

KARAKTERISTIK FREKUENSI RESONANSI DAN *OUTPUT POWER* KERAMIK $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$ SEBAGAI MATERIAL RESONATOR PADA MODUL *DIELECTRIC RESONATOR OSCILLATOR (DRO)*

¹⁾Emilia D. Lestari, ^{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

Magnesium titanate (MgTiO_3) merupakan salah satu material *dielectric resonator* (DR) yang potensial untuk diaplikasikan pada berbagai sistem telekomunikasi, salah satunya sebagai komponen pembangkit frekuensi resonansi pada modul *dielectric resonator oscillator* (DRO) untuk aplikasi sistem radar. Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan karakteristik frekuensi resonansi dan *output power* keramik $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$ (disingkat MTC002) ketika keramik tersebut diujicobakan sebagai resonator pada modul DRO. Keramik dikompaksi menggunakan *uniaxial-cylindrical-die press* berdiameter 8 mm dan *hydraulic-hand-press* pada tekanan 10 MPa, serta disinter pada suhu 1200 °C selama 4 jam. Tujuannya adalah untuk mengkaji karakteristik frekuensi resonansi DRO dan *output power* keramik serta mengkaitkannya dengan data struktur, mikrostruktur, dan permitivitas relatif. Resonansi DRO terdeteksi pada frekuensi 3,352 GHz dengan *output power* +3,848 dBm. Keramik ini mengandung MgTiO_3 sebagai fasa utama (81,38 %molar) dan sisanya TiO_2 *rutile* tanpa disertai fasa sekunder MgTi_2O_5 atau Mg_2TiO_4 . Permukaan keramik tampak padat dengan nilai densitas *bulk* 3,056 g/cm³. Selain itu, keberadaan fasa MgTiO_3 tersebut dikonfirmasi oleh data EDX yang hanya mengandung unsur Mg, Ti, Cr, dan O dengan rasio %atom masing-masing 17,608; 17,831; 0,263; dan 64,298 %. Sementara nilai rata-rata ϵ_r keramik yang diukur pada rentang frekuensi 2-4 GHz adalah 17,40. Hasil-hasil di atas menunjukkan bahwa keramik MTC002 memiliki sifat dielektrik (ϵ_r) yang mendukung untuk diaplikasikan sebagai material resonator pada DRO, khususnya daerah *S-band* (2-4 GHz).

Kata Kunci: Keramik MTC002, frekuensi resonansi, *output power*, dan DRO.

Abstract

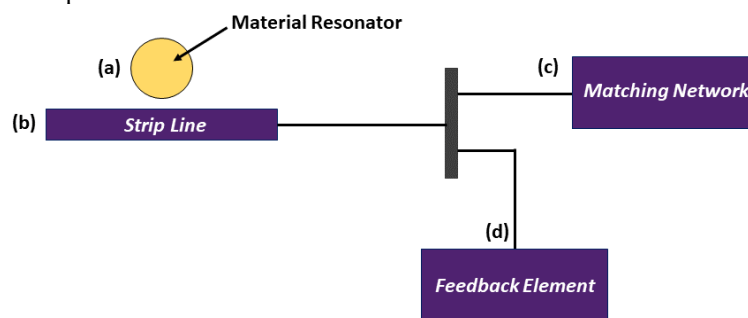
Magnesium titanate (MgTiO_3) is a resonator (DR) dielectric material that has the potential to be applied in various telecommunications systems, one of which is as a resonant frequency generator component in the dielectric resonator oscillator (DRO) module for radar system applications. In this regard, this paper reports the characteristics of the resonance frequency and output power of $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$ ceramic (abbreviated as MTC002) when the ceramic was tested as a resonator in the DRO module. The ceramics were compacted using a *uniaxial-cylindrical-die press* with a diameter of 8 mm and a *hydraulic-hand-press* at a pressure of 10 MPa, and sintered at a temperature of 1200 °C for 4 hours. The aim is to study the characteristics of the DRO resonance frequency and power output of ceramics and relate them to data structure, microstructure and relative permittivity. DRO resonance was detected at a frequency of 3.352 GHz with an output power of +3.848 dBm. This ceramic contains MgTiO_3 as the main phase (81.38% molar) and the remainder is *rutile* TiO_2 without the secondary phase MgTi_2O_5 or Mg_2TiO_4 . The ceramic surface appears solid with a bulk density value of 3.056 g/cm³. In addition, the existence of the MgTiO_3 phase was confirmed by EDX data which only contains the elements Mg, Ti, Cr, and O with an atomic % ratio of 17.608; each 17.831;

0.263; and 64.298 %. Meanwhile, the average value for ceramics measured in the 2-4 GHz frequency range is 17.40. The results above show that MTC002 ceramic has dielectric properties (ϵ_r) that support its application as a resonator material in DRO, especially the S-band region (2-4 GHz).

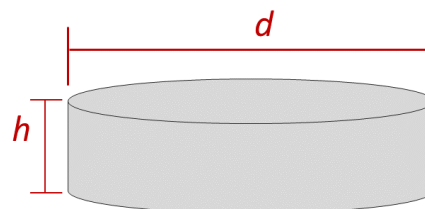
Keywords: MTC002 ceramic, resonant frequency, output power, and DRO.

