

## PENGUKURAN PERMITIVITAS KOMPLEKS MATERIAL MAGNETIK MENGGUNAKAN METODE S-PARAMETER DENGAN PENDEKATAN NICOLSON ROSE-WEIR

Priyono<sup>1,2</sup>, Nur Abidin<sup>1</sup>, dan Iis Nurhasanah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Program studi D3 Instrumentasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

E-mail: [priyonocp@gmail.com](mailto:priyonocp@gmail.com)

### ABSTRACT

Dielectric properties of material are important properties because it describes the interaction of material with electromagnetic waves. The complex permittivity value of material is interesting because it can represent on how much energy savings and dissipation when the material gets exposed to electromagnetic waves. The aim of this paper was to determine complex permittivity by Nicolson-Ross-Weir (NWR) method. The NWR method was based on the phenomenon of reflection and transmission of electromagnetic wave that drip on materials. The values of the reflection coefficient ( $\Gamma$ ) and the transmission coefficient ( $T$ ) were derived from reflection ( $S_{11}$ ) and transmission ( $S_{12}$ ) parameters. Determination of real permittivity in the frequency range of 10 GHz to 15 GHz of  $BaFe_{12}O_{19}$  material was  $\epsilon' = 4.36$  and  $\epsilon'' = 6.23$ . The second sample was  $BaFe_9(MnCo)_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$ , the values of  $\epsilon' = 5.49$ , while  $\epsilon'' = 9.35$ . From the two test materials, it was revealed that in the frequency range of 10 GHz to 15 GHz, absorption did not occur in  $BaFe_{12}O_{19}$ , while in  $BaFe_9(MnCo)_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$  absorption occurred at 13.0 GHz.

Keywords: Ferromagnetic, S-parameter, complex permittivity

### ABSTRAK

Sifat dielektrik pada material merupakan sifat penting yang menggambarkan interaksi material dengan gelombang elektromagnetik. Nilai permitivitas kompleks menjadi menarik karena dapat mewakili seberapa besar simpanan energi dan disipasinya apabila material tersebut mendapatkan paparan gelombang elektromagnetik. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan permitivitas bahan ferromagnetik. Bahan ferromagnetik lebih banyak diteliti permeabilitas magnetnya daripada permitivitasnya karena sifat magnetiknya lebih dominan. Dengan menggunakan metode Nicolson-Ross-Weir (NRW) yang memanfaatkan parameter hamburan yang biasa disebut S-parameter. S-parameter diperoleh dari alat Vector Network Analyzer (VNA) dengan parameter refleksi  $S_{11}$  dan parameter transmisi  $S_{12}$ . Kedua parameter ini akan memberikan nilai koefisien refleksi ( $\Gamma$ ) dan koefisien transmisi ( $T$ ) untuk menentukan nilai nilai permitivitas kompleks. Penentuan permitivitas kompleks pada rentang frekuensi 10 GHz – 15 GHz pada bahan  $BaFe_{12}O_{19}$  diperoleh  $\epsilon' = 4.36$  dan  $\epsilon'' = 6.23$ . Sedangkan pada bahan  $BaFe_9(MnCo)_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$  diperoleh  $\epsilon' = 5.49$  dan  $\epsilon'' = 9.35$ . Dari kedua material uji diperoleh hasil bahwa dalam rentang frekuensi 10 GHz hingga 15 GHz, pada bahan  $BaFe_{12}O_{19}$  tidak terjadi serapan gelombang elektromagnetik, sedangkan pada  $BaFe_9(MnCo)_{1.5}Ti_{1.5}O_{19}$  terjadi serapan pada frekuensi 13,0 GHz.

