



SINTESIS DAN KARAKTERISASI MgB_2 DENGAN PENAMBAHAN NANO-SiC MELALUI METODE REAKSI PADAT

Sigit Dwi Yudanto^{1*}, Lalu Arif Rahman Hakim², Muhammad Emir Hanif Rasyadi², Agung Imaduddin¹ dan Andika Widya Pramono¹

¹Pusat Riset Metalurgi dan Material - BRIN, Tangerang Selatan, Indonesia

²Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*sigi012@brin.go.id

Received 05-03-2021, Revised 15-02-2022, Accepted 15-02-2022

Available Online 17-03-2022, Published Regularly April 2022

ABSTRACT

We have synthesized nano-SiC added MgB_2 by using the solid reaction method. Evaluation of the addition of nano-SiC to the crystal structure and critical temperature of MgB_2 was carried out through X-ray diffraction and cryogenic magnetometer tests. MgB_{2+x} wt.% nano-SiC with $x=0, 5, 10,$ and 15 were prepared by manual milling and sintered at $800^\circ C$ for 2 hours. Based on X-ray diffraction analysis, the addition of nano-SiC caused a decrease in the value of the a-lattice constant from 3.0848 nm to 3.0792 nm. The distortion in the a-lattice constant is the result of carbon substitute boron. The resistivity test results showed that the addition of nano-SiC decreased the T_{c-zero} value of the MgB_2 material.

Keywords: MgB_2 ; solid-state; nano-SiC; lattice; T_{c-zero} .

ABSTRAK

Sintesis material MgB_2 dengan penambahan nano-SiC telah kami lakukan menggunakan metode reaksi padat. Evaluasi penambahan nano-SiC terhadap struktur kristal dan suhu kritis MgB_2 dilakukan melalui pengujian difraksi sinar-X dan *cryogenic magnetometer*. MgB_{2+x} wt.% nano-SiC dengan $x=0, 5, 10,$ dan 15 dipersiapkan dengan penggerusan manual dan disintering pada suhu $800^\circ C$ selama 2 jam. Berdasarkan analisis difraksi sinar-X, penambahan nano-SiC menyebabkan penurunan nilai konstanta kisi-a dari $3,0848 \text{ \AA}$ menjadi $3,0792 \text{ \AA}$. Distorsi pada konstanta kisi-a merupakan dampak dari karbon yang mensubstitusi boron. Hasil uji resistivitas menunjukkan bahwa penambahan nano-SiC menurunkan nilai T_{c-zero} dari material MgB_2 .

Kata kunci: MgB_2 ; reaksi padat; nano-SiC; kisi, T_{c-zero} .

PENDAHULUAN

Banyak sekali penelitian dilakukan yang bertujuan untuk meningkatkan superkonduktivitas MgB_2 sejak ditemukan sifat superkonduktornya pada tahun 2001 [1]. MgB_2 mempunyai suhu kritis sebesar ~ 39 K [1]. Superkonduktor yang memiliki struktur heksagonal dalam group ruang $p6/mmm$ ini mempunyai peluang yang besar untuk diterapkan dalam beberapa aplikasi karena mempunyai beberapa keunggulan, antara lain suhu kritis yang lebih tinggi dibandingkan dengan superkonduktor paduan logam yang telah aplikasikan, bahan baku yang murah, dan metode pembuatan yang sederhana. Beberapa cara yang dilakukan antara lain modifikasi proses sintesis dan substitusi/addisi

pada material MgB₂. S.X. Dou melaporkan bahwa doping SiC meningkatkan nilai rapat arus (J_c) MgB₂^[2].

Pada penelitian sebelumnya, sintesis MgB₂ telah berhasil dilakukan melalui metode reaksi padat. Untuk mengetahui pengaruh penambahan nano-SiC pada struktur dan sifat superkonduktor MgB₂, maka pada penelitian ini dilakukan sintesis material MgB₂ dengan penambahan nano-SiC sebesar 5 wt.%, 10 wt.%, dan 15 wt.%. Kami melaporkan bahwa penambahan nano-SiC menyebabkan distorsi kisi struktur kristal MgB₂ dan mengakibatkan terjadinya penurunan nilai suhu kritis (*T_c*) MgB₂.

