

Sintesis *Codoped-Sr₂TiO₄* Fasa Ruddlesden-Popper dengan Metoda Lelehan Garam dan Sifat Hantaran Listriknya

Elan Mulia¹, Ayu Sabrina¹, Dila Kartika Aprianti¹, Nova Andriani¹, Zulhadjri¹, Yulia Eka Putri^{1*}

¹Laboratorium Kimia Anorganik, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Sumatra Barat, Indonesia

Corresponding author:

Yulia Eka Putri

yuliaekaputri@sci.unand.ac.id

Received: July 2020

Accepted: August 2020

Published: September 2020

©Yulia Eka Putri et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Abstract

In this research, undoped-Sr₂TiO₄ and codoped-Sr₂TiO₄ Ruddlesden-Popper (RP) phase compounds have been synthesized with mole variations of Sr:Ti and dopants. Double substitution with Sm³⁺ for Sr²⁺ sites and Nb⁵⁺ for Ti⁴⁺ sites forming Sr_{2-x}Sm_xTi_{1-y}Nb_yO₄ (x = 0.0125; 0.025; 0.05; 0.1 and y = 0.0125) aimed to increase the number of electrons carrier, so that the electrical conductivity enhanced. The XRD patterns showed that the highest purity of prepared Sr₂TiO₄ RP phase sample was obtained at the mole ratio of Sr:Ti of 2:1 with specific peaks at 2θ: 31.35°, 46.73°, and 57.33°. Then, this mole ratio was used to prepare the codoped-samples, and the XRD patterns showed the Sr_{1.95}Sm_{0.05}Ti_{0.9875}Nb_{0.0125}O₄ sample has the highest purity. SEM images showed that the undoped-Sr₂TiO₄ and codoped-Sr₂TiO₄ samples have a plate-like particles with micrometer size. The electrical conductivity of Sr_{1.95}Sm_{0.05}Ti_{0.9875}Nb_{0.0125}O₄ sample was measured to be a 17-fold increase compared to that of undoped-Sr₂TiO₄ sample.

Keywords: Sr₂TiO₄, Ruddlesden-Popper phase, codoped, electrical conductivity

Pendahuluan

Generator termoelektrik merupakan salah satu perangkat hasil teknologi yang berpotensi sebagai sumber energi alternatif berkelanjutan karena mampu mengkonversi panas buangan menjadi energi listrik^[1]. Panas buangan yang akan dikonversi menjadi listrik bersumber dari kendaraan bermotor, perangkat elektronik, tempat pembakaran dan lain-lain^[2]. Akan tetapi, penggunaan generator termoelektrik secara komersial masih terbatas karena efisiensi konversi energi (η) yang masih rendah meskipun biaya operasionalnya murah dan perawatannya mudah^[3]. Rendahnya efisiensi konversi energi (η) dapat ditingkatkan dengan optimalisasi bahan penyusun generator termoelektrik dan optimalisasi geometri generator termoelektrik^[4]. Kemampuan material

termoelektrik dalam mengubah panas menjadi energi listrik dievaluasi dari nilai angka jasa (*figure of merit*), berdasarkan persamaan (1):

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T \quad (1)$$

dimana S, σ , κ dan T adalah koefisien Seebeck ($\mu\text{V/m}$), hantaran listrik (S/cm), hantaran panas (W/m²K) dan suhu (K)^[5]. Material termoelektrik memiliki peranan yang sangat penting untuk meningkatkan nilai efisiensi konversi energi (η), yaitu:

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2)$$

dimana T_h dan T_c adalah suhu panas dan suhu dingin (K). Berdasarkan persamaan (2) maka bisa dijelaskan bahwa material termoelektrik dengan ZT tinggi akan memberikan efisiensi konversi energi yang tinggi pula.

