

## Modulus Kekenyalan dan Pemalar Gandingan Elektron-Fonon Superkonduktor $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$

(Elastic Moduli and Electron-Phonon Coupling Constant of  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$  Superconductor)

R. ABD-SHUKOR<sup>1,\*</sup>, C.M. CHEW<sup>1</sup>, M.S. TANG<sup>1</sup>, N.J. NOR-AZAH<sup>2</sup>, W.S. CHIU<sup>3</sup>, S.K. CHEN<sup>4</sup>, M.N. MOHD NASIR<sup>1</sup> & DANIYAR USKENBAEV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>2</sup>Pusat PERMATA@Pintar Negara, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

<sup>3</sup>Low Dimensional Materials Research Centre, Department of Physics, Faculty of Science, Universiti Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia

<sup>4</sup>Department of Physics, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia

<sup>5</sup>Institute of Energy, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

Diserahkan: 15 Disember 2025/Diterima: 27 Januari 2026

### ABSTRAK

Kaedah ultrasonik amat sensitif untuk mengesan peranan fonon dalam mekanisme superkonduktor. Dalam kajian ini, halaju bunyi bujur,  $v_L$  dan ricih,  $v_s$  bagi superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$  dengan  $x = 0, 0.02$  dan  $0.05$  telah diukur daripada 80 K hingga sekitar 220 K dan frekuensi 10 MHz.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  menunjukkan suhu genting mula,  $T_{c\text{-mula}}$  93 K dan sampel  $x = 0.02$  menunjukkan  $T_{c\text{-mula}}$  58 K, manakala sampel  $x = 0.05$  tidak menunjukkan sifat superkonduktor. Halaju bunyi bujur dan ricih meningkat secara monotonik apabila suhu diturunkan hingga ke 80 K. Suhu Debye,  $\theta_D$  menurun apabila Fe didopkan ke dalam  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .  $\theta_D$  adalah 370 K bagi  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dan 314 K dan 265 K masing-masing bagi  $x = 0.02$  dan  $0.05$ . Ini menunjukkan pelembutan kekisi berlaku apabila sifat mensuperkonduksi bahan berkurangan. Pemalar gandingan elektron-fonon bagi superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  mengikut teori BCS tiga dimensi dalam had gandingan lemah ialah  $\lambda_{\text{BCS}} = 0.67$ , manakala dalam senario van Hove dua dimensi,  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.023$ . Bagi sampel  $x = 0.02$ ,  $\lambda_{\text{BCS}} = 0.55$  dan  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.020$ . Nilai  $\lambda_{\text{vH2}}$  ini adalah selaras dengan nilai yang diukur dan dilaporkan dalam superkonduktor oleh penyelidik lain. Kajian ini menunjukkan bahawa gandingan elektron-fonon serta ketumpatan keadaan yang tidak terhingga pada aras Fermi seperti yang dicadangkan oleh model van Hove dua dimensi dapat menerangkan mekanisme superkonduktor suhu tinggi dalam  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

Kata kunci: Halaju bujur; halaju ricih; senario van Hove; suhu Debye

### ABSTRACT

The ultrasonic method is very sensitive in determining the role of phonons in the mechanism of superconductivity. In this research, the longitudinal velocity,  $v_L$  and shear velocity,  $v_s$  for  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$  superconductors with  $x = 0, 0.02$  and  $0.05$  have been measured between 80 K and around 220 K at a frequency of 10 MHz.  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  exhibited an onset transition temperature,  $T_{c\text{-onset}}$  of 93 K and the  $x = 0.02$  sample showed  $T_{c\text{-onset}}$  of 58 K while the  $x = 0.05$  showed no transition temperature. The longitudinal and shear velocities increased monotonically with decreasing temperature down to 80 K. The Debye temperature,  $\theta_D$ , decreased with Fe doping. For  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  $\theta_D$  is 370 K, while for the Fe-doped samples it is reduced to 314 K ( $x = 0.02$ ) and 265 K ( $x = 0.05$ ), respectively. This decrease showed lattice softening when the superconducting property was suppressed. The electron-phonon coupling constant of  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  according to the weak coupling limit of the BCS theory is  $\lambda_{\text{BCS}} = 0.67$ , while in the two-dimensional van Hove scenario,  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.023$ . For the  $x = 0.02$  sample,  $\lambda_{\text{BCS}} = 0.55$  and  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.020$ . These  $\lambda_{\text{vH2}}$  values are consistent with the measured values reported in superconducting cuprates reported by other researchers. This work showed that the electron-phonon coupling together with the infinite density of states at the Fermi level as suggested in the two-dimensional van Hove scenario can be used to explain high temperature superconductivity in the  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  superconductor.

Keywords: Debye temperature; longitudinal velocity; shear velocity; van Hove scenario

## PENGENALAN

Teknik ultrasonik adalah sensitif kepada perubahan kecil dalam sifat kenyal dan interaksi elektron-fonon yang berkaitan dengan peralihan kepada fasa superkonduktor. Dalam bahan superkonduktor, halaju bunyi mengalami perubahan mendadak apabila menghampiri suhu genting seperti yang dijangkakan dalam peralihan fasa tertib kedua. Perubahan ini dikaitkan dengan ketidakstabilan struktur kekisi semasa proses peralihan fasa daripada keadaan normal kepada keadaan mensuperkonduksi, sebagaimana yang telah dilaporkan dalam beberapa kajian terdahulu (Abd-Shukor 2018; Abd-Shukor & Kong 2011; Abd-Shukor et al. 2023; Zhang, Ying & Yuan 2011).

Sifat ultrasonik bahan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  telah banyak dilaporkan. Sebelum ini sifat ultrasonik  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dengan kandungan oksigen yang berlainan telah dilaporkan (Abd-Shukor & Tang 2021).  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  mempunyai beberapa perbezaan penting. Suhu peralihan superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  biasanya lebih tinggi berbanding  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  kerana kestabilan oksigen yang berbeza dalam kekisi. Struktur hablur  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  juga kurang stabil dan lebih mudah mengalami pemisahan fasa berbanding  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Dari segi sifat mekanikal,  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  lebih tegar kerana saiz ion  $\text{Nd}^{3+}$  yang lebih besar. Perbezaan ini mempengaruhi sifat kesuperkonduksian dan sifat kenyal kedua-dua bahan. Oleh itu, kajian lanjut mengenai sifat ultrasonik  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  menarik untuk dikaji dan dibandingkan dengan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  yang telah banyak dilaporkan.