Keyword: ferromagnetik, S-parameter, NRW, permitivitas kompleks

## PENDAHULUAN

Penelitian tentang permitivitas dan permeabilitas kompleks pada bahan magnetik dan dielektrik sangat berguna untuk mengetahui sifat-sifat kelistrikan dan kemagnetan material terhadap respon gelombang elektromagnetik. Sifat Dielektrik material sangat bergantung kepada frekuensi, homogenitas dan anisotropi serta kekasaran permukaan bahan [1, 2]. Material yang memiliki respon cukup signifikan terhadap adanya perubahan frekuensi gelombang elektromagnetik tertentu dapat menjadi indikator bahwa material tersebut dapat dimanfaatkan untuk aplikasi tertentu seperti untuk perangkat elektronik, industri penerbangan, telekomunikasi dan lain sebagainya. Pengukuran permitivitas dan permeabilitas kompleks dapat dilakukan dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik menggunakan sistem transmisi langsung kabel *coaxial* atau dapat dilakukan menggunakan radiofrekuensi (RF) dengan rentang dari frekuensi radio hingga gelombang mikro. Selama dekade terakhir, telah banyak dilaporkan penelitian yang berhubungan dengan pengukuran permitivitas kompleks menggunakan sumber gelombang elektromagnetik ekstra tinggi (orde GHz – THz) dengan berbagai metode yang dikembangkan agar hasil pengukuran memiliki presisi dan akurasi tinggi [3]. Untuk mendapatkan hasil presisi dan akurasi yang baik, faktor kalibrasi menjadi masalah tersendiri dalam pengukuran. Dengan berbagai metode yang telah dikembangkan, dapat diperoleh hasil yang paling sesuai dan dapat dipertanggung-jawabkan.

Pemanfaatan gelombang mikro dalam orde GHz atau yang lebih tinggi, pada akhir dasawarsa abad ke duapuluh dan memasuki abad ke duapuluh satu, semakin banyak dieksploitasi oleh industri, khususnya yang berhubungan dengan bidang telekomunikasi tanpa kabel (RF). Hal ini disebabkan karena kejenuhan pada pita frekuensi yang lebih

rendah sehingga sangat mudah terjadi interferensi elektromagnetik (EMI) dan kompatibilitas elektromagnetik (EMC) [4, 5].

Permitivitas kompleks merupakan kuantitas fisis yang dapat digunakan untuk menggambarkan sifat dielektrik yang dapat mempengaruhi pantulan dan transmisi gelombang elektromagnetik pada bahan serta energi yang hilang karena terdisipasinya gelombang elektromagnetik akibat serapan oleh material tersebut. Besarnya permitivitas kompleks material dielektrik dapat dirumuskan:

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

Dengan  $\varepsilon'$  sebagai nilai permitivitas real sedangkan  $\varepsilon''$  sebagai nilai permitivitas imajiner dan  $i$  mewakili nilai  $\sqrt{-1}$ . Berbagai metode untuk menentukan nilai permitivitas kompleks telah banyak dilakukan antara lain dengan metode *coaxial line* (CL), Metode *Resonator dielectric* dan metode *Nicolson-Ross-Weir* (NWR) [6,7] yang memanfaatkan pergeseran dari domain waktu (*time domain*) ke domain frekuensi (*frequency domain*) yang melibatkan satu *port* terminal ataupun dua *port* terminal menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA). VNA adalah sebuah analisator gelombang elektromagnetik dengan sumber gelombang yang berada dalam satu perangkat sehingga tidak terjadi pergeseran fasa saat dilakukan pengukuran. Sehingga pengukuran dengan menggunakan perangkat ini jauh lebih baik daripada perangkat lain seperti menggunakan analisa spektrum (*spectrum analyzer*). Dengan perangkat tersebut dapat digunakan untuk menghitung permitivitas kompleks serta besaran-besaran fisis lain dengan lebih baik [8].

Prinsip dasar dari teknik ini adalah pengukuran pada gelombang datang, transmisi dan pemantulan atau refleksi yang berjalan sepanjang jalur transmisi.

