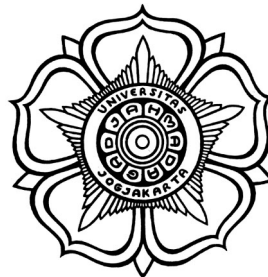


**TESIS**

**ANALISIS TEORETIS PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG  
ELEKTROMAGNETIK PADA BAHAN MAGNETIK NON LINEAR ORDE  
DUA**

***THEORETICAL ANALYSIS OF REFLECTION AND TRANSMISSION OF  
ELECTROMAGNETIC WAVE ON SECOND ORDER NONLINEAR  
MAGNETIC MATERIAL***



**NASUTION  
12333/I-4/0978/99**

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER  
DEPARTEMEN ILMU KOMPUTER DAN ELEKTRONIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2024**

**TESIS**

**ANALISIS TEORETIS PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG  
ELEKTROMAGNETIK PADA BAHAN MAGNETIK NON LINEAR ORDE  
DUA**

***THEORETICAL ANALYSIS OF REFLECTION AND TRANSMISSION OF  
ELECTROMAGNETIC WAVE ON SECOND ORDER NONLINEAR  
MAGNETIC MATERIAL***

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh derajat  
Master of Computer Science



NASUTION  
12333/I-4/0978/99

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU KOMPUTER  
DEPARTEMEN ILMU KOMPUTER DAN ELEKTRONIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2024**

# **HALAMAN PENGESAHAN**

## **TESIS**

### **ANALISIS TEORETIS PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK PADA BAHAN MAGNETIK NON LINEAR ORDE DUA**

Telah dipersiapkan dan disusun oleh

**NASUTION**  
12333/I-4/0978/99

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji  
pada tanggal 5 September 2023

Susunan Tim Penguji

Prof. Muslim, Ph.D  
Promotor

Dr. Pramudita Anggraita  
Penguji

Dr. Kamsul Abraha  
Ko-promotor

Dr. Pekik Nurwantoro, M.S  
Penguji

Dr. Agung B.S. Utomo  
Penguji

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
Untuk memperoleh gelar Master of Science Fisika  
Tanggal 5 September 2023

Dr Jazi Eko Istiyanto  
Pengelola Program Studi Magister Ilmu Komputer

## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Tesis ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar Master di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 5 September 2023

Nasution

Karya sederhana ini kupersembahkan  
buat Bapak, Mama, Nenek,  
dan Adik tercinta

*Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata) : Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka.*

(Q.S. Ali Imran : 190 - 191)

*Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain.*

(Q.S. Alam Nasyrah : 7)

## PRAKATA

Segala puji dan syukur semata-mata hanya untuk Allah SWT, karena atas segala rahmat, hidayah dan bantuan-Nya jualah maka akhirnya Tesis dengan judul Analisis Teoretis Pemantulan dan Pembiasan Gelombang Elektromagnet Pada Bahan Magnetik Non Linear Orde Dua ini telah selesai penulis susun.

Telah banyak bantuan yang penulis peroleh selama dalam penulisan Tesis ini, untuk itu tak lupa penulis ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak dan Mama yang selama ini telah sabar membimbing dan mendoakan penulis tanpa kenal untuk selama-lamanya,
2. Prof. Drs. H. Muslim, Ph. D, selaku Pembimbing Utama, yang telah memberikan ilmunya kepada penulis serta dengan penuh kesabaran membimbing penulis,
3. Drs. Kamsul Abraha, Ph. D, selaku Pembimbing Pendamping yang telah memberikan inspirasi kepada penulis,
4. Dr. Pekik Nurwantoro dan Dr. rer. nat. M. Farchani Rasyid yang telah memperkenalkan sistem operasi LINUX dan  $\text{\LaTeX}$  kepada penulis serta memberikan bimbingan penggunaan  $\text{\LaTeX}$  tersebut dengan sabar,
5. Segenap staf dan karyawan di jurusan Fisika FMIPA UGM, yang telah banyak bekerjasama dengan penulis selama belajar di FMIPA UGM,
6. Sahabat saya M. Rizal Ginanjar, yang selalu bersedia membantu penulis ketika menyelesaikan masalah-masalah komputer.

Tesis ini tentunya tidak lepas dari segala kekurangan dan kelemahan, untuk itu segala kritikan dan saran yang bersifat membangun guna kesempurnaan Tesis ini sangat diharapkan. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan lebih khusus lagi bagi pengembangan ilmu fisika.