Pengedopan Fe secara amnya menyebabkan penurunan suhu genting superkonduktor. Ini berlaku kerana Fe bersifat magnet dan bertindak sebagai pusat serakan yang memecahkan pasangan Cooper. Selain itu, gangguan pada satah  $\text{CuO}_2$  mengurangkan mobiliti pembawa cas yang penting untuk superkonduktor suhu tinggi. Dari segi sifat ultrasonik, kehadiran Fe boleh mengubah pemalar kekenyalan berhampiran suhu genting. Kesan ini dikaitkan dengan ketidakstabilan kekisi, perubahan interaksi elektron-fonon dan ketakselajaran fasa akibat pengedopan. Model van Hove dua dimensi telah dicadangkan untuk menerangkan mekanisme pemasangan elektron dalam superkonduktor kuprum oksida ini. Model ini berasaskan kepada sifat semula jadi konduktor dua dimensi seperti lapisan  $\text{CuO}_2$  yang mempunyai ketumpatan keadaan yang tidak terhingga pada aras Fermi (Getino, Rubio & del Llano 1992; Labbé & Bok 1987). Hal ini memberikan persamaan suhu genting yang berlainan daripada teori BCS tiga dimensi. Kajian terkini juga telah menggunakan model van Hove untuk menerangkan sifat superkonduktor  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  (Wen et al. 2025).

Objektif penyelidikan ini adalah untuk mengkaji kesan pengedopan Fe terhadap sifat ultrasonik dan gandingan elektron-fonon dalam superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$ . Pencirian yang dijalankan termasuklah pembelaan sinar-X, mikroskop elektron imbasan

pengukuran rintangan elektrik dan pengukuran halaju ultrasonik. Pemalar gandingan elektron-fonon yang ditentukan dalam uji kaji ini dibandingkan dengan laporan terdahulu dan model dua dimensi van Hove digunakan untuk menerangkan mekanisme bagi superkonduktor suhu tinggi ini.

## BAHAN DAN KAEDAH

Bahan superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$  telah disediakan daripada serbuk logam oksida  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  dan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan ketulenan 99.9%. Serbuk dengan jisim yang ditentukan telah dicampur mengikut formula  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$  untuk  $x = 0, 0.02$  dan  $0.05$ . Campuran ini dipanaskan pada suhu  $900^\circ\text{C}$  selama 48 jam dalam atmosfera dan dikisar sekali selepas 24 jam dan dipanaskan semula. Serbuk ini kemudiannya ditekan menjadi pelet dengan diameter 12 mm dan tebal 2 mm. Pelet dikisar dan ditekan semula beberapa kali untuk meningkatkan ketumpatan sampel. Ketumpatan yang tinggi diperlukan untuk mendapatkan isyarat gema bagi pengukuran ultrasonik. Ketumpatan jisim diukur dengan membahagikan jisim dengan isi padu pelet.

Fasa yang terbentuk ditentukan dengan kaedah pembelaan sinar-X (XRD) menggunakan alat model Bruker D8 dengan sinaran  $\text{CuK}\alpha$ , panjang gelombang  $\lambda = 1.514 \text{ \AA}$  dengan imbasan dari  $2\theta = 2^\circ$  hingga  $60^\circ$ . Parameter kekisi telah dianggarkan melalui kaedah Pawley menggunakan tidak kurang daripada sepuluh puncak corak pembelaan sinar-X. Mikrograf mikroskop elektron imbasan (SEM) telah direkodkan menggunakan mikroskop elektron imbasan Philips XL 30.

Suhu genting ditentukan melalui pengukuran rintangan elektrik dengan kaedah penduga empat titik. Cat perak digunakan sebagai penyentuh elektrik antara sampel dengan empat penduga tersebut. Jarak antara penduga adalah sekitar 2 mm. Sistem pengukuran terdiri daripada Multimeter Mikrovolt Keithley 197 dan sumber arus Keithley 220. Arus malar dalam julat 1 mA hingga 100 mA digunakan. Pengukuran dijalankan menggunakan kriostat CTI Cryogenics Model 22 dengan pengawal suhu Lake Shore Model 340. Suhu genting mula,  $T_{c-\text{mula}}$  ditakrifkan sebagai suhu berlakunya penurunan mendadak rintangan elektrik yang menandakan bermulanya pembentukan fasa superkonduktor.

Sistem ultrasonik MATEC 7700 gema denyut bertindih telah digunakan untuk mengukur halaju bunyi bujur,  $v_L$  dan halaju ricih,  $v_s$ . Transduser kuarza potongan-X (mod bujur) dan potongan-Y (mod ricih) dengan frekuensi dalam lingkungan 10 MHz digunakan. Pemilihan frekuensi ini adalah berdasarkan penghasilan corak gema yang paling optimum untuk setiap sampel. Gris Nonaq digunakan sebagai medium menghubungkan sampel dengan transduser. Pengukuran ultrasonik dari suhu 80 K hingga melebihi 220 K pada kadar 1 K/min telah dijalankan menggunakan kriostat Oxford Instruments (model DN 1711).

## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Corak pembelauan XRD untuk ketiga-tiga sampel ditunjukkan dalam Rajah 1. Kesemua sampel menunjukkan fasa tunggal  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dengan kumpulan ruang Pmmm. Sampel tanpa pengedopan Fe menunjukkan fasa tunggal dengan struktur ortorombik. Analisis puncak daripada corak XRD untuk sampel ini memberikan parameter kekisi  $a = 3.871 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.905 \text{ \AA}$  dan  $c = 11.76 \text{ \AA}$ . Kandungan oksigen untuk sampel tanpa Fe yang ditentukan menggunakan hubungan antara parameter kekisi dengan kandungan oksigen seperti yang dilaporkan oleh Shaked et al. (1990) ialah  $\text{O}_{7.0}$ . Kandungan oksigen bagi sampel dengan pengedopan Fe tidak ditentukan dalam kajian ini kerana keputusan oleh Shaked et al. (1990) tidak sesuai digunakan dalam sampel tersebut. Sampel dengan  $x = 0.02$  menunjukkan sifat ortorombik sel unit berkurangan iaitu parameter kekisi  $a$  menghampiri  $b$ , dengan  $a = 3.900 \text{ \AA}$ ,  $b = 3.908 \text{ \AA}$  dan  $c = 11.74 \text{ \AA}$ . Sampel  $x = 0.05$  pula menunjukkan struktur tetragonal iaitu  $a = b = 3.904 \text{ \AA}$  dan  $c = 11.74 \text{ \AA}$  (Jadual 1). Peningkatan isi padu,  $V$  sel unit sampel dengan pengedopan Fe boleh diterangkan seperti berikut. Jejari ion  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\approx 0.645 \text{ \AA}$  untuk koordinasi oktahedron) adalah lebih besar berbanding  $\text{Cu}^{2+}$  ( $\approx 0.57 \text{ \AA}$ ). Penggantian ini menyebabkan regangan kekisi setempat yang menyumbang kepada peningkatan isi padu sel unit.

Puncak sinar-X (001) yang kuat bagi  $x = 0.02$  dan  $0.05$  (Rajah 1(b) dan 1(c)) menunjukkan bahawa lapisan  $\text{CuO}_2$  tersusun dengan baik, yang boleh menjadi penting untuk sifat anisotropik, seperti arus genting sepanjang satah  $a$ - $b$  berbanding paksi  $c$ . Walau bagaimanapun, puncak (103), (013) dan (110) yang mula bertindih apabila Fe didopkan menunjukkan unit sel berubah daripada fasa ortorombik ke tetragonal dan ini mengurangkan serta memusnahkan sifat kesuperkonduksian bahan ini.

