

PEMBUATAN KAWAT SUPERKONDUKTOR MULTI-FILAMEN Cu-Nb-Sn DENGAN METODA SERBUK DALAM TABUNG

Florentinus Firdiyono^{1,*}, Andika W. Pramono¹, Pius Sebleku¹,
B. Bandriyono² dan Anton Suryantoro¹

¹Pusat Penelitian Metalurgi dan Material, LIPI
Gedung 470, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan

²Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju, BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan

E-mail : *ffirdiyono@yahoo.com

Masuk tanggal : 12-01-2015, revisi tanggal : 12-03-2015, diterima untuk diterbitkan tanggal : 19-03-2015

Intisari

PEMBUATAN KAWAT SUPERKONDUKTOR MULTI-FILAMEN Cu-Nb-Sn DENGAN METODA SERBUK DALAM TABUNG. Telah dilakukan percobaan pembuatan konduktor Nb₃Sn dengan cara PIT (*powder-in-tube*) untuk aplikasi medan magnet tinggi. Superkonduktor Cu-Nb-Sn adalah salah satu jenis superkonduktor temperatur rendah yang cocok untuk aplikasi pada peralatan MRI (*magnetic resonance imaging*). Percobaan pembuatan kawat superkonduktor *multi-filamen* jenis Cu-Nb-Sn ini dilakukan melalui beberapa tahapan proses yaitu: preparasi bahan, proses pemesinan, penarikan kawat, dan proses perlakuan panas. Proses pencampuran serbuk Nb dan Sn dilakukan menggunakan HEM (*high energy milling*) agar diperoleh campuran yang sempurna. Perlakuan panas terhadap kawat dilakukan pada temperatur 700°C selama 96 jam agar serbuk Nb dan serbuk Sn dapat berdifusi satu sama lain membentuk fasa inter-metalik Nb₃Sn sehingga kawat menjadi bersifat superkonduktor. Pengamatan mikrostruktur kawat multi-filamen dilakukan terhadap potongan penampang melintang maupun membujur. Pengamatan mikrostruktur dengan SEM (*scanning electron microscopy*) dan EDS (*energy dispersive spectroscopy*) dilakukan terhadap kawat hasil perlakuan panas tersebut untuk melihat adanya pembentukan Nb₃Sn di dalam kawat multi-filamen.

Kata kunci : Kawat superkonduktor Cu-Nb-Sn, MRI, Low temperature superkonduktor, Kawat multi-filamen, Powder-in-tube, Nb₃Sn

Abstract

PRODUCTION OF Cu-Nb-Sn MULTIFILAMENARY SUPERCONDUCTOR WIRE BY POWDER-IN-TUBE METHOD. Experimental process to produce Nb₃Sn conductors, based on the powder-in-tube (PIT) method, have been developed for application high field magnets. Cu-Nb-Sn superconductor is one type of low temperature superconductor that suitable to be applied for MRI equipment. The experiments to produce these multi-filamen superconductor wires were done through some steps such as: sample preparation, machining process, wire drawing, and heat treatment process. Perfectly mixing of Nb - Sn powder was needed, so the process was done by using High Energy Mill (HEM). The wires containing Nb-Sn powder was subsequently heat treated at 700°C in 96 hours for the formation of the superconducting Nb₃Sn phase by diffusion reaction of Nb-Sn powder mixture. Microstructure observation of multi-filamen wires was done through the longitudinal dan transverse cross section. Microstructure observation was done by using SEM and EDS to observed the formation of the superconducting Nb₃Sn phase inside the multi-filamen wires.

Key words : Cu-Nb-Sn superconductor wire, MRI, Low temperature superkonduktor, Multi-filamen wire, Powder-in-tube, Nb₃Sn

PENDAHULUAN

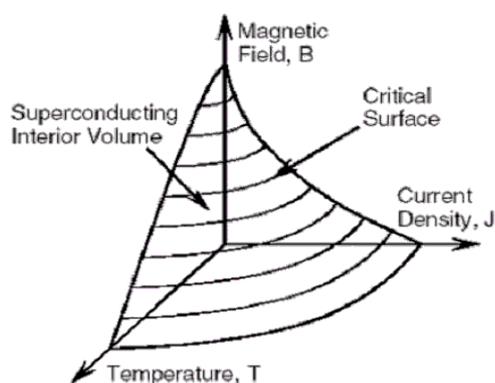
Indonesia telah lama menjadi salah satu produsen timah dunia melalui cadangan timah di Pulau Bangka. Timah tersebut belum sepenuhnya diimplementasikan

menjadi berbagai produk komoditas. Peningkatan nilai tambah terhadap logam timah dan tembaga Indonesia dilakukan melalui verifikasi produk berbasis timah dan tembaga dengan melakukan percobaan

pembuatan kawat superkonduktor Cu-Nb-Sn.

