

Fabrikasi Kawat Resistansi Nol Berbahan MgB_2 /Stainless Steel dengan Variasi Reduksi Ukuran melalui Pengerolan Dingin terhadap Karakteristik Mekanik dan Struktur Mikro

**Satrio Herbirowo¹; Vinda Puspasari²; Heri Nugraha³; Eko Sulistiyo⁴;
Andika Widya Pramono⁵; Agung Imaduddin⁶**

^{1,2,3,5,6} Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Setu,
Tangerang Selatan

⁴ Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi – Institut Teknologi PLN Jakarta

¹ satr006@lipi.go.id

ABSTRACT

Magnesium Diboride (MgB_2) is a high potential material for medical and electrical applications with zero resistance and high efficiency. The raw materials of Mg powder with a purity of 98% and B amorphous with a purity of 95%, were mixed with a ratio of 1:2, ground for 2 hours using an agate mortar, and subsequently compacted and inserted into stainless steel (SS) tube by powder-in-tube (PIT). The SS tube was previously annealed at 900 °C for 1 hour. The sintering process was carried out using a muffle furnace at a temperature of 800°C for 1 hour, followed by cold wire rolling with gradual reduction. The samples were characterized for their mechanical properties using Vickers microhardness and ultimate tensile test machine. Surface morphologies of samples were observed using optical microscope and SEM-EDAX. Superconducting properties were measured with the cryogenic resistance measurement. The highest hardness value of 377,2 HV was achieved at a 60% size reduction along with the tensile strength of 1381 KN/mm. The results of the morphological observation showed homogeneous deformation without any cracks, with the grain shape tended to be crystalline. The superconductivity test showed the phenomenon of zero resistance at a critical temperature of 39.55K at a 40% reduction size.

Keywords: MgB_2 , cold rolling, mechanical properties, morphological properties, superconductivity

ABSTRAK

Magnesium diborida (MgB_2) adalah material berpotensi tinggi untuk aplikasi kesehatan dan kelistrikan, yang memiliki resistansi nol dan efisiensi tinggi. Bahan baku serbuk Mg dengan kemurnian 98% dan B amorf dengan kemurnian 95%, dicampur dengan dengan rasio 1:2 lalu digerus selama 2 jam menggunakan mortar agate kemudian dikompaksi dan dimasukkan ke dalam tabung stainless steel secara powder-in-tube (PIT). Tabung stainless steel sebelumnya dianil pada suhu 900 °C selama 1 jam. Proses sintering dilakukan menggunakan muffle furnace pada suhu 800°C selama 1 jam, yang diikuti oleh pengerolan kawat dingin dengan reduksi secara bertahap. Sifat mekanik kawat dikarakterisasi menggunakan alat uji kekerasan mikro Vickers dan alat uji tarik tegangan regangan. Pengamatan morfologi permukaan sampel dilakukan dengan mikroskop optik dan SEM-EDAX. Sifat superkonduktivitas diukur dengan alat cryogenic resistance. Berdasarkan hasil uji mekanik nilai kekerasan tertinggi (377,2 HV) diperoleh pada reduksi ukuran 60%, beserta kekuatan tarik sebesar 1381 KN/mm. Hasil observasi morfologi memperlihatkan deformasi homogen tanpa adanya retakan, dengan bentuk butir cenderung kristalin. Pengujian superkonduktivitas menunjukkan fenomena resistansi nol pada suhu kritis 39,55K dengan reduksi kawat 60%.

Kata kunci: MgB_2 , pengerolan dingin, sifat mekanik, sifat morfologi, superkonduktivitas

