

# PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG ELEKTROMAGNET HARMONIK PERTAMA (FHEM) TERPOLARISASI-S DI BIDANG BATAS BAWAH BAHAN ANTIFEROMAGNETIK $\text{FeF}_2$ PADA KONFIGURASI VOIGT

Taufik Nurrohman dan Roniyus M.S.

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung  
Jl. Sumantri Bojonegoro No 1. Gd. Meneng Bandar Lampung

## ABSTRAK

PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG ELEKTROMAGNET HARMONIK PERTAMA (FHEM) TERPOLARISASI-S DI BIDANG BATAS BAWAH BAHAN ANTIFEROMAGNETIK  $\text{FeF}_2$  PADA KONFIGURASI VOIGT. Telah dilakukan analisis teoretis mengenai pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet harmonik pertama (FHEM) terpolarisasi-s di bidang batas bawah bahan antiferromagnetik  $\text{FeF}_2$  pada konfigurasi Voigt. Dari penelitian ini didapatkan informasi bahwa reflektansi ( $R$ ) dan transmitansi ( $T$ ) gelombang elektromagnet harmonik pertama di bidang batas bawah memiliki sifat tak resiprokal terhadap perubahan tanda  $H_0$  (medan magnet konstan terpasang dari luar) maupun terhadap perubahan tanda sudut  $\phi$  (sudut tiba gelombang datang), sama seperti sifat-sifat yang diperoleh di bidang batas atas. Selain itu diperoleh juga relasi  $V_1(H_0) = V_2(-H_0)$  dan  $V_1(\phi) = V_2(-\phi)$  dengan  $V_1$  dan  $V_2$  berturut-turut adalah  $R$  dan  $T$  di bidang batas atas dan bidang bawah.

**Kata kunci** : Bahan magnet, harmonik pertama, optik

## ABSTRACT

REFLECTION AND TRANSMISSION OF S-POLARIZED FIRST HARMONIC ELECTROMAGNETIC (FHEM) WAVE AT THE LOWER BOUNDARY OF ANTIFERROMAGNETIC MATERIAL  $\text{FeF}_2$  IN VOIGT'S CONFIGURATION. A theoretical investigation about reflection and transmission of s-polarized first harmonic electromagnetic (FHEM) wave at the lower boundary of antiferromagnetic materials  $\text{FeF}_2$  in Voigt's Configuration have been carried out. By the research can be reported that the reflectance ( $R$ ) and transmittance ( $T$ ) of FHEM wave at the lower boundary have nonreciprocal behaviour as at the upper boundary, when the sign of  $H_0$  (constant applied external magnetic field) or  $\phi$  (angle of incidence of the incoming wave) are reversed. The other results, it is found the relations  $V_1(H_0) = V_2(-H_0)$  and  $V_1(\phi) = V_2(-\phi)$  where  $V_1$  and  $V_2$  are  $R$  and  $T$  at the upper and lower boundary respectively.

**Key words** : Magnetic materials, first harmonic, optic

## PENDAHULUAN

Apabila sebuah bahan magnet anisotrop uniaksial dikenai gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $\omega$  dari luar bahan, maka akan dihasilkan sebuah gelombang elektromagnet terpantul dan maksimal dua buah gelombang elektromagnet terbias berfrekuensi sudut  $\omega$  [1]. Gejala optika ini sangat dipengaruhi oleh bentuk tensor kerentanan (*susceptibility*) bahannya. Kerentanan magnetik yang dimaksud disini adalah kerentanan magnetik *linear* pada bahan magnet anisotrop yang terdiri dari dua subkisi dengan sumbu mudah (*easy axis*) kemagnetannya memiliki sudut sebarang terhadap medan magnet konstan dari luar  $H_0$  [2].

Bahan dengan jenis seperti ini adalah antiferromagnet  $\text{FeF}_2$  yang mampu memberikan respon optika *linear* [2], maupun respon non linear [1]. Percobaan pemantulan dan pembiasan di bidang batas

atas bahan ini menggunakan Konfigurasi Voigt (konfigurasi yang menggunakan medan magnet luar  $H_0$  yang diarahkan tegak lurus terhadap bidang datang) telah pernah dilakukan sebelumnya [2].