Superkonduktor jenis Cu-Nb-Sn ini dikategorikan sebagai superkonduktor suhu rendah, yaitu tipe superkonduktor yang suhu kritisnya (T_c) berada di bawah -196°C (77K) atau setara dengan titik didih nitrogen cair^[1]. Suhu kritis adalah suhu transisi, dimana pada kondisi lebih rendah dari suhu tersebut suatu material akan kehilangan tahanan listriknya, atau dengan kata lain menjadi superkonduktor^[2]. Karena keuletan yang rendah serta harganya yang cukup tinggi, Cu-Nb-Sn lebih tidak populer dibandingkan dengan Cu-Nb-Ti ($\text{Ti} = \text{titanium}$). Akan tetapi Cu-Nb-Sn memiliki kepadatan arus listrik kritis tertinggi, yang merupakan aspek penting dalam implementasi superkonduktor. Pada superkonduktor, kendala utama dari fenomena superkonduktivitas tidak hanya pada suhu yang sangat rendah, tetapi juga pada kepadatan arus listrik dan medan magnet yang terbatas^[2].

Di sini, nilai maksimum dari suhu (T), kepadatan arus listrik (J), dan kuat medan magnet (B) saling ber-ketergantungan satu sama lain, dan apabila mereka diplot pada sumbu 3-dimensi, maka akan terlihat seperti pada Gambar 1^[3-5].



Gambar 1. Interdependensi dari temperatur (T), medan magnet (B), dan kepadatan arus listrik (J)^[3-5]

Karena aliran arus listrik dan medan magnet sangat stabil, maka kawat Cu-Nb-Sn sangat cocok untuk aplikasi penting seperti MRI (*magnetic resonance images*)

^[1-2, 4]. Adapun aplikasinya adalah sebagai infrastuktur pendukung peralatan MRI dalam bentuk magnet superkonduktor atau kumparan (solinoid). Kualitas kawat superkonduktor Cu-Nb-Sn utamanya diukur dari nilai rapat arus (J_c) yang dihasilkan. Semakin banyak senyawa Nb_3Sn yang terbentuk di dalam kawat, maka J_c semakin tinggi.

Pembuatan kawat superkonduktor dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu^[6-9]:

1. Pembuatan kawat superkonduktor dengan proses perunggu (*bronze process*)

Niobium (Nb) rod pertama di*cladding* ke dalam paduan perunggu (Cu-Sn) murni untuk membentuk *sub-element assembly*. Kumpulan *sub-element assembly* dalam perunggu ini kemudian di*cladding* kembali dengan Nb atau Ta (tantalum), yang berfungsi sebagai penahan proses difusi dari timah di perunggu ke lapisan tembaga di sisi paling luar. Material kemudian diberi perlakuan panas pada suhu $650 - 700^\circ\text{C}$ agar terjadi interdifusi antara Nb dengan Sn dari perunggu untuk membentuk Nb_3Sn .

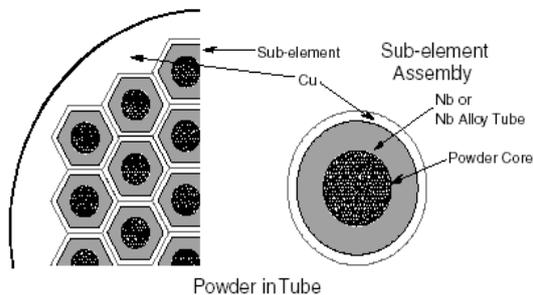
2. Pembuatan kawat superkonduktor dengan proses timah internal (*internal Sn*)

Sn rod dibungkus dengan lembaran saling silang antara Cu dan Nb untuk membentuk *sub-element assembly*. *Sub-element assembly* ini selanjutnya di*cladding* dengan Nb atau Ta. Hasil *cladding* ini, kemudian disusun ke dalam tabung Cu murni. Tahap selanjutnya material diberi perlakuan panas pada suhu $650 - 700^\circ\text{C}$ untuk membentuk Nb_3Sn .

