

POTENSI KERAMIK $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,95}\text{Cr}_{0,05})\text{O}_3$ SEBAGAI KANDIDAT MATERIAL DIELEKTRIK RESONATOR DRO PADA FREKUENSI 3,3 GHz

¹⁾Anisa D. Akmalia, ²⁾Frida U. Ermawati^{*}, ³⁾Yana Taryana, ⁴⁾Yaya Sulaiman, ⁵⁾ Bagus E. Sukoco, ⁶⁾Nanang Sudrajat

^{1),2)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

^{3), 4), 5)} Pusat Penelitian Telekomunikasi, BRIN Bandung, Indonesia

⁶⁾ Pusat Penelitian Material Maju, BRIN Serpong, Indonesia

^{*}The Corresponding Author, Email: frida.ermawati@unesa.ac.id

Abstrak

Keramik MgTiO_3 merupakan material dengan sifat dielektrik yang baik sehingga berpotensi sebagai material *dielektrik resonator* (DR) yang diaplikasikan pada sistem telekomunikasi gelombang mikro. Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan potensi keramik dengan komposisi baru, yaitu $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,95}\text{Cr}_{0,05})\text{O}_3$ (selanjutnya disingkat MTC005) sebagai kandidat material DR pada frekuensi 3,3 GHz. Tujuan dari makalah ini adalah untuk menganalisis karakteristik DRO keramik pada gelombang mikro berupa frekuensi resonansi dan *output power* (diukur menggunakan *Spectrum Analyzer*) dan menghubungkannya dengan data struktur, mikrostruktur, densitas *bulk*, dan permitivitas relatif (ϵ_r). Keramik dikompaksi menggunakan *die-press* berdiameter 8 mm dan *hydraulic-hand-press* pada tekanan 10 MPa sebelum disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam. Data struktur keramik diperoleh dari pola XRD Cu-K α menunjukkan bahwa keramik MTC005 mengandung fasa utama MgTiO_3 (89,34 % molar) dan sisanya adalah fasa TiO_2 *rutile*. Kerapatan dan kepadatan butir pada permukaan keramik ini dikonfirmasi oleh nilai densitas *bulk* sebesar 3,63 gr.cm⁻³. Selain itu, hasil uji EDX menunjukkan bahwa keramik ini mengandung bahan-bahan penyusun saja, yaitu Mg, Ti, Cr, dan O dengan rasio %atom Mg : (Ti+Cr) : O $\approx$ 19,693 : 20,665 : 63,651 mendekati rasio stoikiometri idealnya, yaitu 1 : 1 : 3. Sedangkan nilai rata-rata ϵ_r keramik MTC005 yang diukur secara kontinu pada frekuensi 2-4 GHz = 17,5. Peristiwa resonansi DRO terekam pada frekuensi 3,367 GHz dengan *output power* +4,52 dBm. Dengan demikian, berdasarkan semua data di atas dapat disimpulkan bahwa keramik MTC005 sangat potensial sebagai kandidat material resonator DRO pada S-band, khususnya pada frekuensi 3,3 GHz.

Kata Kunci: keramik MTC005; dielektrik resonator; DRO; frekuensi resonansi; output power

Abstract

MgTiO_3 ceramic is a material with good dielectric properties so it has potential as a dielectric resonator (DR) material applied in microwave telecommunications systems. In this regard, this paper reports the potential of ceramics with a new composition, namely $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,95}\text{Cr}_{0,05})\text{O}_3$ (hereinafter abbreviated as MTC005) as a candidate DR material at a frequency of 3.3 GHz. The aim of this paper is to analyze the characteristics of ceramic DRO at microwaves in the form of resonance frequency and output power (measured using a Spectrum Analyzer) and relate them to data on structure, microstructure, bulk density and relative permittivity (ϵ_r). The ceramics were compacted using a die-press with a diameter of 8 mm and a hydraulic-hand-press at a pressure of 10 MPa before being sintered at a temperature of 1300 °C for 3 hours. Ceramic structure data obtained from the Cu-K α XRD pattern shows that the MTC005 ceramic contains the main phase MgTiO_3 (89.34% molar) and the remainder is the *rutile* TiO_2 phase. The density and grain density on the ceramic surface is confirmed by the bulk density value of 3.63 gr.cm⁻³. Apart from that, the EDX test results show that this ceramic contains only the constituent ingredients, namely Mg, Ti, Cr, and O with a atomic % ratio of Mg : (Ti+Cr) : O $\approx$ 19.693 : 20.665 : 63.651 close to the ideal stoichiometric ratio, namely 1 : 1 : 3. Meanwhile, the average value of ϵ_r for MTC005 ceramics measured continuously at a frequency of 2-4 GHz = 17.5. The DRO resonance event was recorded at a frequency of 3.367 GHz with an output power of +4.52 dBm.

Thus, based on all the data above, it can be concluded that MTC005 ceramic has great potential as a candidate material for DRO resonators in the S-band, especially at a frequency of 3.3 GHz..

Keywords: MTC005 ceramic; dielectric resonator; DRO; resonant frequency; output power