1. PENDAHULUAN

Magnesium diborida (MgB_2) sudah dikenal sejak tahun 1950 dan diketahui memiliki keunikan sifat superkonduktivitas oleh Nagamatsu et.al pada tahun 2001 dengan struktur hexagonal, nilai yang tinggi pada medan kritis (>40 T) dan suhu kritis yang tinggi sebesar 39 K [1]. MgB_2 sangat cocok dipakai untuk menggantikan Nb_3Sn dan NbTi sebagai pilihan untuk aplikasi skala besar pada suhu kritis 20 – 30 K sehingga Buzea et. al mengembangkan potensi besar dengan mensintesis magnesium dan boron dalam bentuk *bulk* [2]-[3]. Keunggulan dari MgB_2 yaitu ketersediaan bahan baku yang cenderung murah, struktur kristal sederhana, tinggi kepadatan dan sampai saat ini MgB_2 akan menjadi material yang berpotensi kuat pada bidang aplikasi kesehatan dan perangkat elektronik [4]-[5]. MgB_2 dapat dimanufaktur menjadi beberapa bentuk seperti contohnya tape, lapisan tipis dan kawat, selain itu proses manufaktur MgB_2 tergolong mudah dan membutuhkan sedikit biaya dibandingkan material superkonduktor lain [6]. Berdasarkan alasan di atas, MgB_2 dalam bentuk kawat dipilih untuk diteliti dalam penelitian ini dikarenakan sangat menarik dalam aplikasi superkonduktor. Kawat MgB_2 memiliki nilai potensial untuk aplikasi skala besar dimana produksi kawat dengan arus yang tinggi, kapasitas yang tinggi serta kawat yang panjang dapat diproduksi dengan biaya yang murah. *Powder in tube (in-situ/ex-situ)* merupakan salah satu metode yang simpel dan murah untuk memproduksi kawat MgB_2 [7]. Kovac et al mensintesis kawat MgB_2 menggunakan metode *powder in-tube ex situ* dimana serbuk MgB_2 diproses *sintering* sebelum diproses menjadi kawat [8]. Penggunaan metode *ex-situ* menunjukkan hasil yang optimum dan meminimalkan reaksi antara selubung baja tahan karat dengan MgB_2 yang berdampak pada pembentukan oksida. Choi et al juga menyimpulkan kemudahan proses doping karbon pada kawat superkonduktor MgB_2 menggunakan metode *powder in tube ex-situ* [9]. Penelitian ini menggunakan metode *powder in tube in-situ* dimana serbuk MgB_2 dimasukkan ke dalam selubung baja sebagai media pembentukan kawat sebelum proses *sintering*. Metode *powder in tube in-situ* dipilih berdasarkan faktor efisien dan lebih ekonomis dengan hasil yang menunjukkan sifat superkonduktivitas dan sifat mekanik yang baik [10]. Pada penelitian ini fabrikasi lanjut pada material MgB_2 dilakukan menggunakan tabung baja tahan karat sebagai bahan selubung yang lebih optimal karena tidak bereaksi ketika dipanaskan dan menghasilkan fasa MgB_2 yang lebih baik serta memiliki keunggulan lain yaitu biaya yang murah dan kemampuan deformasi yang baik serta dapat dilakukan perlakuan panas [11]-[12]. Proses pembentukan kawat selanjutnya dilakukan dengan proses *rolling* merupakan proses deformasi plastis yang merupakan metode pembentukan sederhana yang dapat meningkatkan sifat mekanik material namun menurunkan keuletan [13]. Faktor yang penting dalam pembentukan kawat MgB_2 adalah rasio dari area *cross-sectional* material inti terhadap area *cross-sectional* pembungkus karena dapat mempengaruhi kapasitas arus dan densifikasi material inti [14]. Fraksi komposisi dari Mg dan B pada kawat MgB_2 sangat penting untuk mencapai kerapatan arus kritis yang tinggi [15]. Berdasarkan penelitian sebelumnya, banyak dilakukan variasi rasio Mg dan penentuan suhu sinter optimal sekitar 750-850°C, dan masih ada kekurangan dalam pembentukan fase oksida dan fasa lain bersama dengan fase MgB_2 yang dapat mempengaruhi tingkat kepadatan serbuk dalam kawat [16]. Untuk hasil suhu transisi kritis juga cenderung fluktuatif diakibatkan konektivitas antar butir dan mampu bentuk saat dilakukan deformasi, sehingga dalam penelitian ini pemilihan tabung SS 316 yang di *annealing* pada suhu 900°C. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan mampu canai dingin setelah dilakukan sintesis MgB_2 melalui *sintering*. Pengaruh variasi reduksi ukuran dianalisis secara makro maupun mikro untuk mendapatkan produk kawat resistansi nol tanpa cacat dan dikarakterisasi lebih lanjut melalui uji sifat mekanik, morfologi permukaan dan uji superkonduktivitas. Uji mekanik mencakup uji sifat keras dengan *microvickers testing* dan kekuatan tarik. Pengamatan morfologi

permukaan *cross section* menggunakan mikroskop optik dan SEM serta dilanjutkan dengan uji resistansi pada kondisi kriogenik.