3. Pembuatan kawat superkonduktor dengan proses serbuk dalam tabung (*powder in tube*)

Serbuk intermetalik Nb_6Sn_5 atau NbSn_2 yang memiliki kadar Sn lebih tinggi dimasukkan ke dalam tabung Nb dan dipanaskan pada 650°C sampai 700°C untuk membentuk Nb_3Sn . Setelah dipanaskan, kemudian di*cladding* ke

dalam tabung Cu. Bentuk potongan penampang lintang kawat superkonduktor ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema proses serbuk bahan superkonduktor dalam tabung

Pembuatan kawat superkonduktor Cu-Nb-Sn yang akan dilakukan dalam percobaan ini pada dasarnya menggunakan metoda serbuk dalam tabung tetapi serbuk yang digunakan dalam percobaan ini bukan serbuk intermetalik Nb_6Sn_5 atau $NbSn_2$ melainkan serbuk Nb dan Sn. Pembentukan senyawa intermetalik Nb_6Sn_5 atau $NbSn_2$ diharapkan dapat terjadi pada saat pemberian perlakuan panas terhadap serbuk Nb dan Sn dalam kawat. Penggunaan serbuk Sn dan Nb akan memperluas permukaan unsur-unsur tersebut sehingga luas permukaan kontak antara Nb dan Sn menjadi sangat besar yang mengakibatkan kesempatan kontak untuk membentuk paduan Nb_3Sn menjadi besar pula. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan paduan Nb_3Sn antara lain : temperatur pemanasan, waktu pemanasan dan besar ukuran butir unsur tersebut. Keseluruhan faktor tersebut akan menambah kecepatan reaksi penetrasi unsur Sn ke dalam unsur Nb dan sebaliknya.

Permasalahan yang ada dalam pembuatan kawat ini ialah kawat multi-filamen seringkali terputus karena adanya proses permesinan dan penarikan kawat yang berulang-ulang, untuk itu perlu ketelitian dalam melakukan proses perlakuan panas agar kawat tidak putus pada saat proses permesinan dan

penarikan kawat. Selain itu permasalahan yang lain ialah masalah perlakuan panas terhadap kawat *multi-filamen* agar dapat dihasilkan fasa intermetalik Nb_3Sn di dalam kawat tersebut.

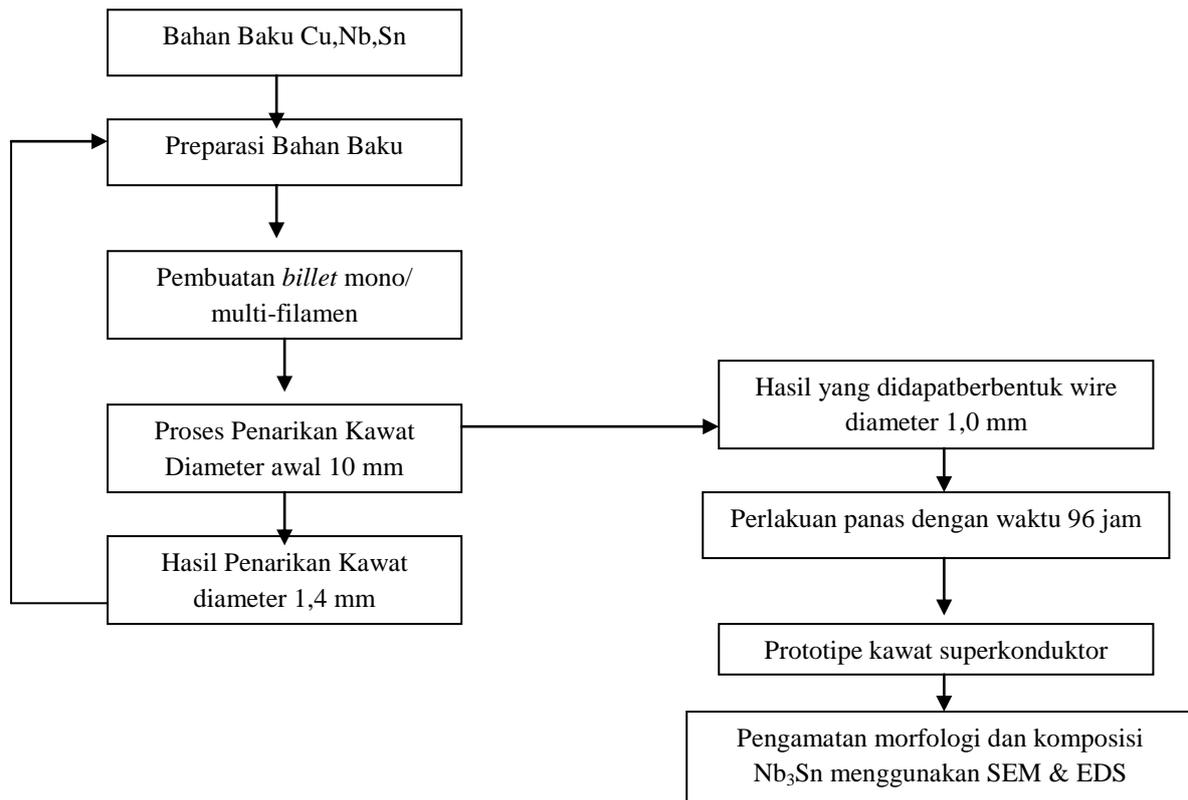
Semua cara tersebut di atas dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh paduan Nb_3Sn dengan cara yang efisien, yaitu paling mudah, paling banyak diperoleh paduan Nb_3Sn dan paling cepat prosesnya. Sehingga dari proses tersebut dapat diperoleh kawat superkonduktor Nb_3Sn yang murah tetapi tetap berkualitas tinggi.