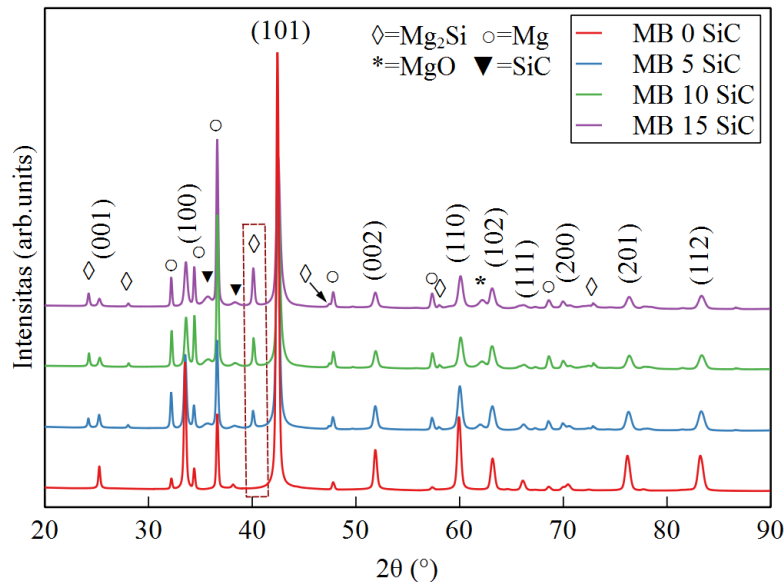
METODE

Penambahan nano-SiC terhadap material MgB₂ dilakukan secara *in situ* dengan metode reaksi padat. Sampel MgB₂ penambahan nano-SiC dipersiapkan mengikuti rumus Mg+2B+x wt.% SiC (x=0; 5;10;15) dengan bahan baku serbuk magnesium, boron, dan nano-SiC. Sintesis material diawali dengan penimbangan bahan baku sesuai dengan perbandingan stoikiometri Mg:B=1:2. Nano-SiC sebesar 5, 10, dan 15 wt.% ditambahkan dalam campuran dan digerus menggunakan *mortar agate* selama 30 menit dan selanjutnya diberi kode masing-masing MB5SiC, MB10SiC, dan MB15SiC. Sedangkan sampel murni tanpa penambahan (MB0SiC) telah dilaporkan sebelumnya dan dijadikan sebagai pembanding^[3]. Hasil gerusan dikemas dalam tabung *stainless steel* 304 (SS304) dan dipadatkan dengan tekanan 350 MPa. Pengemasan serbuk dalam tabung SS304 bertujuan untuk mencegah adanya oksidasi dan evaporasi magnesium ketika dilakukan pemanasan di atas titik leburnya. Semua sampel dipanaskan dalam *muffle furnace* pada suhu 800°C selama 2 jam dengan kondisi atmosfer udara bebas dan dibiarkan dingin di dalam tungku sampai suhu ruangan.

Difraktometer sinar-X atau *X-Ray Diffractometer (XRD) Smartlab* dari *Rigaku* digunakan untuk mengkarakterisasi pembentukan fasa, struktur kristal, dan ukuran kristal. Dengan sumber radiasi Cu K α ($\lambda = 0,15406$ nm), pengukuran dilakukan pada rentang sudut $2\theta = 20 - 90^\circ$. Analisis kualitatif XRD menggunakan bantuan perangkat lunak Match 3! yang didukung dengan database *Crystallography Open Database (COD)* tahun 2018. Analisis kuantitatif hasil XRD dengan cara penghalusan pola difraksi dilakukan menggunakan metode *Rietveld*^[4]. Pengukuran resistansi bertujuan untuk mengetahui kecenderungan hambatan sampel terhadap suhu dilakukan menggunakan *cryogenic magnetometer* dari *oxford*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 memperlihatkan pola difraksi sinar-X sampel MgB₂ tanpa dan dengan penambahan nano-SiC. Pengujian XRD dilakukan pada serbuk sampel yang digerus setelah dikeluarkan dari tabung SS304. Sampel MgB₂ murni (MB0SiC) menunjukkan hasil multifasa dengan fasa MgB₂ sebagai fasa dominan^[3]. Berdasarkan pola difraksi, masih ditemukan fasa Mg dan MgO yang teridentifikasi pada sudut $2\theta=32,19^\circ$; $34,44^\circ$; $36,65^\circ$; dan $47,79^\circ$ untuk fasa Mg dan sudut $2\theta = 62,17^\circ$ untuk fasa MgO. Fasa MgB₂, Mg, dan MgO masing-masing merujuk pada database COD nomor #152-6508, #900-8507, dan #900-6795. Masih terjadinya oksidasi pada Mg disebabkan karena proses preparasi di udara bebas^[5].

