softability* kawat tembaga 0,25 mm

No	Kondisi Proses	Sebelum Penarikan (ø 0,90 mm)	Softability (gram)			
			Setelah Penarikan (ø 0,25 mm)			
			TA2	A2.1	A2.2	A2.3
1	TA1	-	-	218	212	187
2	A1 (600°C)	-	-	147	-	-

Customer Standard : Max 220 gram

Tabel 4.

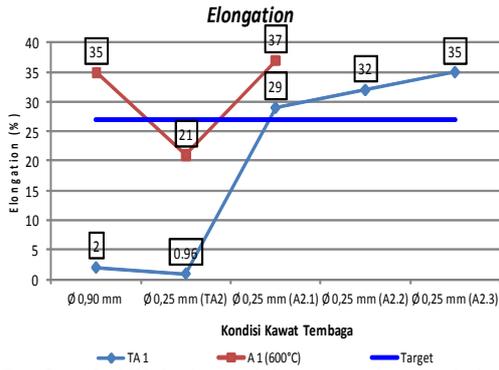
Hasil uji metalografi berupa foto-foto bentuk strukturmikro masing-masing kondisi dengan pembesaran 500X. Secara rinci dapat dilihat pada pembahasan.

Analisis Sifat Mekanik (Elongasi, Kekuatan Tarik dan Kelenturan)

Elongasi Kawat

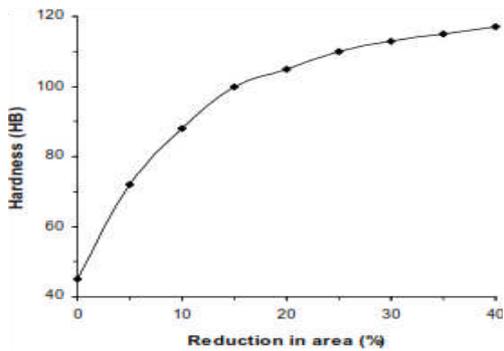
Mengacu pada Tabel 1 dan Gambar 5 berikut terlihat bahwa kondisi awal *rod* tembaga tanpa *annealing* awal (berdiameter 0,9 mm) sebelum di tarik (*drawing*) memiliki elongasi sebesar 2%. Elongasi ini jauh di bawah elongasi *rod* dengan *annealing* awal yang besarnya 35%. Hal ini menunjukkan bahwa *rod* tersebut lebih mudah di *drawing* karena lebih lunak dibandingkan dengan *rod* tanpa *annealing*.

Setelah proses *drawing* dilakukan, elongasi kawat berdiameter 0,25 mm menjadikan elongasinya mengalami penurunan drastis. Untuk *rod* tanpa



Gambar 5. Nilai elongasi kawat tembaga sebelum *drawing* dan setelah *drawing* baik tanpa dan dengan *annealing* awal (A1) yang diikuti *annealing* akhir (A2)

annealing awal (TA1) terjadi penurunan sebesar 52% dari elongasi 2% menjadi 0,96%. Sedang untuk *rod* yang di *annealing* awal (A1) terjadi penurunan sebesar 40% dari elongasi 35% menjadi 21%. Elongasi yang diperoleh masih di bawah standar, karena syarat yang diminta minimal 27%. Penurunan elongasi disebabkan karena terjadinya pengerasan regang (*strain hardening*) [4], [12-13] setelah proses penarikan kawat dan tergantung pada besarnya reduksi atau pengecilan diameter yang terjadi. Dalam hal ini terjadi peningkatan kekerasan, kasus ini pernah diamati pada penelitian sebelumnya di perusahaan kabel metal Nigeria [4].



Gambar 6. Pengaruh prosentase reduksi penarikan kawat terhadap kekerasan [4].