PROSEDUR PERCOBAAN

Metoda pembuatan kawat superkonduktor ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu:

1. Preparasi bahan yang akan digunakan
2. Pembuatan billet mono-filamen
3. Penarikan kawat mono-filamen
4. Proses heat-treatment untuk rekristalisasi
5. Pembuatan billet multi-filamen
6. Penarikan kawat multi-filamen
7. Proses *heat-treatment* pembentukan fasa intermetalik Nb_3Sn
8. Analisa morfologi dan komposisi Nb_3Sn dengan SEM dan EDS

Secara sederhana kegiatan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat dalam diagram alir pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir proses pembuatan kawat *multi-filamen*

Persiapan bahan utama dalam percobaan ini adalah pelat logam niobium (Nb) dan serbuk logam Nb murni dengan ukuran butir -325 mesh. Bahan ini harus diimpor karena Indonesia tidak memproduksi logam ini. Untuk keperluan percobaan bahan pelat dan bubuk niobium ini diimpor dari China. Kondisi bubuk niobium adalah sebagai berikut: ukuran bijih -325 mesh, tingkat kemurnian 99,9% dengan kandungan unsur pengotor seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia bubuk logam Niobium (Nb)

Nama unsur	Kadar, ppm	Nama unsur	Kadar, ppm
O	500	Mn	30
Si	50	Mo	20
H	36	Ni	50
C	170	Ta	< 500
Cr	50	Ti	20
Cu	30	W	50
Fe	100		

Serbuk logam timah (Sn) yang digunakan dalam percobaan ini adalah serbuk timah murni produk E Merck, Jerman dengan ukuran partikel < 71 μm . Kandungan pengotor yang terdapat dalam serbuk ini adalah seperti tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi kimia bubuk logam Timah (Sn)

Nama Unsur	Bi	Cu	Fe	Pb	Sb
Kadar (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,02	< 0,05	< 0,02

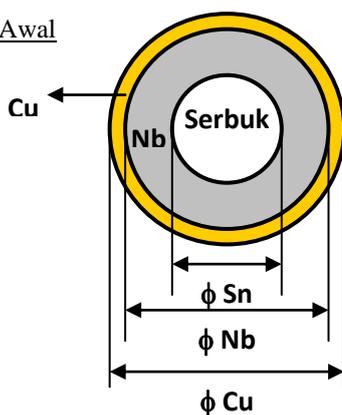
Pipa tembaga maupun batang tembaga murni yang digunakan dalam percobaan ini diperoleh di pasaran.

Tahap awal kegiatan penelitian pembuatan kawat superkonduktor jenis Cu-Nb-Sn adalah proses perlakuan panas terhadap *billet* dan tabung Cu. Hal ini dilakukan karena *billet* Cu yang telah mengalami proses pembentukan logam akan menjadi getas dan mudah putus bila dilakukan proses penarikan kawat. Untuk

mencegah agar kawat tidak mudah putus maka dilakukan proses rekristalisasi dengan perlakuan panas terhadap tabung Cu hasil proses pembentukan logam. Proses dilakukan dengan cara memanaskan tabung Cu pada temperatur 300°C dan variabel waktu pemanasan 3, 6, 12, 24, dan 48 jam. Aktivitas penelitian selanjutnya adalah preparasi sampel serbuk Nb dan Sn, yaitu berupa proses pencampuran serbuk Nb dan Sn dengan komposisi tertentu yang dilakukan dengan menggunakan HEM (*high energy milling*) selama 3 jam. Dengan kondisi seperti di atas, maka proses pencampuran dengan menggunakan HEM tidak mengakibatkan pembentukan fasa intermetalik^[10].

