

PENGARUH DOPAN Zn PADA KERAMIK MgTiO_3 TERHADAP PENINGKATAN PARAMETER KISI DAN VOLUME SEL SATUAN

¹⁾Renita Fitriani, ^{2*)}Frida Ulfah Ermawati

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Email: renitafitriani.21047@mhs.unesa.ac.id

^{2*)}Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, Email: frida.ermawati@unesa.ac.id

Abstrak

Material keramik dielektrik merupakan material yang menarik perhatian dalam pengembangan resonator dielektrik gelombang mikro, dan teknologi nirkabel modern. *Magnesium Titanate* (MgTiO_3) menjadi satu di antara komponen yang dapat dimanfaatkan dalam aplikasi tersebut. Sifat asli keramik dielektrik MgTiO_3 dapat dibuat lebih baik dengan menambahkan ion dopan. Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan karakterisasi struktur keramik dengan komposisi baru, yakni 20% mol dopan Zn pada $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{TiO}_3$ (MZT02) melalui data XRD. Dopan Zn ditambahkan untuk mengetahui perubahan ukuran parameter kisi dan vol. sel satuan dibandingkan dengan tanpa diberi dopan. Data struktur MZT02 dibandingkan dengan data struktur MgTiO_3 tanpa dopan (MZT0). Serbuk MZT0 dan MZT02 disintesis melalui metode pencampuran larutan sesuai stoikiometri, dengan bahan awal serbuk logam Mg, Ti, dan Zn serta HCl 12 M. Serbuk amorf MZT0 dikalsinasi pada 700 °C, sedangkan MZT02 pada 500 °C masing-masing selama 5 jam. Serbuk kristalin dikompaksi menggunakan hidrolik *hand press* (8 MPa, 10 detik) menjadi pelet silinder pejal berdiameter 8 mm dan disinter pada 1100 °C selama 4 jam. Hasil XRD diperoleh parameter kisi *c* pada fasa utama MgTiO_3 meningkat dari $13,903 \times 10^{-2}$ nm (MZT0) menjadi $13,910 \times 10^{-2}$ nm (MZT02). Peningkatan juga terlihat pada data volume sel satuan, yakni dari $307,71 \pm 0,020 \times 10^{-1}$ nm³ (MZT0) menjadi $307,81 \pm 0,042 \times 10^{-1}$ nm³ (MZT02). Peningkatan parameter kisi dan volume sel satuan disebabkan ukuran jari-jari Zn (0,074 nm) yang lebih besar dibandingkan dengan ukuran jari-jari Mg (0,072 nm). Distorsi kisi tersebut juga menyebabkan menurunnya nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) dan faktor *Q* pada keramik MZT02.

