

Pengaruh Doping Nikel dan Suhu Sinter pada Pembuatan Kawat Superkonduktor Magnesium Diborida

Satrio Herbirowo^{1*}, M. Nur Hanafi², Agung Imaduddin¹, Edy Priyanto Utomo¹, Hendrik¹, Adhitya Trenggono², Erlina Yustanti²

¹Pusat Penelitian Metalurgi dan Material – LIPI Gedung 470 Kawasan Puspiptek - Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

²Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jenderal Sudirman Km 3 Cilegon, Banten 42435, Indonesia

*satr006@lipi.go.id

ABSTRACT

Improvement of MgB_2 superconducting properties through the addition of doping has been done. Even so, the manufacture of MgB_2 superconducting wire has not been optimally produced due to porosity formed from the MgB_2 layer structure. The purpose of this study was to analyze the effect of adding nickel doping to the value of crystallinity and optimum density and temperature in the synthesis of MgB_2 -based superconductor wire. The process variables in the sample used are Ni doped weight percent variation and sintering temperature. Characterizations used include Xray Diffraction (XRD), Scanning Electron Micoscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS), and Cryogenic Magnets. The manufacturing process uses powder metallurgy with in-situ powder in tube method and wire rolling manufacturing. Rolling is done by reducing the diameter of 6 mm to 4 mm, and the initial length of 10 cm to ± 26 cm. XRD results showed that the nickel doped sample produced MgB_2 primary phase and $MgNi_{2.5}B_2$ secondary phase and some impurities (MgO and Mg) with crystallite size increased more than MgB_2 without doping. From the SEM image, the sample appears to show a decrease in the amount of porosity. The sintered $750^\circ C$ sample is the optimal temperature in synthesizing nickel doped MgB_2 superconductors because it has the highest on T_c of 42.53 K and the lowest porosity in nickel doping of 20 wt. % is of 13.5% of porosity.

Keywords: Superconductor, Magnesium diboride, nickel doping, porosity.

ABSTRAK

Peningkatan sifat superkonduktor MgB_2 melalui penambahan doping telah banyak dilakukan. Meskipun begitu, pembuatan kawat superkonduktor MgB_2 belum secara optimal dihasilkan akibat porositas yang terbentuk dari struktur lapis MgB_2 . Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis efek penambahan doping nikel terhadap nilai kristalinitas dan kepadatan serta temperatur optimum dalam sintesis kawat superkonduktor berbasis MgB_2 . Variabel proses pada sampel yang digunakan yaitu variasi persen berat doping Nikel dan temperatur sintering. Karakterisasi yang digunakan meliputi Xray Diffraction (XRD), Scanning Electron Micoscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS), dan Cryogenic Magnet. Pembuatannya menggunakan proses metalurgi serbuk dengan metode powder in tube secara in-situ dan manufaktur pengerolan kawat. Pengerolan dilakukan reduksi ukuran diameter 6 mm menjadi 4 mm, serta panjang awalnya 10 cm menjadi ± 26 cm. Dari hasil XRD menunjukkan bahwa sampel dengan doping nikel menghasilkan fasa primer MgB_2 dan fasa sekunder $MgNi_{2.5}B_2$ serta beberapa pengotor (MgO dan Mg) dengan ukuran kristalit lebih meningkat dibandingkan MgB_2 tanpa doping. Dari gambar SEM, sampel tampak menunjukkan penurunan jumlah porositasnya. Sampel yang disinter $750^\circ C$ merupakan temperatur optimal dalam mensintesis superkonduktor MgB_2 yang didoping nikel karena memiliki T_c onset

tertinggi sebesar 42,53 K dan porositas terendah pada pendopingan nikel sebesar 20 persen berat yaitu sebesar 13,5% porositas.

Kata kunci: superkonduktor, magnesium diborida, doping nikel, porositas.

PENDAHULUAN

Magnesium diboride (MgB_2), yang baru ditemukan pada tahun 2001 oleh Nagamatsu dkk, merupakan material superkonduktor MgB_2 dengan temperatur kritis ($T_c = 39$ K) dan bahan berbasis logam yang mempunyai T_c tertinggi sehingga dapat digunakan pada suhu operasional 20-25 K dalam kondisi *cryocooler* yang lebih murah. Penelitian dan pengembangan material MgB_2 yang dilakukan diharapkan dapat menggantikan superkonduktor suhu rendah seperti NbTi dan Nb_3Sn karena selain mempunyai nilai temperatur kritis yang lebih tinggi, superkonduktor MgB_2 berbahan dasar Mg merupakan sumber daya yang melimpah dan lebih murah dibandingkan dengan NbTi maupun Nb_3Sn [1]. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Erhan aksu, mengenai pengaruh variasi temperatur *sintering*, mikrostruktur heksagonal fasa MgB_2 meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *sintering* dari 750 sampai 950°C [3] dan penelitian oleh Qian Zhao, dkk, di dapat hasil bahwa penambahan *doping* nikel pada bahan magnesium diborida dapat meningkatkan rapat arus kritis (J_c), selain itu Ni dapat memperbaiki karakter dari kristalinitas dan konektivitas antar partikel serta dapat meningkatkan kepadatan sehingga mampu menurunkan porositas dan menurunkan suhu *sintering* dalam mensintesis superkonduktor MgB_2 [4].