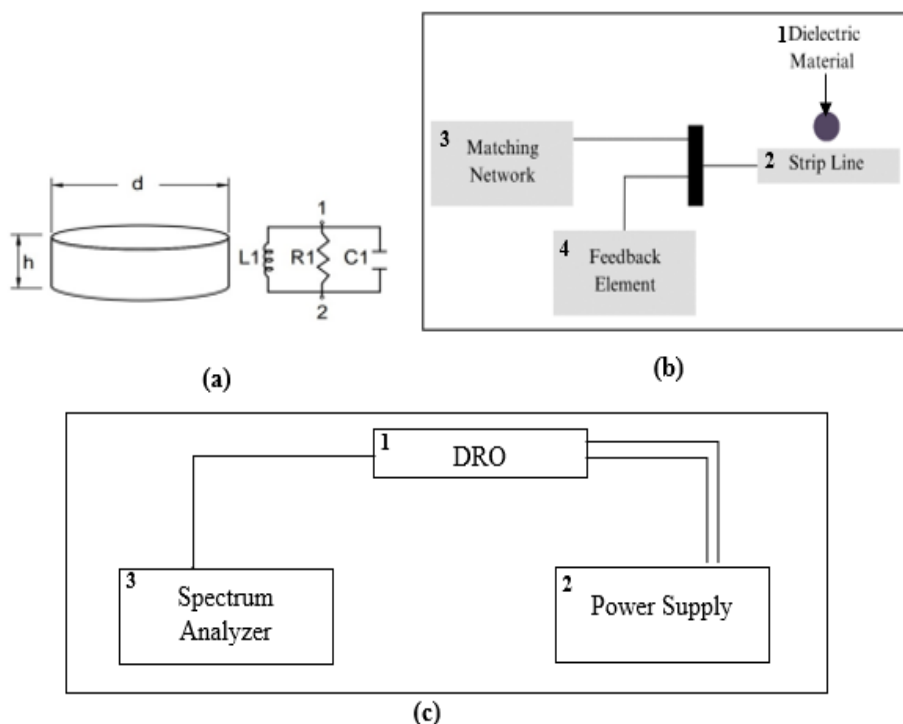
I. PENDAHULUAN

Magnesium titanate ($MgTiO_3$) merupakan salah satu material dengan sifat dielektrik yang baik, salah satunya yaitu memiliki nilai permitivitas relatif sedang ($\epsilon_r \sim 17$) [1]–[3]. Sifat dielektrik yang baik tersebut menjadikan $MgTiO_3$ berpotensi untuk diaplikasikan berbagai sistem komunikasi yang bekerja di frekuensi gelombang mikro seperti antenna, filter, dan sebagai material *Dielectric Resonator Oscillator* (DRO) pada sistem radar [4], [5]. DRO sendiri merupakan salah satu jenis tipe osilator yang prinsip kerjanya menggunakan bantuan material dielektrik keramik sebagai resonator yang berfungsi menghasilkan sinyal dengan stabilitas yang baik pada gelombang mikro[6].

Saat diaplikasikan pada gelombang mikro, DRO dapat dikelompokkan menjadi dua mode yaitu mode *Transverse Magnetic* (TM) dan *Transverse Electric* (TE). Mode TM adalah mode gelombang magnetik dengan medan listrik tegak lurus terhadap medan magnet yang sejajar dengan permukaan penghantar atau dinding pandu gelombang. Sedangkan, mode TE sendiri merupakan mode gelombang elektrik dengan medan listrik tegak lurus dan menjalar terhadap arah rambat gelombang yang bergantung pada gelombang listrik transversal. Terdapat mode $TE_{0,1\delta}$ yang sering diaplikasikan untuk pandu gelombang persegi dan memiliki mode frekuensi resonansi rendah [7], [8]. Frekuensi resonansi (f_0) dirumuskan dengan Persamaan (1) [9]

$$f_0(GHz) = \frac{8,553}{\sqrt{\epsilon_r \left(\frac{\pi}{4} d^2 h\right)^{\frac{1}{3}}}} \quad (1)$$

dimana d = diameter resonator, h = tebal resonator dan ϵ_r = konstanta dielektrik resonator. Seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 1**, skema dimensi material DR dengan ketebalan h dan diameter d disertai rangkaian ekuivalensi.



Gambar 1 (a) Material DR silinder diaplikasikan sebagai mode DRO dengan d = diameter dan h = ketebalan dan rangkaian RLC, (b) rangkaian DRO yang dinyatakan dalam diagram blok, dan (c) rangkaian pengukuran frekuensi resonansi DRO [10]

Seperti yang terlihat pada **Gambar 1.a**, material DR dapat berupa material dielektrik yang berbentuk silinder atau berupa rangkaian RLC. Sedangkan, pada **Gambar 1.b**, menunjukkan rangkaian DRO dengan empat komponen, yaitu : 1) *dielectric material* berfungsi sebagai resonator, 2) *strip line* adalah sebuah tembaga

yang digunakan sebagai pandu gelombang yang berfungsi untuk saluran transmisi gelombang elektromagnet penghasil frekuensi resonansi, 3) *matching network* adalah rangkaian impedansi yang berfungsi memastikan kestabilan antara impedansi input dan output sehingga terjadi perpindahan daya maksimal, 4) *feedback element* merupakan rangkaian umpan balik sebagai elemen yang memastikan kestabilan perangkat aktif dalam keadaan kurang dari satu sehingga perangkat bekerja dengan stabil. Pada **Gambar 1.c**, rangkaian pengukuran frekuensi resonansi DRO terdiri dari tiga bagian : 1) rangkaian DRO, 2) *power supply* digunakan sebagai pemberi tegangan pada rangkaian DRO, dan 3) *Spektrum Analyzer* digunakan sebagai pencatat sinyal frekuensi resonansi keluaran dari DRO, selain itu juga sebagai alat untuk mengukur nilai parameter seperti *bandwidth*, *output power* dan *phase noise*[9].

Material DR umumnya diperoleh dari proses fabrikasi keramik. Terdapat beberapa peneliti yang telah melaporkan fabrikasi keramik berbasis $MgTiO_3$, diantaranya oleh Referensi [4], [9], [11]–[16]. Baru-baru ini, Referensi [4] melaporkan fabrikasi keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$ yang disinter pada suhu 1100 °C dengan variasi waktu tahan sinter 4, 6, 8, dan 10 jam. Sebagai material dielektrik, keramik tersebut menghasilkan fasa utama $MgTiO_3$ dengan nilai ϵ_r sebesar 17,36 – 17,48. Selain itu, keramik MZTS tersebut juga menghasilkan nilai frekuensi resonansi sebesar 4,03 – 4,11 GHz dan *output power* sebesar -6,61 sampai -7,29 dBm sehingga bekerja pada daerah kerja frekuensi C-band. Selanjutnya, Referensi [9] memfabrikasi keramik $(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3 + 2wt.\% Bi_2O_3$ dengan variasi suhu sinter yaitu 1000 °C, 1100 °C, dan 1200 °C ditahan selama 4 jam teridentifikasi fasa utama $MgTiO_3$ dan sisanya fasa intermediet $MgTi_2O_5$. Referensi [9] juga menyampaikan nilai frekuensi resonansi dari keramiknya yang terletak pada frekuensi 5,08 – 5,12 GHz dan *output power* -1,39 sampai -2,77 sehingga berpotensi bekerja pada daerah kerja frekuensi C-band. Sedangkan, Referensi [13] juga melakukan fabrikasi keramik berbasis $MgTiO_3$ menggunakan ion Zn sebanyak 0,4 sebagai dopan ion *host* Mg yang disinter pada suhu 1300 °C dengan variasi waktu tahan sinter yaitu 6, 8, dan 10 jam. Keramik MZT04 tersebut teridentifikasi fasa utama $MgTiO_3$ disertai dengan fasa TiO_2 *rutile* dan MgO , serta menghasilkan nilai frekuensi resonansi sebesar 5,20 – 5,22 GHz dan nilai *output power* -14,47 sampai -19,70 dBm.