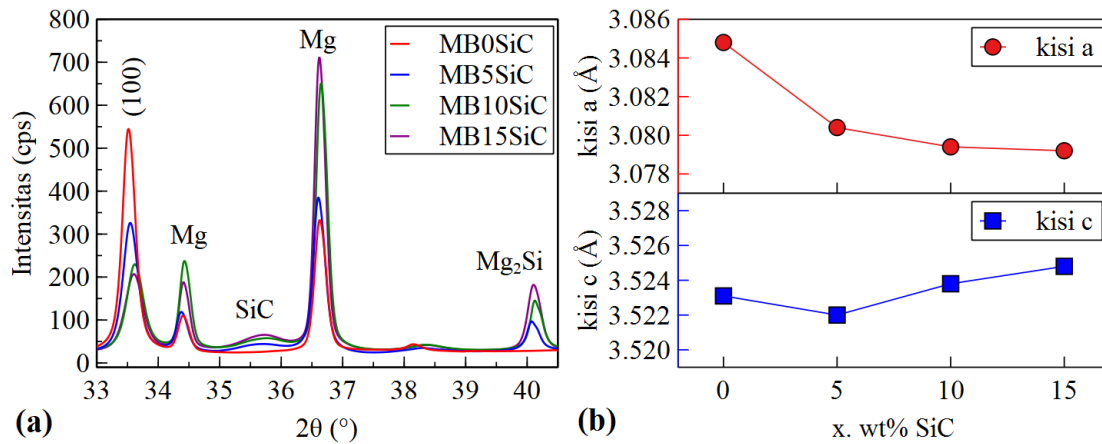


Gambar 1. Pola difraksi sampel MgB_2 dengan penambahan nano-SiC hasil penghalusan

Penambahan nano-SiC pada sintesis material MgB_2 menyebabkan munculnya dua fasa baru, yaitu fasa Mg_2Si dan SiC [6,7]. Puncak fasa pada sudut $2\theta=24,24^\circ$; $28,04^\circ$; $40,13^\circ$; dan $58,04^\circ$ teridentifikasi sebagai fasa Mg_2Si berdasarkan COD nomor #153-7741. Puncak pada sudut $2\theta=35,65^\circ$ dan $38,13^\circ$ merupakan puncak fasa SiC yang sesuai dengan COD nomor #900-8876. Kemunculan fasa-fasa baru hasil penambahan nano-SiC lebih jelas ditunjukkan pada Gambar 2a. Semakin besar jumlah nano-SiC yang ditambahkan menyebabkan semakin tinggi intensitas dari puncak fasa Mg_2Si . Berdasarkan perhitungan melalui penghalusan pola difraksi dengan nilai χ^2 atau *goodness of fit* (GoF) yang dapat diterima secara statistik, diperoleh persentase dari masing-masing fasa yang terbentuk. Tabel 1 menyajikan data hasil analisis kuantitatif pengujian XRD. Dari Tabel 1 terlihat bahwa selain munculnya fasa Mg_2Si dan SiC, penambahan nano-SiC menyebabkan penurunan fraksi massa fasa MgB_2 yang terbentuk. Berkurangnya fasa MgB_2 merupakan konsekuensi dari kenaikan fraksi massa fasa-fasa lain. Tingginya fraksi massa Mg yang tidak bereaksi ini disebabkan karena ukuran partikel Mg yang besar [8-11]. Ukuran partikel Mg yang besar ini menyebabkan Mg yang tidak bereaksi terjebak di dalam lapisan MgB_2 [8]. K. Vinod, et al melakukan percobaan pengaruh magnesium dengan ukuran partikel sebesar $< 25 \mu\text{m}$, $25\text{-}53 \mu\text{m}$, $53\text{-}106 \mu\text{m}$, dan $106\text{-}180 \mu\text{m}$, sedangkan pada penelitian ini menggunakan serbuk magnesium yang berukuran $0,05 - 1 \text{ mm}$ [8].