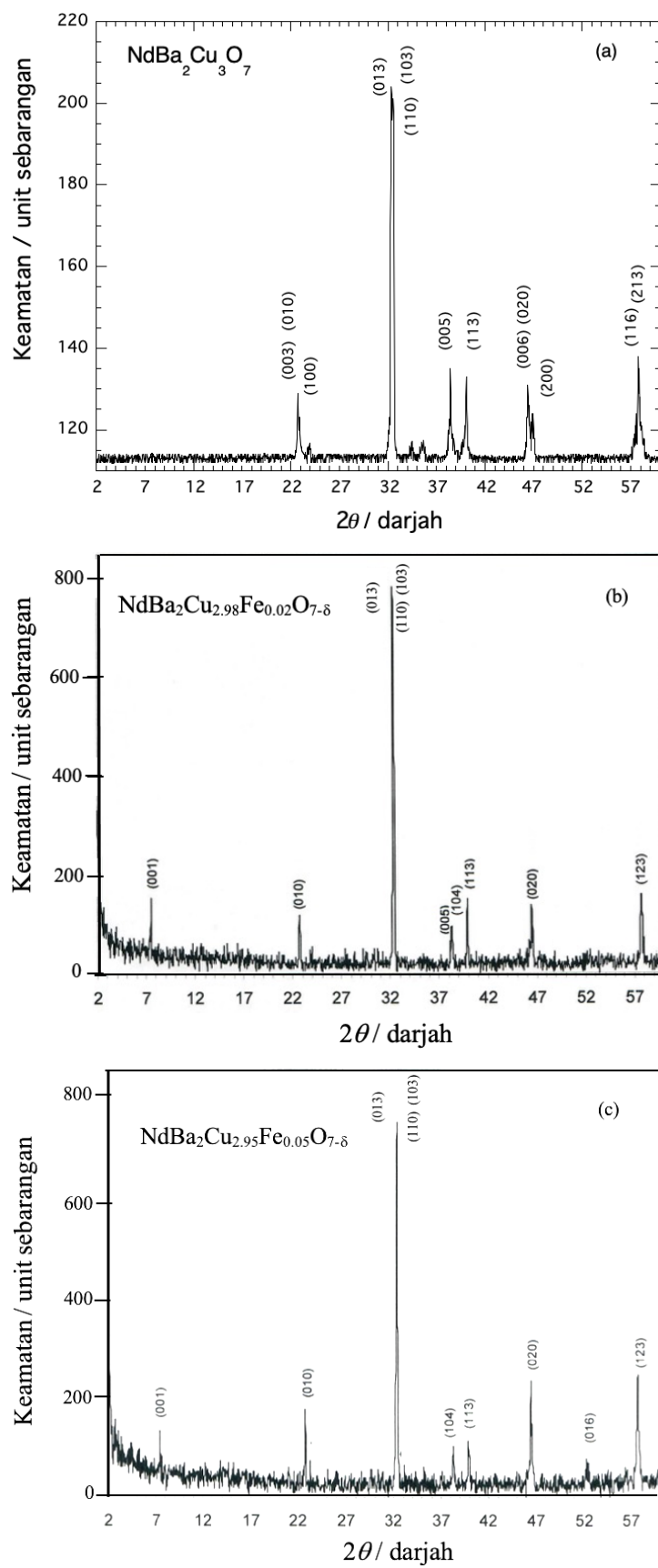
Mikrograf SEM sampel  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  tanpa pengedopan Fe menunjukkan butiran berbentuk kepingan yang agak besar dengan sempadan butiran yang jelas (Rajah 2(a)). Hubungan antara butiran adalah baik, menandakan proses pensinteran yang berkesan. Kehadiran liang adalah terhad dan kebanyakannya bersaiz sederhana. Mikrostruktur ini menyokong sifat superkonduktor yang baik kerana arus elektrik boleh mengalir antara butiran dengan lebih baik. Sebaliknya, mikrograf sampel  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7.8}$  (Rajah 2(b)) dan  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7.8}$  (Rajah 2(c)) memperlihatkan butiran yang lebih halus dan tidak tersusun. Pengedopan Fe telah mengganggu pertumbuhan butiran dan sambungan antara butiran, sekali gus mengurangkan hubungan antara butiran. Struktur yang lebih berliang ini boleh mempengaruhi suhu genting akibat gangguan terhadap kesinambungan rangkaian superkonduktor.

Rajah 3(a) menunjukkan lengkung rintangan elektrik melawan suhu bagi sampel tanpa pengedopan Fe dan  $x = 0.02$  (inset). Sampel tanpa Fe menunjukkan sifat logam

pada keadaan biasa dan  $T_{c-\text{mula}} = 93 \text{ K}$ . Penurunan linear rintangan apabila suhu diturunkan menunjukkan bahan bersifat logam dalam keadaan biasa. Rintangan elektrik  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7.8}$  meningkat apabila suhu diturunkan iaitu bersifat seperti semikonduktor pada keadaan biasa sebelum turun mendadak pada  $T_{c-\text{mula}} = 58 \text{ K}$  (Rajah 3(a)). Bahan  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7.8}$  pula menunjukkan sifat seperti semikonduktor dan tidak mensuperkonduksi pada suhu rendah (Rajah 3(b)). Dari segi kajian ultrasonik, ketiga-tiga sampel ini adalah menarik kerana berguna untuk membandingkan sampel dalam tiga keadaan yang berlainan iaitu dengan sifat superkonduktor yang baik ( $x = 0$ ), superkonduktor yang lemah ( $x = 0.02$ ) dan tidak mensuperkonduksi ( $x = 0.05$ ).

Rajah 4 menunjukkan corak gema ultrasonik daripada ketiga-tiga sampel yang dikaji. Bahan seramik polihabur boleh dimodelkan sebagai medium kenyal isotropik yang mempunyai dua modulus kekenyalan bebas. Medium ini dicirikan oleh beberapa modulus kekenyalan, iaitu modulus membujur  $L = \rho v_L^2$ , modulus ricih  $G = \rho v_s^2$ , modulus pukal  $B = \rho v_L^2 - \frac{4}{3}\rho v_s^2$  dan modulus Young,  $Y = \frac{G(3L-4G)}{L-G}$ , dengan  $\rho$  ialah ketumpatan jisim,  $v_s$  ialah halaju bunyi ricih dan  $v_L$  ialah halaju bujur. Suhu Debye akustik,  $\theta_D$  dikira menggunakan formula piawai  $\theta_D = \left(\frac{h}{k}\right)\left(\frac{3N}{4\pi V}\right)^{\frac{1}{3}}v_m$ , dengan  $h$  ialah pemalar Planck;  $k$  ialah pemalar Boltzmann;  $N$  ialah bilangan titik jisim;  $V$  ialah isi padu atom; dan  $v_m$  ialah halaju purata yang ditakrifkan oleh  $\frac{3}{v_m} = \frac{1}{v_L} + \frac{2}{v_s}$ . Halaju bunyi sampel tanpa liang boleh dianggarkan menggunakan hubungan  $v_l = \sqrt{\frac{\rho_{th}}{\rho_M}}v_M$  dengan  $v_l$  ialah halaju tanpa liang;  $v_M$  ialah halaju yang diukur;  $\rho_{th}$  ialah ketumpatan teori; dan  $\rho_M$  ialah ketumpatan yang diukur (Levy et al. 1992). Ketumpatan, halaju bunyi bujur dan ricih, modulus kekenyalan berkaitan serta suhu Debye yang diukur pada  $80 \text{ K}$  dan  $120 \text{ K}$  ditunjukkan dalam Jadual 1.