Adapun Referensi [12] yang memfabrikasi keramik $(Mg_{0,5}Zn_{0,5})TiO_3$ disinter pada suhu 1300 °C dengan waktu tahan sinter 6, 8, dan 10 jam, menghasilkan fasa utama $MgTiO_3$ dan fasa intermediet $MgTi_2O_5$. Keramik MZT05 tersebut menghasilkan nilai frekuensi resonansi 5,07 – 5,08 GHz dan *output power* -2,01 sampai -2,41 dBm. Referensi [11] juga menyampaikan proses fabrikasi keramik berbasis $(MgTiO_3Zn_{0,2})TiO_3 + 3wt.\% Bi_2O_3$ sebagai material dielektrik. Keramik tersebut disinter pada suhu 1100 °C dengan variasi waktu tahan sinter 4, 6, dan 8 jam, menghasilkan fasa utama $MgTiO_3$ disertai dengan fasa intermediet $MgTi_2O_5$ dan TiO_2 *rutile* dengan nilai frekuensi resonansi yang stabil pada 5,12 GHz dan *output power* (-1,20; -1,42; dan -2,61 dBm). Sedangkan, Referensi [14]–[16] hanya melaporkan sebatas sifat-sifat dielektrik keramik saja, yaitu permitivitas relatif dan faktor kualitas. Berdasarkan beberapa referensi di atas, dapat diimpuliskan bahwa hasil fabrikasi semua keramik tersebut berpotensi sebagai kandidat material resonator dalam modul DRO.

Berdasarkan hasil penelusuran dan uraian di atas, sejauh ini masih belum ditemukan publikasi yang melaporkan fabrikasi keramik yang menggunakan ion Cr sebagai dopan dalam sistem $MgTiO_3$ sebagai kandidat material DR pada modul DRO. Untuk itu, melalui makalah ini Penulis melaporkan hasil fabrikasi keramik $Mg(Ti_{0,95}Cr_{0,05})TiO_3$ yang disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam dan mengujinya sebagai kandidat material DR dalam modul DRO pada daerah gelombang mikro, serta menganalisisnya berdasarkan data struktur, mikrostruktur, densitas *bulk*, permitivitas relatif.

II. METODE

A. Material

Bahan awal yang digunakan untuk proses sintesis serbuk $Mg(Ti_{0,95}Cr_{0,05})O_3$ (disingkat MTC005) adalah serbuk logam Mg, Ti, dan Cr (*Merck*) serta larutan HCl 12M (37%). Proses tersebut menggunakan metode pencampuran larutan antara larutan $MgCl_2$, $TiCl_4$, dan $CrCl_4$. Serbuk hasil sintesis (*amorf*) tersebut dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 4 jam hingga menghasilkan serbuk kristalin. Selanjutnya, proses fabrikasi keramik menggunakan metode konvensional yaitu mengompaksi serbuk kristalin MTC005 menggunakan *hydraulic-hand-press* dan *diepress* dengan diameter 8 mm dan tekanan 10 MPa hingga menghasilkan serbuk padatan berupa pelet. Kemudian, pelet disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam menggunakan furnace (*Nabertherm*) dengan langkah pemanasan 10 °C/menit hingga menjadi keramik MTC005.

B. Karakterisasi

Struktur Keramik MTC005 diuji menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) tipe *PanAnalytical, Type X'pert Pro* dengan radiasi Cu-K α pada rentang sudut difraksi 15-70° dan ukuran step detector 0,02°/min. Selanjutnya, hasil XRD dianalisis secara kualitatif menggunakan metode *search and match* dan secara

kuantitatif menggunakan metode *refinement Rietveld*. Mikrostruktur keramik diuji dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) menggunakan *Thermo Scientific Phenom* dengan perbesaran 10.000 kali. Uji densitas *bulk* dilakukan dengan *Density kit* ME-DNY-43 dan *Balance Mettler Toledo* ME 403 E yang dihubungkan dengan *software Hyperterminal* dengan prinsip hukum Archimedes. Uji permitivitas relatif (ϵ_r) diperoleh dari konversi data S-parameter. Data S-parameter tersebut diukur dengan *Vector Network Analyzer* (VNA) tipe *Anritsu MS46322A*. Karakteristik DRO berupa frekuensi resonansi dan *output power* diukur menggunakan *Spectrum Analyzer* tipe *N9020A MXA*.

C. Variabel Operasional Penelitian

Variabel kontrol dalam penelitian ini berupa bahan awal keramik MTC005, yaitu serbuk logam Mg, Ti, dan Cr dengan kemurnian tinggi, produksi dari Merck®, suhu kalsinasi (800 °C, 4 jam), suhu sinter (1300 °C, 3 jam). Variabel manipulasi adalah serangkaian uji yang dilakukan terhadap keramik MTC005, berupa uji XRD, SEM-EDX, densitas *bulk*, permitivitas relatif, dan karakteristik DRO. Sebagai variabel respon adalah hasil dari seluruh uji karakterisasi yang telah dilakukan tersebut.

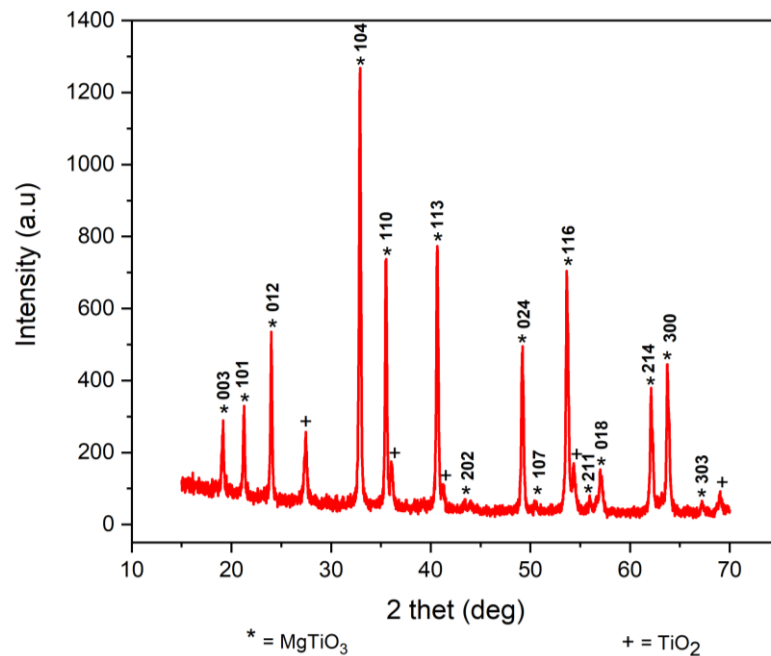
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil dan Pembahasan

Analisis Struktur Keramik MTC005

Pola hasil uji XRD dianalisis secara kualitatif menggunakan program *Match!* untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang terkandung pada keramik. Analisis identifikasi fasa dilakukan dengan mencocokkan puncak-puncak difraksi yang sesuai berdasarkan *database Powder Diffraction File* (PDF) milik masing-masing fasa.