Tabel 1. Analisis kuantitatif sampel MgB_2 dengan penambahan nano-SiC

Keterangan	MB0SiC [3]	MB5SiC	MB10SiC	MB15SiC
MgB_2 (wt.%)	88,57	80,85	64,74	60,67
Mg (wt.%)	2,93	9,89	15,28	16,50
MgO (wt.%)	8,50	5,29	9,20	10,90
Mg_2Si (wt.%)	0	1,83	3,03	3,07
SiC (wt.%)	0	2,14	7,75	8,86
χ^2	1,29	1,21	1,27	1,28
wRp (%)	16,89	17,26	17,45	18,04
Rp (%)	12,37	12,86	13,12	13,37



Gambar 2. a). Perbesaran pola difraksi pada sudut $2\theta = 33 - 41^\circ$ dan b). Parameter kisi kristal MgB_2 hasil perhitungan

Pembentukan fasa Mg_2Si merupakan reaksi antara Mg dengan SiC. Pada saat proses pemanasan, SiC mengalami dekomposisi dan bereaksi dengan magnesium sehingga membentuk Mg_2Si [12,13]. Reaksi pembentukan Mg_2Si ditunjukkan pada persamaan reaksi 1.



Karbon yang terbentuk hasil dekomposisi SiC tidak terlihat pada pola difraksi. Hal ini terjadi mungkin karena karbon mensubstitusi boron. Salah satu indikasi bahwa karbon telah mensubstitusi boron adalah penurunan nilai konstanta kisi a pada sampel dengan penambahan nano-SiC. Seperti yang dilaporkan oleh Vajpayee, et al, terjadinya pergeseran puncak bidang (100) (Gambar 2a) mengindikasikan adanya kontraksi pada kisi [12]. Berdasarkan perhitungan, penambahan nano-SiC ini menyebabkan penurunan konstanta kisi a dari 3,0848 Å untuk sampel MgB_2 murni menjadi 3,0804 Å untuk sampel dengan penambahan 5 wt.% nano-SiC. Konstanta kisi a sampel MB10SiC dan MB15SiC masing-masing adalah 3,0794 Å dan 3,0792 Å. Nilai parameter kisi a pada sampel MgB_2 murni mempunyai kemiripan dengan laporan sebelumnya [1]. Parameter kisi hasil perhitungan pada sampel MgB_2 dengan penambahan nano-SiC secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 2b.

Perkiraan ukuran kristal dari hasil sintesis dihitung menggunakan metode *Williamson Hall Plot (W-H Plot)* dan rumus *Debye-Scherrer*. Rumus *Debye-Scherrer* dituliskan pada persamaan 2 [14].

$$\beta_D = k\lambda / D \cdot \cos\theta \quad (2)$$

D merupakan ukuran kristal yang dinyatakan dalam nanometer (nm), k adalah konstanta faktor bentuk kristal (umumnya digunakan nilai 0,94), λ adalah panjang gelombang sumber radiasi sinar-X (nm), β_D menyatakan lebar setengah puncak atau *Full width at half maximum* (fwhm) yang telah dikoreksi dengan faktor instrumen (radian), dan θ merupakan sudut puncak bidang *Bragg* dari fasa (°). Faktor instrumen yang digunakan adalah sampel Al_2O_3 . Nilai β_D diperoleh melalui persamaan 3.

$$\beta_D^2 = \beta_{\text{observasi}}^2 - \beta_{\text{instrumen}}^2 \quad (3)$$