Salah satu material termoelektrik yang menarik perhatian peneliti saat ini adalah senyawa superkisi (*superlattice*) $\text{Sr}_2\text{TiO}_4/\text{SrO}(\text{SrTiO}_3)$ fasa *Ruddlesden-Popper* (RP). Sr_2TiO_4 memiliki tingkat laminasi (lapisan) struktur tertinggi di antara semua seri fasa RP dengan variasi lapisan $\text{Sr}_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$ ($1 \leq n \leq \infty$) dan memiliki sifat transportasi muatan 2 dimensi (2D) yang spesifik^[6]. Kisi dalam material tersusun secara rapi dan teratur melalui pengulangan lapisan SrO dan lapisan SrTiO_3 membentuk superkisi, sehingga sangat efektif dalam menurunkan hantaran panas melalui mekanisme hamburan (*scattering*) baik oleh elektron maupun vibrasi kisi kristal (fonon)^[7]. Akan tetapi, nilai ZT senyawa ini tergolong kecil dikarenakan hantaran listriknya yang rendah. Oleh karena itu, salah satu cara untuk meningkatkan hantaran listriknya adalah melalui pendadahan (*doping*) dengan ion bervalensi tinggi^[8]. Pendadahan dengan salah satu atom/ion sudah banyak dilakukan pada senyawa fasa RP. Beberapa diantaranya seperti pendadah Y yang telah dilakukan oleh Nishio. et al yang menunjukkan konduktivitas listrik yang tinggi sebesar $8.5 \times 10^{-5} \Omega\text{cm}$ ^[9], pendadah La yang dilakukan Lee. et al dapat menghasilkan nilai hantaran listrik sebesar 1000 S/cm^[10] dan pendadah Nb dan Sm yang dilakukan oleh Y.E .Putri et.al dengan peningkatan hantaran listrik menjadi 2 kali lipat^{[11],[12]}. Meskipun pendadahan telah mampu meningkatkan hantaran listrik senyawa fasa RP, namun peningkatannya belum signifikan. Oleh karena itu diperlukan suatu upaya baru yaitu melakukan substitusi dengan dua jenis pendadah bervalensi tinggi atau yang disebut juga dengan *codoped*. Pendadahan dilakukan melalui substitusi ion samarium (Sm^{3+}) pada sisi stronsium (Sr^{2+}) dan ion niobium (Nb^{5+}) pada sisi titanium (Ti^{4+}). Pendadahan ganda ini berpotensi menambah jumlah elektron pembawa lebih banyak sehingga mampu menghasilkan hantaran listrik yang lebih tinggi^[13].

Senyawa Sr_2TiO_4 fasa RP umumnya disintesis dengan metode reaksi keadaan padat (*solid state reaction*), akan tetapi metode ini membutuhkan panas yang sangat tinggi ($800^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$) dan waktu *sintering* yang cukup lama (90 jam). Oleh karena itu pada penelitian ini sintesis dilakukan dengan metode lelehan garam karena memerlukan suhu yang lebih rendah dan waktu *sintering* yang lebih singkat (10-15 jam) sehingga lebih hemat dan efisien dibandingkan metode reaksi keadaan padat. Media reaksi pada sintesis dengan metode lelehan garam ini menggunakan campuran garam Na_2SO_4 dan K_2SO_4 .

Metodologi Penelitian

Bahan kimia

Bahan yang digunakan yaitu stronsium(II) karbonat (SrCO_3) (Aldrich 99,9%), titanium(IV) oksida (TiO_2) (Aldrich 99,9%), niobium(V) oksida (Nb_2O_5) (Aldrich 99,9%), samarium(III) oksida (Sm_2O_3) (Aldrich 99,9%), garam kalium sulfat (K_2SO_4), natrium sulfat (Na_2SO_4) (Merck) dan akuabides. Semua bahan dengan kemurnian tinggi sehingga tidak dilakukan pemurnian lebih lanjut.

Peralatan

Peralatan yang digunakan yaitu oven (Labtech), *furnace* (Nabertherm), *hot plate* (IKA* C-MAG HS 7), neraca analitik (Kern ALI 220-4 M), lumpang dan alu, aluminium foil, plastik pembungkus, kertas minyak, kertas saring whatman No.41, kurs alumina, spatula, jangka sorong (Nankai, 150MM Digital Caliper) serta beberapa peralatan gelas seperti gelas piala, *erlenmeyer*, corong dan batang pengaduk. Instrumen yang digunakan adalah XRD (Philip X'pert Powder Type PW4030/60), SEM-EDX (6510(LA)) dan LCR meter (TH 2820).

Prosedur penelitian

Karakterisasi material

Produk dikarakterisasi menggunakan XRD dengan menyiapkan sejumlah produk dalam bentuk bubuk untuk analisis struktur kristal senyawa hasil sintesis. Selanjutnya, karakterisasi produk berbentuk bubuk

menggunakan SEM-EDX untuk melihat morfologi permukaan partikel senyawa hasil sintesis dan analisis unsur penyusun senyawa.