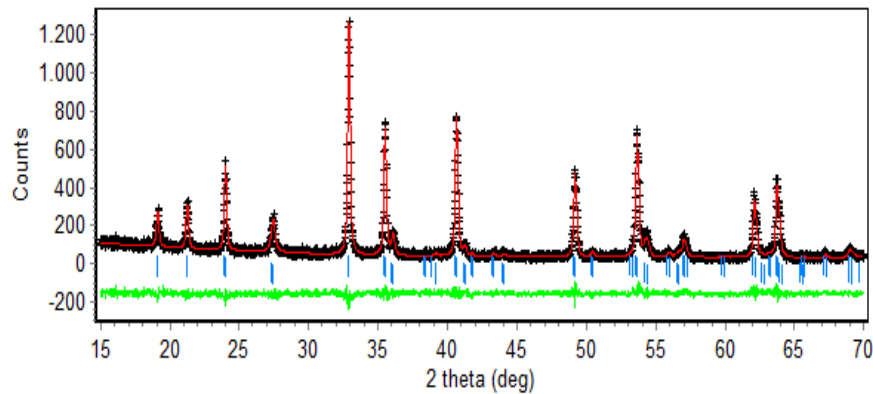
Gambar 2 menunjukkan pola XRD dari keramik MTC005 yang disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam.



Gambar 2. Pola XRD keramik MTC005 disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam. Simbol * = $MgTiO_3$ dan + = TiO_2 rutile

Berdasarkan **Gambar 2**, keramik MTC005 yang disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam mengandung fasa utama $MgTiO_3$ (PDF No. 06-0494) disertai fasa impuritas TiO_2 rutile (PDF No. 21-1276) tanpa fasa intermediet ($MgTi_2O_5$ atau Mg_2TiO_4). Hasil serupa juga dilaporkan oleh Referensi [13], yaitu memfabrikasi keramik MZT04 disinter pada suhu 1300 °C dengan variasi waktu tahan sinter 6, 8, dan 10 jam juga mengandung fasa utama $MgTiO_3$ disertai fasa TiO_2 rutile dan MgO periclase tanpa disertai fasa intermediet.

Selanjutnya, pola XRD tersebut dianalisis secara kuantitatif menggunakan *software Rietica* dengan metode *refinement Rietveld*. **Gambar 3** menunjukkan hasil *refinement* pola XRD keramik MTC005 pada **Gambar 2**. **Tabel 1** mendata *output refinement* tersebut berupa komposisi fasa, %molar, parameter kisi, dan volume sel satuan.



Gambar 3. Hasil *refinement* dari pola XRD keramik MTC005 pada **Gambar 2** dengan metode *Rietveld* dan software *Rietica*

Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 3**, simbol (+) hitam merupakan pola terukur, garis merah menunjukkan pola terhitung. Garis merah tersebut diperoleh dengan cara mengumpulkan data-data kristalografi dari semua fasa yang teridentifikasi pada **Gambar 2**, yaitu fasa MgTiO_3 dan TiO_2 rutile pada software *Rietica*. Data-data kristalografi tersebut diperoleh dari *database Powder Diffraction File* (PDF) No. 06-0494 untuk fasa MgTiO_3 dan No. 21-1276 untuk fasa TiO_2 , serta dari basis data *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) No. 657954 untuk fasa MgTiO_3 dan No. 64987 untuk fasa TiO_2 . Garis vertikal berwarna biru menunjukkan posisi puncak-puncak Bragg milik semua fasa yang teridentifikasi. Garis hijau menyatakan selisih tinggi intensitas antara puncak pola terukur dan puncak pola terhitung, berupa garis horizontal dengan hanya mengandung selisih tinggi puncak (*less peaks*) pada beberapa posisi 2θ saja.

Tabel 1. Output *refinement Rietveld* pola XRD dan densitas *bulk* keramik MTC005 yang disinter pada suhu 1300 °C selama 3 jam.

Sampel	<i>FoM</i>	Fasa	% Molar	Parameter kisi (Å)		Volume sel satuan (Å³)	Densitas <i>Bulk</i> (gr.cm ⁻³)
MTC005	<i>R_p</i>	10,53	89,34 ± 1,52	a=b	5,052	307,12 ± 0,04	3,63
	<i>R_{wp}</i>	13,49		c	13,89		
	<i>R_{exp}</i>	10,80					
	<i>χ²</i>	1,559	10,66 ± 0,26	a=b	4,59	62,4 ± 0,02	
	<i>R_B</i> (MgTiO ₃)	5,86		c	2,95		
	<i>R_B</i> (TiO ₂)	5,87					

Pada **Tabel 1**, output dari hasil *refinement* berupa nilai parameter-parameter kesesuaian (FoM): nilai R_p , R_{wp} , dan $R_{exp} < 15\%$; Sedangkan nilai $R_B < 6\%$, dan nilai $\chi^2 < 2\%$. Referensi [17]–[19] mengemukakan bahwa hasil *refinement* dinyatakan berhasil (*acceptable*) apabila memenuhi nilai-nilai parameter kesesuaian yang telah ditentukan, seperti faktor profil (R_p), *expected R-factor* (R_{exp}) dan faktor profil berbobot (R_{wp}) $< 20\%$, faktor bragg (R_B) $< 10\%$, dan nilai indeks *chi squared* (χ^2) $< 4\%$. Dengan demikian, output dari hasil *refinement Rietveld* pada **Tabel 1** tersebut dinyatakan berhasil dan nilai-nilai kesesuaian tersebut dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

Tabel 1 juga menyajikan data %molar fasa utama MgTiO_3 , sebesar $89,34 \pm 1,52\%$, dan sisanya milik fasa TiO_2 , sebesar $10,66 \pm 0,26\%$. Besarnya %molar fasa utama MgTiO_3 tersebut mengindikasikan bahwa pada keramik yang berbasis MgTiO_3 dengan suhu sinter 1300 °C telah mampu menghasilkan fasa MgTiO_3 mendekati tunggal [20]. Sedangkan, Referensi [13] melaporkan data %molar fasa MgTiO_3 pada keramik MZT04 dengan waktu tahan sinter 6 dan 10 jam sebesar 87,02 dan 87,40%, namun pada waktu tahan sinter 8 jam adalah sebesar 90,55 %. Dengan demikian, jika dibandingkan antara data %molar keramik MTC005 dengan keramik yang dilaporkan oleh Referensi [13] pada waktu tahan sinter 6 dan 10 jam, keramik pada penelitian ini menghasilkan % molar fasa MgTiO_3 yang lebih baik, namun apabila dibandingkan dengan keramik pada waktu tahan sinter 8 jam menghasilkan nilai yang bersesuaian, hal ini dimungkinkan terjadi karena waktu tahan sinter yang berbeda.