Kata Kunci: keramik MZT0 dan MZT02; XRD; parameter kisi; volume sel satuan

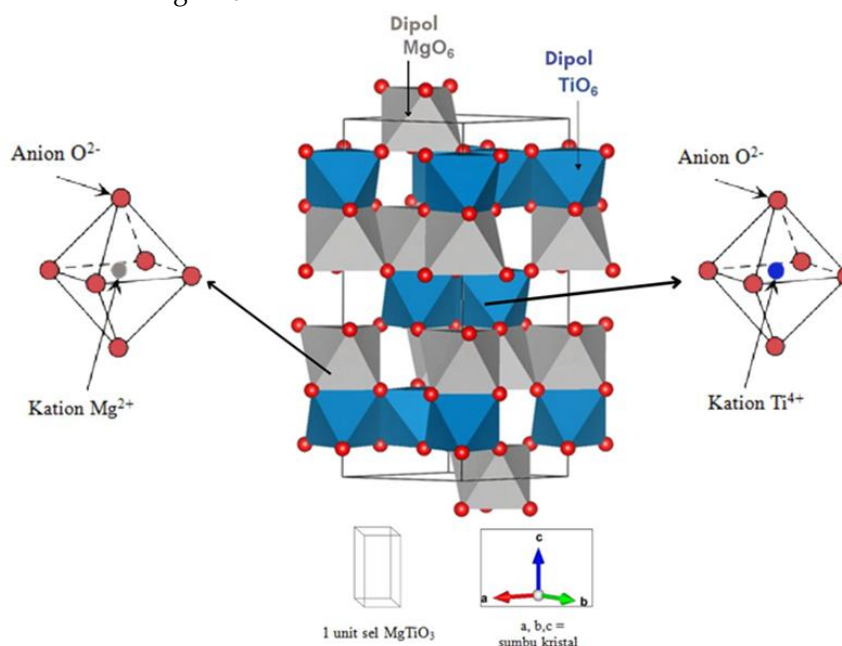
Abstract

Dielectric ceramic materials are essential for the development of microwave dielectric resonators and modern wireless technology. *Magnesium Titanate* (MgTiO_3) is one of the components used in that application. Original properties of MgTiO_3 dielectric ceramics can be improved by added dopant ions. Therefore, this paper reports the structural characterization of $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{TiO}_3$ (MZT02) with 20 mol% Zn dopant via XRD. Structural data of MZT02 are compared with structural data of MgTiO_3 without dopants (MZT0). Zn dopants added to determine the changes size of lattice parameters and volume of unit cell compared to without dopant. MZT0 and MZT02 powders were synthesized using stoichiometric solution mixing method, with Mg, Ti, and Zn metal powders and 12 M HCl as starting materials. Amorphous MZT0 powder was calcined at 700 °C, while MZT02 at 500 °C for 5 hours each. Crystalline powder compacted using hydraulic-hand-press (8 MPa, 10 seconds) into solid cylindrical pellets with diameter 8 mm and sintered at 1100 °C for 4 hours. XRD results obtained that lattice parameter *c* of the main phase MgTiO_3 increased from $13,903 \times 10^{-2}$ nm (MZT0) to $13,910 \times 10^{-2}$ nm (MZT02). Consequently, the unit cell volume increased from $307,71 \pm 0,020 \times 10^{-1}$ nm³ (MZT0) to $307,81 \pm 0,042 \times 10^{-1}$ nm³ (MZT02). Increase in the lattice parameter and unit cell volume was due to the larger radius of Zn (0.074 nm) compared to radius of Mg (0.072 nm). Distortion of the lattice also causes a decrease the dielectric constant (ϵ_r) and *Q* factor in MZT02 ceramics.

Keywords: MZT0 and MZT02 ceramics; XRD; phase transformation; lattice parameter; unit cell volume

I. PENDAHULUAN

Magnesium titanate (MgTiO_3) adalah material keramik dielektrik yang mempunyai peran penting di berbagai sistem khususnya dalam teknologi komunikasi frekuensi *microwave*, meliputi antena, RADAR, serta dalam industri modern seperti filter dielektrik [1]-[3]. MgTiO_3 memiliki struktur kristal ilmenit dan sistem rhombohedral dan *space group* R-3, dengan kisi $a = b = 5,054 \text{ \AA}$ dan $c = 13,898 \text{ \AA}$, serta $\alpha = \beta = 90^\circ$, dan $\gamma = 120^\circ$ (PDF No. 6-494). Berbagai upaya telah dilakukan untuk memodifikasi sifat keramik MgTiO_3 melalui penambahan dopan [4]. Dalam proses pemilihan dopan, harus memenuhi kriteria spesifik untuk memastikan integrasi yang efektif ke dalam struktur kristal MgTiO_3 , dimana ion dopan dan ion *host* harus mempunyai bilangan koordinasi serta muatan kation yang sama, sedangkan perbedaan jari-jari antara ion dopan dan ion *host* tidak boleh melebihi 15 % guna meminimalkan terjadinya distorsi kisi [5]. Distorsi kisi merupakan ketidakaturan struktur kristal akibat gangguan pada posisi atau jarak antar atom dari keadaan setimbang. Hal tersebut seringkali dipicu oleh adanya perbedaan jari-jari ion ketika satu atom digantikan oleh atom lain dalam satu kisi (substitusi), memaksa atom di sekitarnya untuk bergeser dari posisi idealnya demi mengakomodasi ukuran yang tidak sesuai tersebut sehingga memicu perubahan parameter kisi [14]. **Gambar 1** menyajikan struktur kristal MgTiO_3 .



Gambar 1. Ilustrasi hamparan 3D dipol MgO_6 (abu-abu) dan TiO_6 (biru) pada struktur kristal MgTiO_3 yang terbentuk dari kation-kation Mg^{2+} dan Ti^{4+} yang menempati *octahedral voids* diantara 6 anion O^{2-} [6].

