

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI KERAMIK DIELEKTRIK $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,94}\text{Cr}_{0,06})\text{O}_3$

¹⁾Veldiana O. Putri, ²⁾Frida U. Ermawati*)

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

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

Abstrak

Keramik MgTiO_3 telah dikenal sebagai material fungsional yang memiliki permitivitas relatif sedang ($\epsilon_r \sim 17$) sehingga sering digunakan untuk aplikasi telekomunikasi pada gelombang mikro. Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan hasil fabrikasi dan karakterisasi keramik berbasis MgTiO_3 dengan komposisi baru, yaitu $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,94}\text{Cr}_{0,06})\text{O}_3$ (disingkat MTC006) yang potensial sebagai kandidat material dielektrik. Karakterisasi yang dimaksud yaitu struktur (*X-Ray Diffraction*, XRD), mikrostruktur (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*, SEM-EDX) dan densitas *bulk* (densitometer), serta permitivitas relatif (ϵ_r) (*Vector Network Analyzer*, VNA). Keramik dikompaksi dari serbuk kristalin pada tekanan 10 MPa menjadi pelet silinder berdiameter 8 mm dan disinter pada suhu 1200 °C selama 3 jam. Data struktur menunjukkan bahwa keramik MTC006 mengandung fasa utama $\text{MgTiO}_3 = 86,50\%$ berat dan sisanya fasa minor TiO_2 *rutile*, tanpa disertai fasa intermediet (MgTi_2O_5). Tidak adanya puncak difraksi yang mengandung Cr menunjukkan bahwa ion Cr^{4+} telah berhasil masuk ke dalam site Ti^{4+} dalam struktur MgTiO_3 , membentuk larutan padat substitusi MTC006. Hasil EDX menunjukkan bahwa keramik ini hanya mengandung unsur-unsur yang berasal dari bahan awalnya saja, yaitu Mg, Ti, Cr, dan O dengan rasio %berat = Mg : ($\text{Ti}_{0,94} + \text{Cr}_{0,06}$) : O = 19,121 : (21,252 + 1,361) : 58,266. Rasio tersebut mendekati stoikiometri MgTiO_3 , yaitu 1 : 1 : 3 dengan kelebihan, $\text{Ti}_{0,94} + \text{Cr}_{0,06}$ sebesar 3,191 % dari stoikiometri tersebut. Kelebihan ini ditengarai untuk membentuk fasa $(\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x)\text{O}_2$ yang dapat diindeks sebagai fasa minor TiO_2 *rutile* seperti hasil struktur di atas. Permukaan keramik terlihat padat dengan nilai densitas *bulk* sebesar 3,21 g/cm³. Nilai ϵ_r rata-rata terukur pada frekuensi 2-4 GHz sebesar 17,91. Berdasarkan semua data di atas, keramik MTC006 tersebut berpotensi menjadi material dielektrik untuk aplikasi telekomunikasi pada gelombang mikro.

Kata Kunci: keramik MTC006, mikrostruktur, permitivitas relatif, struktur

Abstract

MgTiO_3 ceramic has been known as a functional material that has a relatively moderate permittivity ($\epsilon_r \sim 17$) so it is often used for microwave telecommunications applications. In this regard, this paper reports the results of the fabrication and characterization of MgTiO_3 -based ceramics with a new composition, namely $\text{Mg}(\text{Ti}_{0,94}\text{Cr}_{0,06})\text{O}_3$ (abbreviated as MTC006) which is a potential dielectric material candidate. The characterization in question is structure (*X-Ray Diffraction*, XRD), microstructure (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive*). The ceramics were compressed from crystalline powder at a pressure of 10 MPa into cylindrical pellets with a diameter of 8 mm and sintered at a temperature of 1200 °C for 3 hours. Structural data shows that the MTC006 ceramic contains the main phase $\text{MgTiO}_3 = 86.50\%$ by weight and the remaining minor phase TiO_2 *rutile*, without an intermediate phase (MgTi_2O_5). The absence of a diffraction peak containing Cr indicates that the Cr^{4+} ion has successfully entered the Ti^{4+} site in the MgTiO_3 structure, forming a solid solution of MTC006 substitution. EDX results show that this ceramic only contains elements originating from the starting material, namely Mg, Ti, Cr, and O with a weight % ratio = Mg : ($\text{Ti}_{0,94} + \text{Cr}_{0,06}$) : O = 19.121 : (21.252 + 1.361) : 58.266. This ratio is close to the stoichiometry of MgTiO_3 , namely 1 : 1 : 3 with an excess of $\text{Ti}_{0,94} + \text{Cr}_{0,06}$ of 3.191% of the stoichiometry. This excess is suspected to form the $(\text{Ti}_{1-x}\text{Cr}_x)\text{O}_2$ phase which can be indexed as a *rutile* TiO_2 minor phase as shown in the structure above. The ceramic surface looks solid with a bulk density value of 3.21 g/cm³. The average ϵ_r value measured at the 2-4 GHz frequency is 17.91. Based on all the data above, MTC006 ceramic has the potential to become a dielectric material for microwave telecommunications applications.

Keywords: MTC006 ceramics, microstructure, relative permittivity, structure

I. PENDAHULUAN

Magnesium Titanate ($MgTiO_3$) merupakan material yang memiliki permitivitas relatif sedang ($\epsilon_r \sim 17$) sehingga banyak digunakan dalam aplikasi sistem komunikasi pada frekuensi gelombang mikro [1]. $MgTiO_3$ ini dikenal sebagai mineral *geikielite* yang memiliki struktur ilmenit dengan sistem kristal heksagonal, *space group* R-3, dan parameter kisi $a = b \neq c$, serta memiliki file difraksi serbuk *Powder Diffraction File* (PDF) dengan No. 06-494 [2].