Dalam pengaplikasian teknologinya superkonduktor biasa dibuat dalam bentuk kawat. Proses pembuatan kawat pada penelitian ini menggunakan metode *powder in tube* secara *in situ* dimana memiliki kelebihan dapat dipanaskan pada kondisi atmosferik sehingga tidak perlu dialiri gas argon untuk kondisi *inert* sehingga lebih sederhana dan lebih murah. Pada metode ini, serbuk Mg dan serbuk B dengan komposisi stoikiometri yang diinginkan dimasukkan kedalam tabung logam seperti Ni, Cu, atau *stainless steel* (SS). Pada penelitian ini menggunakan tabung terbuat dari baja SS 304, yang jauh lebih murah dibandingkan tabung logam Ni dan Cu dan dari hasil karakterisasi memperlihatkan dengan penggunaan tabung berbahan *stainless steel* di dapat fasa MgB_2 baik terbentuk karena serbuk tidak bereaksi dengan tabungnya [2].

Selanjutnya kami akan mencoba memvariasikan temperatur *sintering* dan persen berat *doping* nikel pada pembuatan kawat superkonduktor sehingga diharapkan mendapat parameter temperatur optimum dalam sintesis kawat superkonduktor berbasis SS/ MgB_2 dan dievaluasi efek penambahan *doping* nikel terhadap nilai kristalinitas dan kepadatan mikrostruktur kawat MgB_2 .

METODE

Bahan yang digunakan adalah serbuk Magnesium (kemurnian 98%, Sigma aldrich) dengan ukuran ~100 mesh, serbuk Boron (kemurnian 95%, merek KGaA, *Germany*), serbuk nikel (kemurnian 99%, merek KGaA, *Germany*) dengan ukuran 10 μm dan tabung *stainless steel* tipe 304. Proses diawali dengan preparasi tabung SS 304 dengan pemotongan tabung masing-masing dengan panjang 10 cm lalu dilanjutkan proses *annealing* untuk meningkatkan formabilitas tabung tersebut kemudian dilakukan pembubutan dan pembersihan dan terakhir ditutup dengan *rod* penutup.

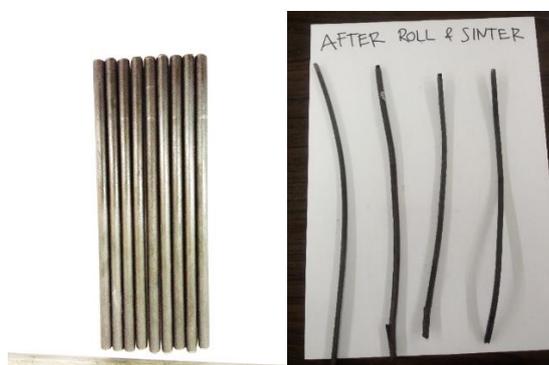
Selanjutnya serbuk ditimbang dengan komposisi yang telah ditentukan sesuai perhitungan stoikiometri. Adapun variasi *doping* yang digunakan yaitu serbuk Ni dengan 3 variasi komposisi berat masing-masing *dopan* sebesar 0; 10 %, dan 20% berat. Dalam perhitungan berat dalam gram disesuaikan dengan volume tabung.

Campuran serbuk kemudian digerus menggunakan *mortar agate* selama 1 jam hingga menjadi homogen. Lalu dilanjutkan proses memasukkan serbuk kedalam tabung SS 304 dan ditutup. Sampel kemudian dilanjutkan ke proses pembuatan kawat menggunakan alat *wire rolling*. Proses ini berfungsi untuk merubah tabung SS 304 yang berisi serbuk untuk dijadikan kawat superkonduktor sehingga mereduksi ukuran tabung tersebut dengan gaya tekan putar sebelum dilakukan proses pemanasan serta membuat serbuk di dalam tabung menjadi lebih padat ^[5].