I. PENDAHULUAN

Magnesium titanate ($MgTiO_3$) merupakan salah satu material *dielectric resonator* (DR) yang potensial untuk diaplikasikan pada berbagai sistem telekomunikasi seperti antenna, filter, dan modul *dielectric resonator oscillator* (DRO) pada sistem radar [1]–[6]. Hal ini dimungkinkan karena $MgTiO_3$ memiliki sifat-sifat dielektrik yang unggul, salah satunya yaitu nilai permitivitas relatif intermediat ($\epsilon_r = \sim 17$) yang mendukung miniaturisasi komponen tanpa menurunkan performanya [7], [8]. Berdasarkan potensi tersebut, maka keramik dielektrik $MgTiO_3$ dapat dipergunakan sebagai material resonator pada modul DRO. DRO merupakan rangkaian jalur mikrostrip yang dapat menghasilkan sinyal gelombang mikro dengan menggunakan material *dielectric resonator* (DR) sebagai elemen resonansinya (lihat **Gambar 1**) [9], [10]. DRO dapat didefinisikan sebagai osilator yang menggunakan material DR untuk membangkitkan, menstabilkan sinyal, dan filter frekuensi pada gelombang mikro [11]. Adapun ilustrasi dari rangkaian DRO ditunjukkan pada **Gambar 1**, sedangkan ilustrasi dari material DR diberikan pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Ilustrasi rangkaian DRO yang terdiri dari 4 komponen utama yaitu material resonator, *strip line*, *matching network*, dan *feedback element* [12]



Gambar 2. Ilustrasi material *dielectric resonator* (DR) yang terdapat pada **Gambar 1a**. d = diameter (mm), dan h = ketebalan (mm) [12]

Seperti terlihat pada **Gambar 1**, rangkaian DRO terdiri dari 4 komponen utama, material resonator berupa material dielektrik seperti diberikan pada **Gambar 2**, *strip line*, *matching network*, dan *feedback element*. Pada gelombang mikro terdapat dua tipe mode DRO, yaitu mode *transverse electric* (TE) dan mode *transverse magnetic* (TM) [13]–[15]. Mode TE merupakan gelombang elektrik yang menjalar di dalam sebuah pandu gelombang. Pemilihan mode TE, khususnya TE_{018} , didasarkan pada fakta bahwa mode ini memiliki tingkat resonansi orde terendah, sehingga memungkinkan untuk beroperasi tanpa mengganggu frekuensi mode orde tinggi lainnya [16].

Fabrikasi keramik $MgTiO_3$ telah dilaporkan oleh beberapa peneliti [2], [3], [10], [17]–[20]. Namun, pembahasan fabrikasi keramik $MgTiO_3$ dalam Referensi [17]–[19] hanya sebatas pada pengukuran sifat-sifat dielektriknya saja. Sementara Referensi [2], [3], [10], [20] melaporkan performa keramik berbasis $MgTiO_3$ saat diaplikasikan sebagai material resonator di dalam modul DRO. Ermawati dkk [2] memfabrikasi keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})(Ti_{0,99}Sn_{0,01})O_3$ (disingkat MZTS) yang disinter pada suhu 1100 °C dengan variasi waktu tahan 4, 6, 8, dan 10 jam dan diperoleh fasa utama $MgTiO_3$ (98,01-100 % molar), tanpa disertai fasa sekunder dengan nilai ϵ_r sebesar 17,36–17,48 pada frekuensi 3,3 GHz. Ketika sampel MZTS tersebut diaplikasikan pada modul DRO dalam sistem radar, diperoleh nilai frekuensi resonansi sebesar 4,03-4,11 GHz, serta *output power* sebesar -6,55

sampai -7,29 dBm. Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan hasil uji coba karakterisasi frekuensi resonansi dan *output power* dari keramik MgTiO_3 dengan komposisi baru, yaitu $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$ (disingkat MTC002) dengan suhu sinter 1200 °C selama 4 jam. Hasil uji dibahas berdasarkan data struktur, mikrostruktur, dan permitivitas relatif.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu fabrikasi keramik, karakterisasi sampel uji, dan analisisnya.

1. Fabrikasi keramik

Dalam penelitian ini, proses fabrikasi keramik MTC002 dilakukan dengan mengompaksi serbuk kristalin MTC002 yang telah dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 4 jam menggunakan *hydraulic-hand-press* dan *cylindrical-die-press* berdiameter 8 mm dengan tekanan 10 MPa untuk menjadi pelet. Setelah itu, pelet hasil proses kompaksi kemudian disinter pada suhu 1200 °C selama 4 jam sehingga menjadi keramik MTC002.

2. Karakterisasi

Keramik MTC002 yang telah disinter pada suhu 1200 °C selama 4 jam kemudian dilakukan karakterisasi strukturnya menggunakan uji *X-Ray Diffraction* (XRD). Hasil XRD kemudian dianalisis baik secara kualitatif dan kuantitatif. Mikrostruktur keramik dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX) untuk mengamati morfologi permukaan sampel dan menganalisis unsur-unsur yang terkandung di dalamnya. Karakterisasi densitas *bulk* dilakukan menggunakan *densitymeter*, sementara permitivitas relatif menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA), serta karakterisasi DRO dilakukan menggunakan *Spectrum Analyzer*.