Yogyakarta, 12 Mei 1994

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>Halaman Judul</b>	<b>ii</b>
<b>Halaman Pengesahan</b>	<b>iii</b>
<b>Halaman Pengesahan</b>	<b>iii</b>
<b>Halaman Pernyataan</b>	<b>iv</b>
<b>Halaman Pernyataan</b>	<b>iv</b>
<b>Halaman Persembahan</b>	<b>v</b>
<b>Halaman Motto</b>	<b>vi</b>
<b>PRAKATA</b>	<b>vii</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xii</b>
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Keaslian Tesis	4
<b>II DASAR TEORI</b>	<b>5</b>
2.1 Ungkapan Gelombang Magnet Di Dalam Bahan Magnet	5
2.1.1 Bahan Magnet Isotrop Linear	5
<b>A UNGKAPAN GELOMBANG MAGNET DI DALAM BAHAN MAGNET NON LINEAR ORDE DUA</b>	<b>10</b>



## **DAFTAR TABEL**

## **DAFTAR GAMBAR**

2.1	Perambatan gelombang elektromagnet di dalam bahan magnet isotrop linear	7
-----	---	---

## INTISARI

### ANALISIS TEORETIS PEMANTULAN DAN PEMBIASAN GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK PADA BAHAN MAGNETIK NON LINEAR ORDE DUA

Oleh

Nasution

12333/I-4/0978/99

Telah dilakukan telaah teoretis mengenai proses pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet dalam tinjauan klasik, termasuk pembahasan tentang pembangkitan frekuensi harmonik kedua pada bahan magnetik *semi-infinite*. Telaah ini sebagai kelanjutan dari telaah sebelumnya tentang perambatan gelombang elektromagnet yang terjadi karena respon non linear di dalam sebuah bahan magnetik *infinite*. Gelombang elektromagnet harmonik kedua (SHEM) yang terpantul dan terbias ini sangat dipengaruhi oleh gelombang elektromagnet harmonik pertama yang terpantul dan terbias yang dibangkitkan oleh gelombang datang. Prosentase dari pemantulan dan pembiasan gelombang SHEM ini lebih kecil daripada gelombang harmonik pertama. Dari telaah teoretis ini juga didapatkan informasi dari bahan  $\text{FeF}_2$  yang merupakan salah satu dari jenis bahan antiferromagnet uniaksial, bahwa perbandingan antara  $\frac{R^{(2)}}{T_1^{(2)}}$  dan  $\frac{T_2^{(2)}}{T_1^{(2)}}$  dengan  $R^{(2)}$ ,  $T_1^{(2)}$  dan  $T_2^{(2)}$  berturut-turut adalah reflektansi gelombang SHEM, transmitansi gelombang SHEM yang terbias pertama dan transmitansi gelombang SHEM yang terbias kedua, memiliki sifat resiprokal terhadap perubahan tanda  $H_0$  (medan magnet konstan dari luar) atau perubahan tanda  $\phi$  (sudut gelombang datang terhadap garis normal), tetapi sifat-sifat ini tidak dijumpai pada konfigurasi Faraday polarisasi p. Diharapkan telaah ini dapat dilanjutkan pada penelitian berikutnya yang mengarah pada pemanfaatan lebih lanjut gejala non linear dalam bahan magnetik tersebut.

Kata-kata kunci : bahan magnet, non linear orde dua, optika.

## ABSTRACT

### THEORETICAL ANALYSIS OF REFLECTION AND TRANSMISSION OF ELECTROMAGNETIC WAVE ON SECOND ORDER NONLINEAR MAGNETIC MATERIAL