Rumus *Debye-Scherrer* (pers. 2) tersebut hanya mempertimbangkan pelebaran puncak (nilai FWHM) untuk menghitung ukuran kristal. Faktor lain yang dapat dijadikan parameter untuk menghitung ukuran kristal adalah regangan kisi (*micro-strain*). Regangan

kisi ini dapat disebabkan karena adanya distorsi kisi dan cacat kristal [15]. Regangan kisi dirumuskan dengan persamaan 4 berikut ini:

$$\varepsilon = \beta_{strain} / 4.\tan\theta \text{ atau } \beta_{strain} = 4\varepsilon.\tan\theta \quad (4)$$

ε adalah *micro-strain* (%) dan β_{strain} merupakan pelebaran puncak karena pengaruh *micro-strain* (radian).

Dengan mengkombinasikan rumus *Debye-Scherrer* dengan regangan kisi ini, maka diperoleh rumus 5 berikut ini:

$$\beta_{hkl} = \beta_D + \beta_{strain} \quad (5)$$

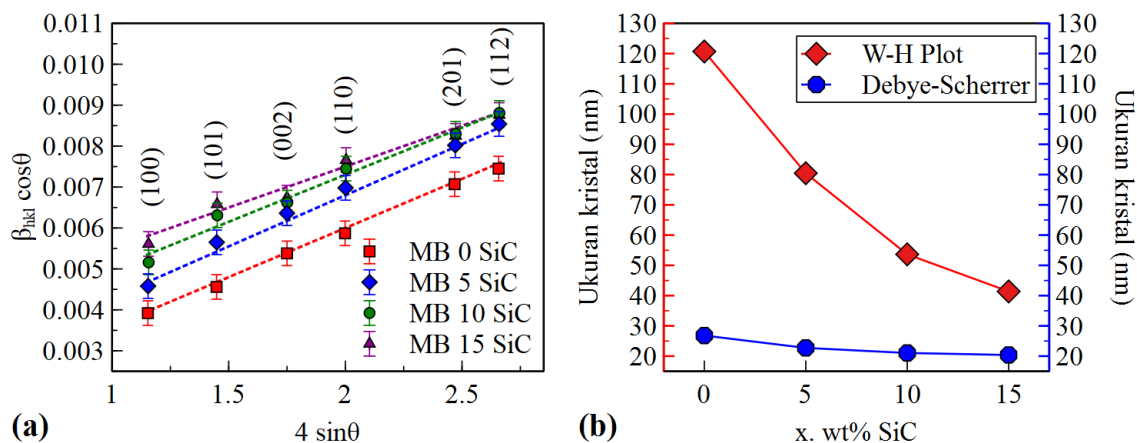
$$\beta_{hkl} = (k\lambda/D.\cos\theta) + 4\varepsilon.\tan\theta \quad (6)$$

Sehingga dapat diturunkan menjadi:

$$\beta_{hkl}.\cos\theta = (k\lambda/D) + 4\varepsilon.\sin\theta \quad (7)$$

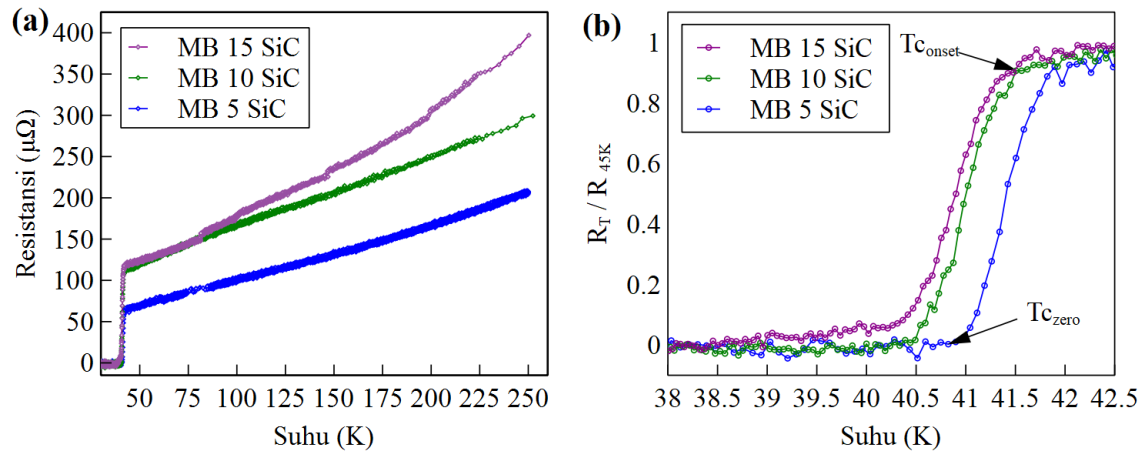
Dari persamaan 7 ini selanjutnya digunakan untuk mencari regangan kisi dan ukuran kristal dengan cara membuat kurva $4.\sin\theta$ vs $\beta_{hkl}.\cos\theta$. Dari persamaan linier hasil kurva $4.\sin\theta$ vs $\beta_{hkl}.\cos\theta$ inilah kita akan dapatkan nilai D dan ε . Analisis *W-H Plot* sampel MgB₂ dengan penambahan nano-SiC ditunjukkan pada Gambar 3a. Regangan kisi sampel MgB₂ penambahan nano-SiC 0, 5, 10, dan 15 wt.% masing-masing adalah 0,24%; 0,25%; 0,23%; dan 0,20%. Berdasarkan penghalusan pola difraksi, meskipun terjadi penurunan dari parameter kisi tetapi ternyata regangan kisi ikut mengalami penurunan. Adanya relaksasi ini dapat disebabkan oleh pelepasan regangan yang digunakan untuk mendorong fasa lain agar terlepas di antara batas butir [16]. Fasa lain yang menjadi penyebab relaksasi tersebut adalah fasa MgO [16]. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, kecenderungan fraksi massa MgO berbanding lurus dengan nilai regangan kisi (*micro-strain*). Semakin besar jumlah fraksi fasa MgO yang terbentuk maka semakin kecil regangan kisi yang terjadi.

Estimasi ukuran kristal berdasarkan metode *Debye-Scherrer* dan *W-H Plot* ditunjukkan pada Gambar 3b. Berdasarkan analisis *Williamson Hall*, ukuran kristal MgB₂ dengan penambahan nano-SiC sebesar 0, 5, 10, dan 15 wt.% masing-masing adalah 120,68; 80,45; 53,64 dan 41,38 nm. Sedangkan berdasarkan metode *Debye-Scherrer* adalah 26,80; 22,72; 21,04; dan 20,38 nm. Penghalusan ukuran kristal ditandai dengan adanya pelebaran puncak seperti yang terlihat pada Gambar 2a merupakan dampak dari karbon yang mensubstitusi boron [17,18].



Gambar 3. a). Analisis *W-H Plot* sampel MgB₂ dengan penambahan nano-SiC dan b). Ukuran kristal hasil perhitungan dengan metode *W-H Plot* dan *Debye-Scherrer*

Evaluasi sifat superkonduktor semua sampel hasil sintesis dilakukan menggunakan *cryogenic magnetometer* dengan metode *four-point probe* (FPP). Pengukuran hambatan dilakukan sampel dalam bentuk padatan yang dikeluarkan dari tabung SS. Gambar 4a memperlihatkan kurva hubungan antara hambatan terhadap suhu. Dari kurva Gambar 4a terlihat bahwa nilai hambatan pada suhu 250 K mengalami kenaikan seiring dengan penambahan nano-SiC. Semua sampel menunjukkan sifat superkonduktor yang ditandai dengan adanya hambatan nol. Suhu ketika nilai hambatan nol adalah suhu kritis nol atau T_{c-zero} dan suhu ketika hambatan mulai turun drastis adalah suhu kritis *onset* atau $T_{c-onset}$.