2. METODE/PERANCANGAN PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan serbuk Mg dengan kemurnian 98% dari Kanto Chemical Japan, serbuk B berbasis amorf dengan kemurnian 95% dari PT. Luoyang China, dan tabung *stainless steel* tipe 316 dengan diameter tabung awal 8 mm. Proses pembuatan kawat resistansi nol ini dimulai dengan preparasi dan pemotongan SS 316 *tube* dengan panjang 20 cm/sampel, dilanjutkan dengan pembubutan dan pengampelasan pada bagian ujung tabung. Selanjutnya dilakukan proses *annealing* pada suhu 900°C dengan arang karbon untuk melunakkan SS 316L *tube* dan meningkatkan mampu bentuk pada saat pengerolan.

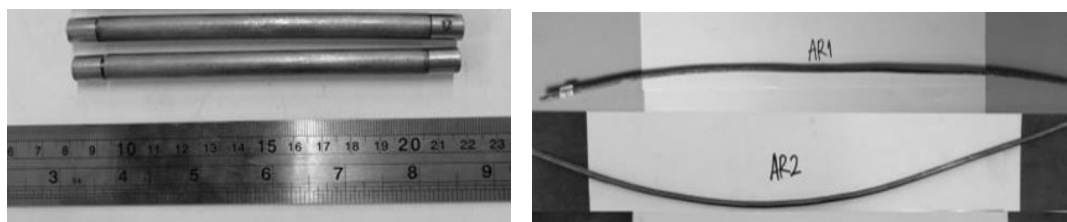
Penimbangan dan pencampuran bahan Mg dan B dilakukan dengan rasio berat 1:2 lalu digerus menggunakan *mortar agate* selama 2 jam agar bahan tersebut menjadi lebih padat dan homogen. Bahan Mg+B yang telah tercampur ini dimasukkan ke dalam tabung SS yang telah disiapkan kemudian ditutup dengan rod SS pada kedua ujungnya dan dikompaksi dengan tekanan 1 ton untuk memadatkan agar tidak ada-celah udara.

Proses sinter dengan tungku pemanas dilakukan dengan kenaikan suhu 10°C per menit hingga mencapai 800°C serta ditahan selama 1 jam dan dilanjutkan dengan proses pendinginan lambat di dalam tungku. Selanjutnya dilakukan proses *wire cold rolling* yang bertujuan untuk mengurangi ketebalan tabung menjadi lebih kecil, memperhalus permukaan kawat, dan menjadikan kawat lebih panjang. Pada proses pengerolan ini dilakukan variasi reduksi ukuran yaitu 60% dan 55% secara bertahap sebanyak 2 kali pengerolan setiap *dies*. Kemudian dilakukan pengukuran panjang serta diameter awal dan akhir seperti dijelaskan pada Gambar 1 dan Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi sampel sebelum dan setelah pengerolan kawat dingin

No	Kode Sampel	Massa MgB ₂	P _{awal}	P _{akhir}	Ø _{awal}	Ø _{akhir}
1	AR1	3,13 gr	10 cm	51 cm	8 mm	3,2 mm
2	AR2	3,13 gr	10 cm	41 cm	8 mm	3,6 mm

Dari sampel yang didapat dilakukan pemotongan secara *cross-section* dengan panjang 2 cm/sampel untuk dilakukan karakterisasi berupa uji sifat keras, pengamatan dengan mikroskop optik, *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDS), dan uji resistansi pada kondisi kriogenik. Pemotongan kawat dengan panjang 10 cm/sampel untuk dilakukan karakterisasi uji Mekanik berupa kuat tarik.