B. Variabel Operasional

Variabel manipulasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu karakterisasi pada sampel keramik MTC002 (XRD, SEM-EDX, *densitymeter*, VNA, dan *spectrum analyzer*). Sedangkan variabel kontrolnya adalah bahan awal (serbuk logam Mg, Ti, dan Cr), kalsinasi pada suhu 800 °C 4 jam, diameter pelet 8 mm, tekanan kompaksi 10 MPa, dan suhu sinter 1200 °C 4 jam. Variabel respon berupa data struktur, mikrostruktur, permitivitas relatif, frekuensi resonansi, dan *output power* keramik MTC002.

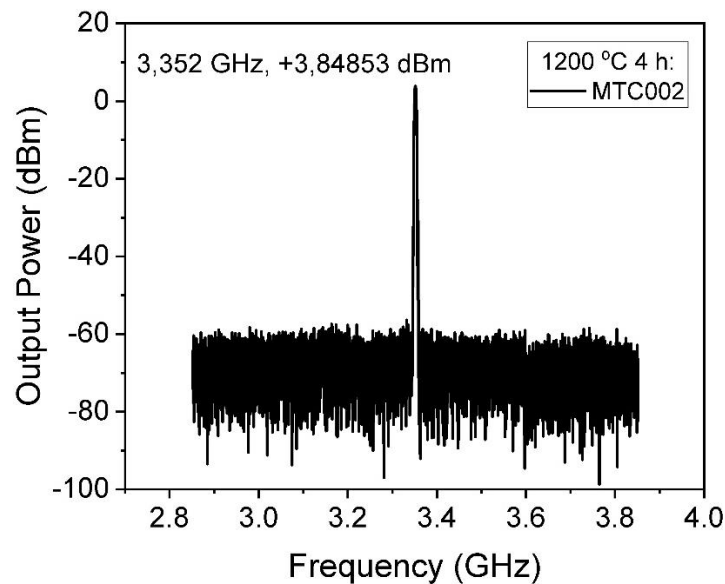
C. Teknik Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data struktur diperoleh melalui uji XRD menggunakan *PanAlytical X'Pert Pro* dengan radiasi Cu-K α ($\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$) pada sudut difraksi 15-70° dan langkah detektor 0,02 °/menit. Data dari uji XRD dianalisis secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan dengan perangkat lunak *Match!* untuk mengidentifikasi fasa-fasa kristalin dalam keramik uji. Sementara analisis kuantitatif menggunakan metode *refinement Rietveld* dengan perangkat lunak *Rietica* untuk menentukan komposisi dari fasa-fasa kristalin yang telah teridentifikasi (Ermawati, 2018). Data mikrostruktur diperoleh dari uji SEM-EDX menggunakan alat *Thermo Scientific Phenom*. Densitas *bulk* (ρ) diukur menggunakan *densitymeter* tipe *Balance Mettler Toledo tipe ME 403 E* dan *Density kit ME-DNY-4*. Perhitungan tersebut dilakukan melalui program *Hyperterminal* yang terhubung dengan alat ukur *densitymeter*. Data permitivitas relatif diperoleh dari uji VNA (*Anritsu MS46322A*), dan karakterisasi DRO menggunakan *spectrum analyzer* tipe *N9020A MXA* (Keysight Technologies) yang beroperasi pada mode TE(0,1) pada rentang frekuensi 3-12 GHz, tegangan 9- 12 volt dan arus listrik 100-200 mA.

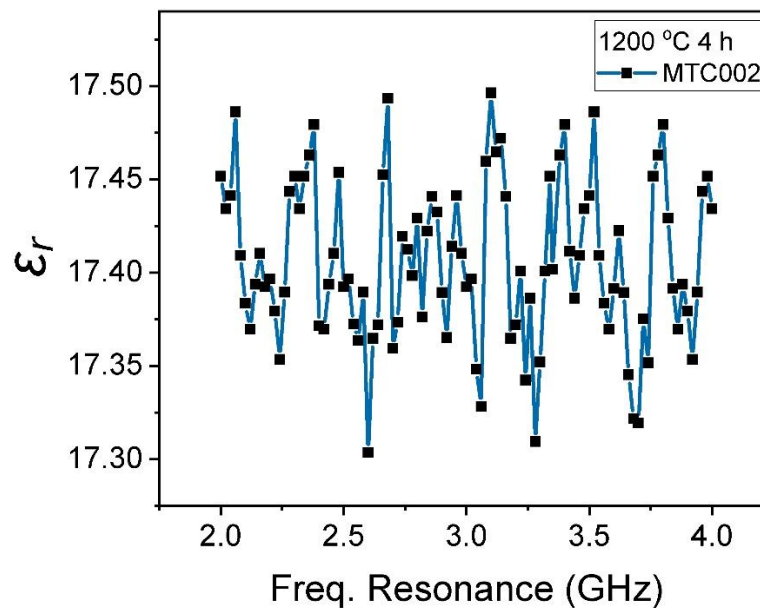
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi DRO dan Permitivitas Relatif

Gambar 3 menampilkan hasil pengukuran frekuensi resonansi dan *output power* dari keramik MTC002 saat keramik tersebut dipasang sebagai material resonator pada modul DRO yang diukur menggunakan *spectrum analyzer* tipe *N9020A MXA* dan *Rohde & Schwarz FSL*. Pengukuran permitivitas relatif keramik MTC002 dilakukan secara kontinu pada rentang frekuensi 2-4 GHz menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) tipe *Anritsu MS46322A* seperti terlihat pada **Gambar 4**. Sementara itu, **Tabel 1** menunjukkan perbandingan data frekuensi resonansi, *output power*, serta permitivitas relatif dari keramik berbasis MgTiO_3 yang diperoleh pada penelitian ini dengan penelitian terdahulu.