Pengukuran hantaran listrik

Sampel diukur dengan LCR-meter dengan cara sampel bubuk hasil sintesis dipadatkan dengan pencetak obat pada suhu kamar dengan teknik tekan normal sehingga berbentuk seperti pelet. Pelet yang diperoleh disintering dengan program suhu bertingkat pada suhu 500 °C selama 1 jam dan dilanjutkan dengan suhu 800 °C selama 2 jam. Setelah itu produk didinginkan dengan pendinginan normal. Setelah sampel dingin, permukaan pelet diratakan menggunakan amplas sampai permukaan halus. Pengukuran menggunakan alat LCR-meter TH 2820 dengan frekuensi 120 Hz, nilai resistansi diukur sebanyak tiga kali untuk masing-masing produk dan diambil nilai rata-rata. Selain itu, juga dilakukan penimbangan massa dan pengukuran dimensi berupa tebal (L) dan diameter (D) pelet menggunakan jangka sorong digital yang akan digunakan dalam menghitung luas permukaan pelet (A). Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai konduktivitas listrik melalui persamaan (3) berikut:

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (3)$$

Dimana:

- σ = Hantaran Listrik (S/cm)
- L = Panjang Sampel (cm)
- A = Luas Penampang (cm²)
- R = Resistansi (Ω)

Perhitungan masa jenis relatif sampel (ρ_{relatif}) dilakukan dengan menghitung masa jenis teoritis struktur kristal sampel dalam struktur tetragonal dan masa jenis sampel hasil sintesis yang sebenarnya berdasarkan penimbangan masa dan perhitungan dimensi, berdasarkan persamaan (4) yaitu:

$$\rho_{\text{relatif}} (\%) = \frac{\rho_{\text{sampel}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100\% \quad (4)$$

Sintesis senyawa Sr_2TiO_4 fasa RP tanpa pendadah dan pendadahan ganda dengan kation Sm^{3+} dan Nb^{5+}

Semua material awal ditimbang dengan perhitungan secara stoikiometri. Perbandingan mol Sr dan Ti divariasikan yaitu 2:1; 2:1.25 dan 2:1.5. Kemudian ditambahkan campuran garam (*molten salt*, MS) Na_2SO_4 dan K_2SO_4 (1:1), dan perbandingan mol antara material awal dan campuran garam adalah 1:0.5. Campuran digerus sampai homogen, ditempatkan dalam krus alumina dan dilakukan sintering di dalam *furnace* pada suhu 950 °C selama 15 jam. Campuran didinginkan dengan pendinginan normal, digerus sampai halus dan dicuci dua kali dengan akuabides panas untuk menghilangkan sisa garam alkali. Produk dikeringkan di dalam oven pada suhu 110 °C selama 5 jam^{[12],[14]}.

Sintesis sampel dengan pendadahan ganda dilakukan setelah sintesis sampel tanpa pendadah. Mol pendadah Sm divariasikan (0.0125; 0.025; 0.05; 0,1) dan mol Nb tetap (0.0125). Oksida kedua pendadah ini dimasukkan bersamaan dengan material awal lainnya. Perlakuan selanjutnya adalah sama dengan prosedur awal.

Hasil dan Diskusi

Analisis X-ray diffraction (XRD)

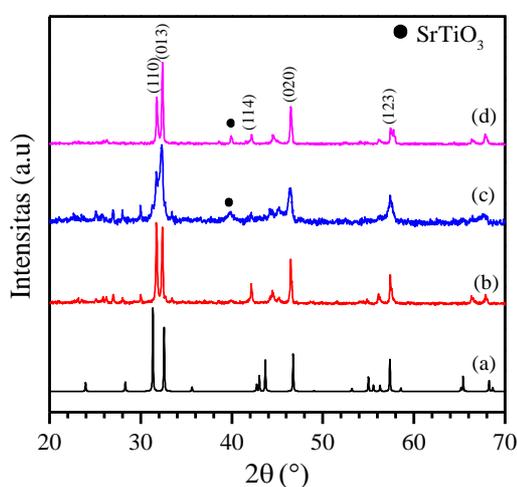
Karakterisasi dengan XRD sampel tanpa pendadah dengan variasi mol Sr:Ti berupa pola XRD seperti pada Gambar 1.

Gambar 1 merupakan pola XRD senyawa Sr_2TiO_4 fasa RP tanpa pendadah dengan variasi mol Sr:Ti yaitu 2:1 ; 2:1.25 ; 2: 1.5. Semua sampel Sr_2TiO_4 fasa RP menunjukkan adanya puncak ganda spesifik pada 2θ : 31.34° dan 32.58°, selain itu juga muncul puncak spesifik lainnya pada 2θ : 23.96°; 28.32°; 43.68°; 46.74°; 57.36°; 65.36° dan 68.24° yang menunjukkan kemiripan dengan standar Sr_2TiO_4 dengan ICSD#157402^[12]. Hal ini membuktikan bahwa senyawa Sr_2TiO_4 fasa RP dengan variasi mol Sr:Ti telah berhasil terbentuk. Jika dibandingkan intensitas dan ketajaman puncak ganda yang terbentuk pada

