

Sains Malaysiana 46(10)(2017): 1971–1977
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2017-4610-36>

Sifat Elektrik dan Kerentanan Arus Ulang Alik Superkonduktor Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O dengan Penambahan In_2O_3 (Electrical Properties and AC Susceptibility of In_2O_3 Added Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O Superconductor)

ILHAMSYAH PUTRA ABU BAKAR, NURUL RAIHAN MOHD SUIB, K. AIZAT,
 J. NUR-AKASYAH, S. RADIMAN & R. ABD-SHUKOR*

ABSTRAK

Kesan penambahan In_2O_3 terhadap superkonduktor $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0-0.1$ peratus berat) telah dikaji. Pencirian yang dijalankan ialah pembelauan sinar-X, mikrostruktur, rintangan elektrik, kerentanan arus ulang alik dan ketumpatan arus genting antara butiran. Suhu genting mula, $T_{c\text{ mula}}$ dan suhu genting sifar, $T_{c\text{ sifar}}$ adalah tertinggi bagi sampel $x = 0$ iaitu $T_{c\text{ mula}} = 112$ K dan $T_{c\text{ sifar}} = 90$ K. Corak pembelauan sinar-X menunjukkan peratus isi padu fasa $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) dan $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) adalah hampir sama untuk semua sampel. Pengukuran kerentanan ulang alik telah dijalankan pada frekuensi 295 Hz dan medan magnet $H = 5$ Oe. Dua peralihan pada kerentanan ulang alik bagi $x = 0$ menandakan kewujudan fasa Bi-2223 dan Bi-2212. Suhu pada puncak kehilangan tenaga, T_p untuk kerentanan khayal, χ'' adalah tertinggi (74 K dan 104 K) untuk $x = 0$. Penambahan In_2O_3 telah menyebabkan T_p beranjak kepada suhu lebih rendah dan ini menunjukkan fluks magnet menembusi antara butiran pada suhu yang semakin menurun apabila In_2O_3 ditambah. Lengkung puncak T_p juga melebar apabila In_2O_3 ditambah. Ini menunjukkan gandingan antara butiran yang semakin lemah dan tenaga pengepitan fluks yang menurun. Ketumpatan arus genting antara butiran $J_c(T_p)$ telah diukur menggunakan model Bean dan nilainya adalah antara 16 hingga 20 A cm^{-2} bagi semua sampel. Satu model skematik arus aruhan bagi bahan polihabur yang mengandungi dua fasa superkonduktor dengan pecahan isi padu yang sama tetapi suhu genting yang berlainan dibincangkan.

Kata kunci: $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$; In_2O_3 ; ketumpatan arus genting antara butiran

ABSTRACT

The effect of In_2O_3 addition on $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0 - 0.1$ weight percent) was investigated. The characterization includes X-ray diffraction method, microstructural, electrical resistance, AC susceptibility and intergrain critical current density. The onset transition temperature, $T_{c\text{ onset}}$ and zero resistance temperature, $T_{c\text{ zero}}$ was 112 K and 90 K, respectively for the $x = 0$ sample. XRD patterns showed that the volume fraction of the $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (Bi-2223) and $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (Bi-2212) phase was almost equal. AC susceptibility measurements were performed at a frequency of 295 Hz and magnetic field (H) 5 Oe. Two distinct step-like transitions were observed in the AC susceptibility measurements for $x = 0$ indicating the existence of Bi-2223 and Bi-2212 phases. The highest peak loss temperature, T_p from the imaginary part χ'' of the susceptibility were 74 K and 104 K for the $x = 0$ sample. T_p shifted to lower temperatures with increasing In_2O_3 content, indicating that magnetic flux penetrated between the grains at lower temperatures as In_2O_3 content was increased. The curve of T_p also broadened with increasing In_2O_3 . This indicated the weakening of intergranular coupling and lowering of the flux pinning energy. The intergrain critical current density at the peak temperature $J_c(T_p)$ was measured using the Bean's model and the values were between 16 and 20 A cm^{-2} for all samples. A schematic model for induced current in a polycrystalline material with two superconducting phases of equal volume fraction but different transition temperature is discussed.

Keywords: $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$; In_2O_3 ; intergrain critical current density

PENGENALAN

Sejak penemuan superkonduktor suhu tinggi kuprum oksida sistem Bi, banyak kajian telah dijalankan untuk menambah baik ciri bahan ini kerana ia sesuai diaplikasikan dalam teknologi dan industri (Yavuz et al. 2016). Antara semua bahan superkonduktor suhu tinggi, sistem Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O adalah salah satu bahan yang telah dikaji dengan meluas ekoran cirinya yang istimewa untuk aplikasi dalam teknologi masa depan.