Parameter elektromagnetik dapat diperoleh dari parameter hamburan (S-Parameter) dari sumber yang dikeluarkan oleh satu *port* ataupun *multiport*. Pendekatan lintasan transmisi dapat digunakan untuk mengetahui sifat-sifat gelombang elektromagnetik dan dapat digunakan untuk melihat fenomena lintasan gelombang pada material, sehingga dapat digunakan untuk menentukan permitivitas kompleks material pada cakupan frekuensi yang diinginkan. Apabila menggunakan sistem dua *port*, maka pengukuran koefisien refleksi dan transmisi yang memiliki empat keluaran S-parameter cukup diambil dua keluaran  $S_{11}$  dan  $S_{21}$ , sedangkan  $S_{12}$  dan  $S_{22}$  hanya digunakan sebagai pembanding saja [9].

Dengan menganggap bahwa material uji yang biasa disebut dengan *Material under test* (MUT) bersifat isotrop maka nilai sehingga dengan asumsi tersebut keluaran dari  $S_{22}$  dan  $S_{21}$  hanya digunakan sebagai pembanding saja. Batasan-batasan sebagai material yang diuji (MUT) pada pandu gelombang harus didefinisikan dengan jelas, sedangkan *output* keluaran harus terlebih dahulu dikalibrasi dengan metode *transmission through-line* (TRL) sehingga nilai S parameter dapat diukur dengan akurat [10, 11].

Untuk menentukan koefisien refleksi  $\Gamma$  dapat ditentukan dengan persamaan (2), sedangkan koefisien transmisi T ditentukan dengan persamaan (4).

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2)$$

$$K = \frac{\{S_{11}^2(\omega) - S_{21}^2(\omega)\} + 1}{2S_{11}(\omega)} \quad (3)$$

Besarnya koefisien transmisi setelah gelombang menembus material dirumuskan sebagai:

$$T = \frac{\{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\} - \Gamma}{1 - \{S_{11}(\omega) + S_{21}(\omega)\}\Gamma} \quad (4)$$

Dari persamaan (1), (2), (3) dan (4) yang menggambarkan koefisien transmisi T dan besar koefisien refleksi  $\Gamma$  sangat berhubungan dengan material yang dilewatinya (MUT) yang kuantitasnya berhubungan dengan nilai besaran permitivitas dan permeabilitas kompleks dari bahan yang memenuhi persamaan (5).

$$\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)^2 \quad (5)$$

Sehingga untuk kasus perambatan dalam pandu gelombang dan dengan menganggap bahwa gelombang merambat dalam ruang persegi dengan panjang gelombang *cut-of* ( $\lambda_c$ ) sesuai dan bergantung pada dimensi pandu gelombang (*waveguide*) yang digunakan. Apabila panjang sampel dari MUT diwakili sebesar L maka diperoleh nilai permitivitas kompleks sesuai dengan persamaan (6).

$$\epsilon_r = \frac{\left(\frac{1-\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2 \lambda_0^2}{\mu_r} \quad (6)$$

dengan

$$\frac{1}{\alpha^2} = - \left[ \frac{1}{2\pi L} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (7)$$

## METODE PENELITIAN

Metode yang penting untuk menentukan permitivitas kompleks yang didasarkan pada nilai parameter hamburan (S-parameter) dari pandu gelombang, dengan menganggap gelombang elektromagnetik merambat dengan murni transversal elektromagnetik (TEM) [12]. S-Parameter merupakan signal hamburan yang ditransmisikan dalam perangkat VNA yang menggambarkan karakteristik sebuah perangkat *waveguide* dengan MUT dengan ukuran 1,8 x 2,1 cm<sup>2</sup> dan ketebalan 4,5 mm dipasang diantara *waveguide* WR-75 yang telah dikalibrasi sebelumnya.

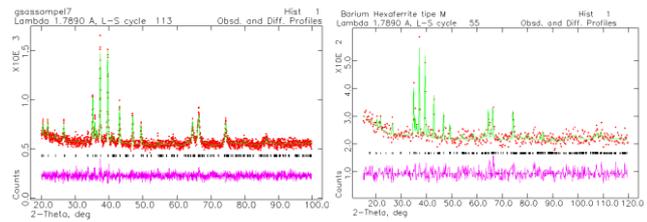
Material yang diletakkan diantara kedua pandu gelombang tersebut

selanjutnya dimasukkan gelombang mikro pada rentang frekuensi efektif dari 8,0 GHz sampai dengan 18,0 GHz, dengan nilai efektif yang dilihat dari nilai panjang gelombang *cut-off* yang diizinkan pada nilai 10,0 GHz sampai dengan 15,0 GHz saja. Untuk menentukan nilai permitivitas dan permeabilitas material menggunakan parameter kompleks yang dimiliki dari parameter hamburan (S-parameter)  $S_{11}$  dan  $S_{21}$  sebagai parameter yang digunakan untuk menentukan permitivitas material.