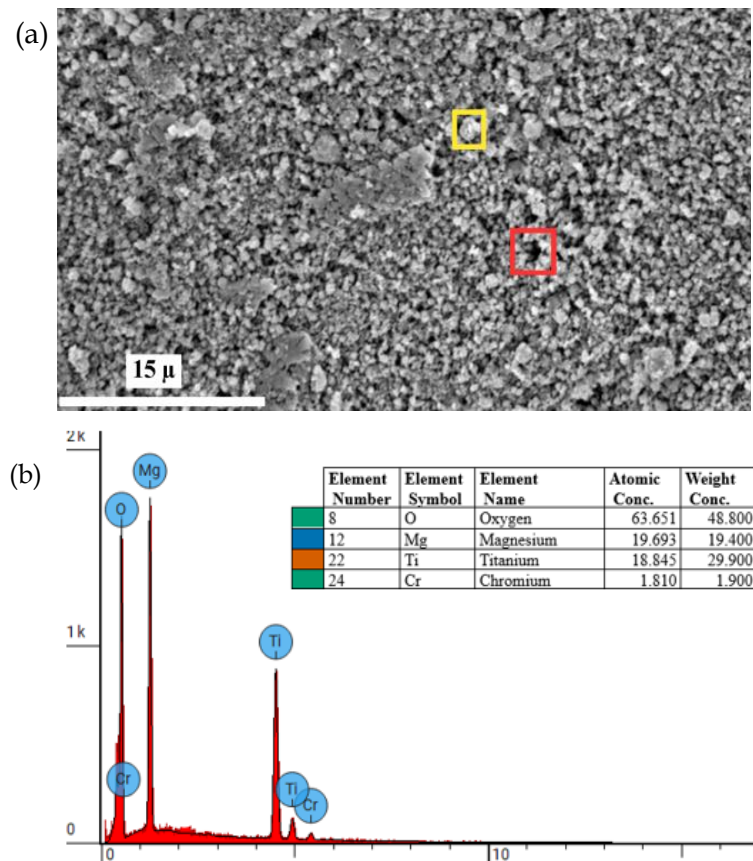
Nilai parameter kisi dan volume sel satuan MgTiO_3 yang dihasilkan oleh keramik MTC005 ternyata juga mendekati nilai pada *database* fasa MgTiO_3 pada PDF No, 06-494, yaitu untuk parameter kisi $a=b = 5,054$

$\text{\AA}$ dan $c = 13,899\text{\AA}$ serta volume sel satuan adalah sebesar $307,40\text{\AA}$. Referensi [9] melaporkan nilai parameter kisi dan volume sel satuan fasa $MgTiO_3$ pada keramik MZT01+2wt% Bi_2O_3 pada suhu sinter 1000, 1100, dan $1200\text{ }^\circ\text{C}$ adalah sebesar $a=b = 4,984\text{--}4,990\text{\AA}$ dan $c = 13,700\text{--}13,710\text{\AA}$, serta volume sel satuannya sebesar $294,7\text{--}295,5\text{\AA}$. Dengan demikian, nilai parameter kisi dan volume sel satuan $MgTiO_3$ yang diperoleh pada penelitian ini lebih besar daripada nilai yang dilaporkan oleh Referensi [9], hal ini dimungkinkan karena ion doping dan suhu yang digunakan berbeda.

Analisis Mikrostruktur Keramik MTC005

Analisis mikrostruktur pada keramik MTC005 berupa karakterisasi SEM-EDX dan densitas *bulk*.

Gambar 4a menunjukkan hasil citra SEM keramik MTC005 dengan perbesaran 10.000 kali, sedangkan **Gambar 4b** memberikan hasil uji EDX.



Gambar 4. Hasil uji SEM-EDX: (a) mikrostruktur dari permukaan keramik dan (b) analisis EDX yang menunjukkan semua unsur yang terkandung pada keramik MTC005

Pada **Gambar 4a** terlihat mikrostruktur permukaan keramik MTC005 yang terdiri dari butiran (putih dalam kotak kuning) dan pori-pori (hitam dalam kotak merah); mikrostruktur tersebut mempunyai densitas *bulk* sebesar $3,63\text{ gr.cm}^{-3}$ (disajikan pada **Tabel 1**). Referensi [12] melaporkan hasil uji SEM disertai dengan pengukuran densitas *bulk* pada keramik MZT05 yang disinter pada suhu $1300\text{ }^\circ\text{C}$ pada waktu tahan sinter 6, 8, dan 10 jam adalah sebesar $2,75\text{--}2,99\text{ gr.cm}^{-3}$. Semakin lama waktu tahan sinter pada keramik MZT05 (dengan ion dopan Zn) berpengaruh positif terhadap meningkatnya nilai densitas *bulk*. Referensi [11] melaporkan bahwa penggunaan ion dopan Zn yang disertai dengan penambahan 4wt% Bi_2O_3 pada keramik MZT02 juga berpengaruh positif terhadap nilai densitas *bulk*. Dengan membandingkan data densitas keramik MTC005 yang diperoleh pada penelitian ini dengan data yang sama milik keramik MZT05 dan MZT02 tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa keramik MTC005 lebih rapat dan padat.