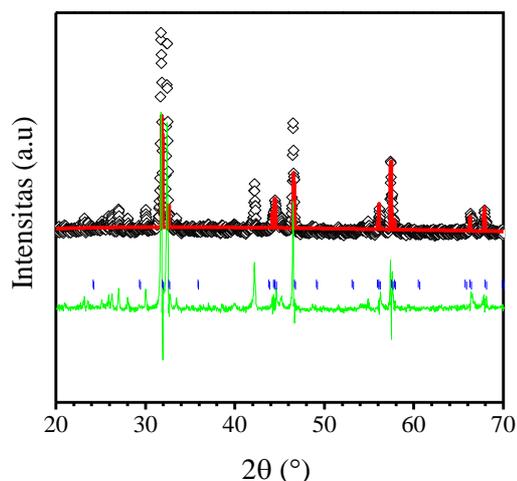
2θ : 31.34° dan 32.58° , maka sampel (b) memiliki intensitas puncak yang lebih tinggi dan tajam dibandingkan sampel (c) dan (d). Hal ini menunjukkan bahwa kristalinitas sampel (b) lebih tinggi dari sampel (c) dan (d). Selain itu, pada pola difraksi sampel (c) dan (d) muncul puncak pengotor SrTiO_3 pada 2θ : 40.02° yang tersisip pada kisi kristal Sr_2TiO_4 karena reaksi topotaktik relaksasi saat sintesis berlangsung^[12]. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa sampel hasil sintesis dengan perbandingan mol Sr:Ti yaitu 2:1 memiliki kristalinitas yang paling tinggi. Selanjutnya, analisis penghalusan struktur kristal (*crystal structure refinement*)

dilakukan untuk melihat kecocokan parameter kisi pada sampel (b) terhadap data standar Sr_2TiO_4 fasa RP menggunakan program Retica dengan teknik Le Bail. Hasil pencocokan struktur kristal seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Gambar 2 merupakan hasil penghalusan struktur kristal pada sampel (b) dimana garis merah merupakan grafik hasil perhitungan software yang memiliki kecocokan dengan parameter kisi dengan *space group* $I4/mmm$, struktur kristal tetragonal dan nilai R_{wp} sebesar 13.61.



Gambar 1. Pola difraksi Sr_2TiO_4 fasa RP (a) standar, perbandingan mol Sr:Ti (b) 2:1; (c) 2:1.25 dan (d) 2:1.5.

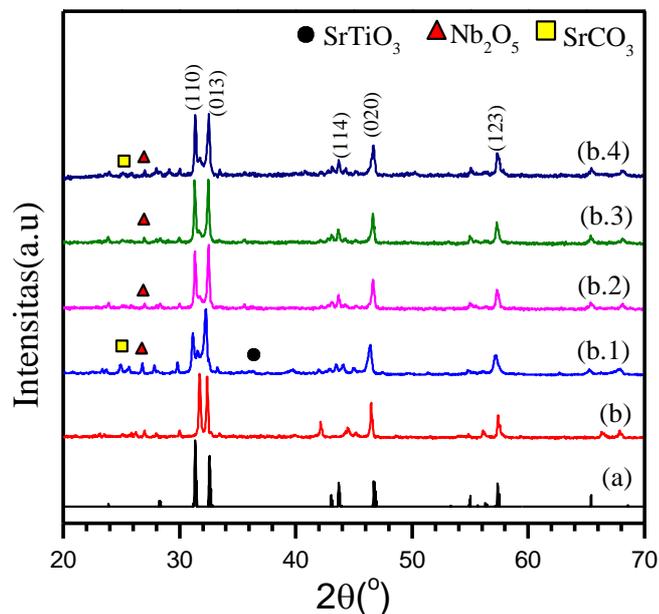


Gambar 2. Hasil analisis penghalusan struktur kristal sampel (b). Data hasil perhitungan (—), data pengamatan (•), selisih antara data perhitungan dengan data pengamatan (—) dan titik nilai hkl (◇).

