

ANALISIS RIETVELD POLA XRD SERBUK $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ HASIL SINTESIS DENGAN METODE PENCAMPURAN LARUTAN

1) Muhammad D. Z. Abror, 2)*Frida U. Ermawati

1).2) Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

*Corresponding Author, Email: frida.ermawati@unesa.ac.id

Abstrak

Serbuk $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ (disingkat MTS002) disintesis menggunakan metode pencampuran larutan dengan doping ion Sn^{4+} terhadap ion Ti^{4+} pada suhu kalsinasi $800\text{ }^{\circ}C$ serta variasi waktu tahan 4, 6, dan 8 jam. Bahan awal yang digunakan berupa serbuk logam Mg, Sn, dan Ti dengan kemurnian tinggi ($>98\%$) yang masing-masing ditimbang sesuai dengan stoikiometrinya, serta HCl 12 M. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis data komposisi fasa serbuk MTS002 secara kuantitatif menggunakan metode Rietveld berupa parameter kisi, volume sel satuan, %berat, %molar, dan densitas atom dari pola XRD hasil kalsinasi pada suhu $800\text{ }^{\circ}C$ yang ditahan selama 4, 6, dan 8 jam tersebut. Hasil menunjukkan bahwa terbentuk fasa dominan $MgTiO_3$ (PDF No. 06-0494) sebesar (83,57-89,37) %berat, dan sisanya adalah fasa *impurity* TiO_2 (PDF No. 21-1276) dan MgO (PDF No. 43-0945) khusus pada waktu tahan 8 jam. Nilai parameter kisi dan volume sel satuan mengalami perubahan seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi. Perubahan tersebut disebabkan oleh terbentuknya larutan padat MTS002 sebagai akibat dari doping ion Sn^{4+} tersebut. Naiknya waktu tahan kalsinasi juga berpengaruh terhadap nilai densitas atom di mana berhubungan dengan kerapatan dan keteraturan atom.

Kata Kunci: $MgTiO_3$, waktu tahan, kalsinasi, *Match!*, Rietveld

Abstract

$Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ powder (abbreviated as MTS002) was synthesized using the solution mixing method by doping Sn^{4+} ions to Ti^{4+} ions at a calcination temperature of $800\text{ }^{\circ}C$ and variations in holding time of 4, 6, and 8 hours. The starting materials used are high purity ($>98\%$) Mg, Sn, and Ti metal powders, each of which is weighed according to its stoichiometry and 12 M HCl. The purpose of this research is to analyze the phase composition data of MTS002 powder quantitatively using the Rietveld method in the form of lattice parameters, unit cell volume, %weight, %molar, and atomic density from the XRD pattern of calcination results at $800\text{ }^{\circ}C$ held for 4, 6, and 8 hours. The results show that the dominant phase $MgTiO_3$ (PDF No. 06-0494) is formed at (83.57-89.37) % weight, and the rest are *impurity* TiO_2 (PDF No. 21-1276) and MgO (PDF No. 43-0945) phases specifically at a holding time of 8 hours. The value of lattice parameters and unit cell volume changes as the calcination holding time increases. These changes are caused by the formation of MTS002 solid solution as a result of the doping of Sn^{4+} ions. The increase in calcination holding time also affects the value of atomic density which is related to the density and orderliness of atoms.

Keywords: $MgTiO_3$, holding time, calcination, *Match!*, Rietveld

I. PENDAHULUAN

Magnesium Titanate ($MgTiO_3$) merupakan salah satu material keramik dielektrik yang banyak digunakan dalam sistem komunikasi gelombang mikro seperti resonator pada sistem radar serta antenna

dielektrik (Liu et al., 2021; Sharon Samyuktha et al., 2016). $MgTiO_3$ memiliki nama mineral *Geikelite* yang memiliki struktur kristal *Trigonal (Rhombohedral)* dengan parameter kisi primitif $a = b = 5,054$, $c = 14,898$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, dan $\gamma < 120^\circ$ (PDF $MgTiO_3$ No. 06-0494). $MgTiO_3$ memiliki struktur Ilmenit, dimana struktur tersebut merupakan turunan dari struktur *Corundum* pada Aluminium Oksida (Al_2O_3). Struktur Ilmenit tersebut memiliki stoikiometri ABO_3 dengan A dan B merupakan kation, yaitu ion Mg^{2+} dan Ti^{4+} , sedangkan O merupakan anion, yaitu O^{2-} . Anion O^{2-} tersebut tersusun dalam hamparan *close packing* berupa *Hexagonal Close Packed* (HCP) dengan pola A-B-A-B dan seterusnya sehingga membentuk *voids* oktahedral dengan bangun oktahedron. Kemudian kation dan anion tersebut memiliki bilangan koordinasi enam.