Seperti terlihat pada **Gambar 4b**, data EDX keramik MTC005 terkonfirmasi hanya mengandung unsur-unsur bahan awal saja, yaitu Mg, Ti, Cr dan O masing-masing dengan rasio % atom $Mg : (Ti + Cr) : O$, seperti ditunjukkan pada Pers (1) dan (2),

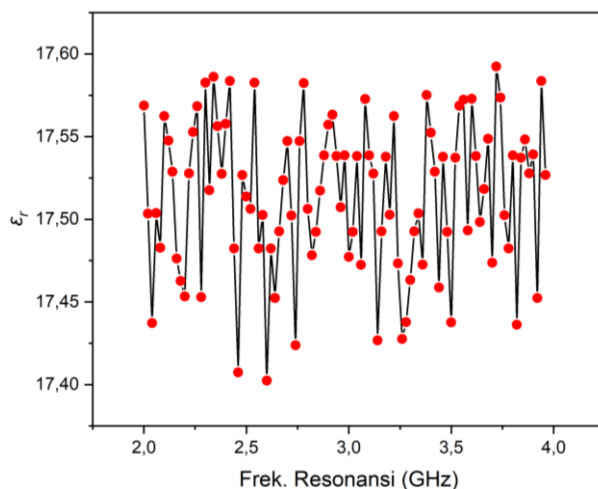
$$Mg : (Ti_{0,95} + Cr_{0,05}) : O = 19,693 : (18,845 + 1,810) : 63,651 = 19,693 : 20,655 : 63,651 \quad (1)$$

$$\text{Rasio \%atom ideal } Mg:Ti:O \text{ untuk } MgTiO_3 = 1 : 1 : 3 \approx 19,693 : 19,693 : 63,651 \quad (2)$$

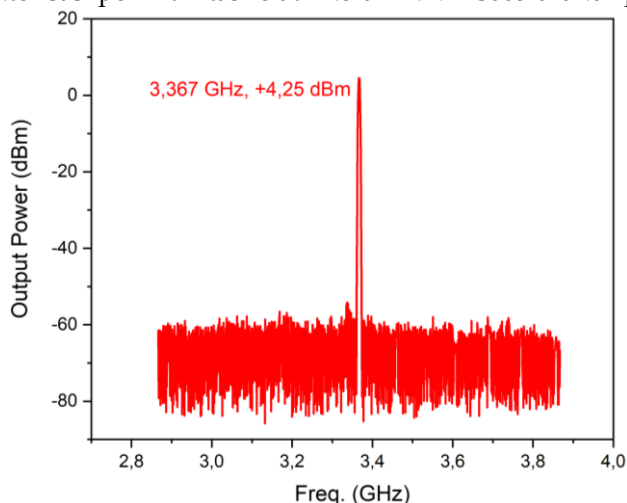
Dengan membandingkan rasio %atom pada Pers. (1) dan (2) tersebut, terlihat bahwa terdapat ekstra %atom ($Ti_{0,95}+Cr_{0,05}$) pada Pers (1) sebanyak 0,962% (yaitu selisih antara 20,655 dan 19,963 %). Ekstra %atom tersebut diperkirakan ada hubungannya dengan keberadaan fasa TiO_2 *rutile* pada Gambar 2.

Analisis Permittivitas Relatif dan Karakteristik DRO

Pengukuran permitivitas relatif (ϵ_r) pada keramik MTC005 dilakukan secara kontinu yaitu pada rentang frekuensi 2–4 GHz, dan hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 5**. **Tabel 2** merangkum perbandingan nilai ϵ_r dan karakteristik DRO yang diperoleh pada penelitian ini dengan nilai-nilai yang sama yang dilaporkan pada penelitian lain.



Gambar 5. Hasil karakterisasi permitivitas relatif keramik MTC005 diukur pada rentang 2 - 4 GHz



Gambar 6. Hasil karakterisasi frekuensi resonansi dan *output power* keramik MTC005

Tabel 2 Perbandingan data ϵ_r dan karakteristik DRO hasil makalah ini dan penelitian lain.

Referensi	Suhu sinter	Sampel	ϵ_r	Frekuensi (GHz)	Frekuensi Resonansi (GHz)	Output power (dBm)
Hasil makalah ini	1300 °C, 3 jam	$Mg(Ti_{0,95}Cr_{0,05})O_3$	17,5	2 - 4	3,367	+4,52
Ermawati et al, 2023 [4]	1100 °C 4 jam	$(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$	17,36	4	4,03	-6,61
	1100 °C 6 jam		17,40		4,04	-7,29
	1100 °C 8 jam		17,45		4,05	-6,55
	1100 °C 10 jam		17,48		4,11	-7,26
Maulana Ishak dan Ermawati, 2022 [13]	1300 °C 6 jam	$(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$	-	-	5,20	-19,70
	1300 °C 8 jam				5,21	-14,47
	1300 °C 10 jam				5,22	-15,69

Ren <i>et al.</i> , 2023 [15]	1400 °C 3 jam	$Mg(TiHf_0)O_3$	17,1	7,5	-	-
		$Mg(Ti_{0,995}Hf_{0,005})O_3$	17,2			
		$Mg(Ti_{0,98}Hf_{0,02})O_3$	17,1			
		$Mg(Ti_{0,95}Hf_{0,05})O_3$	17,5			
		$Mg(Ti_{0,9}Hf_{0,1})O_3$	17,3			
Shi <i>et al.</i> , 2022 [16]	1175 °C 4 jam	$_{0,96}MgTiO_3(0,04)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	18,4	6,5	-	-
		$_{0,95}MgTiO_3(0,05)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	20,0			
		$_{0,94}MgTiO_3(0,06)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	20,6			
		$_{0,93}MgTiO_3(0,07)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	21,2			
		$_{0,92}MgTiO_3(0,08)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	21,8			
		$_{0,91}MgTiO_3(0,09)(Ca_{0,8}Sr_{0,2})TiO_3$	22,0			

Seperti yang terlihat pada **Gambar 5**, nilai ϵ_r keramik MTC005 berada pada rentang 17,40 – 17,60 yang diukur secara kontinu pada frekuensi 2 – 4 GHz dengan suhu sinter 1300 °C 3 jam. Nilai ϵ_r tersebut berkaitan dengan nilai densitas *bulk*, hal ini dikarenakan keramik yang mengandung banyak pori-pori dapat mengurangi serapan energi saat diberikan arus listrik dari luar [21]. Hal ini juga seperti dilaporkan oleh Referensi [22], [23] bahwa densitas *bulk* memiliki peran penting terhadap sifat dielektrik keramik.