Kawat hasil proses *rolling disinter* guna membentuk ikatan antar atom, densifikasi, mengeliminasi porositas dan mesintesis serbuk menjadi superkonduktor MgB₂. Proses *sintering* dilakukan pada 3 variasi temperatur, yaitu 750, 850 dan 950°C lalu ditahan selama 1 jam pada masing-masing temperatur, kemudian dibiarkan dingin didalam *furnace*. Hasil dari *sintering* kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan X-ray Diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy SEM/EDS *Mapping* dan *Cryogenic magnet* guna mengetahui fasa-fasa yang muncul melalui pola difraksi, morfologi struktur mikro yang terbentuk dan sifat superkonduktivitas yang ditandai dengan mengukur resistivitas dari material tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

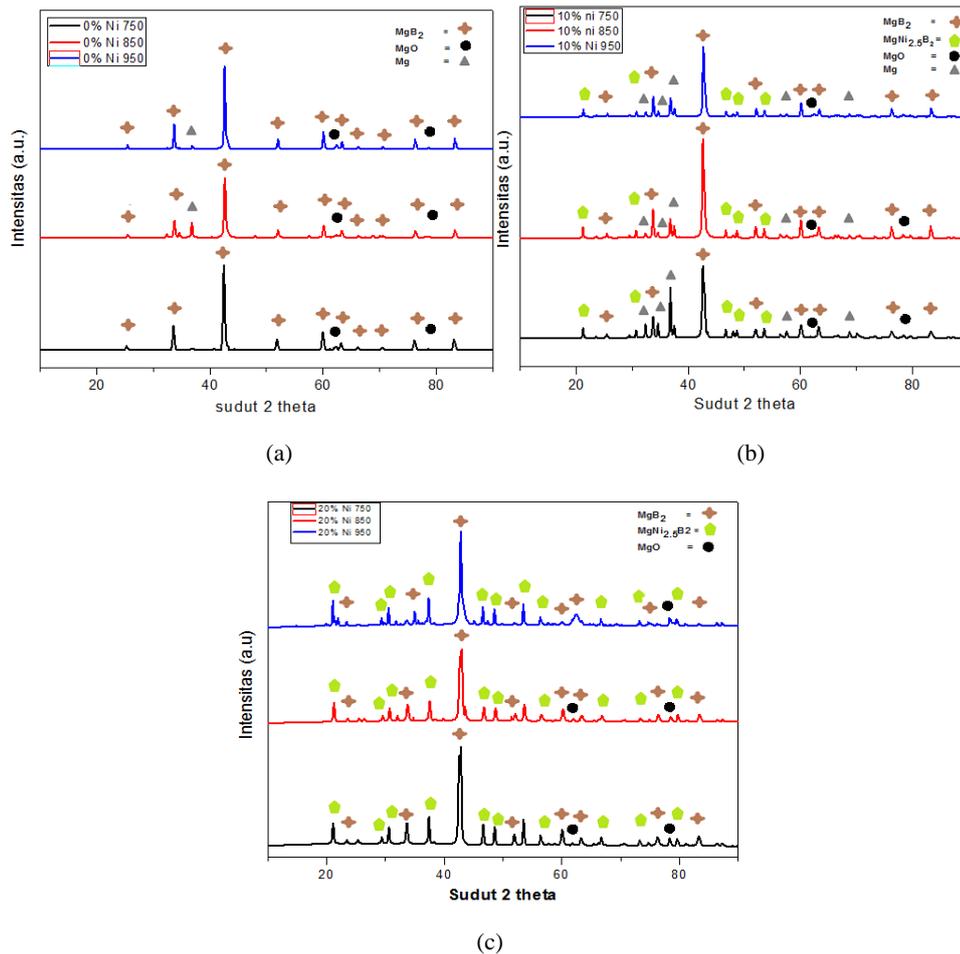
Penelitian ini merupakan proses manufaktur kawat superkonduktor yang berbahan dasar MgB₂ dengan beberapa variasi yaitu variasi *doping* dan variasi suhu sinter yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kawat dibuat dengan metode *powder in tube* secara *in situ* yang mana dilanjutkan *wire rolling* dimana terjadi perubahan dimensi yang awalnya sebelum dilakukan proses *rolling* tabung tersebut berdiameter 6 mm dengan panjang 10 cm, namun setelah dilakukan proses *rolling* dimensinya berubah keukuran diameter 4 mm dengan panjang sekitar 26 cm, bervariasi tergantung dari proses penekukan untuk menutup pada bagian ujung kawat, yang tidak sama antara satu tabung dengan tabung lainnya.



Gambar 1. Tabung SS 304 sebelum proses dan kawat setelah proses *rolling* dan *sintering*

Pengaruh penambahan *doping* nikel pada pembentukan fasa dan kristalinitas

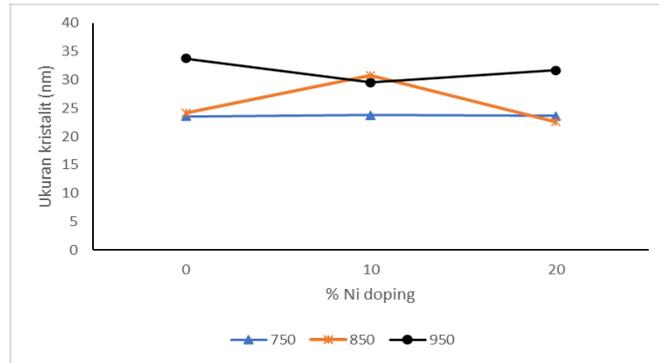
Pengaruh penambahan *doping* nikel terhadap fasa yang terbentuk dapat dilihat dari Gambar 2 hasil analisis XRD dimana dibaca dari pola difraksi yang muncul dari ketiga variasi % *doping* pada ketiga temperatur *sintering* yaitu 750°C, 850°C, dan 950°C.