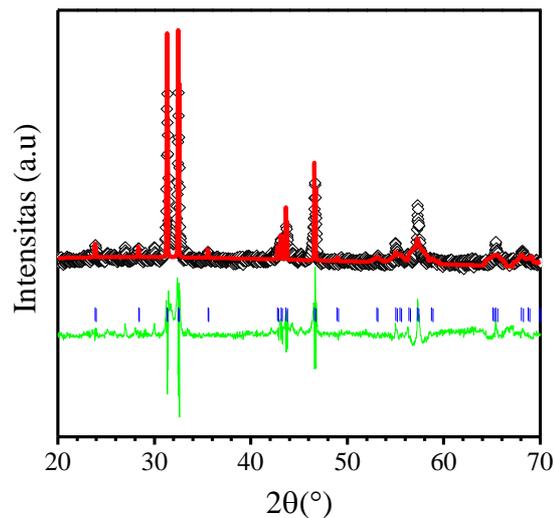
Gambar 3 menunjukkan pola XRD *codoped*- Sr_2TiO_4 sampel dengan puncak ganda spesifik pada 2θ : 31.35° dan 32.58° , serta puncak lain pada 2θ : 23.96° ; 28.32° ; 43.68° ; 46.74° ; 57.36° ; 65.36° dan 68.24° . Diantara sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 pada Gambar 3, ditemukan bahwa sampel (b.3) memiliki intensitas puncak yang lebih tinggi dan tajam dari pada sampel yang lain. Disamping itu, puncak ganda pada 2θ : 31.04° dan 32.89° memiliki kesamaan seperti pada standar, dimana puncak 2θ : 31.04° lebih tinggi dibanding dengan 2θ : 32.89° . Hal ini menunjukkan bahwa kristalinitas produk yang terbentuk pada sampel (b.3) lebih tinggi dari pada sampel yang lain. Pada pola XRD juga muncul beberapa puncak pengotor seperti SrCO_3 , Nb_2O_5 , dan SrTiO_3 . Terbentuknya SrCO_3 dan Nb_2O_5 disebabkan oleh material awal yang tidak bereaksi selama sintesis berlangsung, hal ini dikarenakan oleh perbandingan mol reaktan

yang tidak setara dalam reaksi. Pembentukan pengotor SrTiO_3 disebabkan oleh reaksi topotaktik yang terjadi akibat reaksi yang tidak sempurna SrCO_3 dan TiO_2 pada saat sintesis dan menyisip pada struktur kristal Sr_2TiO_4 ^[15].

Penghalusan struktur kristal dilakukan pada semua sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 fasa RP, akan tetapi pola hasil penghalusan hanya ditampilkan untuk sampel (b.3) seperti pada Gambar 4, karena sampel ini memiliki kristalinitas tertinggi dibandingkan sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 lainnya. Sementara untuk sampel lain ditampilkan berupa tabel (Tabel 1) yang berisi nilai R_{wp} masing-masing. Gambar 4. dan nilai pada Tabel 1 menunjukkan bahwa sampel (b.3) memiliki kecocokan yang lebih tinggi dengan standar ($R_{wp} = 4.75\%$) dengan *space group* $I4/mmm$ struktur kristal tetragonal.



Gambar 3. Pola difraksi sampel $\text{Sr}_{2-x}\text{Sm}_x\text{Ti}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_4$ fasa RP dengan variasi pendadah (a) Standar Sr_2TiO_4 , (b) Sr_2TiO_4 dengan perbandingan mol Sr:Ti 2:1, perbandingan mol pendadah Sm:Nb (b.1) 0.01250 : 0.0125; (b.2) 0.025 : 0.0125; (b.3) 0.05 : 0.0125 dan (b.4) 0.1 : 0.0125.



Gambar 4. Hasil analisis penghalusan struktur kristal sampel (b.3). Data hasil perhitungan (—), data pengamatan (●), selisih antara data perhitungan dengan data pengamatan (—), dan titik nilai hkl (—).

Tabel 1. Nilai R_{wp} senyawa *codoped-Sr₂TiO₄* fasa RP

Sampel	R_{wp} (%)
b.1	32.3
b.2	9.5
b.3	4.8
b.4	9.9

Observasi morfologi dan analisis unsur dengan *scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy* (SEM-EDX)

Observasi morfologi partikel dilakukan untuk sampel Sr_2TiO_4 tanpa pendadah dan sampel *codoped-Sr₂TiO₄* fasa RP (sampel (b.3)) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Foto SEM pada Gambar 5 (a) dan (b) memperlihatkan bahwa kedua sampel memiliki bentuk partikel bulat pipih (*plate-like*) dalam rentang ukuran mikrometer. Pada beberapa bagian terjadi aglomerasi sehingga sebaran ukuran partikel menjadi lebar. Aglomerasi terjadi pada saat pertumbuhan kristal di dalam lelehan garam^[16]. Partikel berukuran kecil dengan energi permukaan yang tinggi akan terbentuk setelah terjadi pengintian, sehingga untuk mengurangi energi permukaan yang tinggi maka terjadi