Rajah 5 menunjukkan perubahan halaju bujur dan ricih  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Ketiadaan histeresis menunjukkan pengaruh tegasan dalaman akibat sifat polihabur sampel ini adalah kecil. Rajah 6 dan 7 masing-masing menunjukkan perubahan halaju  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7.8}$  dan  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7.8}$ . Terdapat histeresis dalam halaju bujur dan ricih dan ini berlaku disebabkan oleh kesan tegasan dalaman daripada sifat polihabur sampel. Pengedopan Fe mengganggu pertumbuhan butiran dan sambungan antara butiran, sekali gus mengurangkan hubungan antara butiran dan meningkatkan tegasan dalaman dan berlakunya histeresis dalam halaju bunyi. Peratus perubahan halaju bujur  $\frac{\Delta v_L}{v_L}$  dan ricih  $\frac{\Delta v_s}{v_s}$  untuk ketiga-tiga sampel diberikan dalam Jadual 1. Sampel yang mensuperkonduksi ( $x = 0$ ) menunjukkan kadar pengerasan kekisi yang lebih tinggi apabila suhu diturunkan berbanding dengan sampel yang suhu gentingnya yang lebih rendah ( $x = 0.02$ ) dan sampel yang tidak mensuperkonduksi ( $x = 0.05$ ). Tiada perubahan mendadak halaju bunyi pada suhu genting dapat dilihat - mungkin disebabkan oleh kejutuan terhad alat yang digunakan.



RAJAH 1. Corak pembelauan sinar-X bagi (a)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , (b)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7-\delta}$  dan (c)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$

JADUAL 1.  $T_{c-mula}$ , parameter kisi, isi padu sel unit, ketumpatan jisim, halaju bujur ( $v_L$ ), halaju ricih ( $v_s$ ), modulus bujur ( $L$ ), modulus ricih ( $G$ ), modulus pukal ( $B$ ), modulus Young ( $Y$ ), suhu Debye ( $\theta_D$ ), gandingan elektron-fonon BCS ( $\lambda_{BCS}$ ) dan gandingan elektron-fonon van Hove ( $\lambda_{vH1}$  untuk  $T_F = 10\theta_D$  dan  $\lambda_{vH2}$  untuk  $T_F = 100\theta_D$ ) yang diukur pada 80 K bagi  $NdBa_2Cu_3O_7$  dan 120 K bagi  $NdBa_2Cu_{2.98}Fe_{0.02}O_{7-\delta}$  dan  $NdBa_2Cu_{2.95}Fe_{0.05}O_{7-\delta}$ , serta peratus perubahan halaju  $\frac{\Delta v_L}{v_L}$  dan  $\frac{\Delta v_s}{v_s}$ . Nilai dalam kurungan ialah anggaran sampel tanpa liang

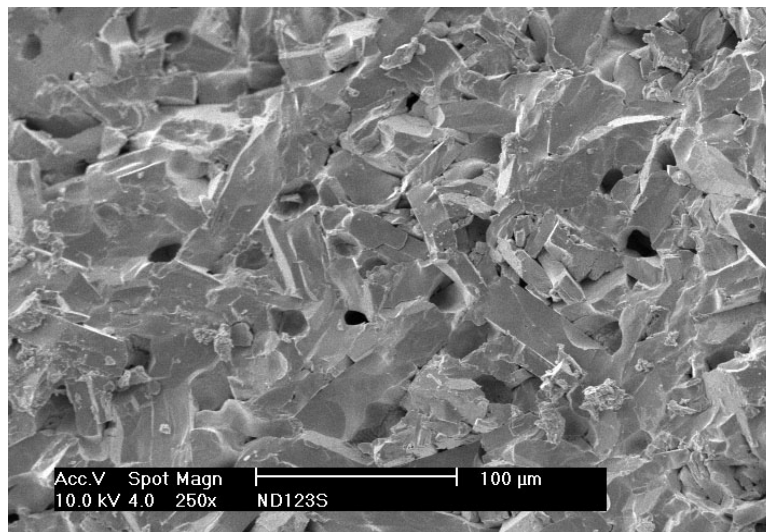
|                                     | $NdBa_2Cu_3O_7$                     | $NdBa_2Cu_{2.98}Fe_{0.02}O_{7-\delta}$ | $NdBa_2Cu_{2.95}Fe_{0.05}O_{7-\delta}$ |
|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| $T_{c-mula} / K$                    | 93                                  | 58                                     | -                                      |
| Pemalar Kekisi:                     |                                     |                                        |                                        |
| $a / \text{\AA}$                    | $3.871 \pm 0.040$                   | $3.900 \pm 0.005$                      | $3.906 \pm 0.006$                      |
| $b / \text{\AA}$                    | $3.905 \pm 0.040$                   | $3.908 \pm 0.001$                      | $3.906 \pm 0.002$                      |
| $c / \text{\AA}$                    | $11.76 \pm 0.02$                    | $11.74 \pm 0.01$                       | $11.74 \pm 0.02$                       |
| $V / \text{\AA}^3$                  | $177.9 \pm 2.6$                     | $178.8 \pm 0.3$                        | $179.10 \pm 4$                         |
| $\rho / g \text{ cm}^{-3}$          | $5.77 \pm 0.02$ (~6.76)             | $6.11 \pm 0.07$ (~6.68)                | $6.08 \pm 0.07$ (~6.68)                |
| $v_L / m \text{ s}^{-1}$            | $4690 \pm 10$ ( $5070 \pm 20$ )     | $2610 \pm 10$ ( $2730 \pm 30$ )        | $2630 \pm 10$ ( $2760 \pm 30$ )        |
| $v_s / m \text{ s}^{-1}$            | $2670 \pm 10$ ( $2890 \pm 10$ )     | $1870 \pm 10$ ( $1960 \pm 25$ )        | $1530 \pm 8$ ( $1600 \pm 18$ )         |
| $v_m / m \text{ s}^{-1}$            | $2970 \pm 10$ ( $3210 \pm 20$ )     | $2020 \pm 60$ ( $2110 \pm 70$ )        | $1700 \pm 50$ ( $1780 \pm 60$ )        |
| $L / GPa$                           | $127 \pm 1$ ( $148 \pm 1$ )         | $41.6 \pm 0.8$ ( $45.5 \pm 1.5$ )      | $42.1 \pm 0.8$ ( $46.3 \pm 1.5$ )      |
| $G / GPa$                           | $41.1 \pm 0.1$ ( $48.0 \pm 0.9$ )   | $21.4 \pm 0.5$ ( $23.5 \pm 0.8$ )      | $14.2 \pm 0.3$ ( $15.6 \pm 0.5$ )      |
| $B / GPa$                           | $72.1 \pm 0.3$ ( $84.2 \pm 0.6$ )   | $13.1 \pm 0.6$ ( $14.2 \pm 1.0$ )      | $23.2 \pm 0.9$ ( $25.5 \pm 1.6$ )      |
| $Y / GPa$                           | $103.6 \pm 1.4$ ( $121.1 \pm 6.3$ ) | $42 \pm 3$ ( $45 \pm 5$ )              | $35 \pm 2$ ( $39 \pm 4$ )              |
| $\theta_D / K$                      | $370 \pm 1$ ( $400 \pm 3$ )         | $314 \pm 1$ ( $328 \pm 3$ )            | $265 \pm 1$ ( $277 \pm 3$ )            |
| $\lambda_{BCS}$                     | $0.67 \pm 0.01$ ( $0.63 \pm 0.01$ ) | $0.55 \pm 0.01$ ( $0.54 \pm 0.01$ )    | -                                      |
| $\lambda_{vH1} (T_F = 10\theta_D)$  | $0.046$ ( $0.044$ )                 | $0.040$ ( $0.038$ )                    | -                                      |
| $\lambda_{vH2} (T_F = 100\theta_D)$ | $0.023$ ( $0.022$ )                 | $0.020$ ( $0.019$ )                    | -                                      |
| $\Delta v_L / v_L / \%$             | $2.05$ (80-290 K)                   | $0.98$ (100-300 K)                     | $1.10$ (120-300 K)                     |
| $\Delta v_s / v_s / \%$             | $1.60$ (80-230 K)                   | $0.50$ (100-220 K)                     | $0.45$ (110-220 K)                     |