Sintesis $MgTiO_3$ telah banyak dilaporkan dengan berbagai macam metode yaitu metode pencampuran padat (*solid-state route*), *solar physical vapor deposition*, dan *sol gel*. *Pertama*, (Shanker et al., 2012) melaporkan sintesis dengan metode pencampuran padat menggunakan bahan awal serbuk oksida $Mg(NO_3) \cdot 6H_2O$, TiO_2 , Na_2CO_3 , dan K_2CO_3 pada suhu kalsinasi $1100^\circ C$ yang menghasilkan fasa dominan $MgTiO_3$ disertai fasa intermediat $MgTi_2O_5$ (*karrooite*). Metode tersebut merupakan metode standar dalam dunia industri karena dapat menghasilkan serbuk dalam jumlah yang banyak. Namun metode tersebut juga memiliki kelemahan, yaitu proses sintesis yang lama, suhu kalsinasi yang tergolong tinggi di atas $1000^\circ C$, dan adanya proses penggilingan yang intensif sehingga menyebabkan ukuran butir menjadi beragam. *Kedua*, (Apostol et al., 2013) menggunakan metode *solar physical vapor deposition* dengan bahan awal serbuk oksida MgO_x dan TiO_{2y} pada suhu kalsinasi $1000^\circ C$ selama 1 jam yang menghasilkan fasa $MgTiO_3$ dengan fasa intermediat Mg_2TiO_4 (*qandilite*). Kelebihan dari metode tersebut adalah mempunyai proses sintesis yang inovatif dan ramah lingkungan dimana bahan dilebur dan diuapkan (disublimasi) serta dikondensasikan dalam reaktor surya menggunakan radiasi matahari. Kekurangan metode tersebut yaitu langkah-langkah sintesis yang rumit dan tidak cocok untuk produksi dalam skala besar. *Ketiga*, (Tuval et al., 2020) melaporkan sintesis metode *sol gel* dengan bahan awal serbuk Mg dan Ti pada suhu kalsinasi $1200^\circ C$ selama 5 jam yang menghasilkan fasa dominan $MgTiO_3$ dengan fasa intermediat Mg_2TiO_4 . Kelebihan dari metode tersebut adalah molekul yang bercampur lebih homogen, dapat menghasilkan fasa yang diinginkan pada suhu rendah, dan kemampuan untuk menghasilkan partikel berukuran nano. Namun metode *sol gel* memiliki kekurangan, yaitu prekursor yang sensitif terhadap kelembaban, serta stoikiometri yang rumit. Munculnya fasa intermediat pada beberapa metode di atas dapat berpotensi menurunkan sifat dielektrik, sehingga merugikan dalam penggunaan skala industri (Tang et al., 2010).

Kemudian terdapat metode yang dapat menghasilkan fasa dominan $MgTiO_3$ tanpa adanya fasa intermediat $MgTi_2O_5$ maupun Mg_2TiO_4 , yaitu metode pencampuran larutan. Metode tersebut menggunakan bahan awal yang mudah didapat serta proses sintesis sederhana. Adapun beberapa peneliti yang telah melaporkan sintesis $MgTiO_3$ dengan metode pencampuran larutan, yaitu: *Pertama*, (Nurchosiyah & Pratapa, 2013) melaporkan sintesis dengan bahan awal serbuk Zn, Mg, dan Ti yang menghasilkan fasa $MgTiO_3$, rutil, dan periclase pada suhu $550^\circ C$. *Kedua*, (Pratapa et al., 2014) menggunakan bahan awal serbuk magnesium (Mg) dan titanium (Ti) (Merck, >99%) yang menghasilkan fasa $MgTiO_3$ dan TiO_2 pada suhu 700 dan $800^\circ C$ serta ekstra fasa MgO pada suhu $600^\circ C$. *Ketiga*, (Nisa & Ermawati, 2020) menggunakan bahan awal serbuk Mg, Zn, dan Ti (Merck) yang menghasilkan fasa dominan $MgTiO_3$ disertai fasa *impurity* TiO_2 pada suhu kalsinasi $550^\circ C$ dan adanya fasa MgO pada suhu sinter $1000^\circ C$. Namun dari beberapa penelitian mengenai sintesis $MgTiO_3$ menggunakan metode pencampuran larutan tersebut masih belum banyak penelitian yang melaporkan penggunaan doping ion Sn^{4+} terhadap ion Ti^{4+} dengan tujuan memperoleh fasa dominan $MgTiO_3$ tanpa disertai fasa intermediat $MgTi_2O_5$ atau Mg_2TiO_4 . Adapun beberapa penelitian yang menggunakan doping ion Sn^{4+} terhadap ion Ti^{4+} tersebut antara lain (Gong et al., 2013) melaporkan metode *conventional solid-state* menggunakan bahan awal serbuk oksida $Mg(OH)_2$, SnO_2 , dan TiO_2 yang dikalsinasi pada suhu $1100^\circ C$ selama 4 jam dan menghasilkan tiga fasa, yaitu $MgTiO_3$, TiO_2 , dan $MgTi_2O_5$. Kemudian (Singh & Bahel, 2020) melaporkan metode yang sama dengan bahan awal serbuk oksida MgO dan $Mg(OH)_2$ pada suhu kalsinasi $1200^\circ C$ selama 5 jam sehingga menghasilkan fasa $MgTiO_3$ sebagai fasa dominan dan $MgTi_2O_5$ sebagai fasa intermediat.