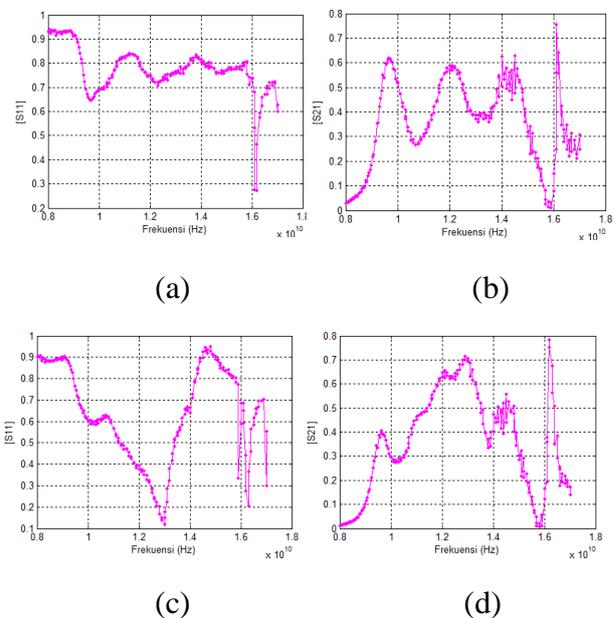
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian struktur ditunjukkan oleh Gambar 1. Tampak bahwa kedua material memiliki fasa utama berstruktur M-hexaferrite. Kedua fasa memiliki pola XRD yang sangat identik, yang dapat disimpulkan bahwa substitusi ion  $Mn^{+2}$  dan  $Co^{+2}$  mampu menggantikan dua buah ion  $Fe^{+3}$  secara sempurna [13, 14]. Hasil substitusi ketiga ion tersebut menyebabkan terjadinya pergeseran parameter kisi dari 23,328 Angstrom menjadi 23,346 Angstrom.

Prosedur yang telah dilakukan dalam metode di atas digunakan *coplanar waveguide*  $K_u(WR-75)$  band dengan panjang antara *thru* dan *line* 50,0 cm dengan rongga *waveguide* sebesar 1,8 cm x 2,1 cm dan disesuaikan dengan ukuran sampel untuk menghindari kebocoran. Pengukuran refleksi dan transmisi gelombang berkaitan dengan alat VNA dimana pengukuran ini berkaitan dengan gelombang yang masuk dengan gelombang yang direfleksikan dan yang ditransmisikan.  $S_{11}$  adalah perbandingan gelombang yang masuk melalui terminal 1 dan gelombang terefleksi kembali ke terminal 1, sedangkan  $S_{21}$  adalah perbandingan gelombang yang masuk dari terminal 1 terhadap gelombang yang diteruskan ke terminal 2. Hasil pengukuran  $S_{11}$  dan  $S_{21}$  diperlihatkan dalam Gambar 2.



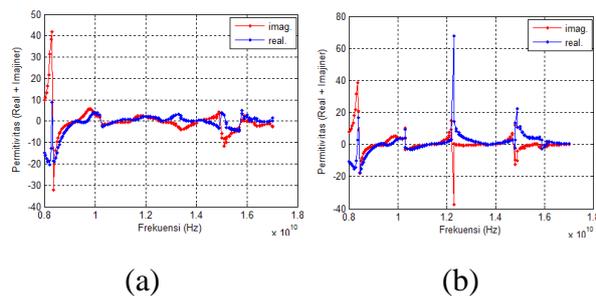
Gambar 1. (a) Hasil uji XRD pada material  $BaFe_{12}O_{19}$  dan (b) pada material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  menggunakan  $Co(K\alpha, 1,778 \text{ nm})$  dengan menggunakan iterasi *rietveld refinement*.