Struktur kristal MgTiO_3 pada **Gambar 1** memperlihatkan bahwa ion Mg^{2+} dan Ti^{4+} menempati posisi *octahedral site* diantara anion-anion oksigen (O^{2-}). Ilustrasi di atas menunjukkan dipol MgO_6 untuk keramik tanpa dopan, sedangkan pada keramik dengan menambahkan dopan Zn pada MZT02 maka *site* kation Mg menjadi dihuni oleh Mg dan Zn membentuk dipol $(\text{Mg}/\text{Zn})\text{O}_6$. Mengingat ukuran jari-jari ion Zn yang relatif lebih besar (0,074 nm) dibandingkan dengan jari-jari ion Mg (0,072 nm), maka perbedaan ini berpotensi menyebabkan ukuran jari-jari kation $(\text{Mg}/\text{Zn})^{2+}$ menjadi relatif lebih besar dibandingkan dengan jari-jari kation Mg tanpa Zn. Tidak hanya itu, perbedaan jari-jari tersebut sekaligus berpotensi untuk menyebabkan perubahan ukuran volume sel satuan pada MZT02.

Berdasarkan [7], keramik $(\text{Mg}_{0.8}\text{Zn}_{0.2})(\text{Ti}_{0.99}\text{Sn}_{0.01})\text{O}_3$ (disingkat MZTS) dimana kation Mg^{2+} diberi dopan Zn sebesar 20 %mol, sementara kation Ti^{4+} diberi dopan Sn sebesar 1 %mol, sinter pada temperatur 1100°C dan divariasi waktu tahan, yaitu (4, 6, 8, dan 10) jam, ternyata mampu mencegah terbentuknya fasa Mg_2TiO_4

dibandingkan dengan keramik tanpa dopan Sn (MZT) saja. Keterlibatan ion dopan Sn^{4+} dalam keramik MZTS terbukti meningkatkan nilai parameter kisi dan vol. sel satuan pada fasa MgTiO_3 , karena jari-jari ion Sn^{4+} (0,069 nm) lebih besar dibandingkan dengan jari-jari ion Ti^{4+} (0,061 nm).

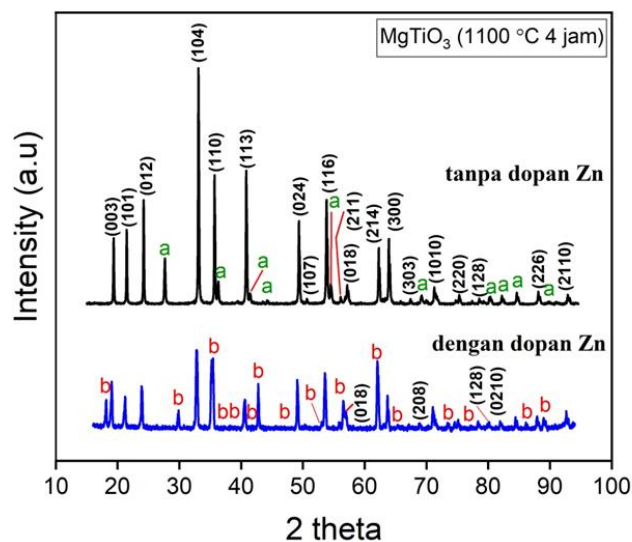
Kemudian publikasi [8], material $\text{Mg}(\text{Ti}_{1-x}\text{Sn}_x)\text{O}_3$ (dengan $x = 0,01 - 0,09$) disintesis menggunakan serbuk $\text{Mg}(\text{OH})_2$, SnO_2 , dan TiO_2 sebagai bahan awal, pada suhu sinter 1330-1450 °C teridentifikasi fasa MgTiO_3 , TiO_2 , dan MgTi_2O_5 . Selain itu [9] juga melaporkan sintesis MgTiO_3 menggunakan serbuk Mg dan Ti dengan variasi suhu kalsinasi (600, 700, dan 800) °C selama 1 jam, ternyata fasa MgTiO_3 baru terbentuk ketika suhu mencapai 800 °C. Hal tersebut dikuatkan oleh [10], bahwasannya fasa MgTiO_3 tanpa dopan baru terbentuk pada suhu kalsinasi 700 °C. Sedangkan MgTiO_3 dengan dopan ion Zn, suhu pembentukan fasa MgTiO_3 turun menjadi 500 °C. Penurunan suhu pembentukan tersebut disebabkan karena ion Zn telah meleleh pada suhu dibawah 500 °C (420 °C) [11]. Mengacu pada manfaat ion Zn tersebut, pada makalah ini, dibahas tentang bagaimana transformasi fasa-fasa yang terbentuk pada keramik MgTiO_3 ketika ditambah dopan Zn (MZT02) dibandingkan tanpa Zn (MZT0) pada suhu sinter 1100 °C selama 4 jam.