Fabrikasi keramik $MgTiO_3$ telah dilaporkan oleh beberapa peneliti, salah satunya yaitu Nilawati & Ermawati [3] yang menggunakan ion Sn sebagai dopan Ti pada sistem $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})TiO_3$ dan disinter pada suhu 1100 °C selama 4 jam. Nilawati & Ermawati [3] melaporkan bahwa keramik tersebut mengandung fasa $MgTiO_3$ sebesar $(97,87 \pm 8,24)$ % molar dan sisanya $(2,13 \pm 0,18)$ % molar fasa TiO_2 . Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Nilawati & Ermawati [3] tersebut juga menghasilkan densitas *bulk* yaitu 2,792 g/cm³. Gogoi dkk. [4] melaporkan fabrikasi keramik $MgTiO_3$ menggunakan dopan ion Zn dalam sistem $(Mg_{1-x}Zn_x)TiO_3$ ($x = 0,01 - 0,07$) yang disinter pada 1275 °C selama 3 jam. Fasa $MgTiO_3$ teridentifikasi pada semua nilai x , namun ketika $x = 0,07$ muncul fasa intermediet $MgTi_2O_5$ yang dapat menurunkan densitas keramik dari 3,81 g/cm³ ($x = 0,01$) menjadi 3,85 g/cm³ ($x = 0,07$). Densitas ini mempengaruhi sifat dielektrik, dimana nilai ϵ_r mengalami sedikit peningkatan dari 17,18 hingga 17,34 untuk $x = 0,01-0,05$, kemudian menurun menjadi 17,25 ketika $x = 0,07$. Selanjutnya, Ermawati dkk. [5] memfabrikasi keramik $(Mg_{1-x}Zn_x)TiO_3$ dengan nilai $x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ yang disinter pada suhu 1400 °C selama 8 jam. Dilaporkan oleh Ermawati dkk. [5] bahwa fasa $MgTiO_3$ terdeteksi sebagai fasa utama untuk $x = 0,3-0,5$ yang disertai fasa Zn_2TiO_4 . Ermawati dkk. [5] mengungkapkan bahwa Zn_2TiO_4 adalah material keramik yang lebih konduktif dibandingkan $(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$, sehingga keberadaannya dalam sistem keramik $(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$ dapat merugikan karena cenderung menurunkan sifat dielektrik keramik utama. Ermawati, Izza, dan Rettiningtyas [6]–[8] juga melaporkan hasil fabrikasi $MgTiO_3$ dengan doping ion Zn^{2+} dan diperoleh fasa $MgTiO_3$ yang masih disertai fasa intermediet $MgTi_2O_5$.

Terkait hal tersebut, makalah ini melaporkan hasil fabrikasi keramik berbasis $MgTiO_3$ dengan komposisi baru yaitu $Mg(Ti_{0,94}Cr_{0,06})O_3$ (disingkat MTC006) yang disinter pada suhu 1200 °C selama 2 jam. Tujuannya adalah untuk menilai potensinya sebagai material dielektrik dalam aplikasi telekomunikasi pada frekuensi gelombang mikro, dengan mengkaji hasil karakterisasi struktur (fasa beserta komposisinya), mikrostruktur (morfologi permukaan, komposisi unsur, dan densitas *bulk*), serta nilai permitivitas relatif keramik.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Fabrikasi dan Karakterisasi

Serbuk kristalin MTC006 hasil sintesis menggunakan metode pencampuran larutan selanjutnya dikompaksi menggunakan *die press* berbentuk silinder yang berdiameter 8 mm dan *hydraulic hand press* dengan penekanan 10 MPa dan ditahan selama 10 sekon hingga terbentuk pelet. Pelet tersebut kemudian disinter pada suhu 1200 °C selama 3 jam untuk menghasilkan keramik.

Karakterisasi struktur keramik MTC006 dilakukan menggunakan difraktometer sinar-x tipe *PANalytical X'Pert Pro* dengan parameter pengukuran berupa panjang gelombang ($CuK\alpha$, $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), rentang sudut difraksi 2θ antara 15 hingga 70°, dan langkah detektor 0,02 °/min). Data struktur yang diperoleh tersebut kemudian dilakukan analisis kualitatif dengan metode *search and match* menggunakan *software Match!* untuk mengidentifikasi fasa kristal yang terbentuk pada keramik. Setelah fasa teridentifikasi selanjutnya dilakukan analisis kuantitatif dengan metode *Rietveld* menggunakan *software Rietica* untuk mendapatkan %berat, parameter kisi, dan volume sel satuan dari semua fasa yang teridentifikasi milik keramik MTC006. Karakterisasi mikrostruktur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX) tipe Thermo Scientific Phenom dengan kecepatan tegangan 10 kV dan perbesaran 12000x untuk mengetahui morfologi permukaan dan unsur-unsur yang terkandung dalam keramik MTC006. Selain itu, densitas *bulk* diukur dengan metode Archimedes menggunakan *Balance Mettler Toledo* tipe ME 403

E dan Density kit ME-DNY-43 yang diintegrasikan ke dalam perangkat lunak Hyperterminal untuk memasukkan dan membaca data keluaran

$$\rho = \frac{m_d}{m_w - m_a} \rho_a \quad (1)$$

Dimana ρ = densitas bulk keramik (g/cm^3), m_d = massa kering, m_d = massa basah, m_d = massa Archimedes, dan ρ_a = massa jenis aquades (gr/cm^3) sebagai medium.

Sedangkan karakterisasi permitivitas relatif dilakukan dengan menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) tipe "Anritsu MS46322A" untuk mengukur parameter-S (*Scattering Parameters*). Hasil pengukuran parameter-S tersebut digunakan untuk menghitung nilai permitivitas relatif dengan menggunakan metode konversi *Nicholson Ross Weir* (NRW).