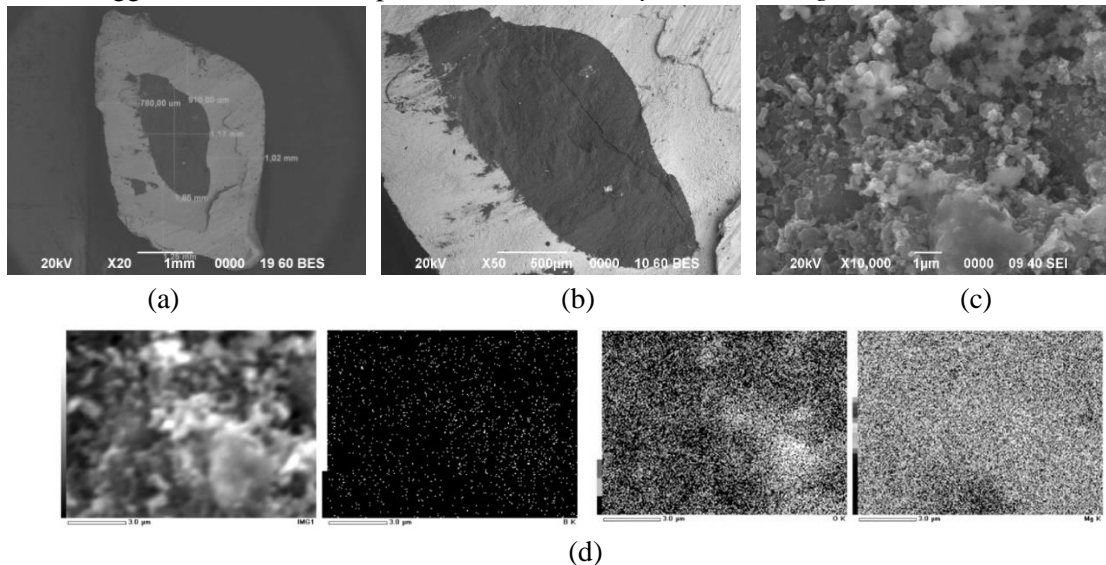


Gambar 1. a) Sampel kawat MgB₂ sebelum dan b) sesudah pengerolan dingin

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Morfologi kawat MgB_2 dengan reduksi 60% (AR1)

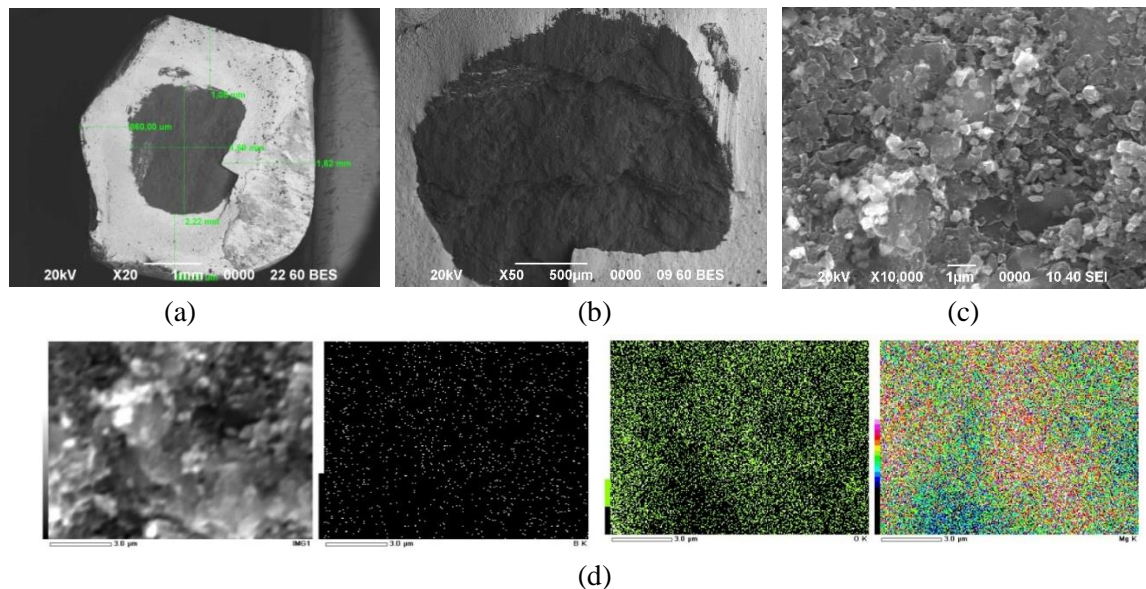
Analisis SEM yang dilakukan pada sampel MgB_2 dengan perbesaran 20 X, 50 X, dan 10000X serta menggunakan metode campuran antara *Secondary Electron Image* dan *Backscatter Electron*.