Antara ciri istimewa sistem Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O ialah ianya tidak toksik berbanding sistem Tl dan Hg. Ia juga mempunyai ketumpatan arus genting dan suhu genting yang tinggi berbanding sistem lain seperti bahan berasaskan Y dan La (Özçelik et al. 2014; Rodrigues et al. 2013). Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O mempunyai struktur seperti perovskit yang multi-fasa (Gul et al. 2006). Ia mempunyai formula umum $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+d}$, dengan n ialah 1, 2 atau 3 yang merujuk kepada bilangan lapisan CuO_2

(Bilgili et al. 2008). Berdasarkan formula umum ini, ia mempunyai tiga fasa iaitu fasa $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_{6+d}$ (Bi-2201), $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi-2212), dan $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+d}$ (Bi-2223). Fasa Bi-2201 mempunyai suhu genting 20 K dan fasa Bi-2212 pula mempunyai suhu genting 95 K manakala suhu genting untuk fasa Bi-2223 ialah 110 K (Hiroshi et al. 1988).

Walaupun bagaimanapun, sangat sukar untuk menghasilkan fasa Bi-2223 yang tunggal. Hal ini disebabkan ia hanya stabil untuk julat suhu yang kecil dan kinetik pembentukan bahan ini sangat perlahan yang menyebabkan hampir mustahil untuk menghasilkan bahan yang mengandungi fasa tunggal Bi-2223 (Zhang et al. 1990). Selain itu, kewujudan vorteks di dalam bahan ini juga mengakibatkan kehilangan tenaga dan mengehadkan nilai ketumpatan arus. Penedapan bahan yang bersesuaian akan dapat membantu pembentukan fasa Bi-2223 dan mengespin pergerakan vorteks seterusnya menambah baik nilai ketumpatan arus genting.

Terdapat beberapa laporan terkini mengenai kesan terhadap sifat superkonduktor apabila didopkan dengan zarah bersaiz nanometer dan mikrometer dengan komposisi tertentu seperti Fe_2O_3 , Ho, PbO, Co_3O_4 , TiO_2 , Na, Ce, La dan SnO_2 (Abd-Shukor & Kong 2009; Abdeen et al. 2016; Annas Al-Sharabi et al. 2016; Azman et al. 2014; Gul et al. 2006; Hamid & Abd-Shukor 2000; Özçelik et al. 2014; Robaiah et al. 2016; Rodrigues et al. 2013; Yavuz et al. 2016). Kajian terhadap kesan penambahan indium (In) juga telah dijalankan. Hasil kajian melaporkan bahawa nilai suhu genting meningkat apabila In ditambah untuk fasa Bi-2212 dan menurun untuk fasa Bi-2223. Pengukuran kerentanan arus ulang alik membuktikan kewujudan fasa berbeza di dalam sampel (Nicolas et al. 1989). Peratusan isi padu fasa Bi-2223 menurun dengan bertambahnya In. Penedapan In yang sedikit meningkatkan suhu genting fasa Bi-2223 dengan suhu genting yang tertinggi (113 K) untuk komposisi $x = 0.05$. Isyarat diamagnet juga menurun dengan bertambahnya In (Nkum et al. 1992).

Dalam artikel ini, kesan penambahan In_2O_3 terhadap superkonduktor $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan komposisi $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$ dan 0.10 peratus berat (% bt.) dilaporkan. Objektif penyelidikan ini ialah mengkaji kesan In_2O_3 terhadap sifat elektrik dan kerentanan arus ulang alik Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O. In_2O_3 mempunyai takat lebur yang lebih tinggi (1910°C) berbanding Bi_2O_3 (817°C) dan keupayaannya sebagai pengepin fluks dikaji. Struktur dan mikrostruktur bahan, rintangan elektrik, kerentanan arus ulang alik dan ketumpatan arus genting J_c dilaporkan.

BAHAN DAN KAEDAH

Sampel Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O telah disediakan dengan menggunakan kaedah tindak balas keadaan pepejal. Serbuk oksida berketulenan tinggi (99.9%) iaitu Bi_2O_3 , PbO, SrO, CaO dan CuO dicampurkan mengikut formula stoikiometri kimia $\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$. Bahan dikisar dengan menggunakan mortar sehingga homogen. Serbuk

ini dipanaskan pada 800°C selama 24 jam. Seterusnya, bahan dikisar sekali lagi dan dipanaskan untuk kali kedua pada suhu dan tempoh yang sama. Seterusnya In_2O_3 ditambah mengikut komposisi $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_x)\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ ($x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$ dan 0.10 % bt.), dikisar dan dipeletkan (diameter 13 mm dan tebal 2 mm) sebelum dipanaskan pada 845°C selama 24 jam.

Struktur dan fasa sampel telah ditentukan menggunakan kaedah pembelauan sinar-X dengan menggunakan pembelau sinar-X model Bruker Diffractometer D8 Advance. Peratus pecahan isi padu fasa Bi-2223 dan Bi-2212 telah dianggarkan daripada jumlah keamatan (I) setiap fasa menggunakan formula daripada Karaca et al. (2009):

$$\text{Bi-2212 \%} = \frac{\sum I_{2212}}{\sum I_{2223} + \sum I_{2212}} \times 100\%$$