Berdasarkan uraian di atas, Penulis berinisiatif untuk mensintesis serbuk $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ (selanjutnya disingkat MTS002) menggunakan metode pencampuran larutan dengan doping ion Sn^{4+} terhadap ion Ti^{4+} pada suhu kalsinasi $800^\circ C$ dengan variasi waktu tahan 4, 6, dan 8 jam. Tujuannya adalah untuk menganalisis data komposisi fasa serbuk MTS002 yang berupa parameter kisi, volume sel satuan, %berat, %molar, dan densitas atom dari pola XRD dengan metode *Rietveld*.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu sintesis, kalsinasi, dan karakterisasi sampel uji serta analisisnya.

Sintesis dan Karakterisasi

Sintesis serbuk MTS002 menggunakan metode pencampuran larutan dengan bahan awal berupa serbuk Mg, Ti, Sn (Merck) yang ditimbang sesuai dengan stoikiometrinya dan dicampurkan dengan HCl 12 M sehingga membentuk larutan homogen seperti pada **Persamaan 1-3**,



Kemudian ketiga larutan $MgCl_2$, $SnCl_4$, dan $TiCl_4$ tersebut dicampur pada suhu ruang dan dipanaskan pada suhu 100-110 °C hingga larutan tersebut mengental dan menjadi kerak kering berwarna putih. Kerak kering tersebut dihaluskan menggunakan mortar dan *pestle* sehingga menghasilkan serbuk amorf berwarna putih yang mengandung fasa $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (PDF No. 25-0515), TiO_2 (PDF No. 21-1276), dan $SnCl_4$ (ICDD No. 01-070-5323). Selanjutnya serbuk amorf tersebut dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 4, 6, dan 8 jam sehingga menghasilkan serbuk kristalin $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ (MTS002). Kemudian serbuk kristalin tersebut dilakukan karakterisasi struktur menggunakan uji *X-Ray Diffraction* (XRD) (*PanAnalytical, Type Expert Pro*) dengan radiasi $CuK\alpha$ pada $\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$, dan rentang sudut difraksi (2θ) = 15-70°, serta ukuran step detektor 0,02 °/min untuk memperoleh pola XRD. Pola XRD tersebut dianalisis secara kualitatif menggunakan metode *Search-and-Match* dengan program *Match!* dan analisis kuantitatif menggunakan metode *Rietveld* dengan program *Rietica*.

B. Variabel Operasional Penelitian

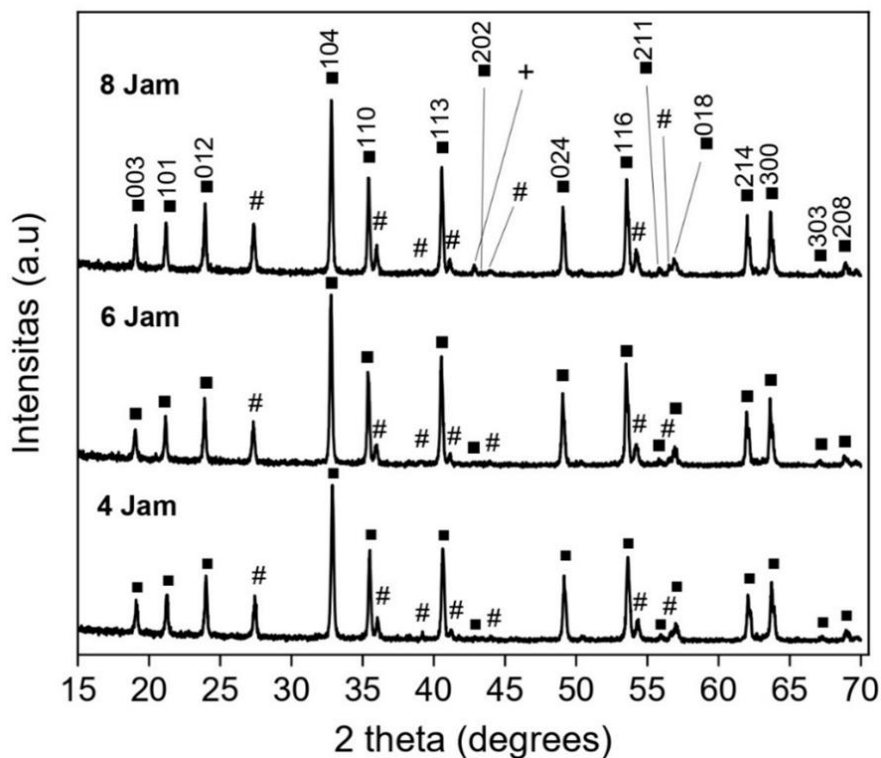
Bahan awal berupa serbuk logam Mg, Ti, Sn; suhu kalsinasi (800 °C); *furnace* dan XRD *PanAnalytical Type Expert Pro* digunakan sebagai variabel kontrol. Kemudian variabel manipulasi yang digunakan adalah waktu tahan kalsinasi selama 4, 6, dan 8 jam. Sedangkan variabel responnya adalah fasa-fasa yang teridentifikasi serta komposisinya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Serbuk $MgTiO_3$

Hasil *Match!*

Gambar 1 berikut menunjukkan hasil dari uji XRD dengan suhu kalsinasi 800 °C pada waktu tahan 4, 6, dan 8 jam menggunakan program *Match!*.