By

Nasution

12333/I-4/0978/99

A theoretical investigation of classical electromagnetic wave reflection and transmission process involving second harmonic frequency generation by a semi-infinite magnetic material has been carried out. This investigation is the continuation of a previous investigation on nonlinear propagation of electromagnetic wave inside an infinite magnetic medium. The reflected and transmitted of second harmonic electromagnetic (SHEM) wave is strongly influenced by reflected and transmitted of first harmonic electromagnetic wave generated by the incoming wave. The percentage of the reflected and transmitted of the SHEM wave is much smaller than those of the first harmonics. From the theoretical analysis it is found that the for uniaxial antiferromagnet materials such as  $\text{FeF}_2$ , the ratio  $\frac{R^{(2)}}{T_1^{(2)}}$  and  $\frac{T_2^{(2)}}{T_1^{(2)}}$  where  $R^{(2)}$ ,  $T_1^{(2)}$  and  $T_2^{(2)}$  are reflectance of the SHEM wave, first wave transmittance of SHEM wave and second wave transmittance of SHEM wave, succesfully, have reciprocal properties when the sign of  $H_0$  (constant external magnetic field) or  $\phi$  (angle of incidence wave) is changing. This does not occur in Faraday's configuration p polarization. It is expected that this investigation can be extended into a further investigation involving applications of nonlinear effects in magnetic materials.

Keywords : magnetic material, second order nonlinear, optics.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Dewasa ini, telaah optika linear maupun non linear orde dua pada bahan listrik dan dalam tinjauan medan listriknya telah dilakukan secara lengkap. Telaah tersebut melingkupi telaah klasik dan kuantum mengenai kerentanan listrik non linear orde dua (Arkundato, 1995), perhitungan intensitas gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  yang dihasilkan oleh sebuah bahan dielektrik non linear orde dua yang dikenai gelombang elektromagnet dari luar (Arkundato, 1995), tinjauan teoretis tentang gejala pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  (Bloembergen dan Pershan, 1962), hukum-hukum kekekalan yang menyertai gejala optika non linear orde dua (Bloembergen, 1980), percobaan pengukuran intensitas gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  (Arkundato, 1995), percobaan pembiasan optika non linear (Matlin *dkk*, 1997) dan penggunaan bahan dielektrik non linear untuk memproses informasi secara digital dengan kelajuan tinggi (Cotter *dkk*, 1999).

Sejauh pengetahuan penulis, telaah serupa belum begitu lengkap dilakukan pada bahan magnetik dan dalam tinjauan medan magnetiknya. Hingga kini telaah yang telah dilakukan antara lain adalah telaah klasik mengenai kerentanan magnetik linear dalam bahan magnetik yang terdiri dari dua sub-kisi dengan sumbu mudah kemagnetannya memiliki sudut sebarang terhadap medan magnet konstan dari luar  $\vec{H}_0$  (Abraha *dkk*, 1994). Yang dimaksud dengan sub-kisi adalah bentuk susunan atom-atom dalam sebuah kisi yang dapat dikelompokkan menjadi beberapa kelompok kecil, sedangkan sumbu mudah (*easy axis*) adalah arah yang disukai oleh magnetisasi kristal. Telaah lain yang dilakukan adalah mengenai kerentanan magnetik non linear orde dua yang terdiri dari dua sub-kisi dengan sumbu mudahnya tegak lurus pada medan magnet konstan dari luar  $\vec{H}_0$  (Marjunus, 1999).

Keistimewaan bahan yang terdiri dari dua sub-kisi ini adalah karena bahan magnet jenis seperti ini sudah terbukti secara eksperimental dapat memberikan respon optika linear sehingga diharapkan bahan jenis ini pun dapat memberikan respon optika non linear orde dua (Abraha *dkk*, 1994). Contoh bahan magnetik yang telah diselidiki respon linearnya adalah antiferromagnet uniaksial  $\text{FeF}_2$  (Abraha

dkk, 1994). Telaah lain yang telah dilakukan adalah perhitungan intensitas gelombang elektromagnet (dalam tinjauan medan magnetnya) berfrekuensi sudut  $2\omega$  pada bahan magnetik non linear orde dua (Marjunus, 1999). Kemudian, telah pula ditelaah percobaan pemantulan dan pembiasan pada bahan magnetik dengan menggunakan konfigurasi Voigt dan Faraday (Abraha, 1995). Konfigurasi Voigt adalah konfigurasi dengan suatu medan magnet konstan homogen dari luar  $\vec{H}_0$  dipasang tegak lurus terhadap bidang datang (*plane of incidence*) yang berbeda dari konfigurasi Faraday, yaitu suatu konfigurasi dengan medan magnet luar  $\vec{H}_0$  yang konstan dan homogen dipasang sejajar terhadap bidang datang. Selain itu juga telah dilakukan telaah teoretis rotasi optika non linear pada bahan magnetik semikonduktor  $\text{Cd}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{Te}$  dengan menggunakan tinjauan medan listrik (?).