Gambar 2. Morfologi *cross-section* kawat MgB_2 dengan reduksi ukuran 60% pada perbesaran a)20 x, b)50 x, c) 10.000 x, dan d) pemetaan unsur (*elemental mapping*).

Gambar 2(a) menunjukkan morfologi kawat MgB_2 reduksi ukuran 60% pada perbesaran 20 x dari selubung SS dan diameter secara detail dari inti MgB_2 . Dari gambar tersebut dapat dianalisis secara visual bahwa tidak adanya retakan maupun porositas yang signifikan dan rata-rata ketebalan SS adalah 985 μm , dengan diameter inti 1,510 μm . Pada perbesaran 50 x (Gambar 2b) dapat dianalisis lebih lanjut bahwa antarmuka (*interface*) antara bahan MgB_2 dan SS cenderung kompatibel, tidak ada celah untuk menghindari adanya lompatan elektron saat diuji resistansinya. Pada perbesaran 10.000 x (Gambar 2c) dan pemetaan unsur (Gambar 2d) terlihat bahwa struktur mikro permukaan sampel memiliki bentuk butiran kecil dan sedikit aglomerasi (gumpalan) dan dari persebaran unsurnya cenderung merata dan homogen dengan masih terdeteksinya unsur oksida yang berarti sampel teroksidasi oleh unsur oksigen (O). Presipitasi dan aglomerasi memiliki keuntungan untuk sifat superkonduktor karena memiliki densitas yang lebih tinggi, meskipun juga memiliki sifat mekanik yang lebih rendah untuk aplikasi kawat [17].

Gambar 3a-d menunjukkan analisis SEM-EDS *mapping* yang dilakukan pada sampel MgB_2 pada reduksi 55% dengan perbesaran 20 x, 50 x, dan 10.000 x. Gambar 3 ini menunjukkan morfologi permukaan material superkonduktor MgB_2 dengan variasi perbesaran di sekitar batas atau antarmuka dengan tabung SS. Terdapat batas yang jelas antara sampel MgB_2 dengan tabung SS yang menunjukkan bahwa sampel tidak bereaksi dengan dinding tabung (Gambar 3a dan 3b). Pada Gambar 3b, struktur bentuk retakan mikro terjadi antara batas butir seperti kristal. Gambar 3c dan 3d menunjukkan struktur permukaan padat tetapi memiliki porositas yang cukup besar. Morfologi porositas ini diperkirakan terjadi karena rendahnya densitas MgB_2 selama proses pemadatan [18], dan adanya unsur oksida yang tersebar akibat masih adanya celah udara masuk saat proses sinter.



Gambar 3. Morfologi *cross-section* kawat MgB_2 dengan reduksi ukuran 55% pada perbesaran a)20 x, b)50 x, c) 10.000 x, dan d) pemetaan unsur (*elemental mapping*).

3.3. Analisis Sifat Mekanik

Tabel 2 dan 3 menunjukkan hasil uji sifat mekanik dari masing-masing sampel dengan variasi reduksi ukuran. Dapat dianalisis bahwa semakin besar reduksi ukuran, kekerasan dan kekuatan tarik meningkat, dengan nilai kekerasan tertinggi (377,2 HV) terjadi pada reduksi 60% dan kekuatan tarik maksimum 1381 N/mm. Kenaikan sifat mekanik tersebut diduga terjadi akibat deformasi plastis dan pengerasan regangan dari canai dingin, sehingga selubung SS cenderung mengeras melebihi batas *yield strength* [19].