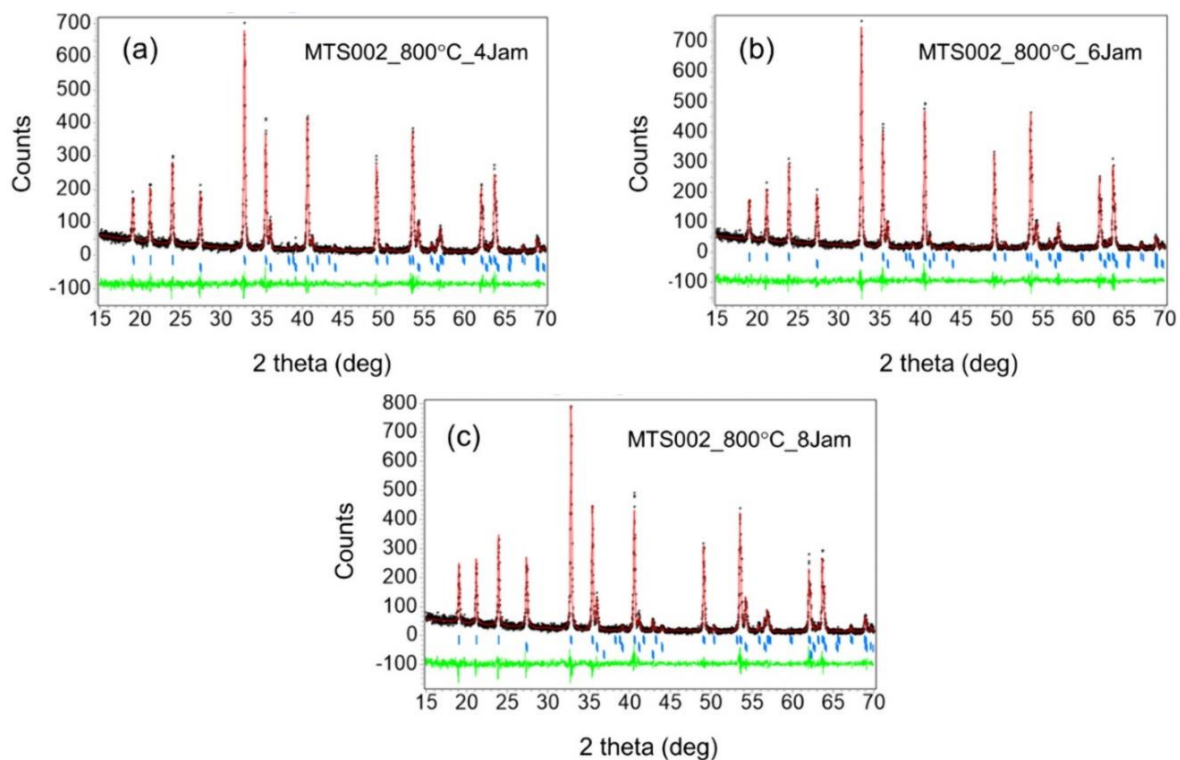
Gambar 1. Pola XRD serbuk MTS002 pada suhu kalsinasi 800 °C selama 4, 6, dan 8 Jam. ■ = $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3 = MgTiO_3$ Geikielite ; # = $(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_2 = TiO_2$ Rutile ; + = MgO Periclase.

Pada **Gambar 1** dapat dilihat bahwa serbuk MTS002 mengandung tiga fasa yaitu fasa $MgTiO_3$ (PDF No. 06-0494) ditandai dengan simbol (■), TiO_2 (PDF No. 21-1276) ditandai dengan simbol (#), dan MgO (PDF No. 43-0945) dengan simbol (+) (khusus waktu tahan 8 jam pada posisi $2\theta = 42,9^\circ$). Selanjutnya adanya fasa *impurity* berupa TiO_2 dan MgO tersebut disebabkan karena kedua fasa tersebut belum bereaksi sempurna membentuk $MgTiO_3$ (Angela & Pratapa, 2012; Yulianti & Ermawati, 2019). Hal yang diduga menjadi penyebab kedua senyawa tersebut tidak bereaksi secara sempurna yaitu kurangnya energi untuk terjadi reaksi pada **Persamaan 4** sebesar $88,58 \pm 2,03$ kJ/mol (Linton et al., 1999).