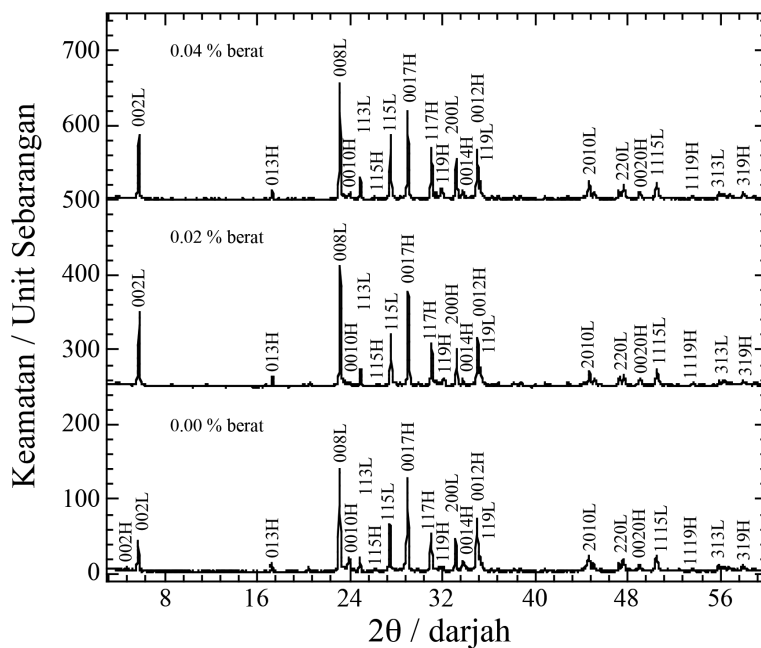
$$\text{Bi-2223 \%} = \frac{\sum I_{2223}}{\sum I_{2223} + \sum I_{2212}} \times 100\%$$

Mikrostruktur telah direkodkan dengan mikroskop elektron imbasan (SEM) Merlin Gemini. Rintangan elektrik diukur menggunakan kaedah penduga empat titik dengan cat perak digunakan sebagai sentuhan elektrik. Penyejuk kitar tertutup CTI Cryogenics Model 22 dan pengawal suhu daripada Lake Shore Model 340 telah digunakan untuk pengukuran pada suhu rendah. Sumber arus tetap yang menghasilkan nilai arus berjulat 1 mA hingga 10 mA digunakan sepanjang pengukuran.

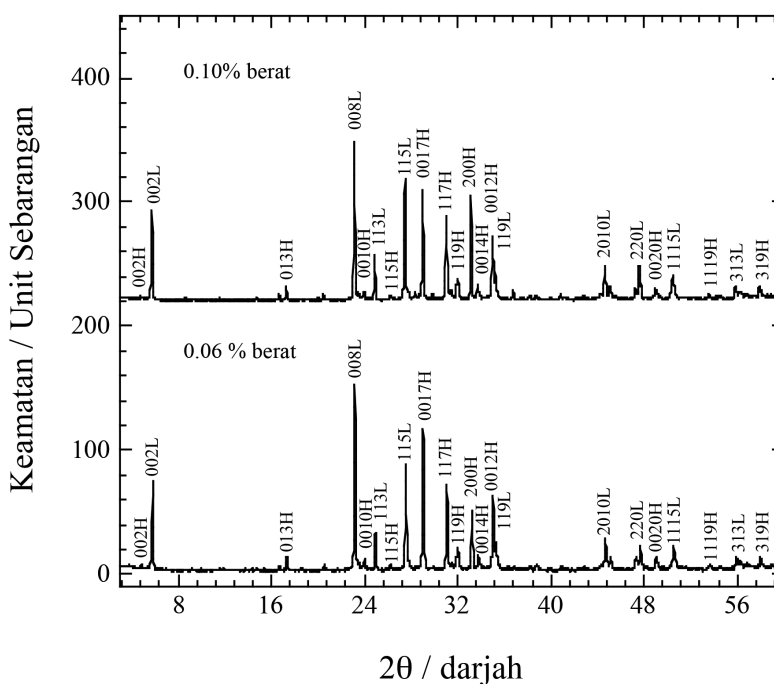
Pengukuran kerentanan arus ulang alik dijalankan menggunakan suseptometer dari Cryo Industry nombor model REF-1808-ACS. Isyarat frekuensi ulang alik yang digunakan ialah 295 Hz dan medan magnet dikenakan ialah $H = 400$ A/m (5 Oe). Sampel untuk pengukuran arus ulang alik dipotong dalam bentuk bar dengan dimensi keratan rentas lebih kurang 1 hingga 2 mm². Ketumpatan arus genting $J_c(T_p)$ antara butiran pada suhu puncak kerentanan khayal χ'' dikira menggunakan formula model Bean, $J_c = H/(ab)^{1/2}$ dengan H ialah medan yang dikenakan, a dan b ialah saiz keratan rentas sampel bentuk bar (Bean 1964).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Analisis corak pembelauan sinar-X menunjukkan kewujudan puncak fasa Bi-2223 dan fasa Bi-2212 pada semua sampel. Corak pembelauan sinar-X ditunjukkan dalam Rajah 1(a) bagi $x = 0, 0.02, 0.04$ % bt. dan Rajah 1(b) bagi $x = 0.06$ dan 0.10 % bt. Peratus pecahan isi padu fasa Bi-2223 dan Bi-2212 adalah hampir sama dengan penambahan In_2O_3 untuk semua sampel (50:50) (Jadual 1). Selain itu, puncak In_2O_3 tidak dikesan dalam corak XRD disebabkan amaun yang kecil. Mikrostruktur sampel menunjukkan bentuk seperti plat dengan purata panjang butiran lebih kurang 2 μm . SEM untuk sampel x