B. Variabel Operasional Penelitian

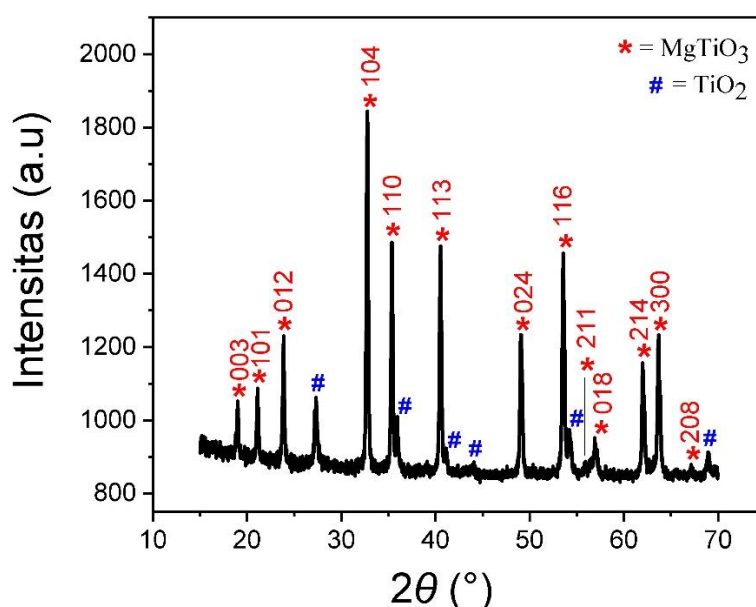
Dalam penelitian ini, variabel kontrol yang digunakan yaitu bahan awal (serbuk logam Mg, Ti, dan Cr sesuai stoikiometri), suhu dan waktu tahan kalsinasi ($800^\circ C$ selama 4 jam), suhu dan waktu tahan sinter ($1200^\circ C$ selama 4 jam), tekanan kompaksi 10 MPa, diameter *die press* (8 mm), dan ketebalan pelet (1,5 mm). Sedangkan variabel manipulasi yang digunakan yaitu karakterisasi struktur (uji XRD), karakterisasi mikrostruktur (uji SEM-EDX dan densitas *bulk*), dan karakterisasi permitivitas relatif (uji VNA). Variabel respon berupa fasa-fasa yang teridentifikasi beserta komposisinya (%berat, parameter kisi, dan volume sel satuan), morfologi permukaan dan unsur-unsur yang terkandung di dalam keramik, densitas *bulk*, serta permitivitas relatif.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi Struktur Keramik MTC006

Analisis Kualitatif (Identifikasi Fasa)

Gambar 1 menunjukkan hasil analisis kualitatif pola XRD dari keramik MTC006 yang disinter pada suhu $1200^\circ C$ selama 3 jam dengan metode *search and match* menggunakan *software Match!*.



Gambar 1. Pola XRD dari keramik MTC006 yang disinter pada suhu $1200^\circ C$ selama 3 jam.

* = $MgTiO_3$, # = TiO_2

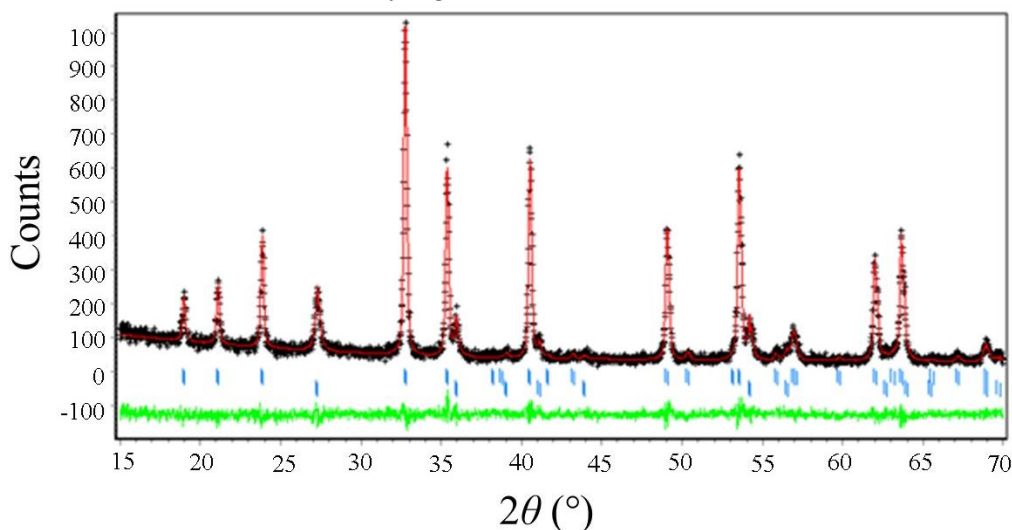
Seperti terlihat pada **Gambar 1**, keramik MTC006 yang disinter pada suhu $1200^\circ C$ selama 3 jam mengandung 2 fasa yaitu fasa utama $MgTiO_3$ *geikielite* (puncak dengan simbol "*", PDF No. 06-0494) disertai dengan fasa minor TiO_2 *rutile* (puncak dengan simbol "#", PDF No. 21-1276). Keberadaan fasa minor berupa

TiO_2 tersebut disebabkan karena reaksi pembentukan $MgTiO_3$ belum terjadi secara sempurna [9]. Selain itu, tidak ditemukan puncak difraksi dari fasa yang mengandung unsur Cr menunjukkan bahwa ion dopan Cr^{4+} yang sengaja ditambahkan pada sistem MTC006 tersebut telah masuk ke dalam sites Ti^{4+} pada struktur $MgTiO_3$ sehingga menghasilkan larutan padat substitusi (*substitutional solid solution*) MTC006.