Suhu Debye,  $\theta_D$  mengalami penurunan yang ketara apabila unsur Fe didopkan ke dalam sistem  $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Bagi sampel tanpa pengedapan Fe ( $x = 0$ ), nilai  $\theta_D$  adalah sekitar 370 K, manakala bagi sampel terdop Fe, nilai ini menurun kepada 314 K untuk  $x = 0.02$  dan 265 K bagi  $x = 0.05$ . Penurunan suhu Debye ini mencerminkan berlakunya pelembutan kekisi yang lazimnya dikaitkan dengan pengurangan kekuatan ikatan atom dan gangguan terhadap dinamik fonon apabila struktur kekisi terganggu oleh pengedapan Fe. Fenomena ini selari dengan kemerosotan sifat mensuperkonduksi bahan akibat gangguan terhadap rangkaian Cu–O yang berperanan penting dalam pemindahan pembawa cas.

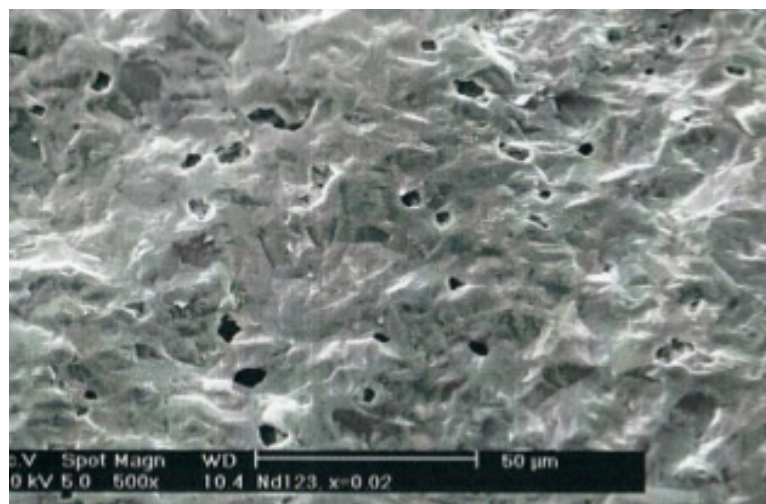
Menurut teori BCS (tiga dimensi) dalam had gandingan lemah ( $\lambda \ll 1$ ), suhu genting boleh dituliskan sebagai  $T_c = 1.13\theta_D e^{-1/\lambda_{BCS}}$  dengan  $\lambda_{BCS}$  ialah pemalar gandingan elektron-fonon. Kekonduksian dalam superkonduktor kuprum oksida adalah dua dimensi. Oleh itu, senario van Hove lebih sesuai untuk superkonduktor jenis ini. Model ini berasaskan kepada struktur elektronik dua dimensi dan wujudnya ketumpatan keadaan yang tidak terhingga berhampiran aras Fermi. Ini telah dicerap

secara uji kaji dalam bahan kuprum oksida (Dessau et al. 1993; Gofron et al. 1993; Tang & Flatté 2002; Wen et al. 2025). Mengikut senario van Hove dalam had gandingan lemah, suhu genting boleh ditulis sebagai  $T_c = 2.72T_F e^{-1/\lambda_{vH}}$ , dengan  $T_F = E_F/k \approx 10 - 100\theta_D$ .  $E_F$  ialah tenaga Fermi dan  $T_F$  ialah suhu Fermi (Getino, Rubio & del Llano 1992). Jadual 1 menunjukkan gandingan elektron-fonon bagi  $\lambda_{vH1} (T_F = 10\theta_D)$  dan  $\lambda_{vH2} (100\theta_D)$ .

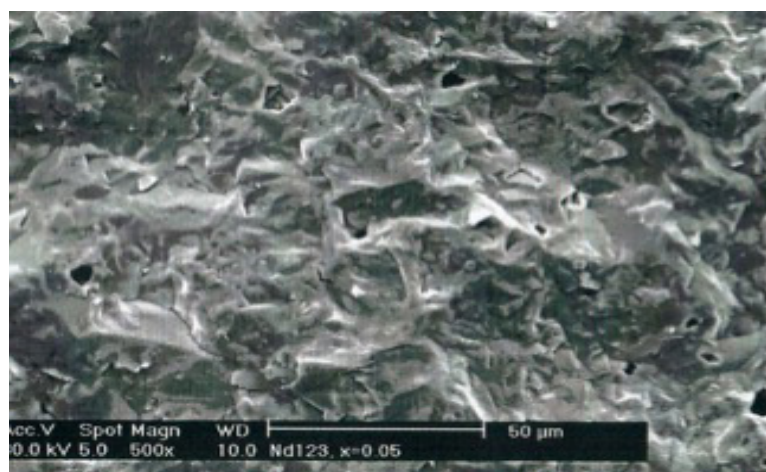
Pemalar gandingan elektron-fonon bagi  $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  yang dianggarkan berdasarkan teori BCS tiga dimensi adalah  $\lambda_{BCS} = 0.67$ . Walau bagaimanapun, apabila mekanisme superkonduktor dianalisis dalam kerangka van Hove dua dimensi, nilai gandingan yang diperoleh adalah jauh lebih kecil, iaitu  $\lambda_{vH2} = 0.023$ . Nilai ini hampir sama dengan pemalar gandingan elektron-fonon yang dilaporkan bagi superkonduktor berasaskan Bi dan  $NdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  ( $\lambda \sim 0.02 - 0.04$ ) daripada uji kaji serakan Raman (Devereaux et al. 1998; Friedl et al. 1990; Pattnaik & Newns 1989). Bagi sampel yang didopkan Fe, khususnya pada kepekatan  $x = 0.02$ , kedua-dua pemalar gandingan ini menunjukkan penurunan dengan  $\lambda_{BCS}$  berkurang kepada 0.55 dan  $\lambda_{vH2}$  kepada 0.020. Penurunan ini menandakan bahawa pengedapan Fe melemahkan interaksi elektron-fonon.