Gambar 3. Puncak frekuensi resonansi DRO keramik MTC002 beserta *output power*-nya.



Gambar 4. Nilai permitivitas relatif keramik MTC002 yang diukur pada frekuensi 2-4 GHz

Tabel 1. Perbandingan data frekuensi resonansi, *output power*, serta permitivitas relatif dari keramik berbasis MgTiO_3 yang diperoleh pada penelitian ini dan penelitian terdahulu.

Referensi	Sampel	Sinter	Frekuensi Resonansi (GHz)	Output Power (dBm)	ϵ_r
Penelitian ini	$\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$	1200 °C 4 jam	3,352	+3,84853	17,40 (2-4 GHz)
[2]	$(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})(\text{Ti}_{0,99}\text{Sn}_{0,01})\text{O}_3$	1100 °C 4 jam	4,03	-6,61	17,36 (3,3 GHz)
		1100 °C 6 jam	4,04	-7,29	17,40 (3,3 GHz)
		1100 °C 8 jam	4,05	-6,55	17,45 (3,3 GHz)
		1100 °C 10 jam	4,11	-7,26	17,48 (3,3 GHz)
[3]	$(\text{Mg}_{0,5}\text{Zn}_{0,5})\text{TiO}_3$	1300 °C 6 jam	5,07	-2,41	-
		1300 °C 8 jam	5,08	-2,01	
		1300 °C 10 jam	5,08	-2,07	

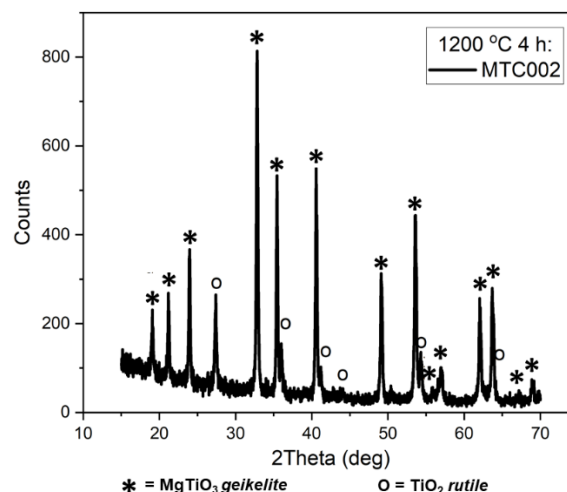
Referensi	Sampel	Sinter	Frekuensi Resonansi (GHz)	Output Power (dBm)	ϵ_r
[10]	$(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$	1300 °C 6 jam	5,20	-19,70	-
		1300 °C 8 jam	5,21	-14,47	
		1300 °C 10 jam	5,22	-15,69	
[20]	$(Mg_{0,8}Zn_{0,2})TiO_3 + 4wt\% Bi_2O_3$	1100 °C 4 jam		-1,20	-
		1100 °C 6 jam	5,12	-1,42	
		1100 °C 8 jam		-,2,61	

Seperti terlihat pada **Gambar 3**, hasil pengukuran frekuensi resonansi keramik MTC002 adalah sebesar 3,352 GHz. Posisi puncak frekuensi resonansi tersebut menunjukkan bahwa daerah kerja resonansi keramik MTC002 terletak pada daerah gelombang S-Band (2-4 GHz). Nilai *output power* yang dihasilkan pada penelitian ini adalah positif, yaitu +3,84853 dBm. Pada **Gambar 4**, pengukuran permitivitas relatif (ϵ_r) dilakukan secara kontinu pada rentang frekuensi 2-4 GHz, dengan nilai rata-rata ϵ_r keramik MTC002 adalah 17,4. Berdasarkan **Tabel 1**, frekuensi resonansi yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh Ermawati dkk, Muammar, Ishak, dan Nilawati [2], [3], [10], [20]. Dalam penelitiannya, Ermawati dkk [2] melaporkan terjadinya pergeseran posisi frekuensi ke arah yang lebih tinggi yaitu 4,03-4,11 GHz, akibat peningkatan data struktural seperti volume sel satuan (fasa $MgTiO_3$, 308,27-308,42 Å³), parameter kisi (fasa $MgTiO_3$, a=b = 5,06-5,14; c = 13,6-13,77), ukuran kristalit (27,32-57,93 nm), dan densitas *bulk* (3,16-3,57 g/cm³). Sementara itu, Ishak [10] melaporkan pergeseran posisi puncak frekuensi ke arah frekuensi yang lebih tinggi yaitu 5,20-5,22 GHz, disebabkan oleh peningkatan waktu tahan sinter. Oleh karena itu, adanya perbedaan posisi puncak frekuensi resonansi yang dihasilkan pada penelitian ini dengan penelitian terdahulu dapat disebabkan oleh data-data struktural dan perlakuan sinter yang berbeda. Selanjutnya, *output power* yang dihasilkan pada penelitian ini bernilai positif dan lebih besar dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh Ermawati dkk, Muammar, Ishak, dan Nilawati [2], [3], [10], [20]. Berdasarkan pernyataan Ermawati dkk [2], apabila nilai *output power* adalah positif atau mendekati nol, maka dapat dipastikan bahwa seluruh bagian dari keramik tersebut telah beresonansi pada frekuensi kerjanya, dalam hal ini yaitu pada frekuensi 3,3 GHz. Nilai permitivitas relatif yang dilaporkan pada penelitian ini tidak jauh berbeda dengan Ermawati dkk [2]. Namun, nilai permitivitas relatif sebesar 17,40 pada penelitian ini diperoleh pada frekuensi pengukuran 2-4 GHz, sedangkan penelitian Ermawati dkk [2] sebesar 17,36-17,48 pada pengukuran 3,3 GHz. Berdasarkan data-data yang diperoleh di atas, maka keramik MTC002 layak dipergunakan sebagai material resonator pada modul DRO karena terletak pada daerah gelombang S-Band, memiliki nilai *output power* yang positif, dan nilai permitivitas relatif intermediat yaitu 17,40.