II. METODE

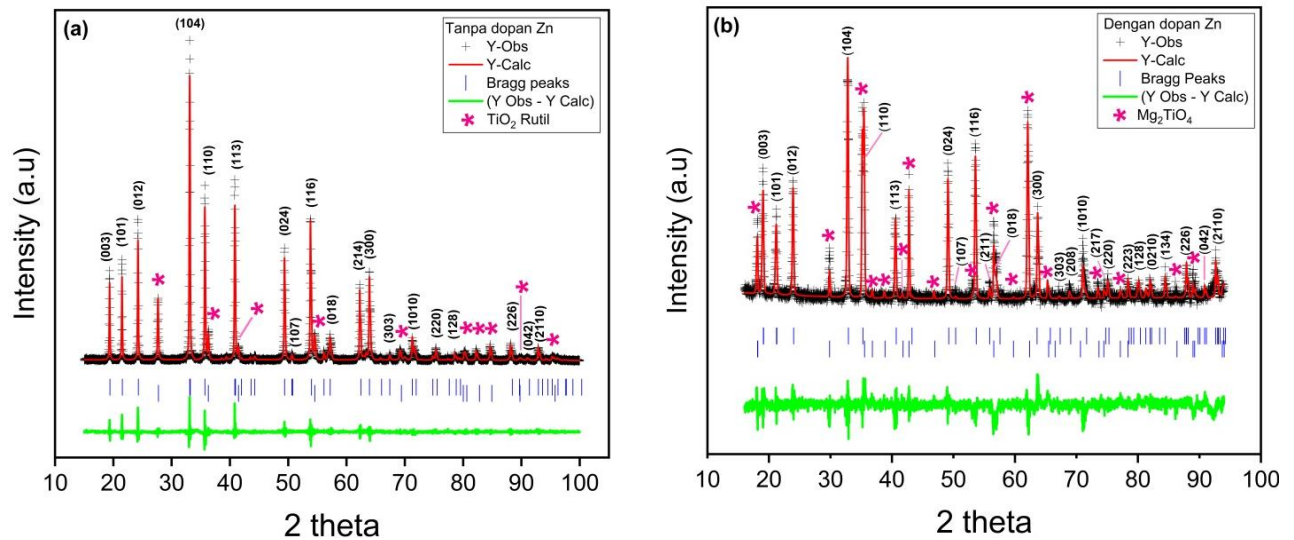
Sintesis serbuk MgTiO_3 (MZT0, tanpa dopan Zn), dan serbuk $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{TiO}_3$ (MZT02, dengan dopan Zn) menggunakan metode pencampuran larutan dari serbuk logam Mg, Ti, dan Zn (Sigma Aldrich) berdasarkan stoikiometri. Serbuk amorf MZT0 dikalsinasi pada 700 °C sedangkan MZT02 hanya 500 °C, masing-masing selama 5 jam menggunakan Furnace tipe BWS dengan langkah pemanasan 10 °C/menit. Keramik MZT0 dan MZT02 dikompaksi secara konvensional berbentuk silinder pejal berdiameter 8 mm. Sinter dilakukan pada suhu 1100 °C selama 4 jam menggunakan furnace yang sama. Karakteristik struktur dilakukan dengan uji XRD dengan alat *PanAnalytical X'Pert Pro*, radiasi Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) pada rentang sudut difraksi (2θ) = 15-95°, dan *step size detector* = 0,02 °/menit. Analisis kuantitatif (*refinement*) dilakukan menggunakan metode *Rietveld* dengan perangkat lunak *Rietica*. Konstanta dielektrik dan faktor Q diperoleh dari konversi data S-parameter melalui uji VNA (*Vector Network Analyzer*), menggunakan alat *Anritsu MS46322A VNA* pada frekuensi 4 GHz dengan menerapkan metode NRW (*Nicolson-Ross-Weir*).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola XRD keramik MZT0 dan MZT02 ditunjukkan oleh **Gambar 2**, sedangkan **Gambar 3** menyajikan hasil analisis kuantitatifnya. **Tabel 1** dan **Tabel 2** masing-masing merangkum parameter kesesuaian (*Figure-of-Merit*, FoM) dan output refinement **Gambar 3** tersebut. Sedangkan **Tabel 3** memberikan data konstanta dielektrik dan faktor kualitas Q untuk kedua sampel tersebut.