Rajah 1(a)



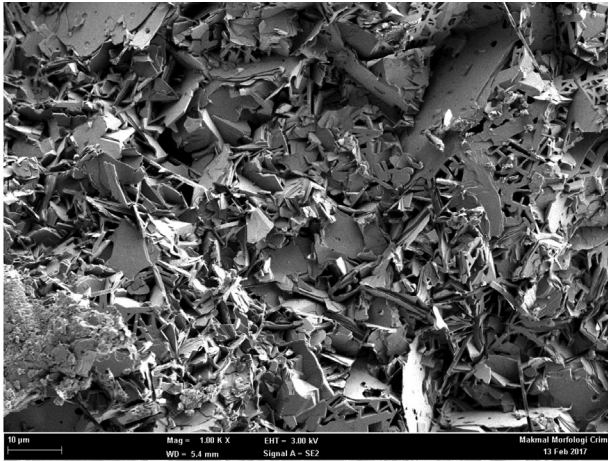
Rajah 1(b)

RAJAH 1. Corak pembelauan sinar-X bagi sampel $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan (a) $x = 0, 0.02, 0.04$ dan (b) $x = 0.06$ dan 0.10 % bt. L ialah puncak fasa Bi-2212 dan H ialah puncak fasa Bi-2223

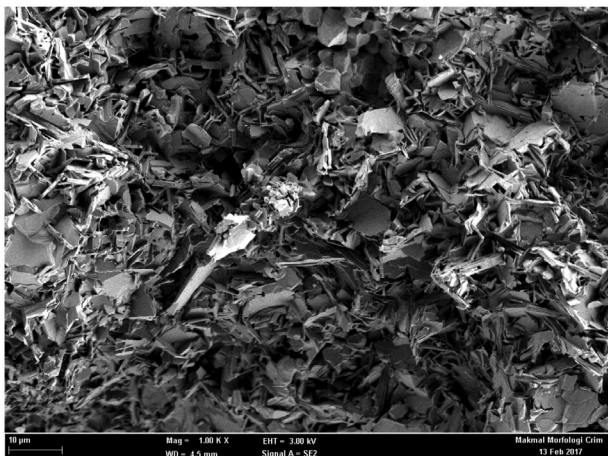
= 0 % bt. ditunjukkan dalam Rajah 2(a) dan $x = 0.04$ % bt. dalam Rajah 2(b). Penambahan In_2O_3 tidak mengubah mikrostruktur sampel.

Lengkung rintangan elektrik melawan suhu ditunjukkan dalam Rajah 3. Semua sampel bersifat seperti logam pada keadaan biasa. Suhu genting mula, $T_{c \text{ mula}}$ dan suhu genting sifar, $T_{c \text{ sifar}}$ bagi sampel tanpa penambahan In_2O_3

menunjukkan suhu yang tertinggi iaitu masing-masing 112 K dan 90 K. Julat peralihan suhu genting yang agak besar iaitu pada Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O tanpa penambahan In_2O_3 dan bentuk tangga pada graf lengkung rintangan melawan suhu menunjukkan kehadiran fasa Bi-2223 dan fasa Bi-2212 di dalam sampel. Terdapat penurunan pada $T_{c \text{ sifar}}$ dengan penambahan In_2O_3 menunjukkan bahawa kemungkinan

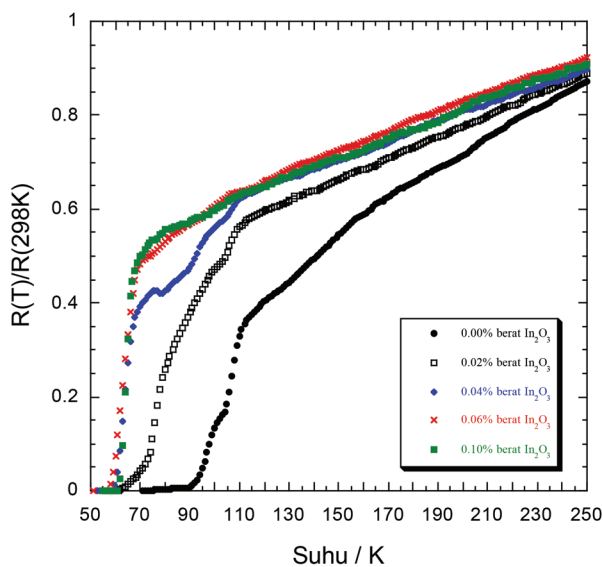


(a)



(b)

RAJAH 2. Mikrograf SEM untuk sampel (a) $x = 0$ dan (b) $x = 0.04$ % bt.