Gambar 4. a). Kurva resistansi terhadap suhu sampel MgB_2 dengan penambahan nano-SiC dan b). Kurva normalisasi resistansi terhadap suhu

Tabel 2. Data sifat kelistrikan sampel MgB_2 dengan penambahan nano-SiC

Keterangan	MB0SiC ^[3]	MB5SiC	MB10SiC	MB15SiC
$R_{250\text{ K}}$ ($\mu\Omega$)	143,20	206,48	297,95	396,17
$R_{45\text{ K}}$ ($\mu\Omega$)	46,99	62,72	115,40	120,02
T_{Conset} (K)	42,53	41,92	41,57	41,53
T_{Czero} (K)	42,03	40,70	40,33	38,54
ΔT_c	0,48	1,22	1,24	2,99

Nilai hambatan sampel MB5SiC adalah 206,48 $\mu\Omega$ pada suhu 250 K dan 62,72 $\mu\Omega$ pada suhu 45 K. Nilai hambatan ini mengalami penurunan secara drastis pada suhu 41,92 K ($T_{c-onset}$) hingga mencapai 0 pada suhu 40,70 K (T_{c-zero}). Penambahan nano-SiC ternyata mempengaruhi sifat superkonduktor MgB_2 . Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4b, terlihat bahwa $T_{c-onset}$ dan T_{c-zero} mengalami pergeseran nilai. Sifat kelistrikan dari semua sampel disajikan dalam Tabel 2. Dari Tabel 2 tersebut kita ketahui bahwa penambahan nano-SiC menyebabkan kenaikan nilai hambatan pada suhu 250 K dan penurunan nilai $T_{c-onset} / T_{c-zero}$ dari material MgB_2 . Nilai $T_{c-onset}$ sampel MB5SiC, MB10SiC, dan MB15SiC masing-masing sebesar 41,92 K; 41,57 K; dan 41,53 K. Kecenderungan penurunan nilai $T_{c-onset}$ ini kemungkinan karena mekanisme substitusi karbon pada situs boron. Hal ini dapat dikonfirmasi dengan terjadinya distorsi konstanta kisi a yang ditunjukkan pada Gambar 2b. Fenomena ini sama seperti pengaruh penambahan CNT terhadap struktur MgB_2 yang kami laporkan sebelumnya^[18]. Menurut Vajpayee, et al, terjadinya pelebaran T_c (ΔT_c) seiring dengan jumlah penambahan nano-SiC disebabkan karena adanya impuritas Mg_2Si yang terbentuk dari hasil dekomposisi SiC yang bereaksi dengan magnesium dan SiC yang tidak bereaksi^[12].