Optika merupakan suatu gejala interaksi antara gelombang elektromagnet yang terdiri dari gelombang listrik dan gelombang magnet yang saling terkait dengan bahan yang dilewatinya dimana panjang gelombang elektromagnet tersebut terbentang dari  $10^{-16}$  m sampai dengan  $10^8$  m (Halliday dan Resnick, 1986). Jadi gelombang elektromagnet tersebut tidak hanya mencakup gelombang elektromagnet dengan frekuensi berada pada daerah spektrum cahaya tampak (seperti yang dikenal dalam kehidupan sehari-hari dengan  $\lambda$ -nya dari 10 nm sampai dengan 0,1 mm), tetapi juga gelombang elektromagnet yang berada di sekitarnya yang tidak termasuk cahaya tampak, misalnya sinar infra merah dan ultra ungu. Bahan yang ada di alam juga dapat berupa bahan yang lebih bersifat listrik atau lebih bersifat magnet. Menurut persamaan Maxwell, gelombang elektromagnet terdiri dari gelombang listrik dan gelombang magnet yang saling terkait, jadi tidak pernah dijumpai adanya gelombang listrik yang dapat berdiri sendiri dan begitu pula halnya pada gelombang magnet. Jika suatu gelombang elektromagnet mengenai bahan listrik, maka gelombang listriknya akan berpengaruh lebih besar dalam menginduksi bahan tersebut, sehingga energi gelombang listriknya akan berkurang dari semula karena telah mengalami suatu proses induksi di dalam bahan, demikian pula halnya jika gelombang elektromagnet mengenai bahan maka gelombang magnetnya akan lebih berperan daripada gelombang listriknya.

Dengan demikian telaah yang lengkap secara teoretis maupun secara eksperimen dalam bidang optika magnetik sangat diperlukan, seperti yang telah dilakukan selama ini pada bahan listrik. Hal ini diperlukan agar telaah sifat optik bahan secara fisis menjadi lengkap, yaitu mencakup tinjauan listrik maupun magnetnya.

## 1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yang "*up to date*" untuk penulisan tesis ini. Masalah-masalah tersebut berada dalam ruang lingkup gejala optika non linear orde dua sebagai kelanjutan yang telah dilakukan sebelumnya oleh penulis pada bahan magnetik (Marjunus, 1999), sedangkan sistem satuan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sistem Internasional (SI). Secara terperinci masalah-masalah yang dimaksud mencakup hal-hal sebagai berikut:

1. Sebelum membahas gejala pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  pada bahan magnetik non linear orde dua sebagai topik utama, terlebih dahulu akan dibahas gejala pemutaran arah polarisasi gelombang elektromagnet di dalam bahan magnet linear maupun non linear orde dua, isotrop maupun anisotrop dengan telaah dilakukan pada komponen magnetiknya; dan
2. Gejala pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  pada bahan magnetik yang bergeometri *semi-infinite* yang diberi atau tanpa tambahan  $\vec{H}_0$ . Penggunaan bahan bergeometri *semi-infinite* dikarenakan penelitian ini hanya membahas perilaku gelombang elektromagnet di bidang batas.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah-masalah di atas maka cakupan tujuan penelitian ini secara rinci dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Telaah mengenai pemutaran arah polarisasi gelombang elektromagnet pada bahan magnetik bertujuan untuk mendapatkan gambaran yang jelas mengenai perilaku gelombang elektromagnet dalam bahan magnet; dan
2. Telaah mengenai gejala pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  oleh permukaan bahan magnetik non linear orde dua bertujuan untuk menghitung reflektansi serta transmitansi permukaan bahan magnet tersebut dengan atau tanpa medan magnet tambahan  $\vec{H}_0$  yang statis dan homogen.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Dengan mengacu pada tujuan penelitian di atas, maka manfaat penelitian meliputi hal-hal sebagai berikut:

1. Telaah ini dapat menjadi salah satu acuan dalam merumuskan proses pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  pada bahan magnetik non linear orde dua yang bergeometri *semi-infinite*; dan
2. Selain itu telaah ini juga dapat menjadi salah satu acuan teoretik dalam merancang percobaan mengenai pemantulan dan pembiasan gelombang elektromagnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  pada bahan magnetik non linear orde dua.