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [3]. Penelitian ini bertujuan mengungkap gejala pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $\omega$  terpolarisasi-s, di bidang batas bawah bahan antiferromagnet  $\text{FeF}_2$  dalam konfigurasi Voigt.

## TEORI

Dalam penelitian ini digunakan persamaan-persamaan *Maxwell* untuk bahan tanpa rapat muatan dan tanpa arus listrik dengan tetapan permitivitas

mutlak  $\epsilon$ , [4], yaitu :

$$\begin{aligned} (a). \quad \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) &= \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \\ (b). \quad \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \\ (c). \quad \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) &= 0 \\ (d). \quad \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0 \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} (a). \quad \vec{D}(\vec{r}, t) &= \epsilon \vec{E}(\vec{r}, t) \\ (b). \quad \vec{B}(\vec{r}, t) &= \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, t) [\vec{I} + \vec{\chi}(\omega)] \end{aligned} \quad (2)$$

Kemudian digunakan pula syarat batas antara vektor gelombang datang

$$\vec{k}^{(i)}$$

terpantul

$$\vec{k}^{(r)}$$

dan terbias

$$\vec{k}^{(t)}$$

yaitu :

$$\begin{aligned} (a). \quad k_x^{(i)} &= k_x^{(r)} = k_x^{(t)} \\ (b). \quad \phi^{(i)} &= \phi^{(r)} \end{aligned} \quad (3)$$

Untuk menghitung koefisien pemantulan dan pembiasannya, digunakan syarat batas untuk kuat medan antar medium di bidang batas, sebagaimana diberikan oleh persamaan (4) berikut ini :

$$\begin{aligned} (a). \quad \vec{E}_{\text{tang}}^{(i)} + \vec{E}_{\text{tang}}^{(r)} &= \vec{E}_{\text{tang}}^{(t)} \\ (b). \quad \vec{H}_{\text{tang}}^{(i)} + \vec{H}_{\text{tang}}^{(r)} &= \vec{H}_{\text{tang}}^{(t)} \end{aligned} \quad (4)$$

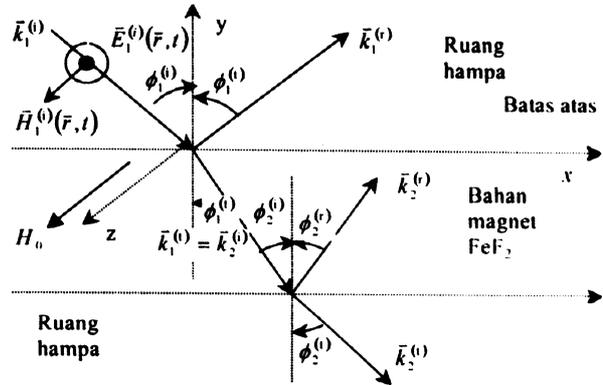
Akhirnya reflektansi dan transmitansinya dihitung menggunakan persamaan (5) berikut ini :

$$\begin{aligned} (a). \quad R &= \frac{\left\langle \vec{S}^{(r)} \right\rangle \cdot \hat{y}}{\left\langle \vec{S}^{(i)} \right\rangle \cdot \hat{y}} \\ (b). \quad T &= \frac{\left\langle \vec{S}^{(t)} \right\rangle \cdot \hat{y}}{\left\langle \vec{S}^{(i)} \right\rangle \cdot \hat{y}} \end{aligned} \quad (5)$$

dengan sumbu y sebagai garis normal bidang batas.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan Gambar 1 dan menggunakan persamaan (1) dan persamaan (2) untuk ruang vakum, maka didapatkan vektor amplitudo gelombang elektromagnet datang serta vektor *Poynting* rata-ratanya sebagai berikut dengan indeks 1 dan 2 berturut-turut untuk batas atas (vakum – FeF<sub>2</sub>) dan batas bawah (FeF<sub>2</sub> – vakum), seperti persamaan (6) dibawah ini :