Pengerjaan pembuatan billet mono-filamen dan multi-filamen kawat superkonduktor meliputi proses permesinan serta penarikan kawat. Pembuatan billet mono-filamennya sendiri dilakukan dengan cara memasukkan lembaran niobium ke dalam silinder tembaga, dan selanjutnya memasukkan ke dalam selinder tersebut serbuk Nb-Sn pada komposisi tertentu. Gambar detail rencana billet mono-filamen dapat dilihat pada Gambar 4.

Ingot Awal



Gambar 4. Desain penampang ingot awal *mono-filamen* Cu-Nb-Sn

Keterangan gambar 4 :

ϕ Cu = 10,00 mm
 ϕ Nb = 8,33 mm
 ϕ core berisi serbuk Nb-Sn = 7,50 mm

Tebal lembaran Nb: $(8,33 \text{ mm} - 7,50 \text{ mm})/2 = 0,42 \text{ mm}$

Lebar lembaran Nb: 26 mm / 2,6 cm

Tebal tabung Cu: $(10 \text{ mm} - 8,33 \text{ mm})/2 = 0,85 \text{ mm}$

Panjang tabung/ingot : 100 mm atau 10 cm

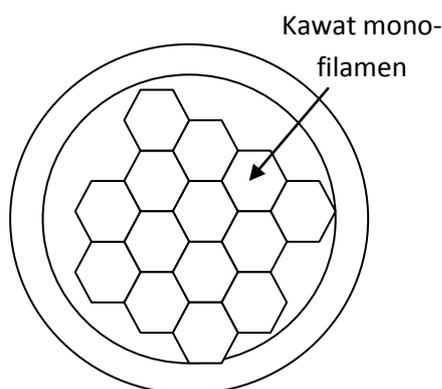
Billet mono-filamen awal dengan diameter 10 mm ini kemudian ditarik hingga diperoleh kawat dengan diameter 2,2 mm dan dilakukan proses rekristalisasi. Selanjutnya terhadap kawat mono-filamen ini dilakukan penarikan lagi sehingga diperoleh kawat mono-filamen berbentuk hexagonal dengan diameter 1,4 mm yang merupakan bahan utama untuk pembuatan kawat superkonduktor multi-filamen.

Pembuatan kawat multi-filamen dilakukan dengan cara memasukkan potongan-potongan kawat mono-filamen ke dalam tabung tembaga dengan diameter 10 mm hingga penuh. Selanjutnya tabung tembaga dengan kumpulan kawat mono-filamen tersebut akan ditarik kembali seperti yang telah dilakukan pada saat pembuatan kawat mono-filamen, sehingga diperoleh kawat multi-filamen dengan diameter 1,4 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5. Agar kawat multi-filamen ini dapat berfungsi sebagai kawat superkonduktor maka perlu dilakukan proses perlakuan panas terhadap kawat tersebut pada temperatur 700°C, sehingga campuran serbuk niobium dan timah dapat berdifusi dan membentuk fasa intermetalik Nb_3Sn ^[11-12]. Tahap akhir dari proses ini ialah analisis terhadap kawat hasil proses perlakuan panas berupa pengamatan tekstur dan morfologi dari kawat superkonduktor multi-filamen.

Billet mono-filamen awal dengan diameter 10 mm ini kemudian ditarik hingga diperoleh kawat dengan diameter

2,2 mm dan dilakukan proses rekristalisasi. Selanjutnya terhadap kawat mono-filamen ini dilakukan penarikan lagi sehingga diperoleh kawat mono-filamen berbentuk hexagonal dengan diameter 1,4 mm yang merupakan bahan utama untuk pembuatan kawat superkonduktor multi-filamen.

Pembuatan kawat multi-filamen dilakukan dengan cara memasukkan potongan-potongan kawat mono-filamen ke dalam tabung tembaga dengan diameter 10 mm hingga penuh. Selanjutnya tabung tembaga dengan kumpulan kawat mono-filamen tersebut akan ditarik kembali seperti yang telah dilakukan pada saat pembuatan kawat mono-filamen, sehingga diperoleh kawat multi-filamen dengan diameter 1,4 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5. Agar kawat multi-filamen ini dapat berfungsi sebagai kawat superkonduktor maka perlu dilakukan proses perlakuan panas terhadap kawat tersebut pada temperatur 700°C, sehingga campuran serbuk niobium dan timah dapat berdifusi dan membentuk fasa intermetalik Nb₃Sn^[11-12]. Tahap akhir dari proses ini ialah analisis terhadap kawat hasil proses perlakuan panas berupa pengamatan tekstur dan morfologi dari kawat superkonduktor multi-filamen.