Gambar 2. Pola difraksi XRD dengan variasi doping Ni (a)0%, (b)10%, (c)20% berat pada 3 temperatur sintering

Dari ketiga variasi % *doping* Ni pada setiap temperatur dari pola difraksi pada Gambar 2, didapat fasa MgB_2 sebagai fasa primer atau fasa utama dengan database no referensi ICSD 98-010-8064 yang terbentuk dimana membuktikan bahwa serbuk Mg dan B berhasil disintesis dan bereaksi dengan baik. Selanjutnya pada pola difraksi dengan penambahan *doping* Ni dengan variasi *doping* 10% dan 20 % Ni didapat fasa sekunder $MgNi_{2.5}B_2$ dengan database referensi 98-010-0111 dimana fasa ini merupakan reaksi antara Ni dengan Mg dan B dan dapat diperoleh di atas $600^\circ C$. Selanjutnya didapat juga fasa MgO dan unsur Mg merupakan pengotornya. Fasa MgO dengan database referensi ICSD 98-008-8058 bereaksi dengan Mg sehingga menjadi MgO dan bisa terjadi juga akibat proses *solid state* serbuk Mg didalam tabung yang belum maksimal sehingga berikatan dengan oksigen yang terperangkap dalam tabung pada saat proses berlangsung. Unsur Mg sendiri akibat masih adanya Mg yang belum meleleh sempurna pada saat proses *sintering* di dalam tabung SS 304 tersebut. Dari ketiga variasi tersebut terlihat semakin besar % *doping* nikel yang ditambah maka fasa sekunder $MgNi_{2.5}B_2$ juga semakin banyak terbentuk dan tidak terdapat pada variasi 0% Ni atau tanpa *doping*. Hal ini menyatakan fasa ini muncul akibat penambahan dari *doping* nikel.

Dari analisis data XRD juga dilihat pengaruh *doping* Ni terhadap kristanilitas yang mana dapat diketahui dengan menghitung ukuran kristalit atau *crystallite size* dengan menggunakan 2 metode yaitu dapat menggunakan *software HighScore Plus* (HSP) dan perhitungan manual menggunakan Debye Scherrer *equation*.

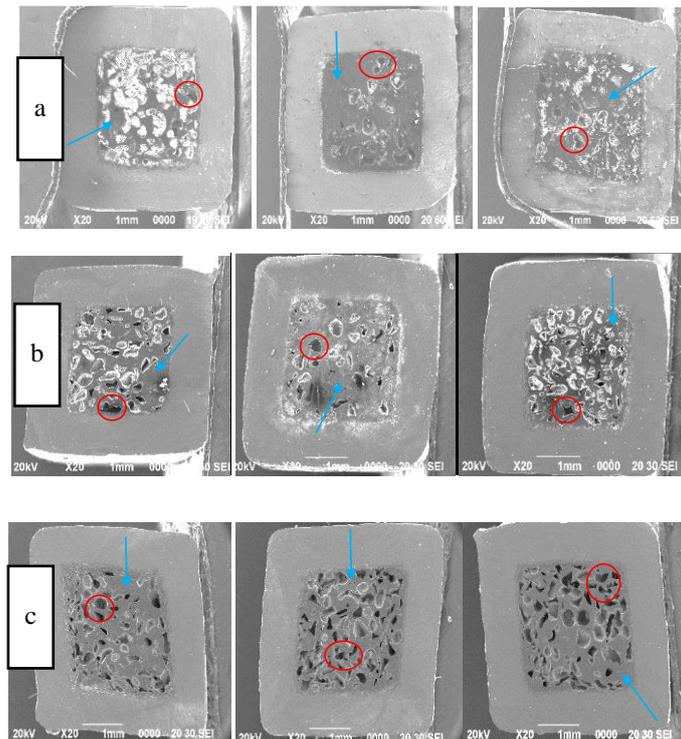


Gambar 3. Grafik Ukuran kristalit (Scherrer equation) Terhadap Temperatur *Sintering* Dan % *Doping* Ni

hasil perhitungan menyatakan bahwa pada sampel dengan temperatur *sintering* 750°C dengan penambahan *doping* Ni pada kedua metode cenderung meningkatkan ukuran kristalit, dan yang memiliki ukuran kristalit terbesar yaitu dengan penambahan *doping* 10% Ni. Ukuran kristalit terbesar juga terdapat dengan penambahan 10% Ni, sedangkan pada temperatur 950°C sama dengan nilai FWHM yaitu berkebalikan dengan dua temperatur lainnya, dimana penambahan *doping* Ni malah menurunkan sedikit ukuran kristalitnya dan memiliki ukuran kristalit terbaik pada sampel 0% Ni. Hal ini bisa terjadi karena temperatur *sintering* yang terlalu tinggi menyebabkan fasa MgB_2 terdekomposisi dan muncul banyak fasa pengotor seperti MgO ^[6]