Analisis Komposisi Fasa

Gambar 2 merupakan pola difraksi serbuk MTS002 hasil dari proses *Refinement* menggunakan metode *Rietveld* dengan perangkat lunak *Rietica*. **Tabel 1** menunjukkan hasil penghalusan *Rietveld* melalui parameter-parameter kesesuaian (*Figures of Merit, FoM*). Selain merangkum nilai-nilai parameter kesesuaian tersebut juga terdapat *output Refinement* data komposisi fasa berupa %molar dan densitas milik semua fasa yang telah teridentifikasi. Kemudian **Gambar 3** merupakan perbandingan fraksi berat dari fasa $MgTiO_3$, TiO_2 , dan MgO. **Gambar 4** menunjukkan hubungan dari parameter kisi dengan volume sel satuan dari fasa $MgTiO_3$ seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi.

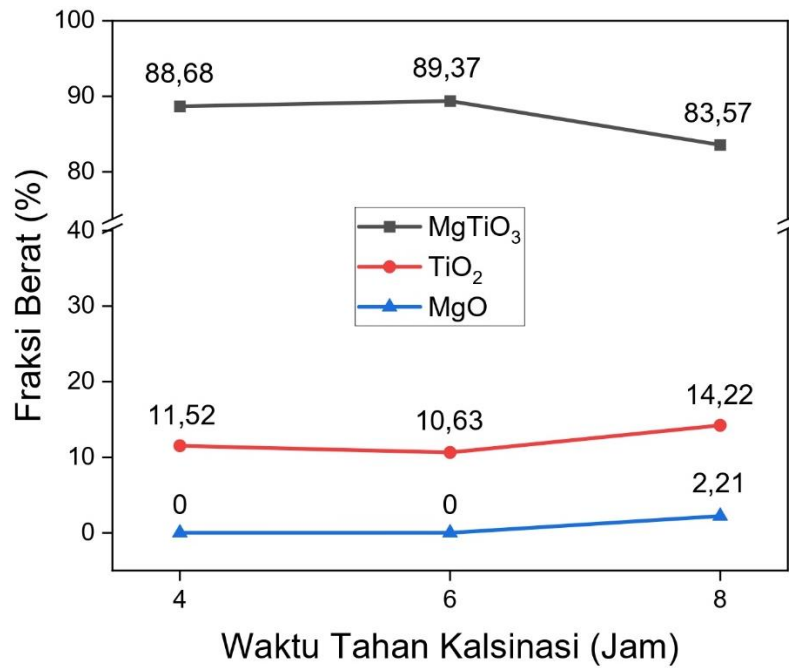


Gambar 2. Hasil Refinement dengan metode Rietveld dari ketiga pola XRD menggunakan program Rietica pada serbuk MTS002 suhu 800 °C dengan waktu tahan (a) 4, (b) 6, dan (c) 8 jam.

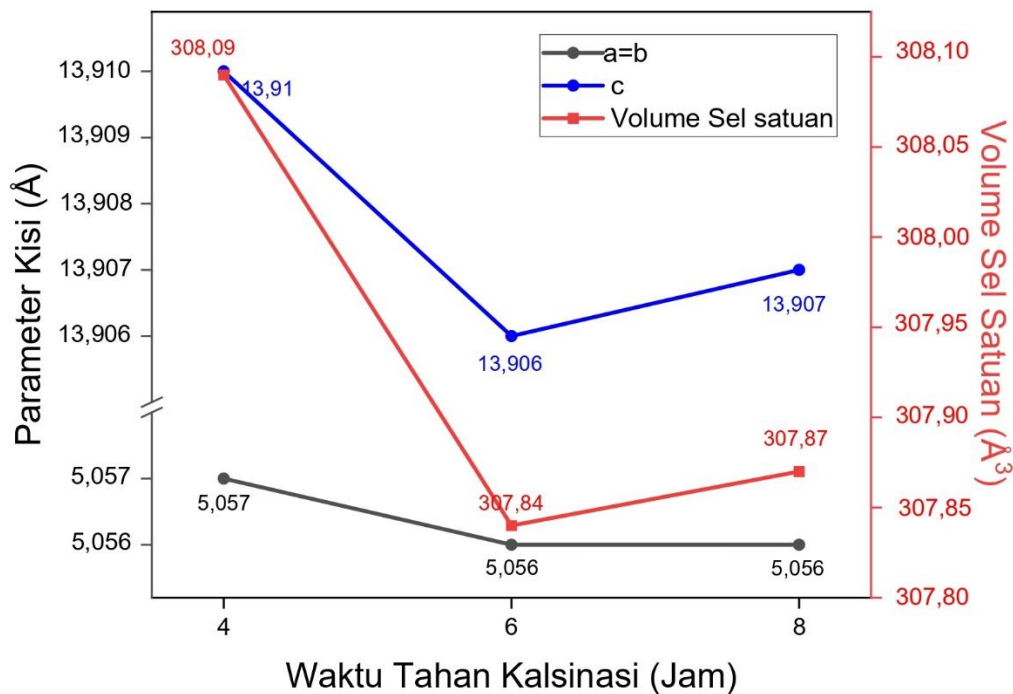
Tabel 1. Output Refinement data komposisi dari ketiga serbuk MTS002 pada Gambar 2.