Gambar 5. Desain geometri penampang ingot multi-filamen

Proses rekristalisasi terhadap *billet* dan tabung Cu yang dilakukan pada temperatur 300°C menunjukkan hasil bahwa dengan pemanasan pada temperatur 300°C diperlukan waktu pemanasan minimal selama 6 jam. Semakin lama waktu

pemanasan akan semakin lunak logam tembaga tersebut, sehingga dapat mencegah atau mengurangi terjadinya cacat logam pada saat proses pembentukan logam. Kenaikan temperatur dapat juga membantu mempercepat proses rekristalisasi. Percobaan pada temperatur 350°C memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan pemanasan pada 300°C akan tetapi memberikan konsekuensi lain yaitu terbentuknya fasa intermetalik Nb₃Sn yang terlalu dini. Pembentukan fasa intermetalik Nb₃Sn yang terlalu dini harus dihindari karena senyawa intermetalik Nb₃Sn mempunyai sifat getas dan rapuh sehingga mudah hancur. Pemanasan pada temperatur 350°C dengan waktu yang singkat akan membantu proses rekristalisasi dan mengurangi pembentukan fasa intermetalik Nb₃Sn.

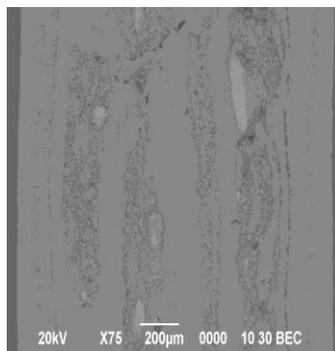
Percobaan yang dilakukan untuk membuat kawat mono-filamen telah dapat mereduksi billet mono-filamen tanpa terputus dari diameter awal 10 mm menjadi kawat mono-filamen dengan diameter kawat 1,4 mm. Kawat mono-filamen ini kemudian akan dipotong-potong sepanjang 10 cm sebagai bahan baku pembuatan kawat multi-filamen.

Proses pembuatan kawat multi-filamen ini dilakukan hingga diperoleh kawat multi-filamen yang berisikan 210 kawat mono-filamen di dalamnya. Agar kawat multi-filamen ini dapat berfungsi sebagai kawat superkonduktor maka harus dilakukan proses perlakuan panas terhadap kawat tersebut. Perlakuan panas dilakukan pada temperatur 700°C selama 96 jam dalam kondisi vakum, agar campuran serbuk niobium dan timah dapat berdifusi dengan baik dan membentuk fasa intermetalik Nb₃Sn serta tidak teroksidasi dengan oksigen dari luar^[10]. Tahap akhir dari proses ini ialah analisis terhadap kawat hasil proses perlakuan panas berupa pengamatan tekstur dan morfologi dari kawat superkonduktor multi-filamen. Analisis mikro struktur terhadap kawat hasil proses perlakuan panas dilakukan

dengan menggunakan SEM dan EDS. Hasil percobaan pembuatan kawat superkonduktor ini dapat dilihat pada tampilan Gambar 6-10.

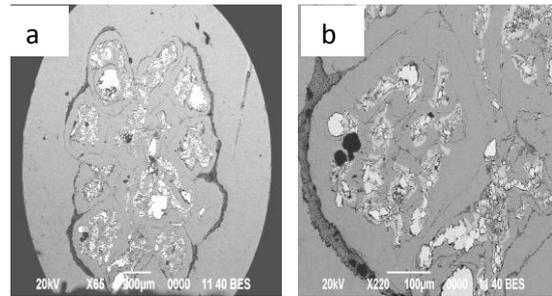
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 memperlihatkan hasil pengamatan dengan SEM terhadap penampang potongan membujur dari sampel sebelum dilakukan proses perlakuan panas. Pada gambar terlihat beberapa lapisan dari tembaga dan campuran serbuk Nb dan Sn.