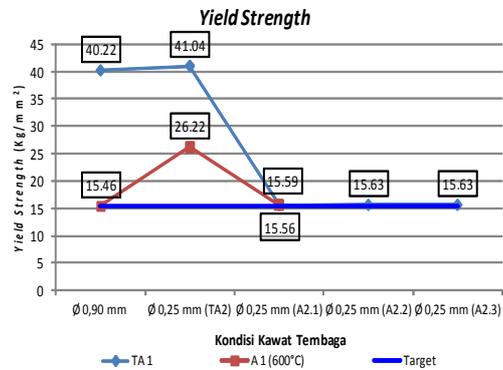
Untuk dapat memenuhi target elongasi, maka dari hasil optimasi *annealing* akhir (A2) terhadap kedua kondisi produk kawat tembaga pada suhu 380 °C sudah didapat harga elongasi yang diinginkan. Dimana untuk kawat tembaga dengan *annealing* awal (A1) nilai elongasinya menjadi 37 % dari sebelumnya 21% (naik 76,2 %). Sedangkan kawat tembaga tanpa *annealing* awal elongasinya naik menjadi 29% yang sebelumnya 0,96%.

Kenaikan yang besar pada kawat tanpa *annealing* awal diduga karena kawat ini mengalami *strain hardening* yang paling besar. Pada saat diberikan energi panas (saat *annealing* akhir A2), maka butirnya paling duluan mengalami rekristalisasi dan bahkan juga mengalami pertumbuhan, sehingga elongasinya mengalami peningkatan drastis [4][12][13].

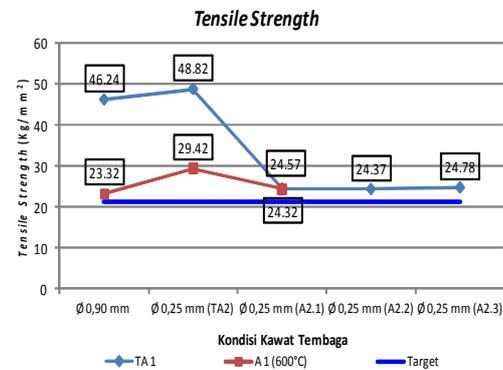
Dengan meningkatnya suhu *annealing* akhir, maka elongasinya juga mengalami kenaikan. Besar peningkatan tersebut, khususnya pada kawat tanpa *annealing* awal adalah pada T 410 °C menjadi 32% dan pada T 440 °C menjadi 35%. Dalam hal ini dengan energi panas yang lebih tinggi terjadi pertumbuhan butir yang lebih besar sehingga meningkatkan elongasi. Fenomena ini juga terjadi pada pada penelitian yang pernah dilakukan penelitian sebelumnya [2].

Kekuatan *Yield* dan Kekuatan Tarik Kawat

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan hasil kakarakterisasi kekuatan *yield* dan kekuatan tarik kawat tembaga dengan berbagai kondisi.



Gambar 7. Nilai kekuatan *yield* kawat tembaga sebelum *drawing* dan setelah *drawing* baik tanpa dan dengan *annealing* awal (A1) yang diikuti *annealing* akhir (A2)



Gambar 8. Nilai kekuatan tarik kawat tembaga sebelum *drawing* dan setelah *drawing* baik tanpa dan dengan *annealing* awal (A1) yang diikuti *annealing* akhir (A2)

Mengacu pada Tabel 2 dan Tabel 3 serta Gambar 7 dan Gambar 8 terlihat bahwa kekuatan *yield* dan kekuatan tarik kawat rod tembaga yang di*annealing* walaupun tanpa *annealing* berbanding terbalik dengan nilai elongasi yang diperoleh. Semakin rendah elongasi sebaliknya terjadi peningkatan kekuatan *yield* maupun kekuatan tariknya.

Sebelum *drawing*, terlihat rod tembaga yang di*annealing* awal (A1) lebih rendah kekuatan *yield*nya yaitu 15,46 kg/mm² dibanding *rod* tembaga tanpa *annealing* (TA1) yang besarnya 40,22 kg/mm². Terjadi penurunan kekuatan *yield* sebesar 61,56 %. Ini

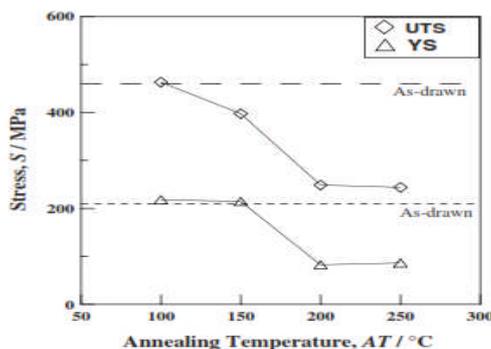
menguntungkan karena secara nyata terjadi penurunan beban penarikan kawat (*drawing*).