Waktu Tahan Kalsinasi	Fasa Teridentifikasi	FoM	%Molar	Densitas (gr/cm^3)	
4 jam	MgTiO ₃	R_p	13,24	84,34 ± 2,27	3,75
		R_{wp}	18,13		
		$R_B(MgTiO_3)$	5,45		
	TiO ₂	$R_B(TiO_2)$	4,70	15,66 ± 0,47	4,23
		R_{exp}	15,45		
		χ^2	1,37		
6 jam	MgTiO ₃	R_p	12,28	85,12 ± 2,35	3,80
		R_{wp}	17,25		
		$R_B(MgTiO_3)$	1,82		
	TiO ₂	$R_B(TiO_2)$	5,08	14,88 ± 0,46	4,23
		R_{exp}	15,31		
		χ^2	1,28		
8 jam	MgTiO ₃	R_p	13,13	74,81 ± 0,78	3,91

	R_{wp}	17,64		
	$R_B(MgTiO_3)$	5,09		
TiO ₂	$R_B(TiO_2)$	3,84	19,26 ± 0,38	4,23
	$R_B(MgO)$	3,48		
MgO	R_{exp}	14,94	5,93 ± 0,57	3,57
	χ^2	1,39		



Gambar 3. Perbandingan persentase berat dari fasa MgTiO₃, TiO₂, dan MgO pada waktu tahan kalsinasi 4, 6, dan 8 jam



Gambar 4. Parameter kisi dan volume sel satuan dari fasa $MgTiO_3$ dengan waktu tahan kalsinasi 4, 6, dan 8 jam

Berdasarkan **Gambar 2** tersebut, simbol “+” merupakan pola difraksi terukur. Sedangkan garis merah merupakan pola model yang dibuat berdasarkan data-data kristalografi dari fasa $MgTiO_3$ *Geikeilite*, TiO_2 *Rutile*, dan MgO *Periclase*. Data-data kristalografi yang dapat diumpangkan pada jendela *Rietica* berupa grup ruang (*space group*), parameter kisi, tipe atom-atom, dan posisi relatif atom-atom tersebut (x, y dan z). Data-data kristalografi tersebut didapatkan melalui basis data *Powder Diffraction File* (PDF) dengan No. 06-0494 untuk fasa $MgTiO_3$, No. 21-1276 untuk fasa TiO_2 , dan No. 45-0946 untuk fasa MgO , serta dari basis data *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) dengan No. 657954 untuk fasa $MgTiO_3$, No. 64987 untuk fasa TiO_2 , dan No. 9863 untuk fasa MgO . Kemudian garis hijau menyatakan selisih tinggi intensitas antara puncak terukur dengan puncak terhitung. Sedangkan garis vertikal biru di sebelah bawah puncak terukur dan puncak terhitung menyatakan posisi puncak-puncak *Bragg* milik ketiga fasa yang teridentifikasi tersebut.

Tabel 1 menunjukkan hasil parameter-parameter kesesuaian (*Figures-of-Merit*, *FoM*) pada setiap waktu tahan kalsinasi dengan nilai *Profile residual* (R_p), *Weighted profile residual* (R_{wp}), dan *Expected profile residual* (R_{exp}) di bawah 20,00, *Goodness of Fit* (GOF) di bawah 2,000, dan *Bragg Residual* di bawah 10,00. Hal ini sesuai dengan pernyataan (Hunter, 2000) bahwa nilai-nilai kesesuaian (R_p , R_{wp} , dan R_{exp}) tersebut bernilai sangat minimal yang menandakan proses *Refinement* telah selesai. Kemudian dapat dilihat garis selisih antara pola terhitung dan pola terukur (garis berwarna hijau) telah menjadi garis tanpa intensitas yang berarti sehingga hasil tersebut menunjukkan bahwa output analisis dari *Refinement* menggunakan metode *Rietveld* telah berhasil dilakukan dan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Selanjutnya **Tabel 1** juga menunjukkan output *Refinement* pada sampel MTS002 yang menghasilkan persentase molar fasa $MgTiO_3$ sebesar 84,34% (4 jam), 85,12% (6 jam), dan 74,81% (8 jam). **Gambar 3** menunjukkan persentase berat fasa $MgTiO_3$ sebesar 88,68% (4 jam), 89,37% (6 jam), dan 83,57% (8 jam). Meningkatnya waktu tahan kalsinasi tersebut juga dapat mempengaruhi persentase berat dari fasa TiO_2 yang semakin menurun, serta fasa $MgTiO_3$ semakin meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa ion-ion Ti^{4+} dan Mg^{2+} telah berhasil membentuk fasa $MgTiO_3$ seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi (Nurchosiyah & Pratapa, 2013). Namun pada waktu tahan 8 jam terjadi penurunan persentase berat dari fasa $MgTiO_3$ akibat adanya fasa baru MgO . Selanjutnya nilai volume sel satuan pada fasa $MgTiO_3$ sebesar $308,08 \pm 0,03 \text{ \AA}^3$ (4 jam), $307,84 \pm 0,02 \text{ \AA}^3$ (6 jam), dan $307,87 \pm 0,02 \text{ \AA}^3$ (8 jam) dimana menghasilkan pola yang sama dengan pola parameter kisi fasa $MgTiO_3$ (a=b, c) sebesar (a=b) = $5,05 \pm 0,00 \text{ \AA}$, c = $13,90 \pm 0,00 \text{ \AA}$ (6 dan 8 jam) mengingat volume sel satuan dibangun oleh perkalian dari parameter kisi a, b, dan c (lihat **Gambar 4**). Adanya perubahan dari parameter kisi dan volume sel satuan seiring dengan