Gambar 6. Hasil SEM terhadap penampang potongan membujur dari kawat multi-filamen yang mengandung fasa Nb₃Sn sebelum dilakukan proses perlakuan panas

Gambar 7(a) menunjukkan penampang melintang dari kawat multi-filamen sebelum proses perlakuan panas. Pada potongan melintang terlihat banyak bentuk yang melingkar-lingkar dari tiap-tiap kumpulan mono-filamen. Setiap lingkaran yang terlihat dalam kumpulan kawat multi-filamen tersebut terdiri dari 15 kawat mono-filamen yang mengandung campuran serbuk Nb dan Sn. Gambar 7(b) merupakan hasil perbesaran dari satu kelompok kawat multi-filamen dari Gambar 7(a). Kawat tersebut kemudian dipanaskan pada temperatur 700°C selama 96 jam agar campuran serbuk Nb dan Sn dapat berubah menjadi fasa intermetalik Nb₃Sn, sehingga kawat menjadi bersifat superkonduktor.

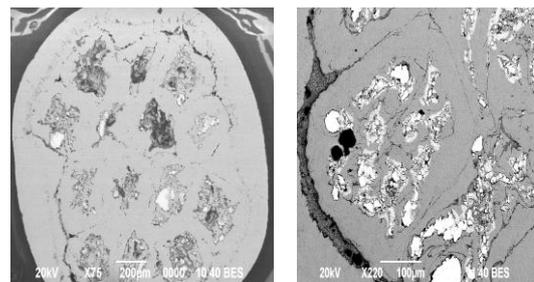


(a)

(b)

Gambar 7.(a) Hasil SEM terhadap penampang potongan melintang kawat multi-filamen yang mengandung fasa Nb₃Sn sebelum proses perlakuan panas, (b) Perbesaran dari salah satu area pada (a)

Gambar 8 menunjukkan penampang melintang dari kawat multi-filamen setelah proses perlakuan panas. Pada Gambar 8(a) dapat dilihat bahwa campuran serbuk Nb dan Sn dalam kelompok-kelompok kawat mono-filamen telah berubah menjadi kelompok-kelompok senyawa intermetalik Nb₃Sn. Hasil perbesaran salah satu kelompok tersebut dapat dilihat pada Gambar 8(b). Pada gambar ini penampang melintang sudah tidak terlihat lagi campuran serbuk Nb dan Sn dari setiap kawat mono-filamen karena telah berubah menjadi kelompok-kelompok fasa intermetalik Nb₃Sn.



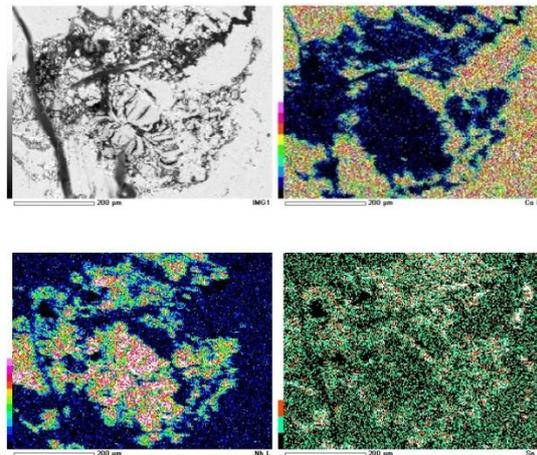
(b)

(b)

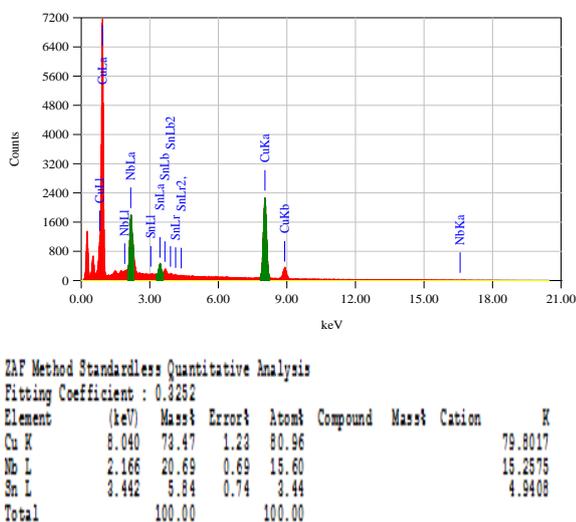
Gambar 8. (a) Hasil SEM terhadap penampang potongan melintang kawat multi-filamen yang mengandung fasa Nb₃Sn setelah proses perlakuan panas, (b) Perbesaran dari salah satu area pada (a)