Seperti telah disinggung di atas, Izza & Ermawati [8] melaporkan bahwa keramik $(Mg_{1,0}Zn_{0,0})TiO_3 + 4 \text{ wt\% } Bi_2O_3$ yang disinter pada suhu $1100^\circ C$ selama 4, 6, dan 8 jam menghasilkan fasa $MgTiO_3$, TiO_2 *rutile*, dan disertai fasa intermediet $MgTi_2O_5$. Keberadaan fasa $MgTi_2O_5$ tersebut kemungkinan besar berasal dari reaksi antara $MgTiO_3 + TiO_2 \rightarrow MgTi_2O_5$ akibat bertambahnya waktu tahan sinter dari 4 dan 6 jam menjadi 8 jam. Rettiningtyas & Ermawati [6] yang melakukan fabrikasi keramik $(Mg_{0,8}Zn_{0,2})TiO_3 + 2 \text{ wt\% } Bi_2O_3$ dan disinter pada suhu $1100^\circ C$ selama 8 jam juga menghasilkan fasa utama $MgTiO_3$ dan TiO_2 yang disertai fasa intermediet $MgTi_2O_5$. Selain itu, Ermawati dkk. [7] juga melaporkan terbentuknya fasa intermediet $MgTi_2O_5$ yang menyertai pembentukan fasa utama $MgTiO_3$ pada sampel keramik $(Mg_{1-x}Zn_x)TiO_3$ ($x = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$; dan $0,5$) yang disinter pada suhu $1300^\circ C$ selama 8 jam. Keberadaan fasa intermediet tersebut telah memperlambat proses penyusutan keramik sehingga mengurangi densitas *bulk* keramik yang berakibat pada penurunan sifat dielektrik keramik, yaitu permitivitas relatif (ϵ_r). Dengan demikian, keramik MTC006 ini berpotensi menghasilkan material keramik dengan sifat dielektrik yang baik untuk aplikasi sistem telekomunikasi.

Analisis Kuantitatif (Komposisi Fasa)

Gambar 4.2 menampilkan hasil penghalusan (*refinement*) pola XRD keramik MTC006 pada **Gambar 1** dengan metode *Rietveld* menggunakan *software* Rietica. **Tabel 1** merangkum parameter-parameter kesesuaian (*Figure-of-Merit*, FoM) dan komposisi fasa (%berat, parameter kisi, dan volume sel satuan) dari proses *refinement* pada **Gambar 2** milik semua fasa yang telah teridentifikasi.



Gambar 2. Hasil penghalusan (*refinement*) pola XRD keramik MTC006 pada **Gambar 1** dengan metode *Rietveld* menggunakan *software* Rietica.

Tabel 1. Rangkuman parameter-parameter kesesuaian (*Figure-of-Merit*, FoM) dan komposisi fasa (%berat, parameter kisi, dan volume sel satuan) dari proses *refinement* pada **Gambar 2** milik semua fasa yang telah teridentifikasi.

FoM		Fasa	%berat	Parameter Kisi (10^{-1} nm)		Volume Sel Satuan (10^{-1} nm)
R_p	9,35	$MgTiO_3$	$86,50 \pm 1,66$	$a=b$	$5,05 \pm 0,00$	
R_{wp}	12,65				$307,08 \pm 0,10$	
R_{exp}	11,05			c	$13,89 \pm 0,00$	

FoM		Fasa	%berat	Parameter Kisi (10^{-1} nm)	Volume Sel Satuan (10^{-1} nm)
χ^2	1,31	TiO ₂	13,50 $\pm$ 0,38	$a=b$	62,41 $\pm$ 0,01
R_B (MgTiO ₃)	2,22			4,59 $\pm$ 0,00	
R_B (TiO ₂)	3,99			c 2,95 $\pm$ 0,00	

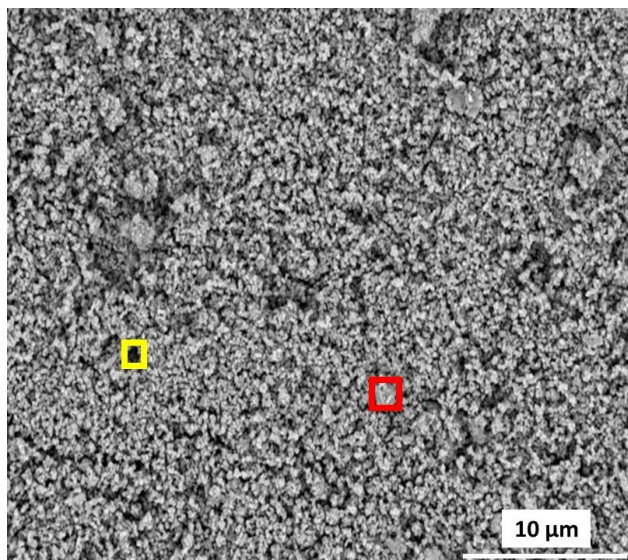
Seperti terlihat pada **Gambar 2**, simbol “+” menunjukkan kurva difraksi terukur (eksperimen), sedangkan garis merah menggambarkan kurva difraksi terhitung (model). Kurva merah tersebut dibuat dengan cara mengumpulkan data-data kristalografi berupa parameter kisi, *phase scale*, dan posisi atom berdasarkan sumbu kristal a, b, c milik semua fasa yang teridentifikasi yaitu fasa MgTiO₃ dan TiO₂ *rutile*. Data-data tersebut diperoleh dari *database Powder Diffraction File* (PDF) dan *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD), dimana untuk fasa MgTiO₃ *geikielite* dengan PDF No. 06-0494 dan ICSD No. 657954 serta fasa TiO₂ *rutile* dengan PDF No. 21-1276 dan ICSD No. 64987. Selanjutnya garis vertikal biru di bawah kurva terukur dan kurva terhitung menunjukkan posisi puncak Bragg dari kedua fasa yang teridentifikasi, sedangkan garis hijau menggambarkan selisih intensitas antara kurva terukur dengan kurva terhitung. Seperti terlihat, garis hijau tersebut berbentuk garis horizontal dengan perbedaan intensitas puncak yang kecil pada beberapa posisi 2θ yang menunjukkan proses *refinement* berhasil dilakukan.