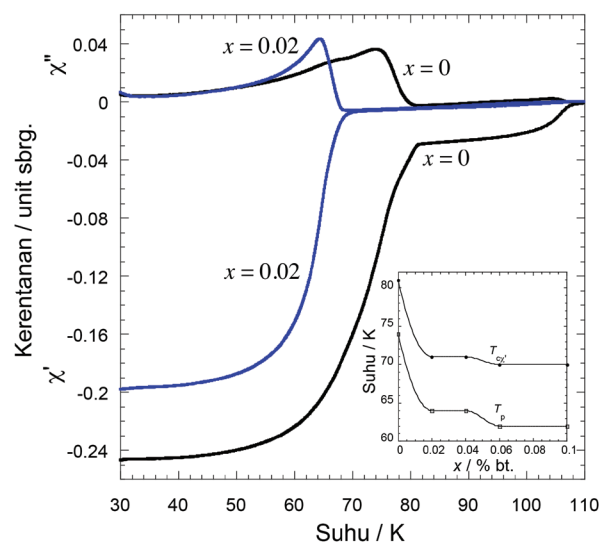


RAJAH 3. Rintangan ternormal $R(T)/R(298\text{ K})$ melawan suhu bagi sampel $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$ dan 0.10 % bt.

wujudnya ikatan yang lemah antara fasa atau disebabkan oleh mekanisme pemecahan pasangan Cooper (Azman et al. 2014). Penambahan In_2O_3 yang tinggi telah menekan sifat kesuperkonduksian dan $T_{c\text{mula}}$ menurun daripada 112 K kepada 70 K apabila penambahan In_2O_3 ialah 0.06 % bt. atau lebih.

Analisis kerentanan arus ulang alik menunjukkan suhu genting $T_{c\text{g}}$ menurun apabila In_2O_3 ditambah (Rajah 4). $\text{Bi}(\text{Pb})\text{-Sr-Ca-Cu-O}$ tanpa penambahan In_2O_3 menunjukkan $T_{c\text{g}}$ 108 K pada kerentanan nyata, χ' . $T_{c\text{g}}$ menurun kepada 71 K dengan penambahan In_2O_3 sebanyak 0.02 % berat. Tiada perubahan $T_{c\text{g}}$ yang ketara untuk sampel yang lain (antara 70 hingga 71 K). Keputusan ini menunjukkan penambahan In_2O_3 ke dalam $\text{Bi}(\text{Pb})\text{-Sr-Ca-Cu-O}$ telah meleraikan sifat kesuperkonduksian dan seterusnya menurunkan $T_{c\text{g}}$. Selain itu, $\text{Bi}(\text{Pb})\text{-Sr-Ca-Cu-O}$ tanpa penambahan In_2O_3 menunjukkan peralihan bentuk tangga pada suhu peralihan untuk χ' (Rajah 4). Pembentukan tangga ini menunjukkan kewujudan fasa Bi-2223 pada suhu lebih tinggi dan fasa Bi-2212 pada suhu lebih rendah. Penurunan tajam pada bahagian nyata χ' kerentanan kompleks ($\chi = \chi' + i\chi''$) di bawah suhu peralihan adalah disebabkan oleh pemerisaian diamagnet dan puncak pada kerentanan khayal, χ'' menunjukkan kehilangan tenaga arus ulang alik. Nilai suhu genting yang diukur dengan kaedah penduga empat titik T_c dan kerentanan arus ulang alik $T_{c\text{g}}$ adalah konsisten antara satu sama lain.

Jadual 1 menunjukkan suhu genting mula, $T_{c\text{mula}}$, suhu genting sifar, $T_{c\text{sifar}}$, suhu genting kerentanan nyata, $T_{c\text{g}}$, suhu pada puncak χ'' , T_p , ketumpatan arus genting antara butiran, $J_c(T_p)$, parameter kekisi a, b dan c , peratus pecahan isi padu fasa Bi-2223, V_{2223} dan Bi-2212, V_{2212} untuk semua sampel. Ketumpatan arus genting untuk semua sampel ialah antara 16 dan 20 A cm^{-2} . Suhu rintangan sifar adalah hampir sama dengan suhu puncak T_p .



RAJAH 4. Kerentanan arus ulang alik, $\chi = \chi' + i\chi''$ melawan suhu untuk $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan $x = 0$ dan 0.02 % bt. Sisipan menunjukkan graf $T_{c\text{g}}$ dan T_p melawan x bagi fasa Bi-2212

JADUAL 1. $T_{c\text{ mula}}, T_{c\text{ sifar}}, T_{c\chi}, T_p, J_c(T_p)$, parameter kekisi untuk fasa Bi-2212 dan pecahan isipadu V_{2223} , dan V_{2212} untuk sampel $(\text{Bi}_{1-x}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan $x = 0, 0.02, 0.04, 0.06$, dan 0.10 % bt. Sampel $x = 0$ menunjukkan dua peralihan dalam $T_{c\chi}$ and T_p disebabkan oleh fasa Bi-2223 (fasa T_c tinggi) dan Bi-2212 (fasa T_c rendah)

| x / % bt. | 0 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.10 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
| $T_{c\text{ mula}} / \text{K}$ | 112 | 111 | 111 | 70 | 70 |
| $T_{c\text{ sifar}} / \text{K}$ | 90 | 64 | 61 | 57 | 57 |
| $T_{c\chi} / \text{K}$ | 108/81 | 71 | 71 | 70 | 70 |
| T_p / K | 104/74 | 64 | 64 | 62 | 62 |
| $J_c(T_p) / \text{A cm}^2$ | 19 | 18 | 16 | 18 | 20 |
| a (Å) | 5.4010 | 5.3766 | 5.3830 | 5.3914 | 5.4010 |
| b (Å) | 5.4030 | 5.3892 | 5.3956 | 5.3913 | 5.4030 |
| c (Å) | 30.7672 | 30.6708 | 30.7311 | 30.707 | 30.6708 |
| $V_{2223} / \%$ | 46 | 45 | 47 | 51 | 47 |
| $V_{2212} / \%$ | 54 | 55 | 53 | 49 | 53 |