(a)

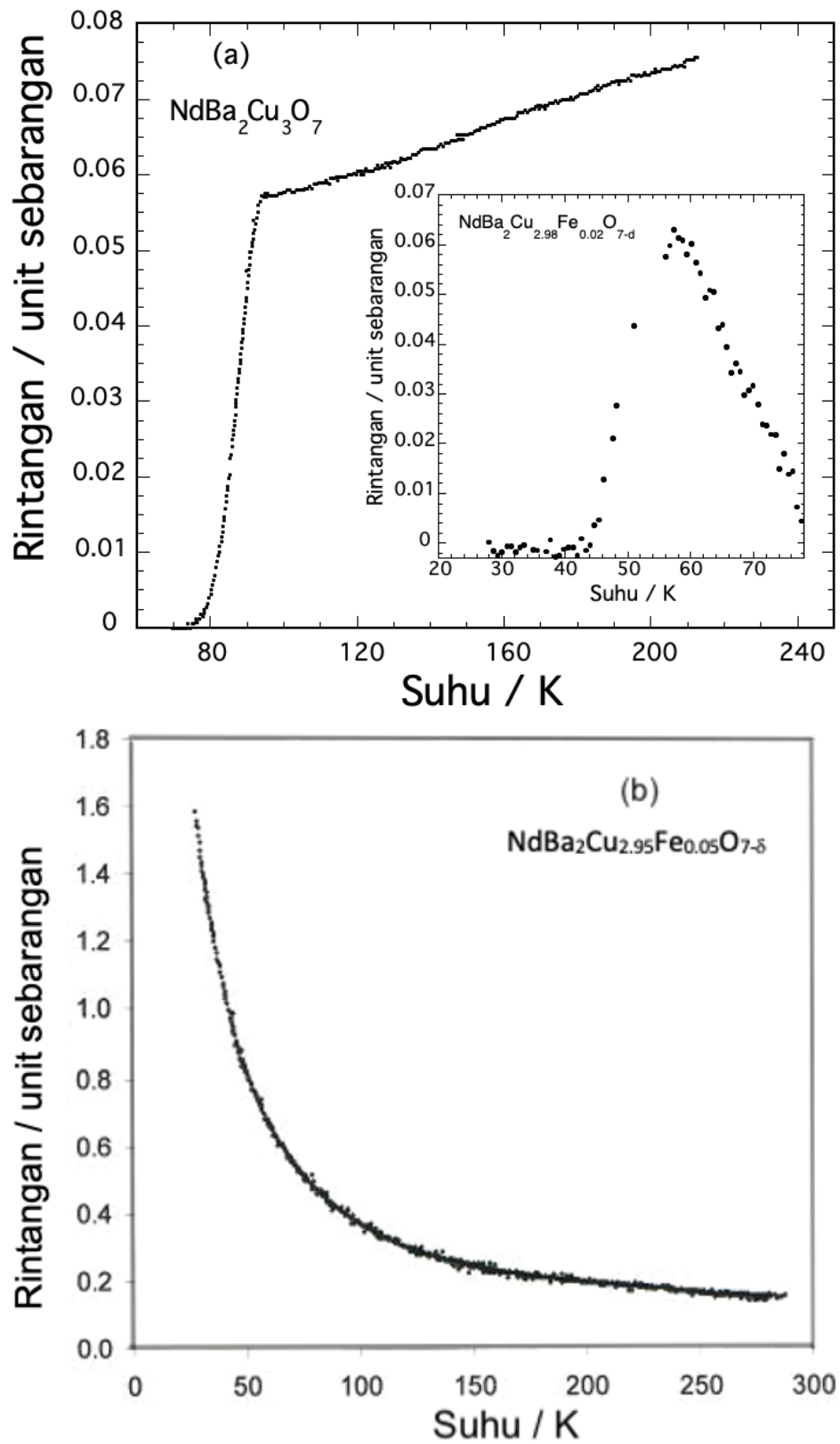


(b)

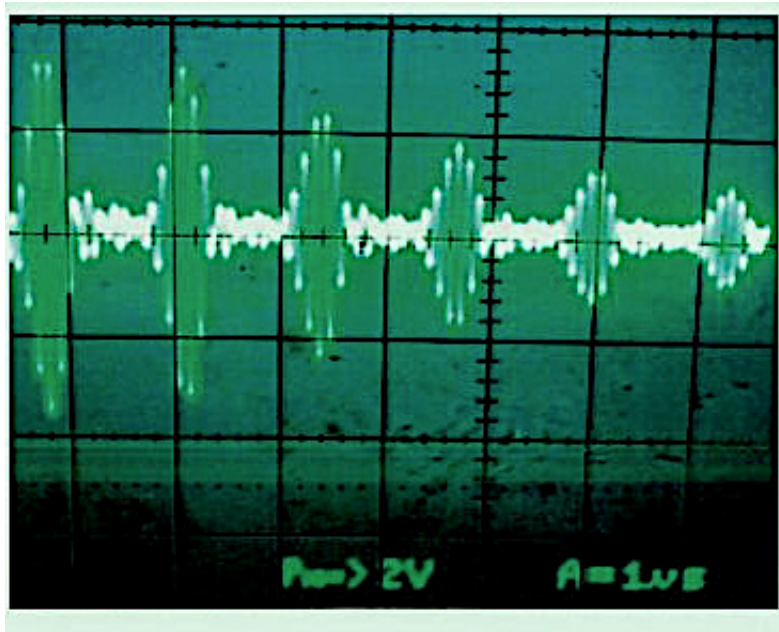


(c)