Selain itu, dengan melihat data-data parameter kesesuaian pada **Tabel 1**, ternyata untuk semua fasa yang teridentifikasi nilai *profile residual* (R_p), *weighted profile residual* (R_{wp}), dan *expected residual* (R_{exp}) menunjukkan nilai di bawah 18%, *chi squared* (χ^2) menunjukkan nilai di bawah 3% serta *Bragg residual* (R_B) menunjukkan nilai di bawah 8%. Hasil *refinement* tersebut sesuai dengan yang diungkapkan oleh Toby [10] yang menyatakan bahwa parameter-parameter dapat diterima apabila nilai R_p , R_{wp} dan R_{exp} kurang dari 20%, R_B kurang dari 10%, dan χ^2 kurang dari 4%. Dengan demikian, penghalusan *Rietveld* berhasil dilakukan dan data output yang berupa %berat, parameter kisi, dan volume sel satuan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

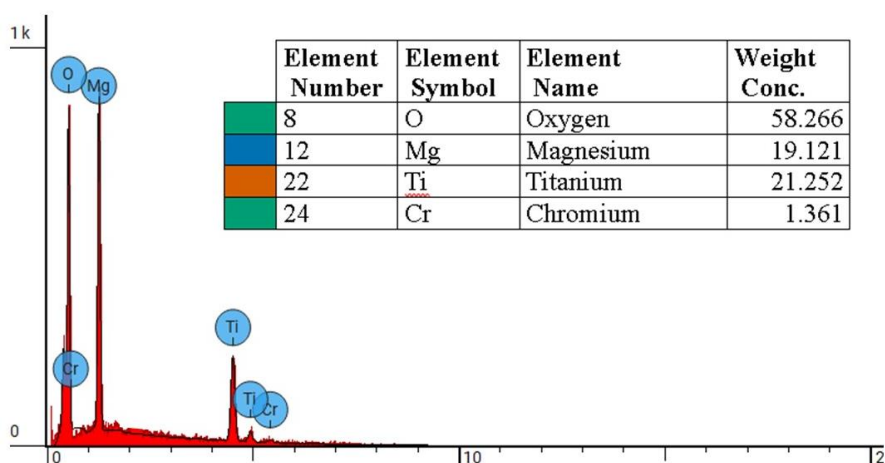
Selanjutnya **Tabel 1** juga menunjukkan bahwa keramik MTC006 mengandung fasa MgTiO₃ sebesar (86,50 $\pm$ 1,66) %berat dan sisanya (13,50 $\pm$ 0,38) %berat fasa TiO₂ *rutile*. Data %berat yang diperoleh pada penelitian ini tidak berbeda signifikan dari data %berat pada sampel MgTiO₃-CaTiO₃ (MT-CT) dengan rasio (Mg+Ca) : Ti = 1,04 : 1 yang dilaporkan oleh Kartika & Pratapa [11]. Dalam publikasinya, Kartika & Pratapa [11] tersebut, dari semua fasa yang teridentifikasi, menghasilkan %berat yaitu sebesar 83,7 % (MgTiO₃), 8,4 % (CaTiO₃), 4,0 % (TiO₂ *rutile*), dan 3,9 % (MgO *periklase*). Sedangkan Farisa [12] melaporkan bahwa pada sampel Zn_{0,5}Mg_{0,5}TiO₃ (ZMT) dengan rasio (Zn+Mg) : Ti = 1,03 : 1 mengandung fasa MgTiO₃ sebesar 77,7 %berat dan fasa TiO₂ *rutile* sebesar 22,3 %berat. Dengan demikian %berat fasa MgTiO₃ yang diperoleh pada penelitian ini lebih baik, yaitu 86,50 %berat dan sisanya untuk fasa TiO₂ *rutile*. Selain itu, pada penelitian ini nilai parameter kisi fasa MgTiO₃ yang dihasilkan yaitu $a = b = 5,05 \pm 0,00$ ($\times 10^{-1}$ nm) dan $c = 13,89 \pm 0,00$ ($\times 10^{-1}$ nm) serta volume sel satuan sebesar 307,08 $\pm$ 0,10 ($\times 10^{-1}$ nm). Data parameter kisi dan volume sel satuan yang diperoleh dalam penelitian ini juga relatif sama seperti yang dilaporkan oleh Muammar & Ermawati [13]. Dalam publikasinya, Muammar & Ermawati [13] tersebut melaporkan bahwa nilai parameter kisi $a = b$ dan c fasa MgTiO₃ pada keramik (Mg_{0,5}Zn_{0,5})TiO₃ yang disinter pada suhu 1300 °C selama 8 jam yaitu masing-masing sebesar 5,06 dan 13,89 ($\times 10^{-1}$ nm) serta volume sel satuan sebesar 307,96 ($\times 10^{-1}$ nm). Hal serupa juga dilaporkan oleh Jo dkk. [14], dimana nilai parameter kisi $a = b$ fasa MgTiO₃ yang dihasilkan pada keramik (Mg_{0,95}Zn_{0,05})TiO₃ yang disinter pada suhu 1400 °C selama 4 jam yaitu 5,05 $\times 10^{-1}$ nm dan parameter kisi $c = 13,90 \times 10^{-1}$ nm dengan volume sel satuan 307,81 $\times 10^{-1}$ nm.