Semua sampel menunjukkan struktur sel unit ortorombik (Jadual 1). Parameter kekisi bagi sampel BPSOCO tanpa penambahan In_2O_3 ialah $a = 5.4010$ Å, $b = 5.4030$ Å, dan $c = 30.7672$ Å. Terdapat sedikit penurunan pada nilai kekisi a , b dan c dengan penambahan In_2O_3 ($x = 0.02$ % bt.). Hal ini berkemungkinan berlakunya penggantian Bi^{3+} dengan In^{3+} disebabkan ia mempunyai ciri valensi yang sama dengan bismut iaitu (3+). Tambahan pula, jejariya dalam bentuk trivalen ialah 0.81 Å yang lebih kecil daripada jejari bismut iaitu 1.20 Å dan boleh menjadi lebih besar iaitu 1.32 Å apabila ia dalam bentuk monovalen memungkinkan penggantian tersebut (Nicolas et al. 1989). Menurut Nicolas et al. (1989) lagi, terdapat hipotesis yang menyatakan jika In^{3+} kekal dalam bentuk trivalen, maka ia tidak sepenuhnya berada di tapak Bi^{3+} , tetapi sebahagian di tapak Ca^{2+} dan ini juga akan mempengaruhi parameter kekisi sampel.

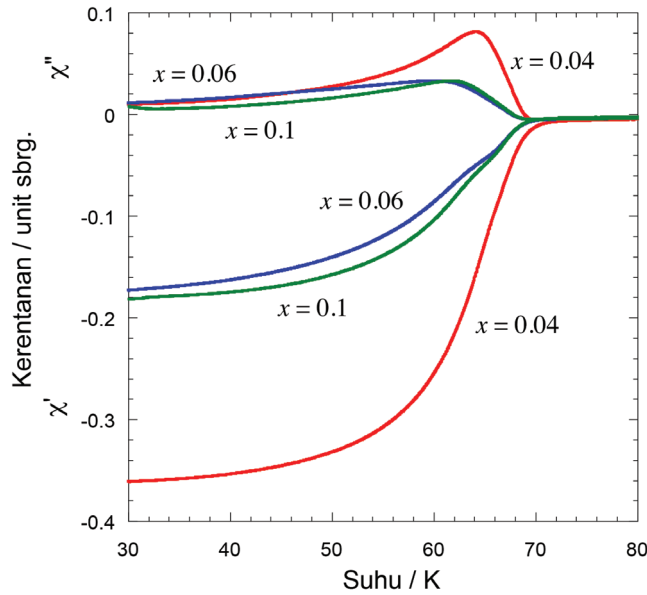
Nilai suhu genting tidak konsisten dengan peratus fasa V_{2223} dan V_{2212} . Sebagai contoh sampel $x = 0 - 0.04$ dengan peratus fasa $V_{2223} \sim 46\%$ menunjukkan suhu genting yang lebih tinggi (111 – 112 K) berbanding dengan sampel $x = 0.06$ dengan peratus fasa (51%) yang lebih tinggi. Ini mungkin disebabkan oleh pengaruh In yang memasuki struktur hablur fasa 2212 dan 2223. Walaupun fasa 2223 adalah tinggi dalam sampel yang ditambah In_2O_3 ($x = 0.06$) nilai T_c adalah rendah kerana In boleh menurunkan T_c dengan valens In yang berbeza. Valens In yang berbeza ini telah meningkatkan kerintangan dan menurunkan ketumpatan cas pengangkut fasa 2223 lalu menurunkan suhu genting.

Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O tanpa penambahan In_2O_3 menunjukkan kewujudan dua puncak manakala sampel-sampel lain menunjukkan satu puncak pada χ'' . Satu puncak kecil pada sampel Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O tanpa penambahan In_2O_3 (104 K) menunjukkan kewujudan fasa