Hal penting yang menjadi perhatian pada saat proses penarikan berlangsung adalah selisih tegangan antara kekuatan *yield* dan kekuatan tarik maksimum. Karena pada rentang penambahan tegangan tersebut berlangsung proses deformasi pada saat penarikan kawat. Kalau rentangnya pendek berarti hanya sedikit deformasi yang dapat terjadi. Jangan sampai tegangan yang digunakan melebihi rentangnya, karena beresiko putusnya kawat yang ditarik.

Dari hasil karakteristik kekuatan yang diteliti, terlihat rod tembaga dengan *annealing* awal (A1) memiliki rentang kekuatan sebesar 6,02 kg/mm² dari awal *yield* sampai terjadinya putus (kekuatan tarik maksimum). Sedangkan rod tembaga tanpa *annealing* awal (TA1) memiliki rentang tegangan sebesar 7.86 kg/mm². Artinya walaupun tanpa *diannealing* awal rod tersebut masih punya rentang yang masih besar, bahkan lebih besar 30,56 % dibanding rod tembaga yang *diannealing*, sehingga aman untuk dilakukan penarikan menjadi kawat berdiameter 0,25 mm.

Proses *annealing* akhir (A2) yang dilakukan pada kawat tembaga A1 maupun pada kawat tembaga TA1 ditujukan untuk mendapatkan nilai elongasi yang disyaratkan. Pada suhu *annealing* 380°C untuk produk kawat tembaga A1 dihasilkan elongasi sebesar 37 %, kekuatan *yield* sebesar 15,56 kg/mm² dan kekuatan tarik sebesar 24,32 kg/mm². Sedangkan dengan kondisi yang sama untuk produk kawat TA1 didapat elongasi sebesar 29 %, kekuatan *yield* sebesar 15,59 kg/mm² dan kekuatan tarik sebesar 24,57 kg/mm². Sedangkan syarat minimalnya 27% untuk elongasi, 15,3 kg/mm² untuk kekuatan *yield* dan 21,4 kg/mm² untuk kekuatan tarik.

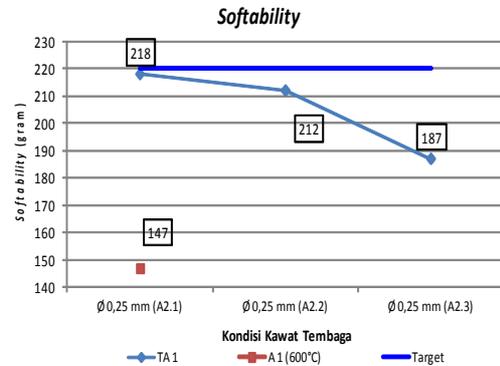
Pada penelitian ini peningkatan temperatur anil akhir pada produk kawat tembaga TA1 yang masing-masing pada suhu 410 °C dan 440 °C tidak terlalu signifikan menaikkan elongasi dan menurunkan kekuatan *yield* dan kekuatan tarik. Fenomena penurunan kekuatan *yield* juga terjadi pada pada penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yaitu pada kawat tembaga tipis [5].



Gambar 9. Nilai kekuatan tarik dan kekuatan *yield* kawat tembaga tipis dengan berbagai variasi suhu *annealing* (100-250°C) [5]

Softability Kawat

Gambar 10 berikut menunjukkan hasil kakarakterisasi *softability* produk kawat tembaga dengan dan tanpa *annealing* awal (TA1) yang *diannealing* akhir (A2).