Untuk lebih meyakinkan terjadinya pembentukan fasa intermetalik Nb₃Sn, maka terhadap sampel tersebut dilakukan analisis dengan EDS. Hasil pengamatan dengan EDS dapat dilihat pada Gambar 9 sedangkan hasil *mapping* unsur dapat

dilihat pada Gambar 10. Dari hasil analisis EDS dapat dilihat bahwa perbandingan persen massa Nb dan Sn adalah tiga setengah berbanding satu atau sekitar tiga berbanding satu yang identik dengan Nb_3Sn . Dari hasil *mapping* terhadap penyebaran unsur Cu, Nb dan Sn terlihat bahwa unsur Nb terlindungi dengan baik oleh unsur Cu. Hal sebaliknya pada pengamatan terhadap unsur Sn kurang memberikan hasil yang terlalu baik seperti terlihat pada gambar dimana unsur Sn tersebar merata hampir di seluruh permukaan meskipun penyebaran unsur ini masih tetap lebih dominan di tempat-tempat penyebaran unsur Nb.



Gambar 10. Hasil *mapping* kawat multi-filamen superkonduktor kawat multi-filamen yang mengandung fasa Nb_3Sn



Gambar 9. Hasil analisis dengan menggunakan EDS pada kawat multi-filamen yang mengandung fasa Nb_3Sn

KESIMPULAN

1. Setelah tahap proses pembentukan logam perlu dilakukan proses rekristalisasi agar *workability* dari material saat dibentuk kawat meningkat atau tidak mudah putus. Proses rekristalisasi dapat dilakukan pada temperatur $300^{\circ}C$ dengan waktu pemanasan minimum selama 6 jam.
2. Pemanasan pada temperatur yang lebih tinggi dari $300^{\circ}C$ akan mengakibatkan terbentuknya fasa intermetalik Nb_3Sn yang bersifat sangat rapuh.
3. Hasil analisis SEM dan EDS menunjukkan bahwa pemanasan optimal kawat multi-filamen pada temperatur $700^{\circ}C$ selama 96 jam untuk membuat campuran serbuk niobium dan timah dapat berdifusi dengan baik dan membentuk fasa intermetalik Nb_3Sn .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE CCAS. 2008. „Superconductivity: Present and Future Applications [Brochure]”. Coalition for the Commercial Application of Superconductors (CCAS) and IEEE Council on Superconductivity.

- [2] Smith, W.F. 1996. Principles of Materials Science and Engineering, 3rd Edition, New York : McGraw-Hill.
- [3] Lee, P. J. 2003. Superconductor: Wires and Cables: Materials and Processes. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*.
- [4] Larbalestier, D. 2010. „Superconductors for Superconducting Magnets. Applied Superconductivity Center”, Florida State University, USA.
- [5] Fischer, C.M. 2002. „Investigation of the Relationships between Superconducting Properties and Nb₃Sn Reaction Conditions in Powder-In-Tube Nb₃Sn Conductors”, Master of Science Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [6] Glowacki, B.A, Majoros, M dkk. 2003. „Composite Cu/Fe/MgB₂ Superconducting Wires And MgB₂/YSZ/Hastelloy Coated Conductors For AC And DC Applications”. *Supercond. Sci. Technol*, No. 16. Hal 297.
- [7] Tachikawa, K, Sakinada, K. Kobayashi. M.. 1993. „New A15 Nb₃(Al, Ge) Tape Prepared From Σ-Phase Powder”. *Cryogenic*. Vol.33. Hal 1091-1094.
- [8] Glowacki, B.A, Majoros, M. 1999. „Transport Ac Losses In (Bi,Pb)Srcacuo-2223/Ag Multifilamenary Tapes With Different Filamen Arrangements”. *Supercond. Sci. Technol* No. 13. Hal 125-136.
- [9] Glowacki, B.A. 2003. „Studies of HTS Materials and Applications”. *Springer-Verlag*, v.1 – Materials.
- [10] Firdiyono, F. Pramono, A. W dkk. 2011. „Percobaan Pembuatan Fasa Intermetalik Nb₃Sn dengan Proses Sintering Logam Niobium (Nb) dan Timah (Sn)”, *Majalah Metalurgi*, Vol 26 No. 3.
- [11] Patankar, S. N and Froes, F. H. 2009. „Formation of Nb₃Sn Using Mechanically Alloyed Nb-Sn Powder”. Institute for Materials and Advanced Processes, University of Idaho, Moscow.
- [12] Lindenhovius, J.L.H, Hornsveld, E.M. 2000. „Powder-in-Tube (PIT) Nb₃Sn Conductors for High-field Magnets”. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 10, No.