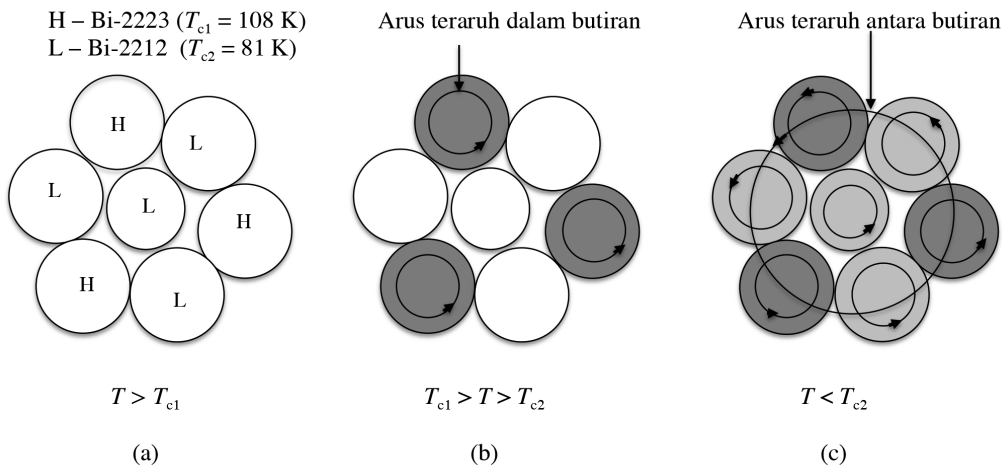
Bi-2223 (Rajah 4) manakala puncak lebar pada semua sampel menunjukkan kehilangan tenaga gandingan di antara butiran (Rajah 5). Hal ini menunjukkan fluks magnet menembusi di antara butiran pada semua sampel dan fluks menembusi butiran pada komposisi $x = 0$ di bawah T_c . Pada T_p , nilai medan magnet ulang alik adalah sama dengan nilai maksimum penembusan fluks. T_p didapati menurun dan puncak semakin melebar apabila penambahan In_2O_3 meningkat. Hal ini disebabkan penambahan In_2O_3 telah melemahkan gandingan antara butiran dan menurunkan tenaga pengepitan fluks (Yavuz et al. 2016). Graf sisipan dalam Rajah 4 menunjukkan perubahan $T_{c\chi}$ dan T_p dengan kandungan In_2O_3 . Perbezaan suhu antara bermulanya pemerisaian medan magnet $T_{c\chi}$ dengan gandingan penuh antara butiran T_p , tidak banyak berubah (7-8 K). Ini menunjukkan bahawa In_2O_3 memberi kesan tindasan yang sama terhadap pemerisaian medan magnet dan gandingan antara butiran dalam Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O.

Satu keputusan penting kajian ini ialah sifat pemerisaian medan magnet adalah berkesan apabila seratus peratus bahan mensuperkonduksi. Dalam kajian ini isi padu fasa Bi-2223 dengan $T_c \sim 108$ K adalah lima puluh peratus dan fasa Bi-2212 dengan $T_c \sim 81$ K adalah lima puluh peratus. Kajian ini mendapati untuk mendapatkan pemerisaian medan magnet yang berkesan pada suhu kurang daripada 81 K diperlukan. Pada suhu kurang daripada 81 K, seratus peratus bahan adalah mensuperkonduksi, manakala pada 110 K walaupun lima puluh peratus bahan adalah mensuperkonduksi, pemerisaian medan tidak berlaku sepenuhnya.

Rajah 6 menunjukkan model skematik superkonduktor polihablur yang mempunyai dua fasa sama banyak (50:50) dengan suhu genting yang berlainan. Rajah 6(a) menunjukkan keadaan pada suhu melebihi suhu genting



RAJAH 5. Kerentanan arus ulang alik kompleks, $\chi = \chi' + i\chi''$ melawan suhu untuk $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan $x = 0.04, 0.06$, dan 0.10 % bt.



RAJAH 6. Model skematik aruhan arus dalam superkonduktor polihablr dua fasa dengan suhu genting berlainan $T_{c1} > T_{c2}$: (a) keadaan pada suhu melebihi T_{c1} , (b) keadaan antara suhu genting Bi-2212 dan Bi-2223 ($T_{c1} > T > T_{c2}$) dengan arus teraruh dalam butiran, (c) keadaan pada suhu di bawah suhu genting Bi-2212 ($T < T_{c2}$) dengan arus teraruh antara butiran

Bi-2223 ($T > T_{c1}$). Rajah 6(b) menunjukkan keadaan antara suhu genting Bi-2223 dan Bi-2212 ($T_{c1} > T > T_{c2}$) dengan lima puluh peratus bahan adalah mensuperkonduksi. Dalam keadaan ini hanya wujud arus teraruh dalam butiran. Dalam Rajah 6(c) ($T < T_{c2}$) semua butiran menjadi superkonduktor dan wujud arus teraruh antara butiran dan pemerisaian pukal medan magnet berlaku.

KESIMPULAN

Kesan penambahan In_2O_3 terhadap superkonduktor $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}(\text{In}_2\text{O}_3)_x$ dengan ($x = 0 - 0.10$ % bt.) telah dikaji. $T_{c \text{ sifar}}$ dan $T_{c \text{ mula}}$ tertinggi ialah masing-masing 112 K dan 90 K pada komposisi $x = 0$. Kerentanan

arus ulang alik menunjukkan fluks magnet menembusi di antara butiran pada semua sampel di bawah T_p . Penambahan In_2O_3 telah menyebabkan anjakan T_p kepada suhu lebih rendah dan pelebaran puncak menandakan pengurangan gandingan di antara butiran dan penurunan tenaga pengepinan fluks. Kajian terhadap ketumpatan arus genting angkutan dicadangkan untuk penyelidikan selanjutnya bagi mendapatkan maklumat yang lebih mendalam terhadap kemampuan In_2O_3 untuk mengepin fluks. J_c dan kerentanan arus ulang alik perlu diukur dengan menggunakan medan magnet yang lebih tinggi dan frekuensi yang berbeza untuk memahami dinamik fluks dalam Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O dengan penambahan In_2O_3 .