naiknya waktu tahan kalsinasi tersebut disebabkan oleh terbentuknya larutan padat MTS002 sebagai akibat dari doping ion Sn^{4+} terhadap Ti^{4+} (Abdillah & Suasmoro, 2015). Nilai volume sel satuan pada fasa $MgTiO_3$ cenderung mengalami kenaikan seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi akibat jari-jari ion *dopant* lebih besar daripada ion *hostnya* (Fang et al., 2021; Sharma & Bahel, 2021). Pada penelitian ini jari-jari ion Sn^{4+} (0,069 nm) lebih besar daripada ion Ti^{4+} (0,061 nm) sehingga volume sel satuan mengalami kenaikan pada waktu tahan 8 jam. Namun terdapat hal menarik pada waktu tahan 4 dan 6 jam dimana nilai volume sel satuan mengalami penurunan. Hal tersebut disebabkan oleh *voids* oktahedron yang terdistorsi pada waktu tahan 6 jam sehingga sel satuan *a* dan *b* menjadi lebih kecil dan menyebabkan nilai volume sel satuan menjadi kecil pula (Wang & Yan, 2021). Kemudian naiknya waktu tahan kalsinasi juga mengakibatkan nilai densitas semakin naik, sebesar 3,75 gr/cm³ (4 jam), 3,80 (6 jam), dan 3,91 gr/cm³ yang disebabkan semakin rapat dan teratur atom-atom pada fasa $MgTiO_3$ (Lei et al., 2018).

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa sintesis serbuk $Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O_3$ (MTS002) menggunakan metode pencampuran larutan padat dengan variasi waktu tahan kalsinasi 4, 6, dan 8 jam pada suhu 800 °C berhasil dilakukan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa telah terbentuk fasa $MgTiO_3$ sebagai fasa dominan serta fasa *impurity* TiO_2 dan MgO (pada waktu tahan 8 jam). Meningkatnya nilai persentase berat fasa $MgTiO_3$ seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi menunjukkan bahwa ion-ion Ti^{4+} dan Mg^{2+} telah berhasil membentuk fasa $MgTiO_3$. Namun pada waktu tahan 8 jam, persentase berat tersebut mengalami penurunan yang disebabkan oleh fasa MgO . Nilai volume sel satuan berbanding lurus dengan parameter kisi yang disebabkan oleh perkalian parameter kisi. Naiknya waktu tahan kalsinasi juga menyebabkan nilai volume sel satuan berubah yang disebabkan oleh terbentuknya larutan padat MTS002 sebagai akibat dari doping ion Sn^{4+} terhadap Ti^{4+} . Pada waktu tahan 4 dan 6 jam nilai volume sel satuan tersebut mengalami penurunan yang disebabkan oleh *voids* oktahedron yang terdistorsi. Kemudian nilai densitas atom semakin tinggi yang disebabkan oleh kerapatan dan keteraturan atom seiring dengan naiknya waktu tahan kalsinasi.

B. Saran

Sintesis serbuk MTS002 dengan variasi doping yang berbeda dan waktu tahan yang lebih banyak perlu dilakukan guna menambah data bagi penelitian kedepannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, S., & Suasmoro. (2015). Electrical Characterization Of $Mg_{0,8}Zn_{0,2}TiO_3$ Doped By V_2O_5 Using Variation Of Sintering Time At 1100 °C. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada : <https://repository.its.ac.id/72028/1/1111100007-Undergraduate-Thesis.pdf>
- Angela, R., & Pratapa, S. (2012). "Sintesis $MgTiO_3$ dengan Variasi Temperatur Kalsinasi Menggunakan Metode Pencampuran Larutan," *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 1(1), hal. 73-75. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12962/j23373520.v1i1.565>
- Apostol, I., Saravanan, K. V., Monty, C. J. A., & Vilarinho, P. M. (2013). Solar Physical Vapor Deposition: A New Approach For Preparing Magnesium Titanate Nanopowders. *Applied Surface Science*, 285, hal. 49-55. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.07.155>
- Fang, Z., Yang, H., Yang, H., Xiong, Z., Zhang, X., Zhao, P., & Tang, B. (2021). Ilmenite-Type $MgTiO_3$ Ceramics By Complex $(Mn_{1/2}W_{1/2})^{4+}$ Cation Co-Substitution Producing Improved Microwave Characteristics. *Ceramics International*, 47(15), hal. 21388-21397. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada : <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.148>
- Gong, Z., Wang, Z., Wang, L., Fu, Z., Han, W., & Zhang, Q. (2013). Microwave Dielectric Properties of High-Q $Mg(Sn_xTi_{1-x})O_3$ Ceramics. *Electronic Materials Letters*, 9(3), hal. 331-335. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s13391-013-2214-3>
- Hunter, B. A. (2000). Rietica - a visual Rietveld program. *2nd AINSE Symposium on Neutron Scattering Powder Diffraction and Australian Neutron Users Group Meeting Symposium Handbook*, hal. 24. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:31059005