KESIMPULAN

Pengaruh penambahan nano-SiC terhadap struktur kristal dan sifat superkonduktor material MgB₂ yang dipersiapkan melalui metode reaksi padat telah dianalisis berdasarkan pengujian difraksi sinar-X dan *cryogenic magnetometer*. Peningkatan kadar nano-SiC menyebabkan penurunan nilai konstanta kisi a jika dibandingkan dengan sampel MgB₂ murni. Nilai konstanta kisi a sampel MgB₂ dengan penambahan nano-SiC sebesar 0, 5, 10, dan 15 wt% masing-masing sebesar 3,0848 Å; 3,0804 Å; 3,0794 Å; dan 3,0792 Å. Terjadinya distorsi kisi disebabkan adanya proses substitusi karbon hasil dari dekomposisi SiC pada situs boron. Konsekuensi adanya karbon yang mensubstitusi boron ini adalah penurunan suhu kritis. Nilai T_{c-zero} sampel MgB₂ dengan penambahan nano-SiC sebesar 0, 5, 10, dan 15 wt% masing-masing adalah 42,03 K; 40,70 K; 40,33 K; dan 38,54 K.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Riset Metalurgi dan Material BRIN atas dukungan fasilitas dan pendanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., and Akimitsu, J. 2001. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Letters to Nature*, 410, 63–64.
- 2 Dou, S.X., Soltanian, S., Horvat, J., Wang, X.L., Zhou, S.H., Ionescu, M., Liu, H.K., Munroe, P., Tomsic, M. 2002. Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB₂ superconductor by nanoparticle SiC doping. *Applied Physics Letters*, 81 (18), 3419–3421.
- 3 Imaduddin, A., Yudanto, S.D., Rasyadi, M.E.H., Nakanishi, Y., and Yoshizawa, M., 2019. Possibility of the Higher Critical Temperature on MgB₂ Superconductor Synthesized by Powder-In-Sealed-Tube Method. *Journal of Low Temperature Physics*, 195, 460–473.
- 4 Larson, A.C., and Von Dreele, R.B. 2004. *General Structure Analysis System (GSAS)*. 86–748.
- 5 Arvapalli, S.S., Muralidhar, M., and Murakami, M. 2019. High-Performance Bulk MgB₂ Superconductor Using Amorphous Nano-boron. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, 1891–1895.
- 6 Soltanian, S., Wang, X., Horvat, J., Qin, M., Liu, H., Munroe, P.R., and Dou, S.X. 2003. Effect of Grain Size and Doping Level of SiC on the Superconductivity and Critical Current Density in MgB₂ Superconductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13 (2), 3273–3276.
- 7 Gabovich, A. 2015. *Superconductors - New Developments*. InTech. Croatia.
- 8 Vinod, K., Varghese, N., Kumar, R. G. A., Syamaprasad, U., and Roy, S.B. 2008. Influence of Mg particle size on the reactivity and superconducting properties of in situ MgB₂. *Journal of Alloys and Compounds*, 464 (1), 33–37.
- 9 Varghese, N., Vinod, K., Syamaprasad, U., and Roy, S.B. 2009. Doping effect of nano-SiC on structural and superconducting properties of MgB₂ bulks prepared by PIST method in air. *Journal of Alloys and Compounds*, 484 (1-2), 734–738.
- 10 Wang, D., Ma, Y., Yu, Z., Gao, Z., Zhang, X., Watanabe, K., and Mossang, E. 2007. Strong influence of precursor powder on the critical current density of Fe- sheathed MgB₂ tapes. *Superconductor Science and Technology*, 20, 574–578.
- 11 Xu, X., Qin, M. J., Konstantinov, K., Santos, D.I.D., Yeoh, W. K., Kim, J.H., and

- Dou, S.X. 2006. Effect of boron powder purity on superconducting properties of MgB_2 . *Superconductor Science and Technology*, 19, 466–469.
- 12 Vajpayee, A., Jha, R., Srivastava, A. K., Kishan, H., Tropeano, M., Ferdeghini, C., and Awana, V.P.S. 2011. The effect of synthesis temperature on the superconducting properties of n-SiC added bulk MgB_2 superconductor. *Superconductor Science and Technology*, 24, 1–11.
 - 13 Guo, Z., Suo, H., Sandu, V., and Aldica, G. 2014. Experimental study on phase formation of SiC doped MgB_2 : Processing of Mg-B-SiC powders by spark plasma sintering. *Materials Research Innovations*, 18 (6), 407–411.
 - 14 Nath, D., Singh, F., and Das, R. 2020. X-ray diffraction analysis by Williamson-Hall, Halder-Wagner and size-strain plot methods of CdSe nanoparticles-a comparative study. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122021.
 - 15 Zak, A.K., Majid, W.H.A., Abrishami, M.E., and Youse, R. 2011. X-ray analysis of ZnO nanoparticles by Williamson-Hall and size-strain plot methods. *Solid State Sciences*, 13, 251–256.
 - 16 Cai, Q., Ma, Z., Liu, Y., Guo, Q., Xiong, J., Li, H., and Qin, F. 2016. Evaluation of quenching-induced lattice strain and superconducting properties in un-doped and glycine-doped MgB_2 bulks. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27, 9431–9436.
 - 17 Shekhar, C., Giri, R., and Srivastava, O. N. 2007. Enhancement of flux pinning and high critical current density in graphite doped MgB_2 superconductor. *Journal of Applied Physics*, 102, 1–5.
 - 18 Yudanto, S.D., Dewi, Y.P., Sebayang, P., Chandra, S.A., Imaduddin, A., Kurniawan, B., and Manaf, A. 2020. Influence of CNTs addition on structural and superconducting properties of mechanically alloyed MgB_2 . *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30 (3), 9–14.