Tabel 2. Data uji keras mikro vikers

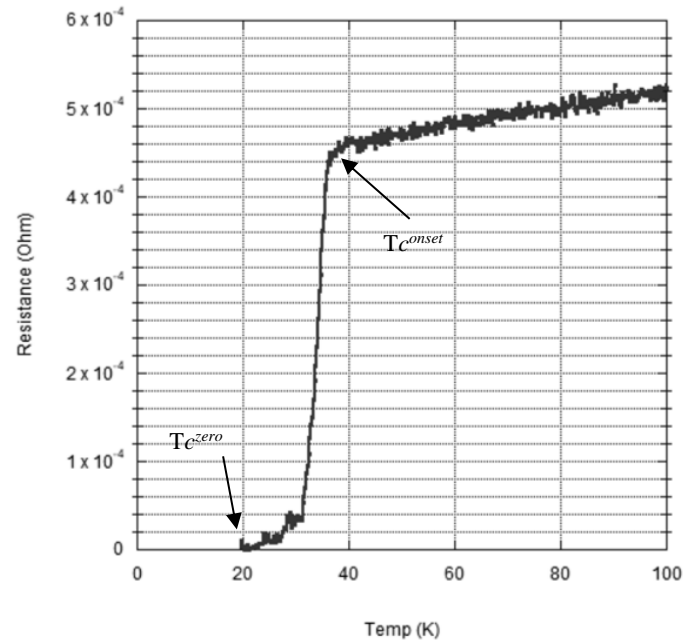
No	Kode Sampel	%Red.	$\varnothing_{\text{awal}}$ (mm)	$\varnothing_{\text{akhir}}$ (mm)	HV 1	HV 2	HV 3	HV 4	HV 5	Rata - Rata
1	AR1	60	8	3.2	376.1	380.4	380.2	380.4	369	377.2
2	AR2	55	8	3.6	370.6	356.4	374.8	369.6	363.3	366.9

Tabel 3. Data uji tarik dan elongasi

No	Kode	\varnothing (mm)	A_0 (mm)	F_m (kN)	σ_u		ϵ (%)
					(N/mm)	(Kgf/mm)	
1	AR1	3,2	8,0	11,1	1381	14076	8,0
2	AR2	3,6	10,2	5,3	521	5310	8,0

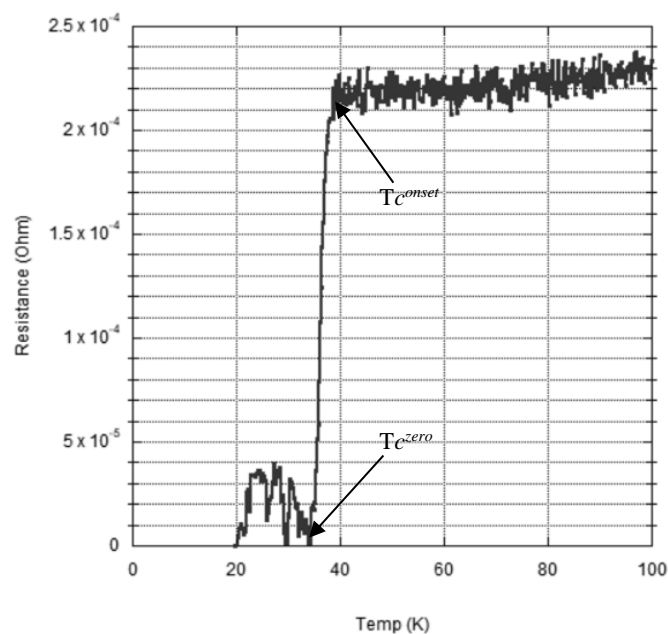
3.4. Analisis Resistansi Kriogenik

Analisis sifat superkonduktivitas dilakukan pada sampel kawat MgB_2 hasil proses fabrikasi dengan pengukuran resistansi dari suhu ruang hingga 20K. Hasil analisis sifat superkonduktivitas pada sampel ini dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.