- Lei, S., Fan, H., Ren, X., Fang, J., Ma, L., & Tian, H. (2018). Microstructure, Phase Evolution and Interfacial Effects in A New $Zn_{0,9}Mg_{0,1}TiO_3$ - $ZnNb_2O_6$ Ceramic System With Greatly Induced Improvement In Microwave Dielectric Properties. *Scripta Materialia*, 146, hal. 154–159. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.11.025>
- Linton, J. A., Fei, Y., & Navrotsky, A. (1999). The $MgTiO_3$ - $FeTiO_3$ Join at High Pressure and Temperature. *American Mineralogist*, 84(10), hal. 1595–1603. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.2138/am-1999-1013>
- Liu, L., Chen, Y., Feng, Z., Wu, H., & Zhang, X. (2021). Crystal Structure, Infrared Spectra, and Microwave Dielectric Properties of The $EuNbO_4$ Ceramic. *Ceramics International*, 47(3), hal. 4321–4326. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.176>
- Nisa, D., & Ermawati, F. U. (2020). Fabrikasi Keramik $(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$ + xwt.% Bi_2O_3 Hasil Sintesis Dengan Metode Pencampuran Larutan Dan Pengaruh Variasi x wt.% Bi_2O_3 Terhadap Struktur Dan Densitas Keramik. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, hal. 15–20. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.26740/ifi.v9n2.p15-20>
- Nurchosiyah, F. S., & Pratapa, S. (2013). Sintesis Larutan Padat $Zn_{0,1}Mg_{0,9}TiO_3$ Kemurnian Tinggi Menggunakan Metode Pencampuran Larutan. *Jurnal Sains Dan Seni ITS*, 2(1), hal. 1-3. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.12962/j23373520.v2i1.2186>
- Pratapa, S., Baqiya, M. A., Istianah, Lestari, R., & Angela, R. (2014). A Simple Dissolved Metals Mixing Method To Produce High-Purity $MgTiO_3$ Nanocrystals. *AIP Conference Proceedings* 1586, hal. 39–42. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1063/1.4866726>
- Shanker, V., Kumar, S., & Surendar, T. (2012). Dielectric Behaviour Of Sodium And Potassium Doped Magnesium Titanate. *Bulletin of Materials Science*, 35(7), hal. 1165–1171. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s12034-012-0399-y>
- Sharma, K., & Bahel, S. (2021). Structural, Dielectric and Reflection Analysis of $Zn_xMg_{1-x}TiO_3$ Ceramics Synthesized Using Auto-Ignition Combustion Method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(23), hal. 27216–27231. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07088-7>
- Sharon Samyuktha, V., Guru Sampath Kumar, A., Subba Rao, T., & Padma Suvarna, R. (2016). Synthesis, Structural and Dielectric Properties of Magnesium Calcium Titanate $(1-x)MgTiO_3-xCaTiO_3$ ($x=0, 0.1, 0.2$ and 0.3). *Materials Today: Proceedings*, 3(6), hal. 1768–1771. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.072>
- Singh, J., & Bahel, S. (2020). Synthesis of Single Phase $MgTiO_3$ and Influence of Sn^{4+} Substitution On Its Structural, Dielectric and Electrical Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, hal. 152679. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152679>
- Tang, B., Zhang, S., Zhou, X., Deng, C., & Yu, S. (2010). Preparation of Pure $MgTiO_3$ Powders and The Effect of The $ZnNb_2O_6$ -Dope Onto The Property of $MgTiO_3$ -Based Ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*, 492(1–2), hal. 461–465. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.140>
- Tuval, T., Rosen, B. A., Zabicky, J., Kimmel, G., Dilman, H., & Shneck, R. Z. (2020). Thermal Expansion of $MgTiO_3$ Made by Sol-Gel Technique at Temperature Range 25–890 °C. *Crystals*, 10(10), hal. 887. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/cryst10100887>
- Wang, M., & Yan, D. (2021). Improved Crystalline Structure and Sintering Characteristics Of Nonstoichiometric $MgTiO_3$ Ceramics By Sol-Gel Method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 97(2), hal. 365–372. Diakses 4 Juli 2023. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05458-x>
- Yulianti, D. I., & Ermawati, F. U. (2019). Analisis Struktur dan Mikrostruktur Fasa Tunggal $(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3/Bi_2O_3$. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 8(02), hal. 17–22. Diakses 24 Juni 2023. Tersedia pada : <https://doi.org/10.26740/ifi.v8n2.p%25p>