Berdasarkan **Gambar 6**, keramik MTC005 menghasilkan puncak frekuensi resonansi yang terletak pada 3,367 GHz sehingga daerah kerja resonansi keramik tersebut berada pada gelombang S-band (2 – 4 GHz) dengan nilai *output power* bernilai positif, yaitu sebesar +4,52 dBm

Pada **Tabel 2**, merangkum data nilai rata-rata ϵ_r keramik MTC005 adalah sebesar 17,5 yang diukur secara kontinu pada frekuensi 2 – 4 GHz. Baru-baru ini, Referensi [4] melaporkan nilai ϵ_r pada keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$ yang disinter pada suhu 1100 °C dengan variasi waktu tahan sinter 4, 6, 8, dan 10 jam menghasilkan sebesar 17,36; 17,40; 17,45; dan 17,48 diukur pada frekuensi 4 GHz. Sedangkan, Referensi [13] yang memfabrikasi keramik $(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$ dan disinter pada suhu 1300 °C dengan variasi waktu tahan 6, 8, dan 10 jam hanya melaporkan data karakteristik DRO saja tanpa data nilai ϵ_r dan akan dibahas pada analisis dibawah. Adapun, Referensi [15] melaporkan penggunaan ion dopan Hf dengan suhu sinter 1400 °C 4 jam, menghasilkan nilai $\epsilon_r = 17,1$ ketika keramik $MgTiO_3$ tidak diberi ion dopan Hf. Sedangkan, ketika diberi ion dopan Hf sebanyak $x = 0,005 - 0,1$ keramik tersebut menghasilkan nilai ϵ_r sebesar 17,1 – 17,5 pada frekuensi 7,5 GHz. Selanjutnya, Referensi [16] melaporkan ion dopan $(Ca_{0,8}Sr_{0,2})$ dan sinter pada suhu 1175 °C 4 jam, menghasilkan nilai ϵ_r sebesar 18,4 – 22 pada frekuensi 6,5 GHz. Dengan demikian, nilai ϵ_r dari makalah ini memiliki hasil yang sebanding meskipun menggunakan suhu sinter lebih rendah atau lebih tinggi dan menggunakan ion dopan yang berbeda dari penelitian lainnya.

Selain itu, **Tabel 2** juga menyajikan rangkuman perbandingan antara hasil karakteristik DRO dari makalah ini dengan peneliti lain. Keramik MTC005 menghasilkan nilai frekuensi resonansi yang lebih rendah diantara dua Referensi lain, yaitu Referensi [4], [13]. Referensi [4] melaporkan pergeseran nilai frekuensi resonansi seiring dengan bertambahnya waktu tahan sinter 4, 6, 8, dan 10 jam adalah sebesar 4,03 – 4,11 GHz pada keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$ semakin meningkat, namun tetap dalam daerah kerja resonansi yang sama, yaitu C-band (4-8 GHz). Nilai *output power* yang dihasilkan masih bernilai negatif, yaitu sebesar -6,61; -7,29; -6,55; -7,26 dBm serta nilai ϵ_r sebesar 17,36 – 17,48. Selanjutnya, Referensi [13] melaporkan keramik MZT04 menghasilkan nilai frekuensi resonansi pada rentang 5,20 – 5,22 GHz dan nilai *output power* masih bernilai negatif juga, yaitu sebesar -19,70; -14,47; -15,69 dBm. Menurut Referensi [4] apabila *output power* bernilai nol atau positif, maka seluruh bagian dari keramik telah beresonansi pada frekuensi kerjanya. Sedangkan, dua peneliti lainnya, yaitu Referensi [15], [16] melaporkan hanya sebatas sifat dielektrik keramik saja tanpa data frekuensi resonansi dan *output power*. Dengan demikian, data karakteristik DRO keramik MTC005 lebih unggul daripada keramik yang dilaporkan oleh keempat peneliti lain yang tersaji pada **Tabel 2**. Hal ini dimungkinkan berkaitan dengan nilai ϵ_r yang dihasilkan serta nilai *output power* keramik MTC005 bernilai positif sedangkan yang dilaporkan oleh Referensi [4], [13] masih bernilai negatif.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan data-data yang diperoleh dan telah dianalisis dapat disimpulkan bahwa fabrikasi keramik MTC005 berhasil dilakukan. Keramik ini menghasilkan struktur dengan fasa utama $MgTiO_3$ dengan %molar sebesar (89,34%) dan sisanya adalah fasa impuritas TiO_2 *rutile*. Analisis mikrostruktur menunjukkan nilai

densitas *bulk* sebesar $3,63 \text{ gr.cm}^{-3}$ dan tersusun atas pori-pori dan butir-butir yang padat pada permukaan keramik. Meskipun keramik tersebut telah ditambahkan ion Cr sebagai dopan, namun ion tersebut tidak mengganggu dari struktur $MgTiO_3$, yang artinya ion Cr telah masuk sebagian ke dalam ion *host* yaitu ion Ti. Keberadaan ion Cr masih terdeteksi sebagai unsur penyusun keramik tersebut, yang dikonfirmasi dengan data EDX. Nilai rata-rata ϵ_r yang dihasilkan adalah sebesar 17,5 pada rentang frekuensi 2 - 4 GHz. Sedangkan, pada karakteristik DRO menghasilkan resonansi yang terekam pada frekuensi 3,367 GHz dengan *output power* bernilai positif sebesar +4,52 dBm. Dengan demikian, keramik MTC005 layak dikatakan sebagai material DR dengan sifat dielektrik yang baik dan dapat diaplikasikan pada modul DRO.