#### 1.5 Keaslian Tesis

Berdasarkan pelacakan literatur dan internet yang ada ternyata permasalahan yang dikaji dalam tesis ini belum pernah diteliti.



## BAB II

### DASAR TEORI

Sebelum memasuki perhitungan yang lebih jauh, perlu diketahui bahwa di dalam tesis ini digunakan kesepakatan Einstein yang memungkinkan peniadaan penulisan lambang  $\Sigma$  secara eksplisit apabila terdapat indeks yang muncul berulang dua kali, jadi munculnya indeks berulang tersebut selalu berarti adanya perintah penjumlahan terhadap bentuk yang memuatnya meliputi seluruh jangkauan indeks kecuali kalau dinyatakan lain, misalnya indeksnya ditulis sebagai (a) (dengan kurung).

#### 2.1 Ungkapan Gelombang Magnet Di Dalam Bahan Magnet

Persamaan-persamaan Maxwell dalam satuan SI untuk bahan, tanpa rapat muatan dan rapat arus listrik dengan tetapan permitivitas ( $\epsilon$ ) mutlak berbentuk skalar Wangsness (1979) adalah

$$\begin{aligned} (a) \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}, t) &= 0; & (c) \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) &= 0; \\ (b) \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}, & (d) \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) &= \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dan

$$(a) \vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon \vec{E}(\vec{r}, t), \quad (b) \vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \left( \vec{H}(\vec{r}, t) + \vec{M}(\vec{r}, t) \right). \quad (2.2)$$

Disini  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m adalah permeabilitas mutlak ruang hampa.

##### 2.1.1 Bahan Magnet Isotrop Linear

Magnetisasi linear untuk bahan magnet dengan parameter kerentanan magnetik linear  $\chi^{(1)}$  berbentuk

$$\vec{M}^{(L)}(\vec{r}, t) = \vec{\chi}^{(1)} \vec{H}(\vec{r}, t). \quad (2.3)$$

Jika observabel gelombang magnetnya merambat sebagai gelombang datar harmonik berfrekuensi sudut  $\omega$ , vektor gelombangnya adalah  $\vec{k}$ , serta dalam penyajian

kompleks, maka

$$\vec{M}^{(L)}(\vec{r}, t) = \vec{M}_0^{(L)}(\vec{r}, t) \exp \left[ i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] \quad (2.4)$$

dan

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0(\vec{r}, t) \exp \left[ i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t) \right]. \quad (2.5)$$

Substitusi pers.(2.4) dan pers.(2.5) ke pers.(2.3) menghasilkan

$$M_{0i}^{(L)} = \chi_{ij}^{(1)} H_{0j}; i = x, y \text{ dan } z. \quad (2.6)$$

Untuk bahan magnet isotrop linear,  $\chi_{ij}^{(1)} = 0$  kecuali

$$\chi_{xx}^{(1)} = \chi_{yy}^{(1)} = \chi_{zz}^{(1)} = \chi^{(1)}, \quad (2.7)$$

sehingga pers.(2.3) dapat dituliskan kembali menjadi

$$\vec{M}^{(L)}(\vec{r}, t) = \chi^{(1)} \vec{H}(\vec{r}, t). \quad (2.8)$$

Substitusi pers.(2.3) ke pers.(2.2.b) menghasilkan bentuk

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu \vec{H}(\vec{r}, t), \quad (2.9)$$

dengan permeabilitas mutlak

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (2.10)$$

$\mu_r$  adalah permeabilitas relatif bahan yang berbentuk

$$\mu_r = 1 + \chi^{(1)}. \quad (2.11)$$

Substitusi pers.(2.2.a) dan pers.(2.9) ke pers.(2.1) memberikan persamaan Maxwell untuk gelombang elektromagnet yang merambat dalam bahan magnet yang linear dan isotrop, yaitu

$$\begin{aligned} \text{(a)} \quad \nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) &= 0; & \text{(c)} \quad \nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) &= 0; \\ \text{(b)} \quad \nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) &= -\mu \frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t}; & \text{(d)} \quad \nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Dari pers.(2.12.a) diperoleh informasi bahwa vektor amplitudo gelombang

listrik  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  yang merambat dalam medium isotrop akan tegak lurus terhadap arah perambatan gelombang  $\vec{k}$ . Misalkan untuk perambatan ke arah sumbu z, maka bentuk gelombang listrik dengan pengutupan vektor amplitudonya ke arah  $\hat{u}$  berbentuk