Gambar 2. Pola XRD MgTiO_3 dengan dan tanpa penambahan dopan Zn pada 1100 °C waktu tahan 4 jam. Puncak dengan $hkl = \text{MgTiO}_3$ (PDF No. 6-0494), a = TiO_2 (PDF No. 21-1276), b = Mg_2TiO_4 (PDF No. 25-1157).



Gambar 3. Pola XRD yang di-refinement dengan software Rietica sampel MgTiO_3 (a) tanpa dopan Zn, (b) dengan penambahan dopan Zn; puncak dengan hkl = MgTiO_3 geikielite (PDF No. 6-0494), "*" pada (a) = TiO_2 rutile (PDF No. 21-1276), "*" pada (b) = Mg_2TiO_4 qandilite (PDF No. 25-1157).

Tabel 1. Parameter kesesuaian dari hasil refine pada Gambar 2

MgTiO_3	R_p	R_{wp}	GoF	R_{exp}	R_B	MgTiO_3	TiO_2	Mg_2TiO_4
Tanpa dopan Zn	11,85	16,75	1,535	13,52	2,37	2,22	-	-
Dengan dopan Zn	12,40	18,70	3,671	8,65	8,04	-	-	5,99

Tabel 2. Output refinement dari kedua pola XRD pada Gambar 2

MgTiO_3	Fasa Ter-identifikasi	Space group	% Berat	% Molar	Sudut antar sumbu kristal ($^\circ$)		Parameter kisi ($\text{\AA}$)		Vol. sel satuan ($\text{\AA}^3$)
Tanpa dopan Zn (MZT0)	MgTiO_3	R-3	$88,00 \pm 0,79$	$84,55 \pm 0,75$	$\alpha = \beta$	90	$a=b$	5,055	$307,71 \pm 0,020$
					γ	120	c	13,903	
	TiO_2	P42/mnm	$11,20 \pm 0,17$	$15,45 \pm 0,24$	$\alpha = \beta = \gamma$	90	$a=b$	4,593	$62,449 \pm 0,010$
							c	2,959	
Dengan dopan Zn (MZT02)	MgTiO_3	R-3	$67,25 \pm 3,23$	$79,33 \pm 3,90$	$\alpha = \beta$	90	$a=b$	5,055	$307,81 \pm 0,042$
					γ	120	c	13,910	
	Mg_2TiO_4	Fd-3m	$32,75 \pm 1,86$	$20,67 \pm 1,19$	$\alpha = \beta = \gamma$	90	$a=b=c$	8,443	$601,80 \pm 0,094$

Tabel 3. Nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) dan Faktor Kualitas (Q)

MgTiO_3	Frekuensi (GHz)	Konstanta Dielektrik (ϵ_r)	Faktor Q
Tanpa dopan Zn (MZT0)	4	17,27	1135,16
Dengan dopan Zn (MZT02)	4	17,15	1123,67

Seperti terlihat pada **Gambar 2**, dapat diketahui bahwa keramik MZT0 menghasilkan MgTiO_3 sebagai fasa utama disertai adanya *minor phase* berupa TiO_2 *rutile* pada keramik tanpa dopan (puncak dengan simbol “a”), sedangkan pada MZT02 menghasilkan fasa utama $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})\text{TiO}_3$ atau dapat diindeks sebagai fasa MgTiO_3 (puncak-puncak dengan *hkl*). Sedangkan pada keramik dengan dopan terdeteksi fasa sekunder berupa Mg_2TiO_4 *qandilite* (puncak dengan simbol “b”). Simbol ‘+’ berwarna hitam pada **Gambar 3** menampilkan pola difraksi eksperimen (*observation*), sedangkan garis merah menggambarkan pola difraksi terhitung (*calculation*). Garis vertikal biru menandakan posisi puncak Bragg pada kedua fasa yang teridentifikasi. Adapun garis horizontal hijau merepresentasikan selisih antara intensitas puncak terukur dan terhitung. Selisih intensitas yang kecil pada garis hijau ini di beberapa posisi 2θ mengkonfirmasi keberhasilan proses *refinement* tersebut. Tanda bintang ungu sebagai penanda keberadaan fasa intermediet pada masing-masing keramik.