Gambar 4. Grafik hresistansi terhadap penurunan suhu *cryogenic* pada kawat reduksi ukuran 60%

Gambar 4 menunjukkan hasil analisis resistivitas terhadap perubahan temperatur memiliki sifat superkonduktivitas dan terlihat kurva transisi yang cukup baik pada suhu kritis T_c^{Onset} 39,55 K dan T_c^{Zero} 22,88 K. Hal tersebut dapat dikonfirmasi sampel kawat ini berupa superkonduktor yang memiliki konektivitas butir antar partikel yang baik dan sedikit *noise* karena senyawa magnesium boron bersifat kristalin dan oksida tidak mempengaruhi secara signifikan[20]



Gambar 5. Grafik resistansi terhadap penurunan suhu *cryogenic* pada kawat reduksi ukuran 55%

Gambar 5 mengalami resistansi nol juga pada suhu kritis onset T_c^{Onset} 38,88 K dan suhu kritis nol T_c^{Zero} 34,22 K yang masih mengalami *flux pinning* akibat adanya senyawa pengotor di suhu rendah yang kemungkinan besar kurang padatnya sampel dan adanya porositas.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Pembuatan material superkonduktor $\text{MgB}_2/\text{SS-316}$ berhasil dilakukan melalui proses *in-situ powder in tube* menggunakan selubung baja tahan karat SS-316 dilanjutkan proses pembentukan kawat dengan proses *cold rolling*. Pengujian sifat mekanik berupa uji sifat keras dan sifat kekuatan tarik menunjukkan nilai kekerasan yang paling tinggi adalah pada sampel kawat MgB_2 yang diberi perlakuan *annealing* dan 60% reduksi yaitu 377,2 HV dan kekuatan tarik 1381 KN/mm. Hal ini terjadi karena proses *strain hardening* yang terjadi saat proses pengerolan dingin dari ukuran diameter kawat yang awalnya besar menjadi lebih kecil yang membuat sampel MgB_2 menjadi lebih keras. Berdasarkan hasil uji SEM-EDS memperlihatkan morfologi permukaan berbentuk aglomerasi (gumpalan-gumpalan) partikel pada morfologi sampel. Selain itu, dapat dilihat dari hasil EDS bahwa dengan perlakuan *annealing* dan 60% reduksi dikatakan lebih mengurangi adanya reaksi oksidasi karena dapat membuat core MgB_2 lebih padat. Dari hasil mapping juga dapat dilihat bahwa MgB_2 terdistribusi secara seragam dalam keseluruhan gambar SEM, dari hasil mapping dari perbesaran 10.000X menunjukkan morfologi permukaan sampel pada memiliki kepadatan butiran yang merata dan homogen. Hasil mapping tersebut juga menunjukkan adanya sedikit unsur baru oksida. Hasil uji *Cryogenic Magnet* membuktikan sampel memiliki sifat superkonduktivitas dimana pada kawat MgB_2 dengan proses *annealing* dan 60% reduksi didapat T_c^{Onset} sebesar 39,55 K dan T_c^{Zero} sebesar T_c^{Zero} 22,88 K.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia atas fasilitas alat laboratorium dan Intitut Teknologi PLN atas dana kegiatan riset dengan No Hibah 017/1/B04/PU/IT-PLN/2021, serta para peneliti hingga teknisi Pusat Penelitian Metalurgi dan Material LIPI atas dukungan dan bantuannya terhadap pelaksanaan penelitian dan penulisan artikel.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rodrigues D, Da Silva LBS, Metzner VCV, Hellstrom EE. (2012). Superconducting properties of MgB_2 with addition of other AlB_2 -type diborides and carbon sources, prepared using high energy ball milling and HIP. *Physics Procedia*.;36:468–74. doi: 10.1016/j.phpro.2012.06.219
- [2] Cristina B, Tsutomu Y. (2001). Review of the superconducting properties of MgB_2 . *Superconductor Science and Technology*. 14(11):R115. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/14/11/201>
- [3] Bascunan J. (2010). CONSTRUCTION AND TEST OF A 500 MHz/200 mm RT BORE SOLID CRYOGEN COOLED Nb_3Sn MRI MAGNET. *AIP Conference Proceedings* 1218, 523 <https://doi.org/10.1063/1.3422398>.
- [4] Glowacki BA, Majoros M. (2002). MgB_2 conductors for dc and ac applications. *Phys C Supercond its Appl*. 372–376(PART 2):1235–40. 10.1016/S0921-4534(02)00981-4.
- [5] Karaboğa F. (2019). Effect of Rapidly Annealing Process on MgB_2 Superconducting Wires. *Sakarya University Journal of Science*. 23(44066):993–1004. <https://doi.org/10.16984/aufenbilder.552659>.
- [6] Rafieazad M, Balci Ö, Acar S, Somer M. (2017). Review on magnesium diboride (MgB_2) as excellent superconductor: Effects of the production techniques on the superconducting properties. *Journal of Boron*. 2(2):87–96.
- [7] Glowacki BA, Majoros M, Vickers M, Evetts JE, Shi Y. (2001). Superconductivity of powder-in-tube MgB_2 wires. *Superconductor Science and Technology*. p. 193–9. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/14/4/304>.