**Gambar 1.** Perambatan gelombang elektromagnet dengan gelombang listrik datangnya tegak lurus bidang datang (polarisasi-s) pada bahan magnet FeF<sub>2</sub> yang dikenai medan magnet  $H_o$  dari luar tegak lurus bidang datang (konfigurasi Voigt)

$$\begin{aligned} (a). \quad E_{2z}^{(i)} &= E_{0z} \\ (b). \quad H_{2x}^{(i)} &= \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} \chi_{xy}^{(1)}(\omega) - (1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega)) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} E_{0z} \\ (c). \quad H_{2y}^{(i)} &= -\frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} (1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)}(\omega) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} E_{0z} \\ (d). \quad \left\langle S_{2z}^{(i)} \right\rangle &= E_{0z}^2 \left[ \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} (1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)}(\omega) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} \right. \\ &\quad \left. + \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} \chi_{xy}^{(1)}(\omega) - (1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega)) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} \right] \end{aligned}$$

Kemudian, dari persamaan (1) sampai dengan persamaan (3) didapatkan vektor-vektor amplitudo gelombang elektromagnet harmonik pertama terpantul yang terpolarisasi s serta vektor *Poynting* rata-ratanya yaitu (persamaan 7) dibawah ini :

$$\begin{aligned} (a). \quad E_{2z}^{(rss)} &= r_{ss} E_{0z} \\ (b). \quad H_{2x}^{(rss)} &= \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} \chi_{xy}^{(1)}(\omega) + (1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega)) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} r_{ss} E_{0z} \\ (c). \quad H_{2y}^{(rss)} &= -\frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} (1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) - \chi_{xy}^{(1)}(\omega) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} r_{ss} E_{0z} \\ (d). \quad \left\langle S_{2z}^{(rss)} \right\rangle &= E_{0z}^2 |r_{ss}|^2 \left[ \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} (1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) - \chi_{xy}^{(1)}(\omega) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} \right. \\ &\quad \left. + \frac{k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} \chi_{xy}^{(1)}(\omega) + (1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega)) (k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)})^{\frac{1}{2}}}{\mu_0 \omega [(1 + \chi_{yy}^{(1)}(\omega))(1 + \chi_{xx}^{(1)}(\omega)) + \chi_{xy}^{(1)2}(\omega)]} \right] \end{aligned}$$

sedangkan untuk pemantulan terpolarisasi-p-nya didapatkan (persamaan 8) dibawah ini :

$$(a). \vec{E}^{(r_{sp})} = -\frac{r_{sp} \sqrt{k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)}}}{k_1^{(t)}} E_{02} \hat{x} + \frac{k_1^{(i)}}{k_1^{(t)}} r_{sp} \sin \phi_1^{(i)} E_{02} \hat{y}$$

$$(b). H_{2z}^{(r_{sp})} = \frac{k_1^{(t)} r_{sp} E_{02}}{\mu_0 \omega (1 + \chi_{zz}^{(t)}(\omega))}$$

$$(c). \langle \vec{S}_2^{(r_{sp})} \rangle = \frac{E_{02}^2 |r_{sp}|^2}{\mu_0 \omega (1 + \chi_{zz}^{(t)}(\omega))} \left[ k_1^{(i)} \sin \phi_1^{(i)} \hat{x} + \sqrt{k_1^{(t)2} - k_1^{(i)2} \sin^2 \phi_1^{(i)}} \hat{y} \right]$$

dengan  $r_{ss}$  dan  $r_{sp}$  berturut-turut adalah koefisien pemantulan gelombang listrik terpolarisasi-s dan terpolarisasi-p yang akan dicari kemudian.

Dari persamaan (1) sampai dengan persamaan (3) didapatkan juga satu buah gelombang elektromagnet harmonik pertama terbias di ruang vakum dan vektor Poynting rata-ratanya, sebagaimana diberikan oleh (persamaan 9)