Pada **Gambar 3**, pola terhitung diperoleh dengan memasukkan data kristalografi seluruh fasa yang teridentifikasi pada **Gambar 2**, yakni data *Powder Diffraction File* (PDF) No. 6-0494 (MgTiO_3), No. 25-1157 (Mg_2TiO_4) dan No. 21-1276 (TiO_2), serta data dari *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) No. 65794 (MgTiO_3), No. 82912 (Mg_2TiO_4) dan No. 64987 (TiO_2). Untuk keramik MZT02, fasa sekunder Mg_2TiO_4 ditengarai terbentuk akibat reaksi antara TiO_2 dengan fasa amorf (yang tidak terdeteksi oleh XRD) yang diperkirakan mengandung magnesium sehingga persamaan reaksi yang terbentuk sebagai berikut $3\text{MgO} + 2\text{TiO}_2 \rightarrow \text{MgTiO}_3 + \text{Mg}_2\text{TiO}_4$. Oleh karena itu terbentuknya fasa sekunder Mg_2TiO_4 tersebut mengindikasikan bahwa dengan menambahkan dopan Zn pada *site* Mg dalam sistem MgTiO_3 dapat memicu pembentukan fasa baru yakni Mg_2TiO_4 . Kemunculan fase sekunder tersebut sejalan dengan Referensi [13] yang juga melaporkan munculnya fasa sekunder MgTi_2O_5 ketika $x = 0,07$ pada keramik $[(\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{TiO}_3]$ yang disinter pada rentang suhu 1225 - 1300 °C ditahan 3 jam. Temuan fase sekunder Mg_2TiO_4 pada penelitian ini dan MgTi_2O_5 pada Referensi [13] mengkonfirmasi bahwa penambahan dopan Zn memang dapat memicu pembentukan fasa sekunder.

Berdasarkan **Tabel 1**, nilai-nilai parameter kesesuaian pola XRD dari **Gambar 3** memperlihatkan bahwa nilai R_p , R_{wp} , dan $R_{exp} < 20\%$, $R_B < 10\%$, dan $\text{GoF} < 4\%$. Hal ini telah sesuai dengan kriteria keberhasilan suatu proses *refinement* menurut [12]. Dengan kata lain, hasil *refinement* telah memenuhi syarat (berhasil) sehingga data *output refinement* tersebut dapat digunakan untuk analisis selanjutnya.

Seperti terlihat pada **Tabel 2**, ternyata penambahan dopan Zn pada keramik MgTiO_3 mempengaruhi peningkatan parameter kisi milik fasa utama (MgTiO_3), yaitu dari $c = 13,903 \text{ \AA}$ (MZT0) menjadi lebih besar $c = 13,910 \text{ \AA}$ (MZT02). Temuan yang sama juga diperoleh pada vol. sel satuan dari fasa MgTiO_3 yang naik saat diberi dopan, yakni dari $307,71 \pm 0,020 \text{ \AA}^3$ (MZT0) menjadi $307,81 \pm 0,042 \text{ \AA}^3$ (MZT02). Peningkatan parameter kisi dan vol. sel satuan tersebut, disebabkan oleh ukuran jari-jari Zn ($0,074 \text{ nm}$) yang lebih besar dibandingkan dengan Mg ($0,072 \text{ nm}$). Faktor perbedaan jari-jari tersebut menyebabkan perubahan parameter kisi dan vol. sel satuan MZT02 menjadi relatif lebih besar dibandingkan dengan parameter kisi dan vol. sel satuan MZT0 akibat adanya perbesaran pada *site* kation Mg [15].

Dengan kata lain, membesarnya vol. sel satuan pada MZT02 tersebut menyebabkan terjadinya distorsi kisi sel satuan pada **Gambar 1**. Seperti diketahui, **Gambar 1** mengilustrasikan hamparan 3D dipol MgO_6 dan TiO_6 pada struktur kristal MgTiO_3 (MZT0). Sedangkan untuk struktur kristal MZT02, maka dipol MgO_6 tersebut berubah menjadi $(\text{Mg}/\text{Zn})\text{O}_6$ sehingga distorsi kisi yang terjadi pada sel satuan kristal MZT02 berupa membesarnya ukuran dipol-dipol $(\text{Mg}/\text{Zn})\text{O}_6$. Dipol-dipol tersebut juga mempunyai total berat atom yang lebih besar daripada total berat atom dipol MgO_6 karena Zn diketahui memiliki berat atom 65,39 yaitu hampir tiga kali lebih besar daripada berat atom Mg (24,31). Akibat membesarnya ukuran dan semakin beratnya dipol-dipol $(\text{Mg}/\text{Zn})\text{O}_6$ tersebut menyebabkan kecepatan osilasi dipol-dipol tersebut berkurang dibandingkan dengan kecepatan osilasi dipol MgO_6 . Terlebih, dengan diterapkannya medan listrik luar pada frekuensi 4 GHz (lihat **Tabel 3**) menyebabkan nilai konstanta dielektrik $\epsilon_{r-\text{MZT02}}$ lebih kecil daripada $\epsilon_{r-\text{MZT0}}$ karena nilai ϵ_r sebanding dengan polarisasi dipol. Nilai ϵ_r juga menyatakan kemampuan material dielektrik untuk menyimpan energi gelombang mikro yang masuk pada material tersebut. Sedangkan besaran faktor kualitas (Q) sebanding dengan ϵ_r . Analisis ini mengkonfirmasi data ϵ_r dan faktor Q pada **Tabel 3**.