Gambar 10. Nilai *softability* produk kawat tembaga dengan dan tanpa *annealing* awal (TA1) yang dianil akhir (A2) dengan variabel suhu *annealing*

Pengujian *softability* hanya dilakukan pada proses *annealing* akhir (A2) produk kawat tembaga dengan dan tanpa *annealing* awal (TA1). Proses produk kawat inilah yang dioptimalkan supaya dapat mencapai spesifikasi standar.

Mengacu pada Tabel 4 dan Gambar 10, terlihat bahwa produk kawat tembaga dengan *annealing* awal (A1) setelah *diannealing* akhir (A2) pada T 380 °C memiliki nilai *softability* yang paling tinggi. Hanya memerlukan 147 gram untuk melengkungkan kawat. Sedangkan produk kawat tanpa *annealing* awal (TA1) memerlukan 218 gram. Nilai ini masih masuk batas yang disyaratkan yaitu maksimal 220 gram.

Semakin tinggi suhu *annealing* akhir, khusus untuk produk kawat TA1 *softability*nya mengalami peningkatan dengan terjadi penurunan pembebanan menjadi 212 gram (T 410 °C) dan 187 gram (T 440 °C).

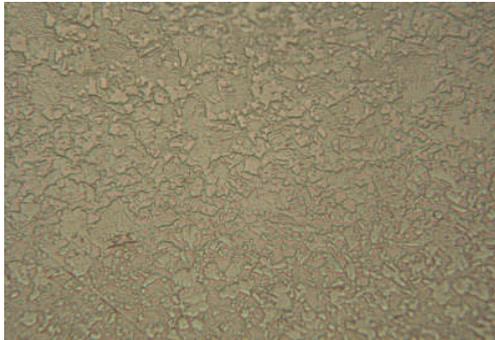
Analisa Strukturmikro Kawat

Dari hasil pengamatan struktur mikro produk kawat tembaga dengan *annealing* awal (A1) dan tanpa *annealing* awal (TA1) serta mengacu pada data



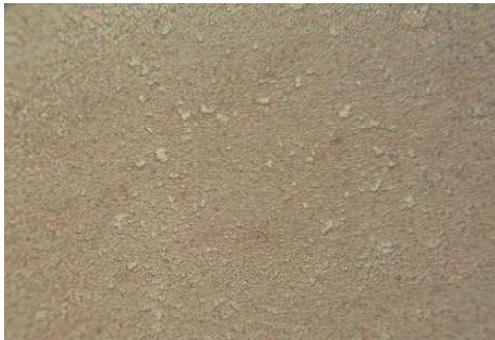
Gambar 11. (a) Strukturmikro rod tembaga Ø 0,90 mm tanpa *annealing* awal (TA1)

karakteristik elongasi, kekuatan *yield*, kekuatan tarik dan *softability* yang dihasilkan, maka untuk kondisi sebelum penarikan (*drawing*) terlihat ukuran butir rod tembaga yang di *annealing* awal (A1) lebih besar dari rod yang tanpa *annealing* (TA1). Foto struktur mikronya dapat dilihat pada Gambar 11(a) dan Gambar 11(b).



Gambar 11. (b). Struktur mikro rod tembaga Ø 0,90 mm dengan *annealing* awal (A1)

Proses *drawing* mengakibatkan pepadatan butir kristal. Namun produk yang di *annealing* awal ukurannya tetap lebih besar dibanding tanpa *annealing* awal, seperti yang terlihat pada Gambar 11(c) dan Gambar 11(d). Pepadatan/pengecilan butir inilah yang menyebabkan terjadinya penurunan elongasi dan sebaliknya menaikkan kekuatan karena telah terjadi strain *hardening*.