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 \exp [i(kz - \omega t)] \hat{u}, \quad (2.13)$$

agar bentuk ini memenuhi pers.(2.12.a), maka harus dipenuhi  $\hat{u} \cdot \hat{z} = 0$ , sehingga dapat diambil  $\hat{u} = \hat{x}$ . Demikian pula untuk gelombang  $\vec{H}(\vec{r}, t)$  nya berbentuk

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = H_0 \exp [i(kz - \omega t)] \hat{u}_H, \quad (2.14)$$

agar bentuk ini memenuhi pers.(2.12.c), maka harus dipenuhi  $\hat{u}_H \cdot \hat{z} = 0$ . Selanjutnya menurut pers.(2.12.b)

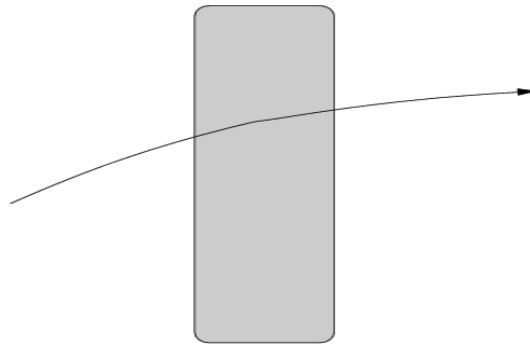
$$ikE_0 \exp [i(kz - \omega t)] \hat{y} = -\mu(-i\omega)H_0 \exp [i(kz - \omega t)] \hat{u}_H \quad (2.15)$$

Jadi diperoleh  $\hat{u}_H = \hat{y}$  yang dapat memenuhi  $\hat{u}_H \cdot \hat{z} = \hat{y} \cdot \hat{z} = 0$ . Selain itu dari pers.(2.15) didapatkan pula

$$H_0 = \frac{k}{\mu\omega} E_0, \quad (2.16)$$

sehingga jika digambarkan akan tampak seperti pada Gb.2.1, dengan  $\vec{S}(\vec{r}, t)$  pada Gb.2.1 adalah vektor Poynting sesaat (Wangsness, 1979) yang nilainya ditentukan oleh

$$\vec{S}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{H}(\vec{r}, t). \quad (2.17)$$



Gambar 2.1: Perambatan gelombang elektromagnet di dalam bahan magnet isotrop linear

Pembuktian lain adalah dengan menggunakan pers.(2.12.b) yang dapat dituliskan kembali menjadi

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\mu\omega} \vec{k} \times \vec{E}(\vec{r}, t). \quad (2.18)$$

Demikian pula pers.(2.12.d) dapat dituliskan kembali sebagai

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{1}{\omega\epsilon} \vec{k} \times \vec{H}(\vec{r}, t). \quad (2.19)$$

## DAFTAR PUSTAKA

- Abraha, K., 1995, Ph. D. Thesis: *Theory of Surface Polaritons and Far Infrared Reflectivity of Antiferromagnets, Rare Earth Metals and Ferrimagnets*, University of Essex, England, hal.35 - 79 dan 236 - 254.
- Abraha, K., Brow, T. E., Dumelow, T., Parker, T. J. dan Tilley, D. R., 1994, Oblique-incidence Far Infrared Reflectivity Study Of The Uniaxial antiferromagnet  $\text{FeF}_2$ , *Physical Review B*, Vol.50, No.10 September 1994, hal.6808 - 6816.
- Arkundato, A., 1995, Skripsi S1: *Aspek Klasik dan Kuantum Optika Non Linear*, Jurusan Fisika FMIPA UGM Yogyakarta Indonesia, hal.2, 9 - 14, 58 - 60 dan 146.
- Bloembergen, N. dan Pershan, P. S., 1962, Light Waves at The Boundary of Nonlinear Media, *Physical Review*, Vol.128, Number 2, hal.606 - 622.
- Bloembergen, N., 1980, Conservation laws in nonlinear optics, *Journal of Optical Society of America*, Vol.70, No.12 Desember 1980, hal.1429 - 1436.
- Budker, D., Orlando, D. J. dan Yaschuk, V., 1999, Nonlinear laser spectroscopy and magnet-optics, *American Journal Physics*, Vol.67, No.7 July 1999, hal.584 - 592.
- Cotter, D., Maning, R. J., Blow, K. J., Ellis, A. D., Kelly, A. E., Nesses, D., Phillips, I. D., Poustie A. J. dan Rogers, D. C., 1999, Nonlinear Optics for High-Speed Digital Information Processing, *SCIENCE*, Vol.286, 19 November 1999, hal.1523 - 1528.
- Halliday, D. dan Resnick, R., 1986, *Fisika Edisi Ke-3 Jilid 2*, diterjemahkan oleh Silaban, P. dan Sucipto, E., Penerbit Erlangga, hal.537 - 568.
- Jackson, J. D., 1999, *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, New York, USA, hal.278 - 282.
- Marjunus, R., 1999, Skripsi S1: *Analisis Teoretis Optika Non Linear Dalam Bahan Magnetik*, Jurusan Fisika FMIPA UGM Yogyakarta Indonesia, hal.1 - 76.
- Matlin, M. D. dan McGee, D. J., 1997, Photorefractive nonlinear optics in the undergraduate physics laboratory, *American Journal Physics*, Vol.65, No.7 July 1997, hal.622 - 634.
- Wangsness, R. K., 1979, *Electromagnetic Fields*, John Wiley and Sons, New York, USA, hal.457 - 475.