Pengaruh penambahan *doping* nikel dan temperatur *sintering* pada morfologi dan struktur mikro serta porositas

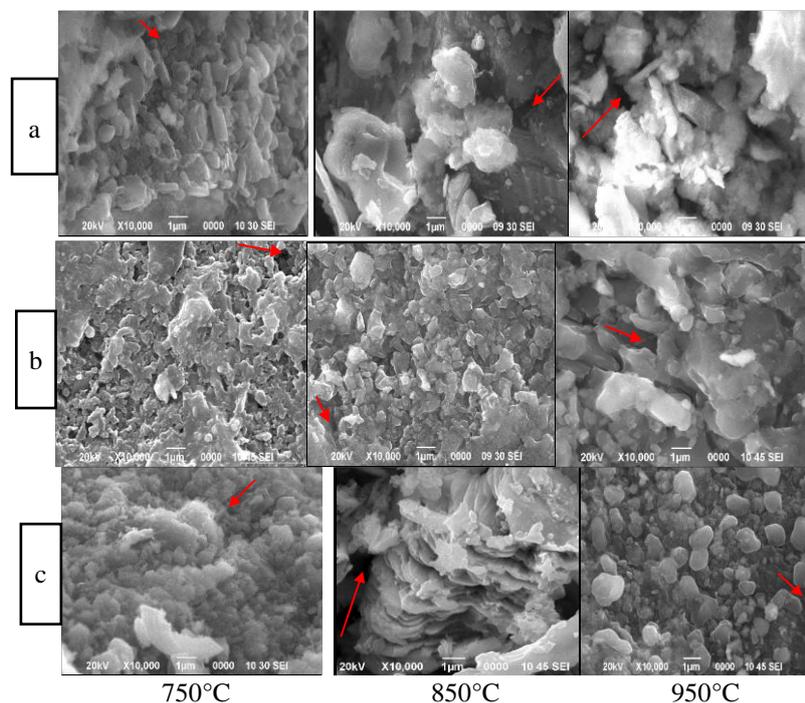
Karakterisasi dengan menggunakan SEM-EDS *mapping* dapat dilihat pengaruh *doping* Ni dan variasi temperatur *sintering* terhadap morfologi permukaan dan struktur mikro kawat superkonduktor MgB_2 seperti terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5



Gambar 4. Hasil SEM penampang melintang kawat pembesaran 20X dengan *doping* Ni (a) 0%, (b) 10%, dan (c) 20%

Gambar 4 merupakan hasil pengamatan SEM secara makro penampang melintang kawat pada temperatur *sintering* 750°C, 850°C dan 950°C, dimana dari gambar terlihat masih terdapat porositas. Hal ini berarti kurang terbentuknya konektifitas antar butir yang mengakibatkan banyaknya lubang-lubang yang terbentuk. Porositas ini terjadi karena reduksi volume dari reaksi $Mg+2B$. Proses *sintering* yang diberikan pada kawat mengakibatkan Mg berubah fasa menjadi *liquid* dan menutupi Boron. Hal ini mengakibatkan terjadinya reduksi volume intrinsik dan meninggalkan ruang yang menyebabkan terjadinya porositas^[7].

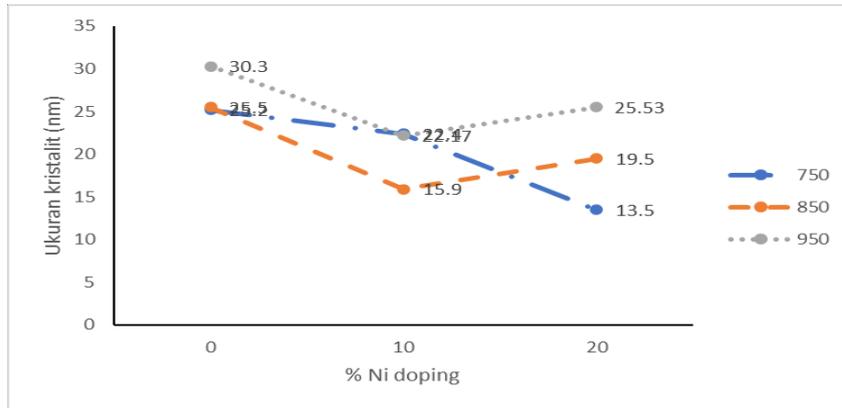
Terlihat juga seluruh bahan *stainless steel* dengan ketebalan dinding dibawah 1 mm menyatu dengan bahan serbuk MgB_2 tanpa ada retakan. Hal tersebut menunjukkan kawat ini berupa kawat *monofilament*. Warna hitam gelap yang dan tampak bolong yang dilingkari merupakan contoh porositas yang terjadi sedangkan warna abu-abu selain yang bewarna gelap yang ditandai garis biru merupakan fasa MgB_2 yang terbentuk^[8]. Dari pengaruh temperatur terlihat semakin tinggi temperatur maka semakin banyak poros yang terbentuk. Namun dari pengaruh *doping* Ni pada pembesaran 20 X ini terlihat kepadatan meningkat dengan penambahan *doping* Ni 10% berat dibandingkan pada kawat tanpa *doping*, namun pada penambahan *doping* Ni 20% kepadatan terlihat menurun karena porositas semakin jelas terlihat.