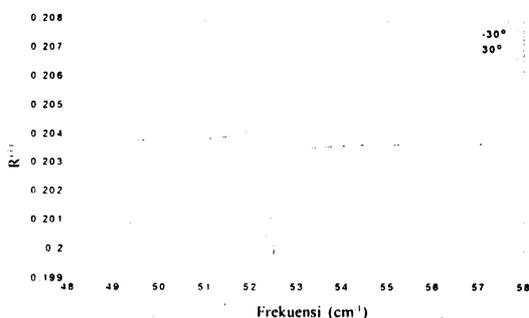
$$(a). E_{2z}^{(t)} = t E_{02}$$

$$(b). \vec{E}^{(t)} = -\frac{k_1^{(i)} t E_{02}}{\mu_0 \omega} (\cos \phi_1^{(i)} \hat{x} + \sin \phi_1^{(i)} \hat{y}) \quad (9)$$

$$(c). \langle \vec{S}_2^{(t)} \rangle = \frac{k_1^{(i)} E_{02}^2 |t|^2}{\omega \mu_0} (\sin \phi_1^{(i)} \hat{x} - \cos \phi_1^{(i)} \hat{y})$$

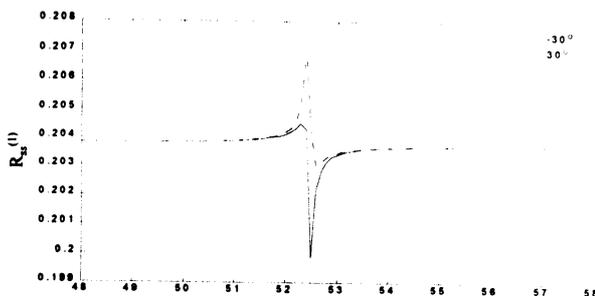
dengan  $t$  adalah koefisien pembiasan gelombang elektromagnet. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (6) sampai dengan persamaan (9) dan persamaan (4) serta persamaan (5) didapatkan nilai-nilai dari  $R_{ss}$ ,  $R_{sp}$ , dan  $T$ .

Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan di sekitar frekuensi resonansi linear bahan antiferomagnet FeF<sub>2</sub>, yaitu 52,45 cm<sup>-1</sup> [3]. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diberikan oleh Gambar 2 dan Gambar 3. Dari Gambar 2 dan Gambar 3, tampak bahwa di bidang batas bawah ini berlaku hubungan  $V(H_0) = V(-H_0)$  dan  $V(\phi) = V(-\phi)$  atau  $V(H_0, \phi) = V(-H_0, -\phi)$ , dengan  $V$  adalah  $R_{ss}$  maupun  $T$  (sedangkan  $R_{ss} = 0$ ), yang berarti terjadi perubahan nilai reflektansi dan transmitansinya ketika terjadi perubahan tanda pada  $H_0$  atau  $\phi$ . Sifat ini lebih dikenal dengan sifat tak resiprok (*non reciprocity*)



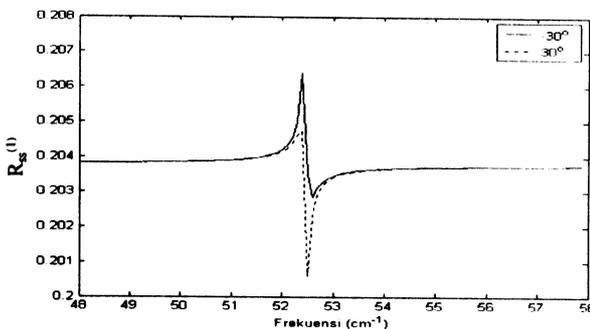
Gambar 2. Grafik  $R_{ss}$  dengan  $H_0 = 3T$ , garis tebal untuk  $\phi = -30^\circ$  dan garis putus-putus untuk  $\phi = 30^\circ$  pada bidang batas bawah.

terhadap perubahan tanda  $H_0$  atau  $\phi$ . Sifat ini juga ditemui pada peristiwa pemantulan dan pembiasan di bidang batas atas sebagaimana yang telah diperoleh sebelumnya [2].