## LAMPIRAN A

### UNGKAPAN GELOMBANG MAGNET DI DALAM BAHAN MAGNET NON LINEAR ORDE DUA

Pembahasan pada lampiran ini dimulai dari bentuk gelombang magnet di dalam bahan magnet anisotrop non linear orde dua seperti yang tercantum pada pers.(2.19) yaitu

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \left\{ \vec{H}_0^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + \vec{H}_0^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] + cc \right\},$$

sehingga diperoleh bentuk berikut ini

$$\begin{aligned} H_{0j}(\vec{r}, t) H_{0k}(\vec{r}, t) = & \frac{1}{4} \left\{ H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(1)} \exp \left[ i(2\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] + 2H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(1)*} \right. \\ & + 2H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ i((\vec{k}^{(1)} + \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} - 3\omega t) \right] + 2H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ i((\vec{k}^{(1)} - \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} + \omega t) \right] \\ & + H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(1)*} \exp \left[ -i(2\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] + 2H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ -i((\vec{k}^{(1)} - \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} + \omega t) \right] \\ & + 2H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ -i((\vec{k}^{(1)} + \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} - 3\omega t) \right] + H_{0j}^{(2)} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ i(2\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 4\omega t) \right] \\ & \left. + 2H_{0j}^{(2)} H_{0k}^{(2)*} + H_{0j}^{(2)*} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ -i(2\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 4\omega t) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

yang mengakibatkan magnetisasi di dalam bahan berbentuk

$$M_i = M_i^{(L)} + M_i^{(NL)}, \quad (1.2)$$

dengan

$$\begin{aligned} M_i^{(L)} = & \frac{1}{2} \left\{ \chi_{ij}^{(1)}(\omega) H_{0j}^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + \chi_{ij}^{(1)}(2\omega) H_{0j}^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right. \\ & \left. + \chi_{ij}^{(1)}(\omega) H_{0j}^{(1)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + \chi_{ij}^{(1)}(2\omega) H_{0j}^{(2)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$M_i^{(NL)} = \chi_{ijk}^{(2)} H_{0j}(\vec{r}, t) H_{0k}(\vec{r}, t). \quad (1.4)$$