B. Struktur Keramik MTC002

Analisis Kualitatif

Gambar 3 menampilkan pola XRD dari keramik MTC002 yang disinter pada suhu 1200 °C selama 4 jam beserta hasil identifikasi fasa-fasa yang terbentuk menggunakan perangkat lunak *Match!*.

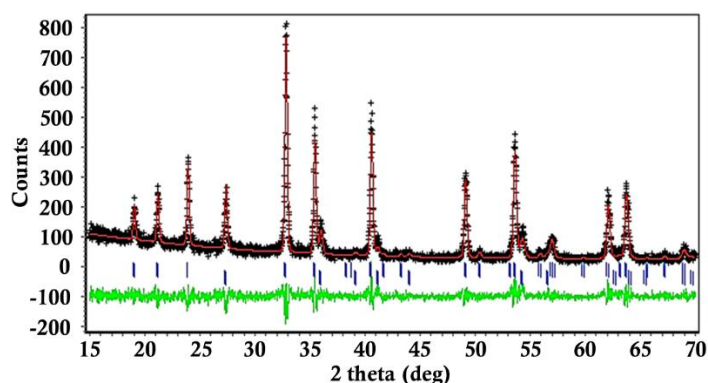


Gambar 5. Pola XRD keramik MTC002 yang disinter pada suhu 1200 °C dengan waktu tahan 4 jam

Pada **Gambar 5**, puncak yang ditandai dengan simbol “*” menyatakan puncak-puncak difraksi milik fasa utama MgTiO_3 (PDF No. 06-0494), sementara simbol “o” menyatakan puncak-puncak difraksi milik fasa minor TiO_2 (PDF No. 21-1276). Dengan demikian, fabrikasi keramik MTC002 dalam penelitian ini dipastikan menghasilkan MgTiO_3 sebagai fasa utama sebesar 86,81 %berat dan sisanya untuk fasa minor TiO_2 adalah 13,19 %berat (lihat **Tabel 2**) tanpa disertai adanya fasa sekunder Mg_2TiO_4 dan MgTi_2O_5 . Selain itu, tidak adanya puncak yang mengandung Cr pada **Gambar 5** menunjukkan bahwa ion Cr^{4+} telah masuk ke dalam *site* Ti^{4+} dan membentuk larutan padat substitusi [10], [21]. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, Gogoi dkk [18] mengidentifikasi terbentuknya fasa sekunder MgTi_2O_5 yang menyertai pembentukan fasa utama MgTiO_3 pada keramik $(\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{TiO}_3$ ($x = 0,01-0,07$). Keberadaan fasa sekunder ini dilaporkan dapat menurunkan nilai densitas dan permitivitas relatif pada keramik tersebut. Selain itu, Ermawati dkk [19] melaporkan bahwa keberadaan fasa sekunder Mg_2TiO_4 dan Zn_2TiO_4 yang menyertai fasa utama MgTiO_3 pada sampel keramik $(\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{TiO}_3$ ($x = 0-0,5$ mol) dapat menurunkan nilai permitivitas relatif keramik pada saat frekuensi tinggi. Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat diasumsikan bahwa keberadaan fasa sekunder dapat menyebabkan penurunan sifat dielektrik pada keramik. Dengan demikian, ketiadaan fasa sekunder Mg_2TiO_4 dan MgTi_2O_5 dalam penelitian ini berpotensi menghasilkan keramik dengan sifat dielektrik yang mendukung untuk diaplikasikan sebagai material resonator pada DRO.

Analisis Kuantitatif

Gambar 6 menunjukkan hasil *refinement Rietveld* pola XRD yang ditampilkan dalam **Gambar 5** menggunakan perangkat lunak *Rietica*. **Tabel 2** menampilkan data parameter kesesuaian (*Figures of Merit*, FoM) keramik MTC002, sedangkan **Tabel 3** menunjukkan perbandingan data komposisi fasa (berupa %molar, %berat, parameter kisi, dan volume sel satuan untuk semua fasa yang teridentifikasi dari proses *refinement*), serta densitas *bulk* keramik berbasis MgTiO_3 pada penelitian ini dengan penelitian terdahulu.



Gambar 6. Pola hasil *refinement Rietveld* dengan software *Rietica* pada keramik MTC002

Tabel 2. Parameter kesesuaian (FoM) dan *output refinement Rietveld* pada **Gambar 6**.