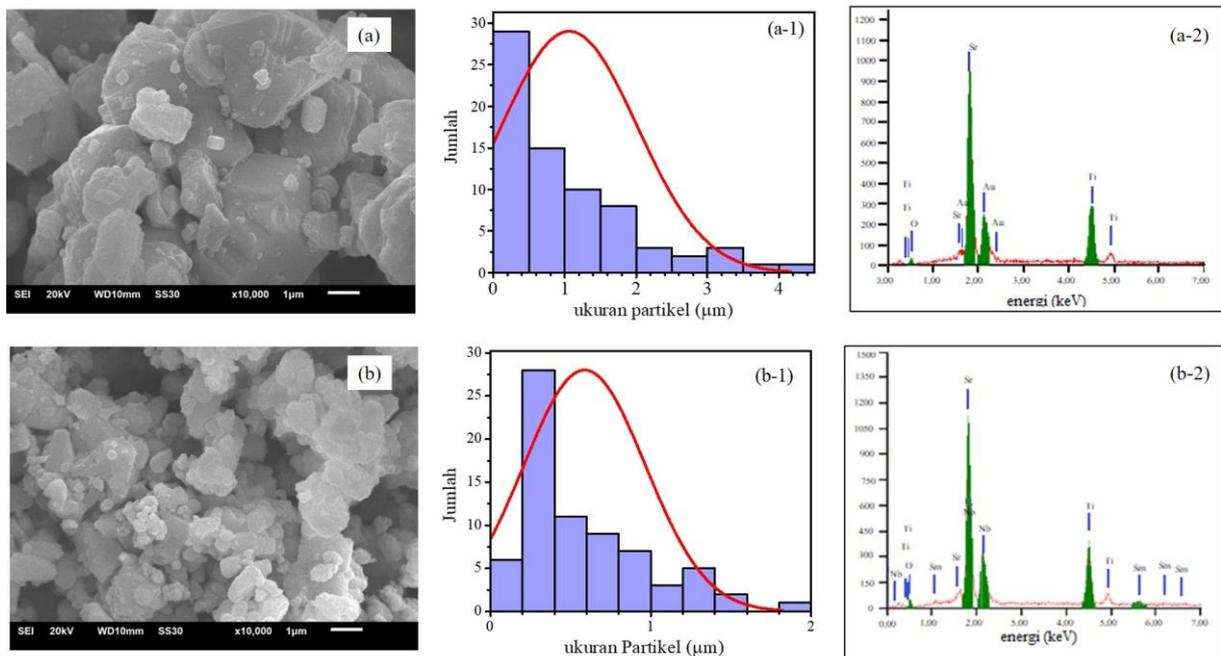
adesi antar partikel dan membentuk partikel yang lebih besar^[17]. Sebaran ukuran partikel ditentukan melalui perangkat lunak Image J, dimana sampel (a) memiliki rentang ukuran partikel antara 0.152- 4.257 μm dan sampel (b.3) adalah 0.125-1.817 μm . Jika dibandingkan, maka sampel (b.3) memiliki sebaran ukuran partikel yang lebih sempit dibandingkan sampel (a). Hal ini dikarenakan terjadi perubahan volume kisi yang disebabkan oleh perbedaan jari-jari ion antara ion pendadah dengan ion yang digantikan, dimana jari-jari ion pendadah lebih kecil dibandingkan jari-jari ion induk yang digantikan, sehingga mempengaruhi ukuran partikel secara keseluruhan^[18]. Spektrum EDX pada Gambar 5 (a-2) mengkonfirmasi keberadaan atom Sr, Ti, dan O pada senyawa Sr_2TiO_4 tanpa pendadah, sedangkan pada

Gambar 5 (b)-2 mengkonfirmasi adanya atom Sr, Ti, dan O serta atom Sm dan Nb sebagai pendadah yang terdapat pada sampel (b.3). Hal ini menunjukkan bahwa sampel yang disintesis mengandung seluruh atom penyusun senyawa yang telah disiapkan pada material awal.