Pada **Tabel 3**, dapat diketahui bahwasannya pada frekuensi 4 GHz sampel MgTiO₃ tanpa penambahan dopan memiliki nilai ϵ_r sebesar 17,27 dan faktor Q senilai 1135,16, sedangkan dengan penambahan dopan Zn memiliki nilai ϵ_r 17,15 dan faktor Q 1123,67. Penjelasan detail tentang data **Tabel 3** telah diberikan pada paragraf di atas. Zat dopan bertindak sebagai aditif dalam kisi kristal yang dapat mengganggu, menghamburkan, atau memodifikasi getaran fonon intrinsik, seperti dilaporkan oleh [16] untuk kasus doping Mn dan Co pada ZnO. Fonon sendiri menyatakan perambatan energi kuantum yang merepresentasikan getaran atom-atom pada kisi kristal. Fonon berperan sebagai pembawa energi gelombang elastis pada material sehingga sangat penting dalam menentukan sifat termal material. Interaksi antara gelombang elektromagnetik (gelombang mikro) dan kisi yang terdistorsi tersebut menyebabkan disipasi energi lebih mudah terbuang sebagai energi termal (panas) dibanding disimpan sebagai energi medan listrik. Energi disipasi yang terbuang akan menurunkan ϵ_r pada keramik MZT02, mengingat seperti dijelaskan di atas, nilai ϵ_r menyatakan kemampuan material dielektrik untuk menyimpan energi gelombang mikro. Berdasarkan data nilai ϵ_r -MZT02 yang lebih kecil daripada ϵ_r -MZT0 (**Tabel 3**) maka keramik MZT0 relatif lebih baik jika diaplikasikan sebagai resonator DRO daripada keramik MZT02. Keberadaan zat dopan seringkali menyebabkan distorsi kisi seperti yang dibuktikan pada penelitian ini. Sejauh yang Penulis ketahui, publikasi yang melaporkan pengaruh dopan Zn terhadap distorsi kisi pada keramik MZT02 masih sulit ditemukan sehingga hal ini menjadi kebaruan dari penelitian ini.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Pekerjaan fabrikasi keramik MgTiO₃ dengan dan tanpa penambahan dopan Zn yang disinter pada suhu 1100 °C telah dilakukan. Hasil menunjukkan bahwa kedua keramik mengandung fasa utama yang sama yakni MgTiO₃ namun berbeda fasa sekundernya yakni TiO₂ rutil (pada MZT0) dan Mg₂TiO₄ (pada MZT02). Penambahan dopan Zn telah memicu terjadinya reaksi antara fasa intermediet TiO₂ dengan fasa amorf mengandung Mg sehingga menjadi fasa Mg₂TiO₄. Serta parameter kisi dan vol. sel satuan yang relatif meningkat disebabkan oleh adanya perbedaan jari-jari antara ion Mg dan Zn. Distorsi kisi tersebut juga menyebabkan menurunnya nilai konstanta dielektrik (ϵ_r) dan faktor Q pada keramik MZT02.