Gambar 5. Hasil SEM kawat MgB_2 pembesaran 10000 X dengan variasi *doping* Ni (a)0%, (b)10%, dan (c)20%

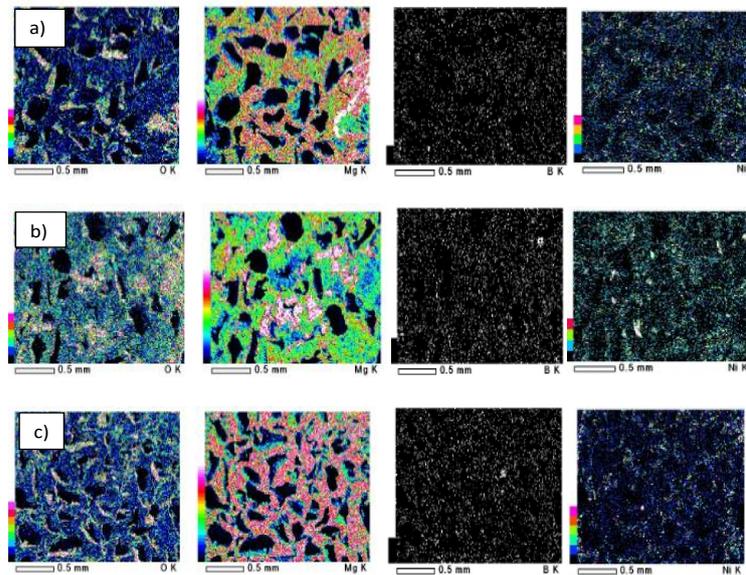
Gambar 5 merupakan hasil pengamatan SEM secara mikro dari morfologi tiap sampel membentuk granul-granul dengan struktur kristal yang heksagonal yang merupakan karakteristik MgB_2 . Dari gambar juga terlihat sedikit void yang ditandai garis merah, serta Mg dan B berdifusi merata terlihat bahwa agregat mikro sudah saling mengikat, namun pada beberapa sampel masih teraglomerasi di beberapa bagian. Berdasarkan variasi *doping* Ni, pada pembesaran 10000 X dimana semakin besar % *doping* nikel yg diberikan maka kepadatan terlihat lebih meningkat serta meningkatkan batas butir dengan semakin kecil

ukuran partikelnya yang mengacu pada penelitian sebelumnya menggunakan doping NiO^[9] dimana celah antar unsur terlihat lebih kecil dan sedikit. Untuk pengaruh suhu terhadap morfologi terlihat jelas bahwa semakin tinggi suhu sinter maka bentuk partikel atau butir semakin jelas terlihat dan semakin kristalin antar batas butirnya.



Gambar 6. Grafik % Porositas Dengan Variasi % Doping Ni pada Setiap Temperatur

Gambar 6 merupakan data perhitungan persen porositas pada kawat superkonduktor MgB₂ yang dihitung menggunakan *software Image J*. Dari data tersebut terlihat bahwa pada sampel dengan variasi doping 0% Ni atau tanpa doping, sedangkan pada variasi doping 10% Ni justru porositas terbesar pada temperatur 750°C. Pada doping 20% Ni pada temperatur 950°C. Hal ini karena pada temperatur 950°C mendekati temperatur uap dari Mg sehingga banyak Mg yang menguap dan menyebabkan porositas^[10]. Namun jika dilihat dari pengaruh penambahan doping Ni pada setiap temperatur *sintering*, dengan temperatur 750°C semakin banyak % nikel maka porositas semakin menurun, adapun pada temperatur 850°C juga menurunkan porositas, tetapi dengan penambahan 20% Ni lebih tinggi daripada 10% Ni, sedangkan pada temperatur 950°C sama halnya dengan 850°C, porositas juga menurun dengan penambahan doping Ni, tetapi penambahan 20% Ni lebih tinggi daripada 10% Ni. Dari seluruh temperatur terlihat bahwa penambahan doping nikel cenderung menurunkan porositas. Hal ini bisa terjadi karena nikel dapat memperbaiki konektivitas antar butir sehingga meningkatkan kepadatan dan menurunkan porositas.