Pengukuran konduktivitas listrik (LCR-meter)

Tabel 2 memperlihatkan hasil pengukuran hantaran listrik senyawa Sr_2TiO_4 tanpa pendadah (sampel b) dan *codoped*- Sr_2TiO_4 (sampel (b.3)) fasa RP. Hasil ini menunjukkan bahwa pendadah pada dua sisi ion di dalam struktur kristal mampu meningkatkan nilai hantaran listrik hingga 17 kali. Peningkatan hantaran listrik pada sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 mengindikasikan bahwa pendadah telah berhasil dilakukan pada sisi yang ditargetkan sehingga pendadah ganda ion bervalensi tinggi mampu meningkatkan jumlah elektron pembawa^[19]. Hal ini membuktikan bahwa

dengan adanya pendadah ganda Sm dan Nb mampu secara efektif meningkatkan hantaran listrik senyawa Sr_2TiO_4 . Tabel 2 juga menunjukkan nilai persentase masa jenis relatif dari dua sampel yang diukur, dimana masa jenis relatif sampel Sr_2TiO_4 tanpa pendadah dan sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Nilai masa jenis relatif yang hampir sama pada kedua sampel ini menunjukkan bahwa pelet kedua sampel memiliki porositas yang sama juga, sehingga nilai hantaran listrik yang diperoleh dari kedua pengukuran tidak dipengaruhi oleh efek pori. Porositas merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi hantaran listrik suatu material padat. Porositas di dalam sampel padat akan mengurangi mobilitas elektron akibat adanya hamburan elektron, sehingga, jika mobilitas elektron berkurang maka hantaran listrik juga akan semakin turun^[14].



Gambar 5. Morfologi partikel sampel Sr_2TiO_4 fasa RP (a) sampel Sr_2TiO_4 tanpa pendadah, (b) sampel *codoped*- Sr_2TiO_4 (sampel (b.3)), (a-1, b-1) sebaran ukuran partikel dan (a-2, b-2) spektrum EDX.

Tabel 2. Nilai hantaran listrik senyawa Sr_2TiO_4 tanpa pendadah dan *codoped-Sr₂TiO₄* fasa RP

Sampel	Hantaran Listrik (S/cm) x 10 ⁻⁷	Masa Jenis Relatif (%)
b	0.49	58
b.3	8.67	56

Kesimpulan

Berdasarkan hasil sintesis senyawa Sr_2TiO_4 tanpa pendadah dan *codoped-Sr₂TiO₄* fasa RP, maka diperoleh kesimpulan bahwa perbandingan mol Sr:Ti untuk sintesis mempengaruhi kristalinitas sampel yang dihasilkan. Sampel dengan perbandingan mol Sr:Ti adalah 2:1 memiliki kristalinitas yang paling tinggi dan memiliki kecocokan struktur kristal paling dekat dengan standar. Kemudian, sampel *codoped-Sr₂TiO₄* dengan pendadah Sm 0.05 mol dan Nb 0.0125 mol ($\text{Sr}_{1.95}\text{Sm}_{0.05}\text{Ti}_{0.9875}\text{Nb}_{0.0125}\text{O}_4$) memiliki kemurnian sampel dan hantaran listrik yang paling tinggi dibandingkan dengan sampel *codoped-Sr₂TiO₄* dengan variasi mol pendadah lainnya. Hantaran listrik sampel $\text{Sr}_{1.95}\text{Sm}_{0.05}\text{Ti}_{0.9875}\text{Nb}_{0.0125}\text{O}_4$ meningkat sebanyak 17 kali dibandingkan dengan sampel Sr_2TiO_4 tanpa pendadah, sehingga bisa disimpulkan bahwa pendadah ganda sangat efektif dalam meningkatkan nilai hantaran listrik senyawa Sr_2TiO_4 fasa RP.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh hibah riset dasar dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi (RISTEKDIKTI) Republik Indonesia (Hibah No: 163/SP2H/LT/DRPM/2019).