B. Karakterisasi Mikrostruktur Keramik MTC006 SEM-EDX

Gambar 3 menunjukkan morfologi permukaan keramik MTC006 yang diukur menggunakan SEM pada 10 kV dengan perbesaran 12000x. Sedangkan **Gambar 4** menampilkan hasil analisis EDX yang menunjukkan unsur-unsur yang terkandung dalam keramik MTC006



Gambar 3. Morfologi permukaan keramik MTC006 yang diukur menggunakan SEM pada 10 kV dengan perbesaran 12000x



Gambar 4. Hasil analisis EDX yang menunjukkan unsur-unsur yang terkandung dalam keramik MTC006

Pada **Gambar 3**, permukaan keramik MTC006 terlihat padat dan terdiri dari butiran (kotak berwarna merah) dan pori-pori (kotak berwarna kuning). Keramik hanya mengandung unsur-unsur yang berasal dari bahan awalnya saja, yaitu Mg, Ti, Cr dan O. Hal ini memastikan bahwa *purity* keramik MTC006 selama proses fabrikasi berlangsung tidak terganggu. Data rasio %berat Mg : $(Ti_{0,94}Cr_{0,06})$: O diberikan dalam **Persamaan 2**, sedangkan %berat ideal diberikan dalam **Persamaan 3**.

$$Mg : (Ti_{0,94} + Cr_{0,06}) : O = 19,121 : (21,252 + 1,361) : 58,266 = 19,121 : 22,613 : 58,266 \quad (2)$$

$$\text{Rasio \%berat ideal adalah } \approx 19,442 : 19,442 : 58,266 = 1 : 1 : 3 \quad (3)$$

Rasio %berat Mg : $(Ti_{0,94} + Cr_{0,06})$: O yang dihasilkan pada **Persamaan 2** tersebut mendekati stoikiometri $MgTiO_3$ yaitu 1 : 1 : 3. Namun, pada **Persamaan 3** menunjukkan bahwa %berat unsur $Ti_{0,94} + Cr_{0,06}$ berlebihan sebesar $(22,613 - 19,442) \% = 3,191 \%$. Ekstra 3,191 % tersebut artinya selain dari fasa $MgTiO_3$, unsur Ti dan Cr ditengarai juga digunakan untuk membentuk fasa $(Ti_{1-x}Cr_x)O_2$ atau dapat diindeks sebagai TiO_2 *rutile*. Mengingat fasa minor $(Ti_{1-x}Cr_x)O_2$ merupakan fasa yang tidak diinginkan, maka nilai x tidak dapat ditentukan

(karena unsur pembangun TiO_2 tidak ditimbang saat proses sintesis). Jadi penambahan Cr itu tidak hanya menjadikan larutan padat untuk fasa $MgTiO_3$ saja tetapi juga untuk fasa TiO_2 .

Densitas Bulk

Tabel 2 merangkum perbandingan nilai densitas *bulk* dari beberapa komposisi keramik dielektrik berbasis $MgTiO_3$.

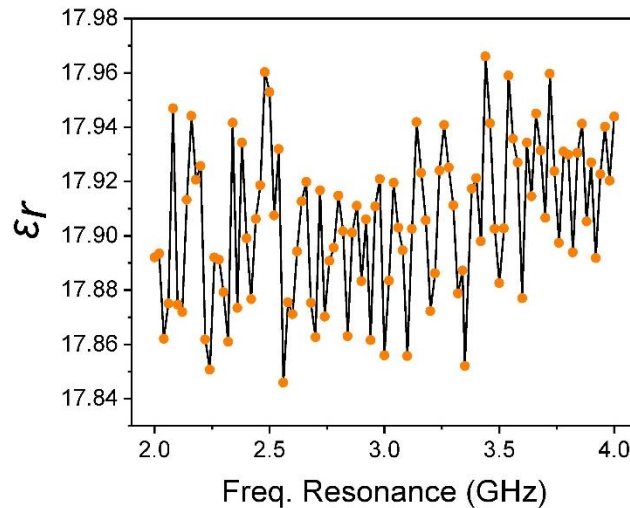
Tabel 2. Perbandingan nilai densitas *bulk* pada beberapa keramik dielektrik $MgTiO_3$

Sampel	Suhu dan Waktu Tahan Sinter	Densitas Bulk ~ (gr/cm ³)	Referensi
$Mg(Ti_{0,94}Cr_{0,06})O_3$	1200 °C selama 3 jam	3,21	Penelitian ini
$(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3 + 2wt. \% Bi_2O_3$	1000 °C, 4 jam	2,93	[15]
	1100 °C, 4 jam	2,83	
	1200 °C, 4 jam	2,74	
$(Mg_{1,0}Zn_{0,0})TiO_3 + 4 wt \% Bi_2O_3$	1100 °C, 4 jam	2,74	[8]
	1100 °C, 6 jam	2,70	
	1100 °C, 8 jam	2,60	
$(Mg_{0,5}Zn_{0,5})TiO_3$	1300 °C, 6 jam	2,75	[13]
	1300 °C, 8 jam	2,84	
	1300 °C, 10 jam	2,99	
$(Mg_{0,6}Zn_{0,4})TiO_3$	1300 °C, 6 jam	2,51	[16]
	1300 °C, 8 jam	2,82	
	1300 °C, 10 jam	3,04	

Seperti terlihat pada **Tabel 2**, dari semua komposisi keramik berbasis $MgTiO_3$ memiliki nilai densitas *bulk* berkisar 2,51-3,21 gr/cm³ meskipun dengan doping yang berbeda-beda. Dalam penelitian ini, memiliki nilai densitas *bulk* keramik lebih besar (3,21 gr/cm³) dengan suhu sinter yang lebih rendah (1200 °C) dari penelitian yang dilakukan oleh Muammar dan Maulana [13], [16]. Sedangkan, nilai densitas *bulk* yang dilaporkan oleh Izza dan Kadarosman [8], [15] lebih rendah berkisar 2,60-2,93 gr/cm³ dengan waktu tahan sinter lebih tinggi yaitu 4 jam dibanding dengan waktu tahan sinter yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan demikian, apabila ditinjau dari segi suhu dan waktu tahan sinter yang digunakan, keramik MTC006 memiliki nilai densitas *bulk* yang relatif lebih besar dari keempat penelitian lain yang ditunjukkan pada **Tabel 2**. Nilai densitas *bulk* yang besar menandakan bahwa selama proses sinter berlangsung, butir-butir akan mengalami pergerakan lebih besar yang kemudian akan saling mendekati satu sama lain, sehingga porositas semakin berkurang yang menunjukkan bahwa jarak antar butir semakin rapat [17].