Selain itu dalam koordinat Cartesan

$$\begin{aligned} \nabla^2 H_i = & -\frac{1}{2} \left\{ (k^{(1)})^2 H_{0i}^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + (k^{(2)})^2 H_{0i}^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right. \\ & \left. + (k^{(1)})^2 H_{0i}^{(1)*} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + (k^{(2)})^2 H_{0i}^{(2)*} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\}; \quad (1.5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial H_{0p}}{\partial x_p} = & -\frac{1}{2} \left\{ k_i^{(1)} k_p^{(1)} H_{0q}^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] \right. \\ & + k_i^{(2)} k_p^{(2)} H_{0q}^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] + k_i^{(1)} k_p^{(1)} H_{0q}^{(1)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] \\ & \left. + k_i^{(2)} k_p^{(2)} H_{0q}^{(2)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\}; \quad (1.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{0i}}{\partial t^2} = & -\frac{1}{2} \omega^2 \left\{ H_{0i}^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + 4H_{0i}^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right. \\ & \left. + H_{0i}^{(1)*} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + 4H_{0i}^{(2)*} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\}; \quad (1.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_i^{(L)}}{\partial t^2} = & -\frac{1}{2} \omega^2 \left\{ \chi_{ij}^{(1)}(\omega) H_{0j}^{(1)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + 4\chi_{ij}^{(1)}(2\omega) H_{0j}^{(2)} \exp \left[ i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right. \\ & \left. + \chi_{ij}^{(1)}(\omega) H_{0j}^{(1)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - \omega t) \right] + 4\chi_{ij}^{(1)}(2\omega) H_{0j}^{(2)*} \exp \left[ -i(\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\}; \quad (1.8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_i^{(NL)}}{\partial t^2} = & -\omega^2 \left\{ \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(1)} \exp \left[ i(2\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right. \\ & + \frac{9}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(3\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ i((\vec{k}^{(1)} + \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} - 3\omega t) \right] \\ & + \frac{1}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ i((\vec{k}^{(1)} - \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} + \omega t) \right] \\ & \left. + \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega) H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(1)*} \exp \left[ -i(2\vec{k}^{(1)} \cdot \vec{r} - 2\omega t) \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(\omega) H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ -i((\vec{k}^{(1)} - \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} + \omega t) \right] \\
& + \frac{9}{2} \chi_{ijk}^{(2)}(3\omega) H_{0j}^{(1)*} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ -i((\vec{k}^{(1)} + \vec{k}^{(2)}) \cdot \vec{r} - 3\omega t) \right] \\
& + 4 \chi_{ijk}^{(2)}(4\omega) H_{0j}^{(2)} H_{0k}^{(2)} \exp \left[ i(2\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 4\omega t) \right] \\
& + 4 \chi_{ijk}^{(2)}(4\omega) H_{0j}^{(2)*} H_{0k}^{(2)*} \exp \left[ -i(2\vec{k}^{(2)} \cdot \vec{r} - 4\omega t) \right] \Big\}; \tag{1.9}
\end{aligned}$$

Kemudian, pers.(1.1 - 1.9) disubstitusikan ke persamaan gelombang magnet pers.(2.16), hasilnya

$$\nabla^2 H_i(\vec{r}, t) - \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial H_p(\vec{r}, t)}{\partial x_p} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 H_i(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 M_i^{(L)}}{\partial t^2} + \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 M_i^{(NL)}}{\partial t^2}$$

karena yang diamati hanya ungkapan gelombang magnet di bidang batas bahan saja maka  $\vec{r} = 0$ , sehingga yang tertinggal adalah bentuk-bentuk eksponensialnya yang mengandung  $(i\omega t)$ .

$$\begin{aligned}
& -(k^{(1)})^2 H_{0i}^{(1)} + k_i^{(1)} k_p^{(1)} H_{0p}^{(1)} + \epsilon \mu_0 \omega^2 H_{0i}^{(1)} \\
& = -\epsilon \mu_0 \omega^2 \chi_{ij}^{(1)}(\omega) H_{0j}^{(1)} - \epsilon \mu_0 \omega^2 \chi_{ijk}^{(2)}(\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)}; \tag{1.10}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -(k^{(2)})^2 H_{0i}^{(2)} + k_i^{(2)} k_p^{(2)} H_{0p}^{(2)} + 4\epsilon \mu_0 \omega^2 H_{0i}^{(2)} \\
& = -4\epsilon \mu_0 \omega^2 \chi_{ij}^{(1)}(2\omega) H_{0j}^{(2)} - 2\epsilon \mu_0 \omega^2 \chi_{ijk}^{(2)}(2\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(1)}; \tag{1.11}
\end{aligned}$$

$$\chi_{ijk}^{(2)}(3\omega) H_{0j}^{(1)} H_{0k}^{(2)} = 0; \tag{1.12}$$

$$\chi_{ijk}^{(2)}(4\omega) H_{0j}^{(2)} H_{0k}^{(2)} = 0; \tag{1.13}$$

Pers.(1.10 - 1.13) inilah yang akan digunakan untuk mencari ungkapan gelombang magnet berfrekuensi sudut  $\omega$  maupun ungkapan gelombang magnet berfrekuensi sudut  $2\omega$  di dalam bahan magnetik non linear orde dua.