B. Saran

Perlu dilakukannya fabrikasi keramik MgTiO₃ dengan penambahan dopan Zn yang menggunakan lebih banyak variasi suhu sinter guna memperoleh hasil yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Fu, C. Chen, Y. She, Z. Yang, and C. Li, "A/B Site Modified MgTiO₃ Dielectric Ceramics for Microwave Application," *Integr. Ferroelectr.*, vol. 230, no. 1, pp. 78–84, Nov. 2022, doi: 10.1080/10584587.2022.2102800.
- [2] T. Shi *et al.*, "Fabrication, sinterability and microwave dielectric properties of MgTiO₃-(Ca_{0.8} Sr_{0.2})TiO₃ composite ceramics from nanosized powders," *Vacuum*, vol. 201, p. 111107, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111107>.
- [3] A. Y. Hercuadi, Y. Sulaeman, and P. Adhi, "Dielectric resonance oscillator (DRO) 9.6 GHz for RADAR application," in *Proceedings of the 2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation, APCAP 2015*, 2016, pp. 549–551. doi: 10.1109/APCAP.2015.7374483.
- [4] Mursal, Azmi, N., & Ismail, I. (2021). Pengaruh Penambahan CO-Doping Mg/La terhadap Karakterisasi TiO₂ sebagai Fotoelektroda. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 9(1), 79–86. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v9i1.2633>.
- [5] Ermawati, Frida U. (2019). Struktur Kristal Bahan Keramik. *Unesa University Press*. ISBN: 978-602-449-375-2.
- [6] Kuganathan, N., Iyngaran, P., Vovk, R., & Chroneos, A. (2019). Defects, dopants and Mg diffusion in MgTiO₃. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40878-y>.
- [7] Ermawati, Frida U., Taryana, Y., Sulaeman, Y., Wijayanto, Y. N., Sudrajat, N., & Adi, W. A. (2023). Fabrication and characterization of (Mg_{0.8}Zn_{0.2})(Ti_{0.99}Sn_{0.01})O₃ ceramics as a 4.0 GHz resonator in

- dielectric resonator oscillator module. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(20), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10890-0>.
- [8] Z. Gong, Z. Wang, L. Wang, Z. Fu, W. Han, and Q. Zhang, “Microwave dielectric properties of high-Q Mg(Sn_xTi_{1-x})O₃ ceramics,” *Electron. Mater. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 331–335, 2013, doi: 10.1007/s13391-0132214-3.
- [9] Angela, R. dan Pratapa, S. (2012) “Sintesis MgTiO₃ dengan Variasi Temperatur Kalsinasi menggunakan Metode Pencampuran Larutan,” *Jurnal Sains Dan Seni Its*, 1(1), hal. 73–75.
- [10] Ermawati, F. U., & Suasmoro, S. (2018). Dilatometric shrinkage study on magnesium titanate-based ceramic systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 997(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/997/1/012005>.
- [11] Voshage, M., Megahed, S., Schückler, P. G., Wen, P., Qin, Y., Jauer, L., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. H. (2022). Additive manufacturing of biodegradable Zn-xMg alloys: Effect of Mg content on manufacturability, microstructure and mechanical properties. *Materials Today Communications*, 32(January). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103805>.
- [12] M. D. Z. Abror dan F. U. Ermawati, “Analisis Rietveld Pola XRD Serbuk Mg(Ti_{0,98}Sn_{0,02})O₃ Hasil Sintesis dengan Metode Pencampuran Larutan,” *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 12, no. 3, pp. 26–34, 2023.
- [13] P. Gogoi, L. R. Singh, dan D. Pamu, “Characterization of Zn Doped MgTiO₃ Ceramics: an Approach for RF Capacitor Applications,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 16, pp. 11712–11721, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-69 V. V. Kulyk *et al.*, “The effect of Sintering Modes on The crystal Lattice
- [14] V. V Kulyk, Z. A. Duriagina, B. D. Vasylyv, P. Y. Lyutyy, and P. Klimczyk, “The effect of sintering modes on the crystal lattice Parameters and The morphology of the ZrO₂-nY₂O₃ (n = 3–8 mol%) Ceramic Microstructure Components,” *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 128, no. 1, pp. 5–22, Jul. 2024, doi: 10.5604/01.3001.0054.8015.75-6.
- [15] Chen, Yuan-Bin & Tseng, Zong-Liang & Chen, Lung-Chien & Lin, Chien-Chi & Miao, Hsin-Yuan & Liu, Jih-Hsin & Lin, Shih-Hung. (2018). Crystal Structure and Microwave Dielectric Properties of [(Mg_{0.6}Zn_{0.4})_{0.95}Co_{0.05}]₂TiO₄-modified Ca_{0.6}La_{0.8}/3TiO₃ cordierite ceramics with a near-zero temperature coefficient. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 29. 10.1007/s10854-018-9137-6.
- [16] C. Lin *et al.*, “Effect of dopant-induced local vibration modes on pressure-driven structural phase transition in Mn and Co-doped ZnO,” *ISCIENCE*, vol. 28, no. 6, p. 112560, 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.112560.