-
- [8] Kovac P, Husek I, Melisek T, Rosova A, Dobrocka E. (2021). Effect of grain size selection in ex-situ made MgB₂ wires. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 583(1353826):1–4. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2021.1353826>.
- [9] Choi S, Patel D, Kim JH, Kumakura H, Matsumoto A, Nishijima G, et al. (2021). Evaluation and control of residual amorphous phases in carbon-doped MgB₂ superconductors. *Journal of Alloys and Compounds*. 864:158867. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158867>
- [10] Vinod K, Varghese N, Rahul S, Syamaprasad U. (2009). Preparation of in situ MgB₂/Fe superconducting tapes with highly densified core by hot pressing of electrically self-heated PIT wires. *Materials Science and Engineering: B*. 164(2):131–4. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2009.08.008>.
- [11] Varghese N, Vinod K, Abhilash Kumar RG, Syamaprasad U, Sundaresan A. (2007). Influence of reactivity of sheath materials with Mg/B on superconducting properties of MgB₂. *Journal of Applied Physic*. 102(4):0–4. <https://doi.org/10.1063/1.2773696>.
- [12] Rasyadi MEH, Yudanto SD, Imaduddin A, Sawitri D. (2018). Fabrication of MgB₂ monofilament wire by in-situ using powder-in-tube (PIT) method. *AIP Conference Proceedings*. 1945, 020030. <https://doi.org/10.1063/1.5030252>.
- [13] Ahmad I, Hansdah JS, Sarangi SN, Sarun PM. (2020). Enhanced magnetic field dependent critical current density of MWCNT doped magnesium diboride superconductor. *Journal of Alloys and Compounds*. 834:155033. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155033>.
- [14] Kováč P, Hušek I, Pachla W, Kulczyk M, Melišek T, Dvůrák T. (2011). As-deformed filament's density and transport currents of MgB₂/Ti/Glidcop wire. *Journal of Alloys and Compounds*. 509(35):8783–7. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.06.071>.
- [15] Güçlü N. (2011). Micro-indentation study of Mg-addition MgB₂ superconducting wires. *Journal of Alloys and Compounds*. 509(5):1691–5. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.178>.
- [16] Aksu E. (2013). Study of MgB₂ phase formation by using XRD, SEM, thermal and magnetic measurements. *Journal of Alloys and Compounds*. 552(376–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.088>
- [17] Sofyan N, Setiawan MT, Herbirowo S, Imaduddin A. (2019). Synthesis and characterization of SiC and CNT doped MgB₂ superconducting wire. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 541(1). DOI: 10.1088/1757-899X/541/1/012055.
- [18] Imaduddin A, Samsulludin, Wicaksono MR, Saefuloh I, Herbirowo S, Yudanto SD, et al. (2019). The doping effects of SiC and carbon nanotubes on the manufacture of superconducting monofilament MgB₂ wires. *Materials Science Forum*. 966, 249–256 p. 10.4028/www.scientific.net/MSF.966.249.
- [19] Herbirowo S, Imaduddin A, Hendrik, Pramono AW, Sunardi, Saefuloh I. (2021). In-situ manufacturing of sic-doped mgb₂ used for superconducting wire. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*. 45(2):175–9. <https://doi.org/10.18280/acsm.450210>.
- [20] Fujii H, Kitaguchi H. Superconducting properties of sintered ex situ MgB₂ tapes through ball milling process as a function of crystallite size in the as-milled and sintered states. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 583:1353838. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2021.1353838>