Gambar 2. Hasil pengukuran nilai parameter refleksi  $S_{11}$  dan parameter transmisi  $S_{21}$ . (a-b) Untuk material  $BaFe_{12}O_{19}$ , dan (c-d) Untuk material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$ .

Pada Gambar 2. terlihat nilai parameter hamburan  $S_{11}$  dan  $S_{21}$  dari bahan  $BaFe_{12}O_{19}$  dan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  menggunakan *waveguide* WR-75 yang memiliki daerah efektif pengukuran pada 10 GHz hingga 15 GHz.

Bila dibandingkan secara visual, nilai parameter hamburan/refleksi kedua material pada Gambar 2(a) dengan 2(c) memiliki pola yang berbeda secara signifikan, khususnya pada frekuensi 13,0 GHz. Hal ini mengindikasikan bahwa material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  pada frekuensi tersebut memiliki refleksi yang lebih rendah dibandingkan dengan  $BaFe_{12}O_{19}$ . Berbeda dengan parameter transmisinya, kedua material  $BaFe_{12}O_{19}$  dan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  memiliki nilai parameter transmisi  $S_{21}$  hampir sama. Penjelasan ini diperkuat dengan Gambar 3, bahwa pada material  $BaFe_{12}O_{19}$ , nilai permitivitas memiliki nilai real  $\epsilon'$  dan permitivitas imajiner  $\epsilon''$  relatif sama, sedangkan material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  berbeda cukup signifikan, khususnya pada frekuensi 13,0 GHz.

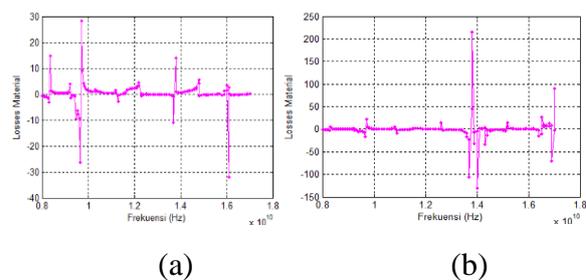


Gambar 3. Perbedaan pola permitivitas real dan imajiner, ( $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ ), (a) bahan  $BaFe_{12}O_{19}$ , dan (b) bahan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$ .

Besarnya permitivitas kompleks yang dilakukan pada bahan ferromagnetik  $BaFe_{12}O_{19}$  pada rentang frekuensi 10 GHz – 15 GHz memiliki  $\epsilon' = 4,36$  dan  $\epsilon'' = 6,23$ , sedangkan pada bahan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  memiliki permitivitas real  $\epsilon' = 5,49$  dan nilai permitivitas kompleks sebesar  $\epsilon'' = 9,35$  kecuali pada frekuensi 13,0 GHz.

Gambar 4. menunjukkan besaran serapan gelombang mikro akibat *loss* material oleh  $BaFe_{12}O_{19}$  (4(a)) dan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  (4(b)). Pada Gambar 4(b) terlihat bahwa terjadi

serapan gelombang yang sangat tinggi pada kisaran frekuensi 13.0 GHz, khususnya pada material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$ , sedangkan pada material  $BaFe_{12}O_{19}$  tidak terjadi perubahan. Hal ini diperkuat dengan hasil pengukuran nilai koefisien refleksi kompleks dari material  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  yang lebih kecil dibandingkan dengan material  $BaFe_{12}O_{19}$ . Bahasan ini menjadi lebih menarik khususnya material *barium hexaferrite* yang tersubstitusi dengan ion *divalent* seperti Mn, Co dan Ti atau dapat dikaji lebih mendalam dalam logam-logam *divalent* lainnya sebagai substitusi ion.



Gambar 4. Perbedaan pola serapan gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi 10 GHz Hingga 15 GHz. (a) Pada  $BaFe_{12}O_{19}$  dan (b)  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$ .