PENGHARGAAN

Penyelidikan ini telah dibiayai oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia di bawah geran FRGS/1/2017/STG02/UKM/01/1 dan Universiti Kebangsaan Malaysia di bawah geran nombor AP-2015-006.

RUJUKAN

- Abd-Shukor, R. & Kong, W. 2009. Magnetic field dependent critical current density of Bi-Sr-Ca-Cu-O superconductor in bulk and tape form with addition of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles. *Journal of Applied Physics* 105(7): 07E311.
- Abdeen, W., Marahba, S., Awad, R., Abou Aly, A.I., Ibrahim, I.H. & Matar, M. 2016. Electrical and mechanical properties of (Bi, Pb)-2223 substituted by holmium. *Journal of Advanced Ceramics* 5(1): 54-69.
- Annas Al-Sharabi, Sarah Yasmin Tajuddin, Au Diya Fatimah Wan Saffiey, Syazana Jasman, Alwi, H.A., Jumali, M.H. & Abd-Shukor, R. 2016. Excess conductivity analysis of PbO nanoparticle added $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductor (in Malay). *Sains Malaysiana* 45(12): 1959-1968.
- Azman, N.J., Abdullah, H. & Abd-Shukor, R. 2014. Transport critical current density of $(\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4})\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ceramic superconductor with different nanosized Co_3O_4 addition. *Advances in Condensed Matter Physics* 2014: 498747.
- Bean, C.P. 1964. Magnetization of high-field superconductors. *Reviews of Modern Physics* 36: 31-39.
- Bilgili, O., Selamet, Y. & Kocabaş, K. 2008. Effects of Li substitution in Bi-2223 superconductors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 21(8): 439-449.
- Gul, I.H., Amin, F., Abbasi, A.Z., Anis-Ur-Rehman, M. & Maqsood, A. 2006. Effect of Ag_2CO_3 addition on the morphology and physical properties of Bi-based (2223) high- T_c superconductors. *Physica C* 449(2): 139-147.
- Hamid, N.A. & Abd-Shukor, R. 2000. Effects of TiO_2 addition on the superconducting properties of Bi-Sr-Ca-Cu-O system. *Journal of Materials Science* 35(9): 2325-2329.
- Hiroshi, M., Yoshiaki, T., Masao, F. & Toshihisa, A. 1988. A new high- T_c oxide superconductor without a rare earth element. *Japanese Journal of Applied Physics* 27(2A): L209.
- Karaca, I., Uzun, O., Kölemen, U., Yilmaz, F. & Sahin, O. 2009. Effects of ZnO addition on mechanical properties of $\text{Bi}_{1.84}\text{Pb}_{0.34}\text{Sr}_{1.91}\text{Ca}_{2.03}\text{Cu}_{3.06}\text{O}_{10}$ prepared by a wet technique. *Journal of Alloys and Compounds* 476(1-2): 486-491.
- Nicolas, M., Ph, L., Thord, E., Burger, J.P. & Alvez, M. 1989. Effect of indium substitution in the 80 K and 110 K superconductors of the Bi-Sr-Ca-Cu-O system. *Superconductor Science and Technology* 2(6): 304-307.
- Nkum, R.K., Punnett, A., Ummat, P.K. & Datars, W.R. 1992. Indium doping in the Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconducting system. *Physica C* 194(3): 321-326.
- Özçelik, B., Gürsul, M., Sotelo, A. & Madre, M.A. 2014. Improvement of superconducting properties in Na-doped BSCCO superconductor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 26(1): 441-447.
- Robaiah, M., Azhan, H., Azman, K., Syamsyir, S.A., Syuhaida, I.N., Azura, C.M.N. & Rosli, M.M. 2016. The influence of Ce-doping on structural and superconducting properties in low-density $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.3}\text{Ce}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductor. *Materials Science Forum* 846: 579-585.
- Rodrigues, V., De Souza, G., De Lima, R., Carvalho, C. & Zadorosny, R. 2013. Effect of La doping on the structural, electrical, magnetic and morphological properties of the BSCCO system. *arXiv preprint arXiv:1311.7353*
- Yavuz, Ş., Bilgili, Ö. & Kocabaş, K. 2016. Effects of superconducting parameters of SnO_2 nanoparticles addition on (Bi, Pb)-2223 phase. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 27(5): 4526-4533.
- Zhang, J.G., McCartney, D.G. & Humphreys, C.J. 1990. On the microstructural evolution of sintered Bi-Sr-Ca-Cu-O high- T_c superconductors. *Superconductor Science and Technology* 3(4): 185-190.

School of Applied Physics
Faculty of Science and Technology
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ras@ukm.edu.my

Diserahkan: 13 Februari 2017

Diterima: 2 Jun 2017