B. Saran

Perlu dilakukan tindak lanjut berupa karakteristik DRO lainnya berupa *phase noise* dan *bandwidth* pada keramik MTC005 untuk mengetahui seluruh nilai dari karakteristik tersebut. Serta, mengkarakterisasi faktor kualitas dan nilai Q pada keramik ini guna mengetahui sifat – sifat dielektrik keramik lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. H. Ahfa and F. U. Ermawati, "Analisis Komposisi Fasa Serbuk $MgTiO_3$ Hasil Preparasi dengan Metode Pencampuran Larutan," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 07, pp. 67–70, 2018.
- [2] J. B. Huang *et al.*, "Microwave and terahertz dielectric properties of $MgTiO_3$ - $CaTiO_3$ ceramics," *Mater. Lett.*, vol. 138, pp. 225–227, 2015, doi: 10.1016/j.matlet.2014.09.122.
- [3] T. Yue, L. Li, M. Du, and Y. Zhan, "Multilayer Co-Fired Microwave Dielectric Ceramics in $MgTiO_3$ - Li_2TiO_3 System with Linear Temperature Coefficient of Resonant Frequency," *Scr. Mater.*, vol. 205, p. 114185, 2021, doi: 10.1016/j.scriptamat.2021.114185.
- [4] F. U. Ermawati, Y. Taryana, Y. Sulaeman, Y. N. Wijayanto, N. Sudrajat, and W. A. Adi, "Fabrication and Characterization of $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$ Ceramics as a 4.0 GHz Resonator in Dielectric Resonator Oscillator Module," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 34, no. 20, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1007/s10854-023-10890-0.
- [5] L. Liu, Y. Chen, Z. Feng, H. Wu, and X. Zhang, "Crystal Structure, Infrared Spectra, and Microwave Dielectric Properties of the $EuNbO_4$ Ceramic," *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 3, pp. 4321–4326, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.09.176.
- [6] J. S. Kim, E. S. Choi, K. W. Ryu, S. G. Bae, and Y. H. Lee, "Microwave Dielectric Properties of $Mg_4Ta_2O_9$ Ceramics with TiO_2 Additions for Dielectric Resonator Oscillator," *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 162, no. 2, pp. 87–91, 2009, doi: 10.1016/j.mseb.2009.03.025.
- [7] T. Chiu, "Dielectric Constant Measurement Technique for a Dielectric Strip Using a Rectangular Waveguide," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 5, pp. 1501–1508, 2003, doi: 10.1109/TIM.2003.817904.
- [8] J. Sheen, "A Dielectric Resonator Method of Measuring Dielectric Properties of Low Loss Materials in the Microwave Region," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5, 2008, doi: 10.1088/0957-0233/19/5/055701.
- [9] A. Kadarosman and F. U. Ermawati, "The Use of $(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3+2\text{wt.}\% Bi_2O_3$ Ceramics as a Dielectric Resonator Oscillator Material and Characterisation of Structure, Microstructure, and Density," *J. Neutrino*, vol. 13, no. 2, pp. 67–79, 2021, doi: 10.18860/neu.v13i2.11720.
- [10] F. U. Ermawati, Y. Wahyu, T. Kristiantoro, and Dedi, "Blok Diagram Sirkuit DRO dan Blok Diagram Pengukuran Respon Frekuensi dan Daya Luaran DRO pada C-band Untuk Keramik Dielektrik $(Mg_{1-x}Zn_x)TiO_3$," No. Pencatatan 000203671, 2020.
- [11] E. Nilawati and F. U. Ermawati, "Karakterisasi Keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})TiO_3+4\text{wt}\% Bi_2O_3$ sebagai Material Dielectric Resonator Oscillator, Struktur, Mikrostruktur dan Densitasnya," *J. Fis. Unand*, vol. 10, no. 2, pp. 239–247, 2021.
- [12] A. M. Muammar and F. U. Ermawati, "Characterization of $(Mg_{0,5}Zn_{0,5})TiO_3$ Ceramics as Material Candidates for Dielectric Resonator at Microwave Frequency," *Indones. Phys. Rev.*, vol. 5, no. 2, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.29303/ip>
- [13] S. N. Maulana Ishak and F. U. Ermawati, "Characterization of $(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$ Ceramics as Dielectric Resonator Materials in Microwave Frequencies," *Spektra J. Fis. dan Apl.*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.21009/spektra.071.02.
- [14] P. Gogoi, L. R. Singh, and D. Pamu, "Characterization of Zn doped $MgTiO_3$ Ceramics: An Approach for RF Capacitor Applications," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 28, no. 16, pp. 11712–11721, 2017, doi: 10.1007/s10854-017-6975-6.
- [15] Z. Ren *et al.*, "Enhanced Quality Factor ($\sim 336,800$ GHz) of $MgTiO_3$ ceramic by Hf Substitution for Ti-

- site," *Ceram. Int.*, no. November 2023, 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.308.
- [16] T. Shi *et al.*, "Fabrication, Sinterability and Microwave Dielectric Properties of $\text{MgTiO}_3-(\text{Ca}_{0,8}\text{Sr}_{0,2})\text{TiO}_3$ Composite Ceramics from Nanosized Powders," *Vacuum*, vol. 201, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.vacuum.2022.111107.
- [17] H. M. Rietveld, "A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures," *J. Appl. Crystallogr.*, vol. 2, no. 2, pp. 65–71, 1969, doi: 10.1107/s0021889869006558.
- [18] A. Hermadianti and F. U. Ermawati, "Pengaruh Waktu Tahan Kalsinasi terhadap Komposisi Fasa dan Ukuran Kristalit Serbuk $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,99}\text{Sn}_{0,01})\text{O}_3$ Hasil Sintesis dengan Metode Pencampuran Larutan," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 12, no. 06, pp. 1–9, 2023, doi: <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p1-9>.
- [19] M. D. Z. Abror and F. U. Ermawati, "Analisis Rietveld Pola XRD Serbuk $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Sn}_{0,02})\text{O}_3$ Hasil Sintesis dengan Metode Pencampuran Larutan," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 12, no. 3, pp. 26–34, 2023, doi: <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n3.p26-34>.
- [20] D. I. Yulianti and F. U. Ermawati, "Analisis Struktur dan Mikrostruktur Fasa Tunggal ($\text{Mg}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{TiO}_3/\text{Bi}_2\text{O}_3$)," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 8 Nomor 02, no. 2302–4313, pp. 17–22, 2019.
- [21] W. . Kingery, H. Bowen, and D. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2th ed. Canada, 1976. [Online]. Available: [https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=nGjjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=W.D.+Kingery,+H.K.+Bowen+and+D.R.+Uhlmann.+\(1976\).+Introduction+to+Ceramics,++2nd+edn.+\(Wiley-Interscience,+New+York\)+p.+452.&ots=OoXybNJ3nc&sig=xeXO2M18A94DVD4DifFwdEg1CwY&redir_](https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=nGjjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=W.D.+Kingery,+H.K.+Bowen+and+D.R.+Uhlmann.+(1976).+Introduction+to+Ceramics,++2nd+edn.+(Wiley-Interscience,+New+York)+p.+452.&ots=OoXybNJ3nc&sig=xeXO2M18A94DVD4DifFwdEg1CwY&redir_)
- [22] R. Han, H. Cao, and B. Li, "Microwave Dielectric Properties of a Novel Low-Temperature Sintering H_3BO_3 -Added $\text{Ca}_2\text{V}_2\text{O}_7$ Ceramics," *J. Alloys Compd.*, vol. 890, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161803>.
- [23] X. Feng *et al.*, "Structure, composition, Microwave Dielectric Properties and Improved Ultra-Low Temperature Sintering Characteristics of Lyonsite Structural $\text{Li}_2\text{Mg}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ Ceramic," *Ceram. Int.*, vol. 50, no. 4, pp. 5936–5947, 2024, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.11.038.