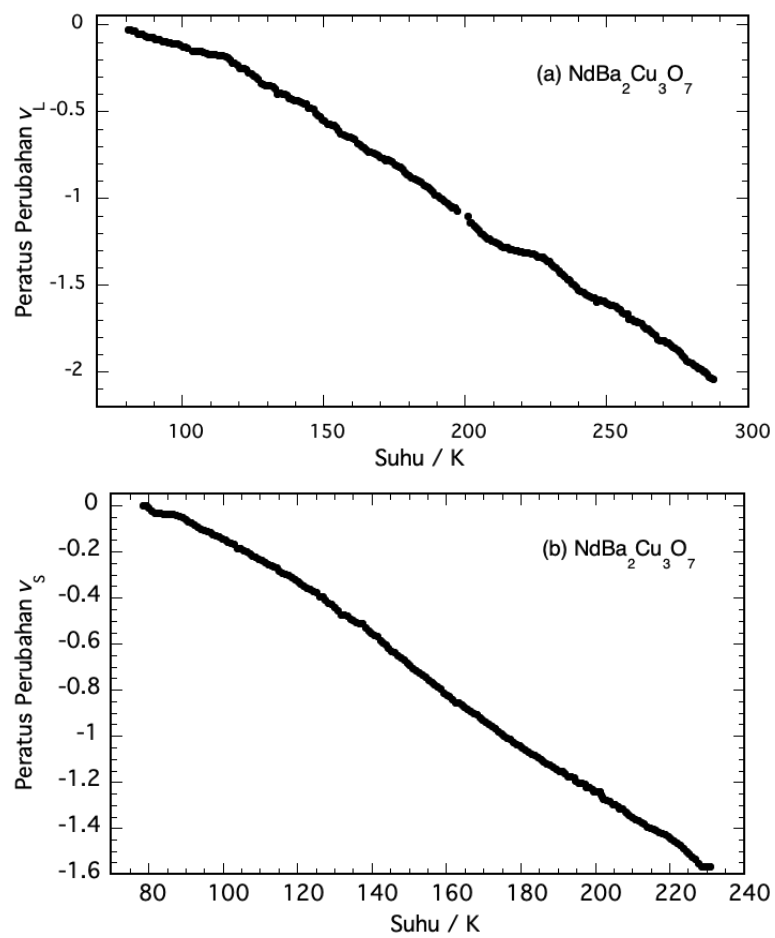
RAJAH 2. Mikrograf mikroskop elektron imbasan bagi (a)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ,  
(b)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7-\delta}$  dan (c)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$



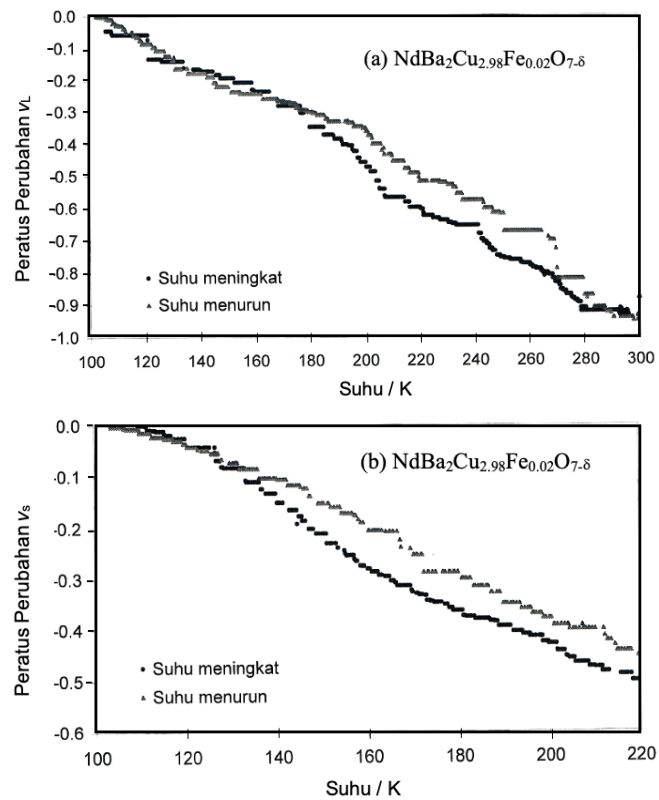
RAJAH 3. Lengkung rintangan melawan suhu (a)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dan  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7-\delta}$  (inset) dan (b)  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$



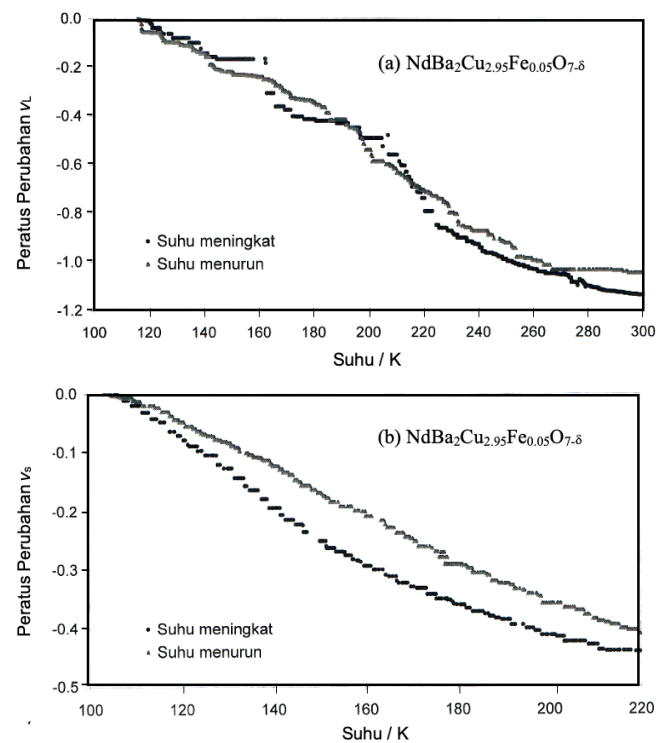
RAJAH 4. Corak gema ultrasonik daripada sampel  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$



RAJAH 5. Peratus perubahan halaju (a) bujur dan (b) ricih bagi  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$



RAJAH 6. Peratus perubahan halaju (a) bujur dan (b) ricih bagi  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_{7.8}$ . (●) suhu meningkat dan (▲) suhu menurun



RAJAH 7. Peratus perubahan halaju (a) bujur dan (b) ricih bagi  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Fe}_{0.05}\text{O}_{7.8}$ . (●) suhu meningkat dan (▲) suhu menurun

Kajian terperinci mengenai fonon dan mod pernafasan oksigen dalam satah  $\text{CuO}_2$  telah dilaporkan (Piekarz, Konior & Jefferson 1999). Pemalar gandingan elektron-fonon bagi mod pernafasan ialah  $\lambda = 0.02$  (Devereaux et al. 2004) dan ini adalah hampir sama dengan sampel  $x=0$  ( $\lambda_{\text{vH2}} = 0.023$ ) dan  $x=0.02$  ( $\lambda_{\text{vH2}} = 0.02$ ) yang diperoleh daripada kajian ini. Mod pernafasan oksigen ini memberikan keupayaan berkesan yang memasangkan dua elektron untuk membentuk pasangan Cooper. Kajian ini menunjukkan bahawa pengedopan Fe: (i) memberi kesan negatif terhadap kestabilan kekisi dan sifat mensuperkonduksi dan (ii) mekanisme superkonduktor suhu tinggi dalam sistem  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dapat diterangkan melalui model dua dimensi van Hove.