Keramik	FoM (%)	Fasa	%Molar	%Berat	Parameter kisi (Å)	Volume sel satuan (Å ³)
MTC002	R_p	MgTiO_3	$81,38 \pm 0,71$	$86,81 \pm 0,74$	a=b	$50,52 \pm 0,00$
	R_{wp}					
	R_B				c	$138,92 \pm 0,00$
	R_B (MgTiO_3)	TiO_2	$18,62 \pm 0,38$	$13,19 \pm 0,27$	a=b	$45,924 \pm 0,00$
	R_{exp}					
	χ^2				c	$29,60 \pm 0,00$
						$3070,94 \pm 0,90$
						$624,34 \pm 0,28$

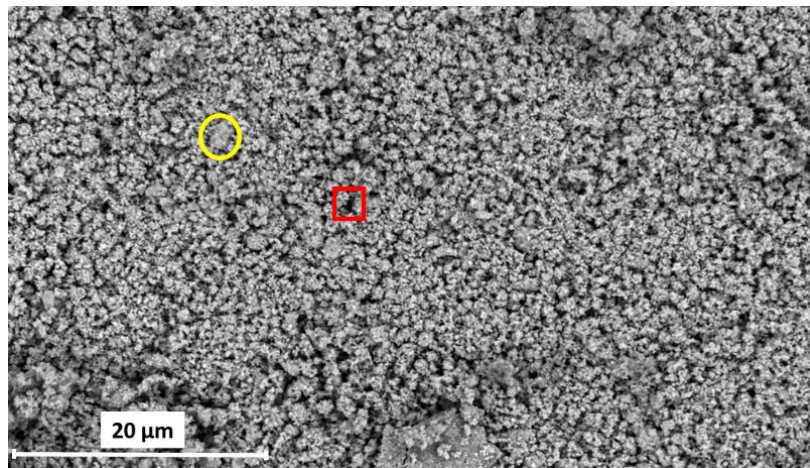
Seperti yang terlihat pada **Gambar 4**, simbol "+" berwarna hitam menggambarkan pola difraksi yang diukur (eksperimen), sementara itu garis merah menggambarkan pola difraksi yang dihitung (model). Garis

hijau menunjukkan perbedaan intensitas ketinggian antara puncak yang diukur dan yang dihitung, sedangkan garis vertikal biru di bawah puncak yang dihitung dan diukur mewakili puncak Bragg terkait dengan semua fase yang teridentifikasi yaitu MgTiO_3 dan TiO_2 *rutile*. Selain itu, berdasarkan data-data parameter kesesuaian (FoM) dari penghalusan *Rietveld* pada **Tabel 2**, nilai faktor profil (R_p), faktor profil tertimbang (R_{wp}), dan faktor eksperimen (R_{exp}) menunjukkan <20 , dengan *Goodness of Fit* (GoF) yang bernilai <2 . Hal ini menunjukkan keberhasilan penghalusan *Rietveld* yang sesuai dengan pernyataan Referensi [22], yaitu apabila nilai-nilai parameter kesesuaian seperti R_p dan R_{wp} kurang dari 20 %, GOF kurang dari 4 %, dan R_{Bragg} kurang dari 10%, maka parameter-parameter penghalusan tersebut dapat dinyatakan *acceptable*. Dengan demikian, data *output* penghalusan *Rietveld* pada **Tabel 2** dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Berdasarkan **Tabel 2**, terlihat bahwa keramik MTC002 terdiri dari fasa utama MgTiO_3 dan fasa minor TiO_2 *rutile*. Nilai persentase molar dan berat untuk fasa MgTiO_3 masing-masing adalah 81,38 % dan 86,81 %, sedangkan nilai persentase molar dan berat untuk fasa TiO_2 adalah 18,62 % dan 13,19 %. Tingginya nilai %molar dan %berat fasa MgTiO_3 ini mengindikasikan bahwa fasa tersebut dominan pada keramik MTC002.