C. Karakterisasi Permittivitas Relatif

Gambar 5 menunjukkan data pengukuran permitivitas relatif (ϵ_r) keramik MTC006. Sedangkan **Tabel 3** merangkum perbandingan nilai ϵ_r dari beberapa komposisi keramik dielektrik berbasis $MgTiO_3$ yang terukur pada frekuensi tertentu.



Gambar 5. Nilai permitivitas relatif keramik MTC006 yang terukur pada frekuensi 2-4 GHz

Tabel 3. Perbandingan nilai permitivitas relatif (ϵ_r) pada beberapa keramik dielektrik $MgTiO_3$

Sampel	Suhu dan Waktu Tahan Sinter	$\sim \epsilon_r$ (frekuensi pengukuran)	Referensi
$Mg(Ti_{0,94}Cr_{0,06})O_3$	1200 °C, 3 jam	17,91 (2-4 GHz)	Penelitian ini
$MgTiO_3$	1050 °C, 2 jam	16,2 (10 GHz)	[18]
$MgTiO_3$	1400 °C, 4 jam	17,26 (7,5 GHz)	[19]
$Mg(Ti_{0,98}Hf_{0,02})O_3$		17,12 (7,5 GHz)	
$Mg(Ti_{0,95}Hf_{0,05})O_3$		17,55 (7,5 GHz)	
$Mg(Ti_{0,90}Hf_{0,10})O_3$		17,20 (7,5 GHz)	
$MgTiO_3$	1400 °C, 3 jam	14,47 (200 KHz)	[20]
$MgTiO_3+1wt.\% Bi_2O_3$		17,13 (200 KHz)	
$MgTiO_3+2wt.\% Bi_2O_3$		18,28 (200 KHz)	
$MgTiO_3+3wt.\% Bi_2O_3$		18,05 (200 KHz)	
$MgTiO_3+4wt.\% Bi_2O_3$		17,98 (200 KHz)	
$MgTiO_3$	1200 °C, 3 jam	16,24 (10-100 kHz)	[21]
$Mg_5TiO_3-0,04SrTiO_3$		16,44(10-100 kHz)	
$0,96Zn_{0,95}Mg_{0,05}TiO_3-0,04SrTiO_3$		17,43 (10-100 kHz)	
$0,96Zn_{0,92,5}Mg_{0,07,5}TiO_3-0,04SrTiO_3$		18,23 (10-100 kHz)	

Seperti terlihat pada **Gambar 5**, pengukuran permitivitas relatif keramik MTC006 dilakukan secara kontinu yaitu pada rentang frekuensi 2-4 GHz. Sedangkan **Tabel 3** merangkum perbandingan nilai ϵ_r dari 15 macam komposisi keramik dielektrik berbasis $MgTiO_3$ dengan fasa utama $MgTiO_3$. Nilai ϵ_r yang terukur untuk $MgTiO_3$ tanpa doping berkisar 14,47-17,26, sementara yang menggunakan doping (baik Cr, Hf, B_2O_3 , Zn dan $SrTiO_3$) berkisar 16,44-18,28, dengan frekuensi pengukuran yang berbeda. Nilai ϵ_r yang dengan doping ternyata relatif lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa doping. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penambahan dopan berpengaruh positif terhadap peningkatan nilai ϵ_r sehingga dapat menciptakan material dengan sifat dielektrik yang lebih baik daripada material asalnya. Selain itu, penelitian ini mampu menghasilkan nilai ϵ_r rata-rata yaitu sebesar 17,91 dengan frekuensi yang lebih tinggi (2-4 GHz) dari penelitian yang dilakukan oleh Sharma [21], meskipun menggunakan suhu dan waktu tahan sinter yang sama yaitu 1200

°C selama 3 jam. Nilai ϵ_r ini berkaitan dengan data %berat fasa $MgTiO_3$ sebagai fasa utama serta data densitas *bulk* keramik MTC006 yang telah dibahas sebelumnya. Sedangkan untuk data yang sama, nilai ϵ_r tersebut dapat dijangkau namun dengan menggunakan suhu dan waktu tahan sinter yang lebih tinggi yaitu 1400 °C selama 3 dan 4 jam [19], [20]. Berdasarkan data-data tersebut menunjukkan bahwa keramik $MgTiO_3$ merupakan material dielektrik yang baik karena memiliki nilai ϵ_r yang dapat terukur pada berbagai frekuensi.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Pekerjaan fabrikasi dan karakterisasi keramik MTC006 yang disinter pada suhu 1200 °C selama 3 jam berhasil dilakukan. Keramik tersebut mengandung fasa utama $MgTiO_3$ 86,50 %berat dan sisanya fasa minor TiO_2 *rutile*, tanpa disertai fasa intermediet ($MgTi_2O_5$). Tidak adanya puncak difraksi yang mengandung Cr menunjukkan bahwa ion Cr^{4+} telah berhasil masuk ke dalam site Ti^{4+} dalam struktur $MgTiO_3$, membentuk larutan padat substitusi MTC006. Unsur-unsur yang terkandung di dalam keramik hanya berawal dari bahan awalnya saja, yaitu Mg, Ti, Cr, dan O dengan rasio %berat = Mg : ($Ti_{0,94} + Cr_{0,06}$) : O = 19,121 : (21,252 + 1,361) : 58,266. Rasio tersebut mendekati stoikiometri $MgTiO_3$, yaitu 1 : 1 : 3 dengan kelebihan, $Ti_{0,94} + Cr_{0,06}$ sebesar 3,191 % dari stoikiometri tersebut. Kelebihan ini ditengarai untuk membentuk fasa $(Ti_{1-x}Cr_x)O_2$ yang dapat diindeks sebagai fasa minor TiO_2 *rutile* seperti hasil struktur di atas. Permukaan keramik terlihat padat dengan nilai densitas *bulk* sebesar 3,21 g/cm³. Nilai ϵ_r rata-rata terukur pada frekuensi 2-4 GHz yaitu sebesar 17,91. Berdasarkan data di atas, keramik MTC006 tersebut berpotensi menjadi material dielektrik untuk aplikasi telekomunikasi pada gelombang mikro.

B. Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut dengan melakukan karakterisasi DRO seperti uji frekuensi resonansi, *output power*, *bandwidth*, dan *phase noise* pada keramik MTC006. Tujuannya adalah agar data karakteristik keramik MTC006 menjadi lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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.
- [2] V. S. Samyuktha, T. S. Rao, and R. P. Suvarna, "Synthesis and Dielectric Properties of $MgTiO_3$ Ceramic Material," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V5, no. 05, pp. 245–249, 2016, doi: 10.17577/ijertv5is050349.
- [3] E. Nilawati and F. U. Ermawati, "Karakterisasi Keramik ($Mg_{0,8}Zn_{0,2}$) TiO_3 +4wt% Bi_2O_3 sebagai Material Dielectric Resonator Oscillator, Struktur, Mikrostruktur dan Densitasnya," *J. Fis. Unand*, vol. 10, no. 2, pp. 239–247, 2021, doi: 10.25077/jfu.10.2.239-247.2021.
- [4] 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.
- [5] F. U. Ermawati, S. Suasmoro, F. U. Ermawati, S. Pratapa, T. Hübert, and U. Banach, "Preparation and Structural Study of $Mg_{1-x}Zn_xTiO_3$ Ceramics and Their Dielectric Properties from 1 Hz to 7.7 GHz," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 27, no. 7, pp. 6637–6645, 2016, doi: 10.1007/s10854-016-4610-6.
- [6] N. Retningtyas and F. U. Ermawati, "Sintesis Dan Fabrikasi Keramik ($Mg_{0,8}Zn_{0,2}$) TiO_3 + 2 wt% Bi_2O_3 Sebagai Bahan Dielektrik serta Karakterisasi Struktur dan Densitasnya Akibat Variasi Waktu Tahan Sinter," *Inov. Fis. Indones.*, vol. 9, no. 2, pp. 25–33, 2020, doi: 10.26740/ifi.v9n2.p25-33.
- [7] F. U. Ermawati, Z. A. Supardi, S. Suasmoro, S. Pratapa, and T. Hubert, "Contribution of Relaxation Effect to the Permittivity of $Mg_{1-x}Zn_xTiO_3$ Ceramics Contribution of Relaxation Effect to the Permittivity of $Mg_{1-x}Zn_xTiO_3$ Ceramics," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/367/1/012003.
- [8] L. Izza and F. U. Ermawati, "Characterization of ($Mg_{1,0}Zn_{0,0}$) TiO_3 +4 wt% Bi_2O_3 Ceramics for Application as Resonator in Dielectric Resonator Oscillator Circuit," *J. Ilmu Fis. | Univ. Andalas*, vol. 13, no. 2, pp.

- 62–69, 2021, doi: 10.25077/jif.13.2.62-69.2021.
- [9] D. I. Yulianti and F. U. Ermawati, "Analisis Struktur dan Mikrostruktur Fasa Tunggal $(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3/Bi_2O_3$," *J. Inov. Fis. Indones.*, vol. 8, no. 02, pp. 17–22, 2019.
 - [10] B. H. Toby, "R Factors in Rietveld Analysis: How Good is Good Enough?," *Powder Diff.*, vol. 21, no. 1, pp. 67–70, 2006, doi: 10.1154/1.2179804.
 - [11] L. D. Kartika and S. S. Pratapa, "Sintesis $MgTiO_3-CaTiO_3$ (MT-CT) dengan Memanfaatkan Kapur Alam dan Metode Pencampuran Larutan," *J. Sains Dan Seni Its*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, 2012.
 - [12] A. Farisa, "Ana Farisa dan Suminar Pratapa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111," *J. Sains dan Seni*, vol. 1, no. 1, pp. 63–65, 2012.
 - [13] 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, pp. 71–85, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.29303/ip>
 - [14] H. J. Jo, J. S. Kim, and E. S. Kim, "Microwave Dielectric Properties of $MgTiO_3$ -based Ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 41, no. S1, pp. S530–S536, 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2015.03.142.
 - [15] A. Kadarosman and F. U. Ermawati, "The Use of $(Mg_{0,9}Zn_{0,1})TiO_3+2wt.\% Bi_2O_3$ 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.
 - [16] 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, pp. 11–28, 2022, doi: 10.21009/spektra.071.02.
 - [17] M. Masrukan and M. Mujinem, "Pengaruh Proses Sintering Terhadap Perubahan Densitas, Kekerasan dan Mikrostruktur Pelet U-ZrHx," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 22, no. 1, pp. 25–34, 2016, doi: 10.17146/urania.2016.22.1.2742.
 - [18] 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.
 - [19] Z. Ren *et al.*, "Enhanced Quality Factor ($\sim 336,800$ GHz) of $MgTiO_3$ Ceramic by Hf Substitution for Ti-site," *Ceram. Int.*, vol. 50, no. 6, pp. 9861–9868, 2024, doi: 10.1016/j.ceramint.2023.12.308.
 - [20] X. Jia, S. Mao, L. Tian, S. Chen, G. Li, and W. Gao, "Effect of B_2O_3 Doping on Sintering Properties of Nanometer Mn-Zn Ferrites," *J. Synth. Cryst.*, vol. 47, no. 9, pp. 1–7, 2018.
 - [21] K. Sharma, H. Kaur, and S. Bahel, "Impact of Zn Substitution on Structural and Dielectric Properties of $0.96Zn_xMg_{1-x}TiO_3-0.04SrTiO_3$ Ceramics," *SSRN Electron. J.*, pp. 1–19, 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4046764>.