#### KESIMPULAN

Halaju bunyi bujur dan ricih dalam superkonduktor  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  yang didopkan Fe telah ukur. Daripada halaju bunyi ini modulus kekenyalan dan suhu Debye telah ditentukan. Menggunakan suhu Debye ini, nilai gandingan elektron-fonon dalam bahan dengan  $x = 0$  dan  $0.02$  telah dianggarkan. Model van Hove dua dimensi memberikan gandingan elektron-fonon  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.023$  untuk sampel  $x = 0$  yang mempunyai  $T_{\text{c-mula}}$  93 K dan  $\lambda_{\text{vH2}} = 0.02$  untuk sampel  $x = 0.02$  yang mempunyai  $T_{\text{c-mula}}$  58 K. Nilai gandingan ini adalah hampir sama dengan yang dilaporkan dalam bahan superkonduktor kuprum oksida lain yang diukur melalui teknik spektroskopi Raman. Kajian ini menunjukkan model dua dimensi van Hove dapat menerangkan mekanisme kesuperkonduksian dalam bahan kuprum oksida. Model dua dimensi Van Hove dalam teori BCS ialah model yang mana elektron bergerak dalam satah dua dimensi dan aras Fermi terletak berhampiran singulariti Van Hove, menghasilkan kepadatan keadaan tinggi yang meningkatkan suhu transisi superkonduktor.

Suhu Debye menurun apabila kandungan Fe ditingkatkan. Ini menandakan pelembutan kekisi berlaku dalam bahan yang sifat superkonduktornya ditekan atau dimusnahkan. Pelembutan ini terjadi kerana pengurangan kekuatan ikatan atom dan gangguan dinamik fonon apabila Fe didopkan. Kesan ini tekal dengan kemerosotan sifat kesuperkonduksian yang berpunca daripada gangguan pada satah  $\text{CuO}_2$  yang membawa cas.

Kajian seterusnya boleh memberi tumpuan kepada pengedopan lain seperti Co, Ni atau Zn untuk menilai sama ada penurunan suhu Debye dan pelembutan kekisi merupakan sifat umum bagi dopan pada tapak Cu atau kesan khusus akibat pengedopan Fe sahaja. Selain itu, model van Hove dua dimensi boleh diperluas dengan membangunkan pendekatan interaksi fluktuasi spin untuk gambaran yang lebih menyeluruh tentang mekanisme kesuperkonduksian dalam sistem kuprum oksida.

#### PENGHARGAAN

Penyelidikan ini dibiayai sebahagiannya oleh Ministry of Science and Higher Education Republic of Kazakhstan (Geran No. AP26104991). Kami ingin merakamkan penghargaan kepada Jabatan Fizik Gunaan, Universiti Kebangsaan Malaysia, atas penyediaan beberapa kemudahan yang diperlukan untuk menjalankan penyelidikan ini.

#### RUJUKAN

- Abd-Shukor, R. 2018. Ultrasonic and elastic properties of Tl- and Hg-based cuprate superconductors: A review. *Phase Transition* 91: 48-57.
- Abd-Shukor, R. & Tang, M.S. 2021. Sound velocity and elastic moduli of superconducting and non-superconducting  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 34(1): 43-47.
- Abd-Shukor, R. & Kong, W. 2011. Calculated sound velocity and elastic moduli changes in  $\text{LaOFeP}$  and  $\text{LiFeAs}$  at the superconducting transition. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 24: 1607-1609.
- Abd-Shukor, R., Lee, B.B., Muhammad-Najib, K., Nor Azah Nik-Jaafar & Mohd Narizee Mohd Nasir. 2023. Anomali halaju bunyi ricih dan atenuasi ultrasonik dalam  $\text{TmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $\delta = 0.06$  dan  $0.6$ ). *Sains Malaysiana* 52(7): 2095-2102.
- Dessau, D.S., Shen, Z.-X., King, D.M., Marshall, D.S., Lombardo, L.W., Dickinson, P.H., Loeser, A.G., DiCarlo, J. & Park, C.H. 1993. Key features in the measured band structure of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$ : Flat bands at EF and fermi surface nesting. *Physical Review Letters* 71(17): 2781-2784.
- Devereaux, T.P., Cuk, T., Shen, Z.-X. & Nagaosa, N. 2004. Anisotropic electron-phonon interaction in the cuprates. *Physical Review Letters* 93: 117004-1-117004-4.
- Devereaux, T.P., Virosztek, A., Zawadowski, A., Opel, M., Müller, P.F., Hoffmann, C., Philipp, R., Nemetschek, R., Hackl, R., Erb, A., Walker, E., Berger, H. & Forró, L. 1998. Enhanced electron-phonon coupling and its irrelevance to high  $T_c$  superconductivity. *Solid State Communications* 108: 407-411.
- Friedl, B., Thomsen, C., Schoenherr, E. & Cardona, M. 1990. Electron-phonon coupling of apex oxygen in  $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . *Solid State Communications* 76: 1107-1110.
- Getino, J.M., Rubio, H. & del Llano, M. 1992. Cooper pairing in the van Hove singularity scenario of high-temperature superconductivity. *Solid State Communications* 83: 891-893.

- Goffron, K., Campuzano, J.C., Abrikosov, A.A., Lindroos, M., Bansil, A., Ding, H., Koelling, D. & Dabrowski, B. 1993. Observation of an 'extended' van Hove singularity in  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  by ultrahigh energy resolution angle-resolved photoemission. *Physical Review Letters* 73(24): 3302-3305.
- Labbé, J. & Bok, J. 1987. Superconductivity in alkaline-earth-substituted  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ : A theoretical model. *Europhysics Letters* 3: 1225.
- Levy, M., Xu, M., Sarma, B.K. & Sun, K.J. 1992. Ultrasonics of high  $T_c$  and other unconventional superconductors. In *Physical Acoustic*, disunting oleh Levy, M. New York: *Academic Press*. vol. XX. hlm. 295.
- Pattnaik, P.C. & Newns, D.M. 1989. Estimate of electron-phonon coupling constant in high- $T_c$  superconductors. *Physica C* 157: 13-15.
- Piekarz, P., Konior, J. & Jefferson, J.H. 1999. Electron-phonon interaction in the cuprates: Breathing versus buckling mode. *Physical Review B* 59: 14697-14701.
- Shaked, H., Veal, B.W., Faber Jr., J., Hitterman, R.L., Balachandran, U., Tomlins, G., Shi, H., Morss, L. & Paulikas, A. P. 1990. Structural and superconducting properties of oxygen-deficient  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . *Physical Review B* 41(7): 4173-4180.
- Tang, J.M. & Flatté, M.E. 2002. Van Hove features in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  and effective parameters for Ni impurities inferred from STM spectra. *Physical Review B* 66(6): 060504-1-060504-4.
- Wen, C., Hou, Z., Akbari, A., Chen, K., Hong, W., Yang, H., Eremin, I., Li, Y. & Wen, H.H. 2025. Unprecedentedly large gap in  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  with the highest  $T_c$  at ambient pressure. *NPJ Quantum Materials* 10(1): Article 20.
- Zhang, L., Ying, X.N. & Yuan, Y.H. 2011. Internal friction study on bilayer cuprates  $\text{Pr}(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ . *Physica C* 471: 62-65.

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