## KESIMPULAN

Perhitungan permitivitas ( $\epsilon$ ) kompleks dengan menggunakan parameter hamburan sangat fleksibel untuk menentukan sifat kompleks kelistrikan dan kemagnetan bahan, terutama untuk material non konduktif. Hasil pengukuran permitivitas kompleks pada bahan  $BaFe_{12}O_{19}$  dan  $BaFe_9(MnCo)_{1,5}Ti_{1,5}O_{19}$  menunjukkan perbedaan nilai yang cukup signifikan, terutama terutama pada daerah frekuensi 13.0 GHz. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa material  $BaFe_{12}O_{19}$  yang tersubstitusi ion  $Fe^{+2}$  atau  $Fe^{+3}$  dengan ion  $Mn^{+2}$   $Co^{+2}$  dan  $Ti^{+4}$  mampu merubah sifat dielektrik bahan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chang CS, Agarwal AP. Fine line thin dielectric circuit board characterization. *IEEE Proc. 44th Electronic Components and Technology Conf.* 1994;564-569.
- [2] Dong KY, Young H, Kwan J, Bong J, Chong C. Effects sheet thickness on the electromagnetic wave absorbing characterization of  $\text{Li}_{0.375}\text{Ni}_{0.375}\text{Zn}_{0.25}$  ferrite composite as a radiation absorbent material. *J. Electromagnetic engineering and Science.* 2016;16(3):150-158.
- [3] Baker-Jarvis J, Janezic M, Grosvenor J, Geyer R. Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability. *Natl Inst Stand Technol Tech. Note 1355-R*, 1993
- [4] Nelson RM. Designing for EMC a case study for developing a course in electromagnetic compatibility. *IEEE Trans On Education.* 1997;40(4):283-286.
- [5] Braun S, Russer P. A low-noise multiresolution high dynamic ultra-broad-band time-domain EMI Measurement System. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 2005;53:3354–3363.
- [5] Jebbor N, Bri S, Nakheli A, Bejjit L, Hdddad M, Mamouni A. Complex permittivity determination with the transmission/reflection method. *Int J Emerg Sci.* 2011;1(4):682-695.
- [6] Mosig JR, Besson JCE, Fabry M, Gardiol FE. Reflection of an open ended coaxial line and application to non-destructive measurement of materials. *IEEE trans Instrum.* 1981;30(1):46-51.
- [7] Krupka J, Derzakowski K, Riddle B, Baker J. A dielectric resonator for measurements of complex permittivity of low dielectric materials as a function of temperature. *Mat Sci Tech.* 1998;9:1751-1756.
- [8] Baker-Jarvis J, Vanzura EJ, Kissick WA. Improve technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.* 1990;38(8):1906-1103.
- [9] Abbas Z, Pollard RD, Kelsall RW. Rectangular dielectric waveguide technique for determination of permittivity of materials at W-band. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.* 1998;46(12):2011-2015.
- [10] Challa RK, Kajfez D, Gladden JR, Elsherbeni AZ. Permittivity measurement with a non-standard waveguide by using TRL calibration and fractional linear data fitting. *Progress in Electromagnetik Research B.* 2008;2:1-13.
- [11] Rohde, Schwarz. *Measurement of Dielectric Material Properties*, Application Note, CY Kuek 07.2006 – RAC0607-0019. 2006.
- [12]. Ferraris S, Savi P, Maio I. Complex permittivity determination from measured scattering parameter of TEM waveguide. International Conference proceeding IEEE. 2011.
- [13]. Randa M, Priyono. Ferrite phase of  $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$  as anti-radar coating material. *2015 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications.* 2015;46-49.
- [14]. Priyono, Eddy S, Manaf A. Pengaruh substitusi ion Mn dan Ion Co serta ion Ti pada pembentukan fasa  $\text{BaFe}_9(\text{MnCo})_{1,5}\text{Ti}_{1,5}\text{O}_{19}$  disintesis melalui rute metallurgi serbuk. *Indonesian Journal of Applied Physics.* 2013;3(1):79-85.