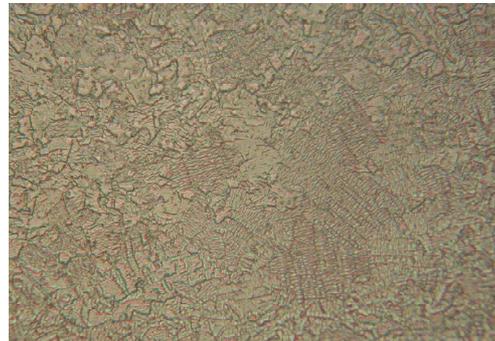
Gambar 11. (c). Struktur mikro kawat tembaga Ø 0,25 mm (TA1) dan tanpa *annealing* akhir (TA2)



Gambar 11. (d). Struktur mikro kawat tembaga Ø 0,25 mm (A1) dan tanpa *annealing* akhir (TA2)

Untuk mendapatkan elongasi yang sesuai standar, maka dengan adanya *annealing* akhir (A2) menyebabkan terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan butir. Dengan bertambah tingginya suhu A2, energi panas yang diberikan mengakibatkan butir kristal

semakin besar sehingga semakin meningkatkan elongasi dan *softability* serta sebaliknya menurunkan kekuatan, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11(e) dan Gambar 11(f).



Gambar 11. (e). Struktur mikro kawat tembaga Ø 0,25 mm dengan *annealing* awal (A1) dan *annealing* akhir (A2.1) T 380°C



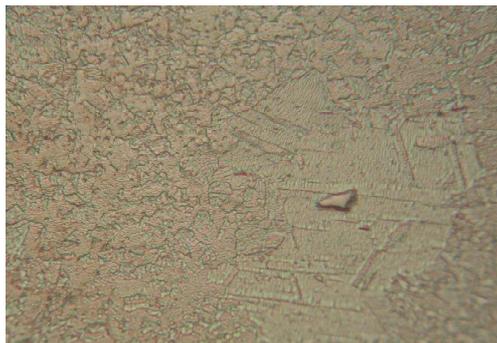
Gambar 11. (f). Struktur mikro kawat tembaga Ø 0,25 mm tanpa *annealing* awal (TA1) dan *annealing* akhir (A2) T 380°C

Tingginya kenaikan elongasi pada produk kawat TA1 setelah mengalami *annealing* akhir, disebabkan karena kawat ini telah mengalami *strain hardening* yang cukup kuat pada saat *drawing*. Pada saat *annealing* akhir (A2) T 380 °C, maka energi panas tersebut dengan mudah mendorong butir yang terdeformasi mengalami rekristalisasi dan diikuti dengan pertumbuhan butir (Gambar 11(f)), selaras dengan penelitian lain yang dilakukan sebelumnya [2][5].

Peningkatan suhu *annealing* akhir (A1) menjadi T 410 °C dan T 440 °C yang dilakukan pada produk kawat tanpa *annealing* awal (A1) tidak terlalu signifikan



Gambar 11(g). Struktur mikro kawat tembaga Ø 0,25 mm tanpa *annealing* awal (TA1) dan *annealing* akhir (A2.2) T 410°C



Gambar 11(h). Strukturmikro kawat tembaga Ø 0,25 mm tanpa *annealing* awal (TA1) dan *annealing* akhir (A2.2) T 440°C

mendorong pertumbuhan butir, sehingga peningkatan elongasi dan *softability* maupun penurunan kekuatan yield dan kekuatan tarik juga tidak terlalu besar. Seperti yang terlihat pada Gambar 11(g) dan Gambar 11(h).

KESIMPULAN

Dalam pembuatan kawat tembaga (*fine drawing*) proses penganilan dapat dilakukan sekali hanya pada produk akhir tanpa mengurangi kualitas sifat mekanis kawat. Adapun hasil optimal diperoleh adalah pada *annealing* akhir (A2) dengan suhu 380 °C. Dengan demikian dapat dilakukan penghematan energi karena tidak dilakukan proses pemanasan pada *annealing* 1 (A1) sampai suhu 600 °C.

Dari hasil penelitian, proses *annealing* akhir pada suhu 380 °C didapatkan elongasi 29 %, kekuatan *yield* 15,59 kg/mm², kekuatan tarik 24,57 kg/mm² dan *softability* 218 gram. Semua sifat mekanis yang dicapai sudah memenuhi standar yang diinginkan, dimana persyaratannya adalah elongasi minimal 27%, kekuatan *yield* minimal 15,3 kg/mm², kekuatan tarik minimal 15,3 kg/mm² dan *softability* maksimal 220 gram.