Daftar Pustaka

- Lan, S., Smith, A., Stobart, R. & Chen, R., Feasibility study on a vehicular thermoelectric generator for both waste heat recovery and engine oil warm-up. *Appl. Energy*, **242**: 273–284 (2019).
- Champier, D., Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, **140**: 167–181 (2017).
- He, W., Zhang, G., Zhang, X., Ji, J., Li, G. & Zhao, X., Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, **143**: 1–25 (2015).
- Shittu, S., Li, G., Zhao, X., Ma, X., Akhlaghi, Y. G. & Ayodele, E., Optimized high performance thermoelectric generator with combined segmented and asymmetrical legs under pulsed heat input power. *J. Power Sources*, **428**: 53–66 (2019).
- Jerič, M., de Boor, J., Jančar, B. & Čeh, M., An enhanced thermoelectric figure of merit for $\text{Sr}(\text{Ti}_{0.8}\text{Nb}_{0.2})\text{O}_3$ based on a Ruddlesden-Popper-polytype-induced microstructure. *J. Eur. Ceram. Soc.*, **36**(5): 1177–1182 (2016).
- Zhang, H., Ni, S., Mi, Y. & Xu, X., Ruddlesden-Popper compound Sr_2TiO_4 co-doped with La and Fe for efficient photocatalytic hydrogen production. *J. Catal.*, **359**: 112–121 (2018).
- Reshak, A. H., Thermoelectric properties of $\text{Sr}_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n=1, 2, 3, \infty$) Ruddlesden-Popper Homologous Series. *Renew. Energy*, **76**: 36–44 (2015).
- Samain, L., Amshoff, P., Biendicho, J. J., Tietz, F., Mahmoud, A., Hermann, R. P., Istomin, S. Y., *et al.*, Crystal structure and high-temperature properties of the Ruddlesden-Popper phases $\text{Sr}_{3-x}\text{Y}_x(\text{Fe}_{1.25}\text{Ni}_{0.75})\text{O}_{7-\delta}$ ($0 \leq x \leq 0.75$). *J. Solid State Chem.*, **227**: 45–54 (2015).
- Nishio, K., Fukuda, K., Imai, T., Takenouchi, H., Mae, H., Fujimoto, M., Iida, T., *et al.*, Preparation and Properties of $\text{Sr}_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$ Ruddlesden-Popper Homologous Series by Metal-Citric Acid Complex Decomposition Method. *MRS Proc.*, **1044**(1044-U06-03): 307–311 (2007).
- Lee, K. H., Ohta, H. & Koumoto, K.,

- Thermoelectric properties of layered perovskite-type Nb-doped SrO(SrTiO₃)_n (n = 1, 2) Ruddlesden-Popper phases. in *International Conference on Thermoelectrics, ICT, Proceedings*, **1(c)**: 81–84 (2006).
11. Putri, Y. E., Ulfah, N., Afani, E. R., Andriani, N., Refinel, R. & Syukri, S., Electrical conductivity enhancement of doped-SrO/SrTiO₃ Ruddlesden Popper phase prepared by molten salt method. in *AIP Conference Proceedings*, **2023**: (2018).
 12. Putri, Y. E., Said, S. M., Refinel, R., Ohtaki, M. & Syukri, S., Low Thermal Conductivity of RE-Doped SrO(SrTiO₃)₁ Ruddlesden Popper Phase Bulk Materials Prepared by Molten Salt Method. *Electron. Mater. Lett.*, **14(5)**: 556–562 (2018).
 13. Putri, Y. E., Said, S. M., Refinel, R., Ohtaki, M. & Syukri, S., Low Thermal Conductivity of RE-Doped SrO(SrTiO₃)₁ Ruddlesden Popper Phase Bulk Materials Prepared by Molten Salt Method. *Electron. Mater. Lett.*, **14(5)**: 556–562 (2018).
 14. Putri, Y. E., Yusri, H., Yusri, H. & Zulhadjri., Studi hantaran listrik senyawa Sr_{n+1}Ti_nO_{3n+1} (n = 1 dan 2) fasa Ruddlesden-Popper yang disintesis dengan metode lelehan garam. *J. Ris. Kim.*, **8(2)**: 176 (2015).
 15. Chang, Y., Ning, H., Wu, J., Zhang, S., Lü, T., Yang, B. & Cao, W., Formation mechanism of (001) oriented perovskite SrTiO₃ microplatelets synthesized by topochemical microcrystal conversion. *Inorg. Chem.*, **53(20)**: 11060–11067 (2014).
 16. Chen, W., Hong, J. & Li, Y., Facile fabrication of perovskite single-crystalline LaMnO₃ nanocubes via a salt-assisted solution combustion process. *J. Alloys Compd.*, **484(1–2)**: 846–850 (2009).
 17. Li, Z., Zhang, X., Hou, J. & Zhou, K., Molten salt synthesis of anisometric Sr₃Ti₂O₇ particles. *J. Cryst. Growth*, **305(1)**: 265–270 (2007).
 18. Xiang, G., Zhang, J., Hao, Z., Zhang, X., Pan, G. H., Luo, Y. & Zhao, H., Decrease in particle size and enhancement of upconversion emission through Y³⁺ ions doping in hexagonal NaLuF₄:Yb³⁺/Er³⁺ nanocrystals. *CrystEngComm*, **17(16)**: 3103–3109 (2015).
 19. Putri, Y. E., Wan, C., Dang, F., Mori, T., Ozawa, Y., Norimatsu, W., Kusunoki, M., *et al.*, Effects of transition metal substitution on the thermoelectric properties of metallic (BiS)_{1.2}(TiS₂)₂ misfit layer sulfide. *J. Electron. Mater.*, **43(6)**: 1870–1874 (2014).