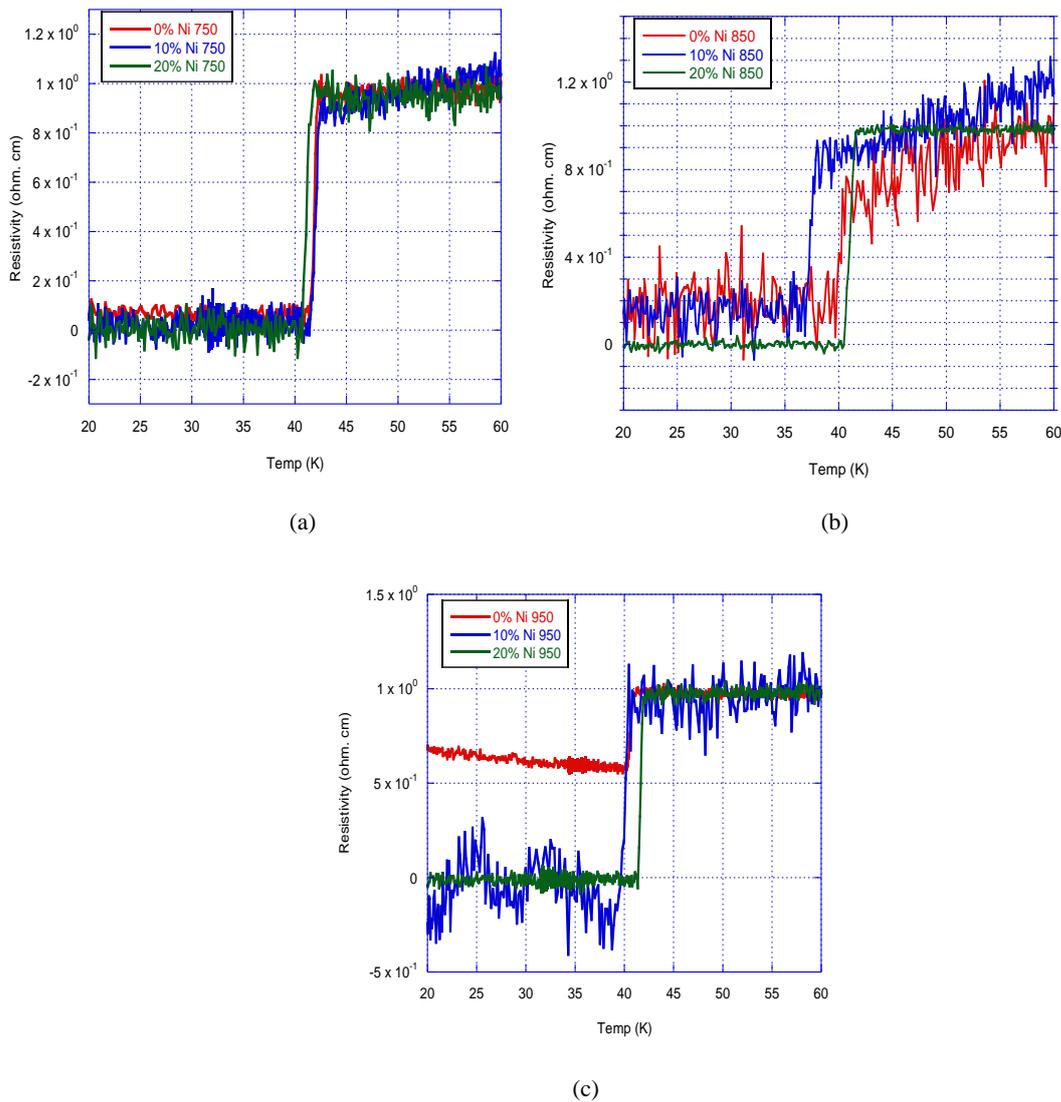


Gambar 7. Grafik % Porositas Dengan Variasi % Doping Ni pada Setiap Temperatur

Gambar 7 merupakan hasil SEM-EDS *Mapping* dimana terlihat persebaran tiap unsur yang terdapat pada kawat. Dari gambar terlihat bahwa setiap unsur baik Mg, B dan Ni serta didapat unsur pengotor O terdispersi atau tersebar merata disetiap bagian tabung terkecuali pada bagian terkena porositasnya. Hal ini menandakan bahwa serbuk berhasil berdifusi dan bereaksi dengan baik.

Pengaruh penambahan *doping* nikel terhadap resistivitas pada superkonduktor MgB₂

Pengukuran resistivitas bertujuan melihat sifat superkonduktivitas dari material tersebut yang ditunjukkan dengan temperatur kritis (T_c) dari material tersebut.