Sedangkan sifat mekanis kawat tembaga yang diproduksi dengan 2 kali *annealing* (A1 pada T 600 °C dan A2 pada T 380 °C) memiliki hasil yang lebih baik yaitu elongasi 37%, kekuatan *yield* 15,56 kg/mm², kekuatan tarik 24,32 kg/mm² dan *softability* 147 gram, namun demikian terjadi pemborosan energi pada *annealing* 1 (A1).

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan pada Bapak Sutarjo (B2TKS-BPPT) yang telah membantu kami dalam melakukan karakterisasi produk kawat tembaga, sehingga pada akhirnya tulisan ini bisa kami selesaikan.

DAFTAR ACUAN

[1]. S. L. Demakov, Yu. N. Loginov, A. G. Illarionov, *et al.* "Effect of Annealing Temperature on Texture

of Copper Wire". *The Physics and Metallography*, Pleaides Publishing Ltd, vol 113, no 7, pp 681-686, 2012.

- [2]. A. Akbari, G. H. Hasani and M. J. Jam. "An Experimental Investigation on The Effect of Annealing Treatment on Strain Inhomogeneity In The Cross-Section of Drawn Copper Wires". In *Proc. Roznov pod Radhostem, Czech Republic, EU*, 18. - 20. 5, May 2010.
- [3]. X. H. Chen, X. Tang, Z. Wang, *et al.* "Manufacturing Process and Microstructure of Copper-Coated Aluminium Wires". *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 22, No. 2, pp.190-196, 2015.
- [4]. O. S. Olokode, B. O. Bolaji, and O. Aiyedun. "Effects of Process Annealing on Mechanical Properties of Strain-Hardened Copper: A Case of Kabel Metal Nigeria Limited". *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 9, No 2, pp. 278-83, November 2008.
- [5]. F. Y. Hung, Y. T. Wang, L. H. Chen. "Recrystallization Effect and Electric Flame-Off Characteristic of Thin Copper Wire". *The Japan Institute of Metals, Materials Transactions*, vol. 47, No. 7, pp. 1776-81, 2006.
- [6]. X. Liu, X. Liu, J. Xie. "Effects of Annealing Process on Interface And Mechanical Properties of Silver Clad Aluminum Wires". *Procedia Engineering*, pp. 502-511, 2012.
- [7]. N. A. Raji, O. O. Oluwole. "Influence of Degree of Cold-Drawing on the Mechanical Properties of Low Carbon Steel". *Materials Sciences and Applications, Scientific Research*, 2 pp. 1556-63, Sept 2011.
- [8]. N. A. Raji, O. O. Oluwole. "Effect of Soaking Time on the Mechanical Properties of Annealed Cold-Drawn Low Carbon Steel". *Materials Sciences and Applications, Scientific Research*, 3, pp. 513-18, June 2012.
- [9]. A. Nassar, M. A. El-Wahab, E. A. EL-Hamid. "Plastic Deformation Evaluation of 6201 Alloy by Using Positron Annihilation Lifetime Technique". *Journal of Materials Science and Engineering*, A 3 (1), David Publishing, pp. 14-21, January 2013.
- [10]. W. D. Callister. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 254-64, 544-49.
- [11]. P. L. Mangonon. *The Principles of Materials Selection for Engineering Design*, USA, Prentice Hall, Inc., 2012, pp 234-43.
- [12]. S. Kalpakjian. *Manufacturing Engineering & Technology*, USA, Prentice Hall Inc., 2014, pp. 436-42.
- [13]. U. S. Dixit, R. G. Narayanan. *Metal Forming*, New Delhi , Mc Graw Hill Education Private Limited, 2013, pp. 31-36.

- [14]. P. Handonowarih. *AOTS Training Handbook*, Topic : *Bahan Pelatihan Proses Produksi Sumitomo Group*. Sumitomo Electric Industries.co.ltd, , Jepang, Mei-Agustus, 2006.
- [15]. JIS C 3003. *Methods of Test for Enamelled Wires*. Japanese Standards Association, 1999.