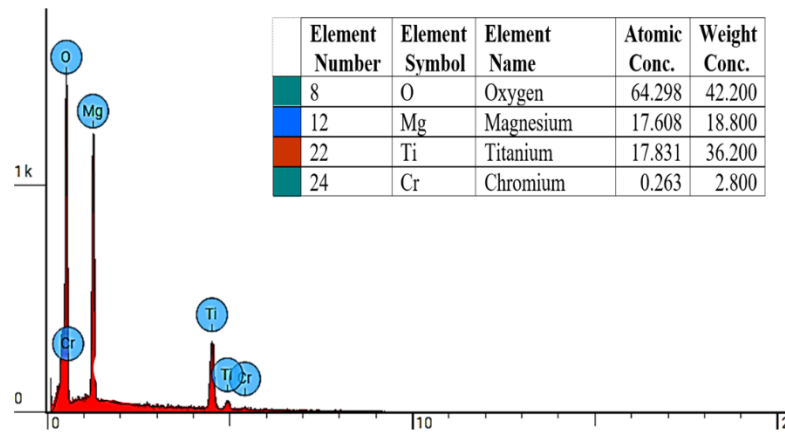
Dalam penelitian ini, keramik MTC002 yang disinter pada suhu 1200 °C selama 4 jam memperoleh densitas *bulk* sebesar 3,056 g/cm³ (lihat **Tabel 2**). Ermawati dkk [2] melaporkan bahwa keramik $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})(\text{Ti}_{0,99}\text{Sn}_{0,01})\text{O}_3$ yang disinter pada suhu 1100 °C selama 4, 6, 8, dan 10 mampu menghasilkan densitas *bulk* yang lebih tinggi, yaitu 3,16-3,57 g/cm³. Oleh karena itu, densitas *bulk* keramik MTC002 pada penelitian ini lebih rendah jika dibandingkan dengan densitas *bulk* keramik $(\text{Mg}_{0,8}\text{Zn}_{0,2})(\text{Ti}_{0,99}\text{Sn}_{0,01})\text{O}_3$ yang dilaporkan oleh Ermawati dkk [2]. Namun, apabila dibandingkan dengan keramik $(\text{Mg}_{0,5}\text{Zn}_{0,5})\text{TiO}_3$ dan $(\text{Mg}_{0,6}\text{Zn}_{0,4})\text{TiO}_3$ yang disinter pada suhu 1300 °C selama 6, 8, serta 10 jam oleh Muammar & Ishak [3][10], maka densitas *bulk* keramik MTC002 pada penelitian ini bernilai lebih tinggi, dimana densitas *bulk* keramik $(\text{Mg}_{0,5}\text{Zn}_{0,5})\text{TiO}_3$ yang dilaporkan oleh Muammar adalah 2,75-2,99 g/cm³, sedangkan densitas *bulk* keramik $(\text{Mg}_{0,6}\text{Zn}_{0,4})\text{TiO}_3$ yang dilaporkan oleh Ishak adalah 2,51-3,04 g/cm³. Dengan demikian, adanya perbedaan nilai densitas *bulk* pada penelitian ini dengan penelitian yang dilaporkan oleh Ermawati dkk, Muammar, dan Ishak dapat disebabkan oleh penggunaan dopan yang berbeda, karena penggunaan suhu sinter yang berbeda tidak berpengaruh signifikan terhadap densitas *bulk* keramik.

C. Mikrostruktur Keramik MTC002

Analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan uji SEM untuk mengamati morfologi permukaan keramik MTC002, yang ditunjukkan pada **Gambar 7**. Sementara **Gambar 8** menampilkan hasil uji EDX yang digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung dalam keramik.



Gambar 7. Morfologi permukaan keramik MTC002 pada perbesaran 8000x



Gambar 8. Hasil analisis unsur dengan EDX pada keramik MTC002

Pada Gambar 7, permukaan keramik MTC002 tampak padat dan terdiri dari butiran (ditandai dengan lingkaran berwarna kuning) serta pori (ditandai dengan kotak berwarna merah) dengan diperoleh nilai densitas *bulk* sebesar $3,056 \text{ g/cm}^3$ (lihat Tabel 2). Sementara itu, data EDX pada Gambar 8 menunjukkan bahwa keramik MTC002 hanya mengandung unsur Mg, Ti, Cr, dan O dengan persentase atom masing-masing adalah 17,608; 17,831; 0,263; dan 64,298 %. Sedangkan data rasio persentase atom Mg : $(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})$: O_3 diberikan dalam Persamaan 1, dan persentase atom ideal diberikan dalam Persamaan 2.

$$\text{Mg} : (\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02}) : \text{O}_3 = 17,608 : (17,831 + 0,263) : 64,298 = 17,608 : 18,094 : 64,298 \quad (1)$$

$$\text{Rasio \%atom ideal} = 17,608 : 17,608 : 64,298 \quad (2)$$

Berdasarkan data %atom pada Persamaan 1 dan 2, rasio %atom Mg : $(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})$: O_3 adalah mendekati 1 : 1 : 3. Namun, pada Persamaan 1 terlihat bahwa %atom $(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})$ pada keramik MTC002 berlebihan, sehingga terdapat fasa lain yang mengandung Ti selain fasa MgTiO_3 . Kelebihan %atom Ti sebesar 0,486 % (dari perhitungan $18,094 - 17,608 = 0,486$) tersebut diduga digunakan untuk membentuk fasa $(\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x)\text{O}_3$ atau dapat diindeks TiO_2 *rutile*. Hal ini sesuai dengan pola XRD pada Gambar 5 yang menunjukkan bahwa keramik MTC002 teridentifikasi mengandung dua fasa, yaitu fasa utama MgTiO_3 dan fasa minor TiO_2 *rutile*.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Fabrikasi dan karakterisasi keramik $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,98}\text{Cr}_{0,02})\text{O}_3$ yang disinter pada suhu 1200°C selama 4 jam telah dilakukan. Hasil menunjukkan bahwa resonansi DRO terdeteksi pada frekuensi 3,352 GHz dengan *output power* +3,848 dBm. Keramik ini mengandung MgTiO_3 sebagai fasa utama (81,38 %molar) dan sisanya fasa TiO_2 *rutile* tanpa disertai fasa sekunder Mg_2TiO_4 atau MgTi_2O_5 . Selain itu, keramik MTC002 memiliki nilai densitas *bulk* $3,056 \text{ gr.cm}^3$ dan nilai permitivitas relatif 17,4. Data-data tersebut menunjukkan bahwa keramik MTC002 potensial untuk diaplikasikan sebagai material resonator pada DRO, khususnya daerah *S-band* (2-4 GHz).

B. Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait pengukuran sifat dielektrik berupa faktor kualitas, kerugian dielektrik, dan karakteristik DRO berupa *bandwidth* serta *phase noise*. Hal ini penting untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai sifat-sifat dielektrik dan karakteristik DRO secara menyeluruh, mengingat fokus penelitian ini terbatas pada permitivitas relatif, frekuensi resonansi dan *output power* saja.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Wang and D. Yan, "Improved Crystalline Structure and Sintering Characteristics of Nonstoichiometric MgTiO_3 Ceramics by Sol-gel Method," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, pp. 365–372, 2021, doi: 10.1007/s10971-020-05458-x.
- [2] F. U. Ermawati, Y. Taryana, N. Sudrajat, and W. A. Adi, "Fabrication and Characterization Resonator

- in Dielectric Resonator Oscillator Module," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 1553, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1007/s10854-023-10890-0.
- [3] A. M. Muammar and F. U. Ermawati, "Characterization of $(\text{Mg}_{0,5}\text{Zn}_{0,5})\text{TiO}_3$ 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>
 - [4] V. S. Samyuktha, A. G. S. Kumar, T. S. Rao, and R. P. Suvarna, "Structural and Dielectric Properties of Magnesium Calcium," *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 1768–1771, 2016, doi: 10.1016/j.matpr.2016.04.072.
 - [5] V. S. Samyuktha, R. Padma Suvarna, and T. Subba Rao B B Professor, "Synthesis and Dielectric Properties of Ceramic Material." [Online]. Available: <http://www.ijert.org>
 - [6] J. Singh and S. Bahel, "Synthesis of single phase MgTiO_3 and Influence of Sn^{4+} Substitution on its Structural, Dielectric and Electrical Properties," *J. Alloys Compd.*, vol. 816, p. 152679, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152679.
 - [7] L. Nikzad, H. Majidian, S. Ghofrani, and T. Ebadzadeh, "Synthesis of MgTiO_3 Powder Via Co-Precipitation Method and Investigation of Sintering Behavior," *Acerp*, vol. 4, no. 1, pp. 40–44, 2018.
 - [8] 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, no. 02, pp. 67–70, 2018.
 - [9] Manisha, K. Sreelakshmi, and R. K. Dora, "Dielectric Resonator Oscillator," *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 71–73, 2021.
 - [10] S. N. Maulana Ishak and F. U. Ermawati, "Characterization of $(\text{Mg}_{0,6}\text{Zn}_{0,4})\text{TiO}_3$ Ceramics as Dielectric Resonator Materials in Microwave Frequencies," *Spektra J. Fis. dan Apl.*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.21009/spektra.071.02.
 - [11] A. Ali *et al.*, "Structural Evolution and Microwave Dielectric Properties of $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ti}_4\text{O}_9$, ($0.0 \leq x \leq 0.06$) Ceramics," *ACS Omega*, vol. 7, no. 2, pp. 2331–2336, 2022, doi: 10.1021/acsomega.1c06212.
 - [12] 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 $(\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x)\text{TiO}_3$," 000203671, 2020 [Online]. Available: <https://pdki-indonesia.dgip.go.id/search?type=copyright&keyword=000203671&page=1&showFilter=true>
 - [13] E. Ishida *et al.*, "Amorphous-Si Waveguide on a Garnet Magneto-Optical Isolator with a TE Mode Nonreciprocal Phase Shift," *Opt. Express*, vol. 25, no. 1, pp. 452–462, 2017.
 - [14] R. Yamaguchi, Y. Shoji, and T. Mizumoto, "Low-loss Waveguide Optical Isolator with Tapered Mode Converter and Magneto-Optical Phase Shifter for TE Mode Input," *Opt. Express*, vol. 26, no. 16, pp. 21271–21278, 2018.
 - [15] L. Sanchez, S. Lechago, and P. Sanchis, "Ultra-compact TE and TM Pass Polarizers Based on Vanadium Dioxide on Silicon," vol. 40, no. 7, pp. 1452–1455, 2015.
 - [16] D. R. Wenas, "Analisis Pandu Gelombang Menggunakan Bragg Reflector sebagai Cladding," *J. Fista (Fisika dan Ter.)*, vol. 1, no. 1, p. 7, 2020.
 - [17] Z. Gong, Z. Wang, L. Wang, Z. Fu, W. Han, and Q. Zhang, "Microwave dielectric properties of high-Q $\text{Mg}(\text{Sn}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ceramics," *Electron. Mater. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 331–335, 2013, doi: 10.1007/s13391-013-2214-3.
 - [18] 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.
 - [19] F. U. Ermawati, S. Pratapa, S. Suasgoro, T. Hubert, and U. Banach, "Preparation and Structural Study of $\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{TiO}_3$ Ceramics and their Dielectric Properties from 1 Hz to 7.7 GHz," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 27 (7), pp. 6637–6645, 2016.
 - [20] E. Nilawati and F. U. Ermawati, "Dielectric Resonator Oscillator , Struktur , Mikrostruktur dan Densitasnya," *J. Fis. Unand*, vol. 10, no. 2, pp. 239–247, 2021, doi: <https://doi.org/10.25077/jfu.10.2.239-247.2021>.
 - [21] 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," vol. 12, no. 06, pp. 1–9, 2023.
 - [22] F. U. Ermawati, *Difraksi Sinar-X: Teori dan Analisis Data Eksperimen*. Surabaya: Unesa University Press, 2018.