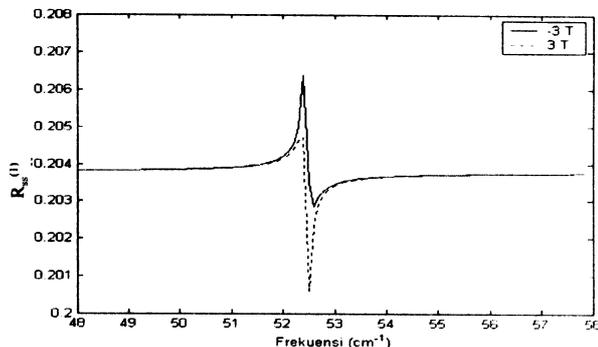


Gambar 3. Grafik  $R_{ss}$  dengan  $\phi = 30^\circ$ , garis tebal untuk  $H_0 = -3T$  dan garis putus-utus untuk  $H_0 = 3T$  pada bidang batas bawah

Jika hasil ini dibandingkan dengan reflektansi dan transmitansi di bidang batas atas yang juga bersifat tak resiprok [3], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, maka tampak adanya relasi  $V_1(\phi) = V_2(-\phi)$  dan  $V_1(H_0) = V_2(-H_0)$  dengan  $V_1$  dan  $V_2$  berturut-turut adalah  $R$  dan  $T$  di bidang batas atas dan bawah.



Gambar 4. Grafik  $R_{ss}$  dengan  $H_0 = 3T$ , garis tebal untuk  $\phi = -30^\circ$  dan garis putus-putus untuk  $\phi = 30^\circ$  pada bidang batas atas [3].



Gambar 5. Grafik  $R_{ss}$  dengan  $\phi = 30^\circ$ , garis tebal untuk  $H_0 = -3T$  dan garis putus-putus untuk  $H_0 = 3T$  pada bidang batas atas [3].

## KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian teoretis yang dilaporkan disini maka dapatlah kiranya ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sebuah gelombang elektromagnet harmonik pertama terpolarisasi-s di dalam bahan antiferromagnetik FeF<sub>2</sub> yang menuju ke bidang batas bawah bahan tersebut akan menghasilkan satu buah gelombang elektromagnet harmonik pertama terpantul di dalam bahan dan satu buah gelombang terbiasnya di ruang hampa.
2. Pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet harmonik pertama terpolarisasi-s pada konfigurasi Voigt di bidang batas bawah bahan antiferromagnetik FeF<sub>2</sub> memiliki sifat tak resiprokal terhadap perubahan tanda  $H_0$  (medan magnet konstan dari luar) maupun terhadap perubahan tanda sudut  $\phi$  (sudut datang) atau dapat dituliskan  $V(H_0) \neq V(-H_0)$ ,  $V(\phi) \neq V(-\phi)$  dan  $V(H_0, \phi) = V(-H_0, -\phi)$ .
3. Pada peristiwa pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet harmonik pertama terpolarisasi-s pada konfigurasi Voigt pada bidang batas atas (indeks 1) dan bidang batas bawah (indeks 2) bahan FeF<sub>2</sub>, dijumpai adanya relasi  $V_1(\phi) = V_2(-\phi)$  dan  $V_1(H_0) = V_2(-H_0)$ .

Adapun saran-saran untuk penelitian selanjutnya yaitu perlunya dilakukan eksperimen yang mendukung telaah teoretis ini sehingga telaah teoretis ini dapat diverifikasi kebenarannya secara kuantitatif.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. MARJUNUS, R. *Analisis Teoretis Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Elektromagnet pada Bahan Magnetik Non Linear Orde Dua*, Program Studi Ilmu Fisika, Jurusan Ilmu-Ilmu MIPA, Program Pasca Sarjana UGM Yogyakarta Indonesia, (2002) 1 – 167.
- [2]. ABRAHA, K., BROW, T. E., DUMELow, T., PARKER, T. J. DAN TILLEY, D. R. *Oblique-Incidence Far Infrared Reflectivity Study of The Uniaxial Antiferromagnet FeF<sub>2</sub>*, *Physical Review B*, **50** (10), (1994), 6808 – 6816.
- [3]. ABRAHA, K. *Theory of Surface Polaritons and Far Infrared Reflectivity of Antiferromagnets, Rare Earth Metals and Ferrimagnets*, University Essex, England, (1995), 35 – 79 dan 236 – 254.
- [4]. WANGSNESS, R. K. *Electromagnetic Fields*, John Wiley and Sons, New York, USA, (1979), 457 – 475.