Gambar 8. Grafik Resistivitas Kawat Superkonduktor MgB₂ Pada T= 750 (a), 850 (b) dan 950°C (c) dengan variasi *doping* Ni 0, 10 dan 20%wt

Dari grafik pada temperatur *sintering* 750°C bahwa temperatur kritis tertinggi didapat pada sampel penambahan *doping* Ni 10% berat. Adapun pada temperatur *sintering* 850°C temperatur kritis tertinggi didapat pada sampel dengan penambahan *doping* Ni sebanyak 20% berat. Sedangkan, pada temperatur *sintering* yang tertinggi yaitu 950°C didapat temperatur kritis tertinggi sama dengan tempertur 850°C, yaitu dengan sampel dengan variasi *doping* Ni sebanyak 20% berat. Dari ketiga temperatur, secara umum dapat

disimpulkan bahwa dengan *doping* Ni cenderung meningkatkan temperatur kritisnya. Hal ini bisa terjadi karena *doping* Ni dapat memperbaiki kristalinitas dan konektivitas antar butir dari superkonduktor MgB_2 ^[11] maka arus listrik yang dialirkan suhu kritis (T_c) dari material tersebut.

KESIMPULAN

Kawat superkonduktor MgB_2 berhasil dibuat dengan proses metalurgi serbuk menggunakan metode *powder in tube* secara *in-situ* dan manufaktur pengerolan kawat dibuktikan dengan adanya sifat superkonduktivitas. Hasil pengujian XRD dari superkonduktor MgB_2 dan *didoping* Ni didapatkan fasa primer MgB_2 dan fasa sekunder $\text{MgNi}_{2.5}\text{B}_2$, serta senyawa MgO dan unsur Mg sebagai fasa pengotornya. Penambahan *doping* Ni cenderung meningkatkan kristalinitas dan ukuran kristalit, dengan penambahan terbaik yaitu 10% Ni.

Partikel Mg-B-Ni terdistribusi merata dalam kawat superkonduktor dan pengaruh penambahan *doping* Ni dapat menurunkan porositas, dan porositas terendah pada *pendopingan* nikel 20% berat yaitu sebesar 13,5%. Temperatur *sintering* 750°C merupakan temperatur optimal dalam mensintesis superkonduktor MgB_2 yang *didoping* nikel karena memiliki T_c onset tertinggi sebesar 42,53 K yang secara morfologi suhu sinter juga mempengaruhi bentuk maupun batas butir.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material - LIPI yang telah mendanai serta memberikan fasilitas alat proses dan pengujian superkonduktivitas melalui kegiatan DIPA Tematik tahun 2018. Ucapan terimakasih juga diberikan kepada para peneliti dan teknisi tim superkonduktor serta kerjasama penelitian dengan Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Nagamatsu, J. (2000), Superconductivity at 49 K in copper doping magnesium diboride, *Nature*, Vol. 410, No. March, hal. 1–3.
- 2 Varghese, N. K. Vinod, R. G. Abhilash Kumar, U. Syamaprasad, and A. Sundaresan, (2007), Influence of reactivity of sheath materials with Mg/B on superconducting properties of MgB_2 , *J. Appl. Phys.*, Vol. 102, No. 4, hal. 0–4.
- 3 Aksu, E. (2013), Study of MgB_2 phase formation by using XRD, SEM, thermal and magnetic measurements, *J. Alloys Compd.*, Vol. 552, hal. 376–381.
- 4 Zhao, Q., Y. Liu, and Q. Cai, (2012), Influence of Ni addition on the process of phase formation in MgB_2 bulk, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, Vol. 107, No. 4, hal. 877–883.
- 5 Herbirowo, S., Sofyan, N., Imaduddin, A., (2017), Properties of carbon nanotubes-doped Fe-sheath MgB_2 for superconducting wires, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1826.
- 6 Cai, Q., Z. Ma, Q. Zhao, and Y. Liu, (2011) Observation of flux jump in (MgB_2) 0.96Ni 0.04 superconductor doped with milled Ni powders, *J. Supercond. Nov. Magn.*, Vol. 24, No. 6, hal. 2013–2017.

- 7 Vinod, K., N. Varghese, R. G. A. Kumar, U. Syamaprasad, and S. B. Roy, (2008), Influence of Mg particle size on the reactivity and superconducting properties of in situ MgB₂, *J. Alloys Compd.*, Vol. 464, No. 1–2, pp. 33–37.
- 8 Glowacki, B. A., M. Majoros, M. Vickers, J. E. Evetts, and Y. Shi, (2014), Superconductivity of powder-in-tube MgB₂ wires, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 14, hal. 193–199.
- 9 Ranot, M., S. H. Jang, Y. S. Oh, K. P. Shinde, S. H. Kang, and K. C. Chung, (2016), Addition effects of nanoscale NiO on microstructure and superconducting properties of MgB₂, *Prog. Supercond. Cryog.*, Vol. 18, No. 1, hal. 37–40.
- 10 Novosel, N., Galic, S., Pajic, D., (2012) Enhancement of the critical current density in MgB₂ wires doped with Ni nanoparticles, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 25, No. 9.
- 11 Jung, A., Schlachter, S. I., Runtsch, B., (2010) “Influence of Ni and Cu contamination on the superconducting properties of MgB₂ filaments,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 23, No. 9.