

RAGAM POLARITON PERMUKAAN PADA BAHAN FERROELEKTRIK BTO

(Surface Polariton Modes In Ferroelectric Materials BTO)

Widayanti

Staf Pengajar Program
Studi Fisika Fakultas
Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga
Yogyakarta

Abstract

The information about the properties of an electric and optic material is needed and required to know the usage of specific purposes. One of the applicable methods to obtain such information is by observing the behavior of polariton in a material. Dielectric material of ferroelectrics with high dielectric constant gives opportunity to be applied at signal processor at a very high frequency so that study about polariton of this ferroelectrics material need to be done.

In this study, a theoretical study is conducted by analytically reducing dispersion relationship between wave vector and frequency applied to a material. The solution is obtained numerically through computational process to produce a dispersion relationship graph. Bisection method is applied to analyze and solve surface polariton mode at the dispersion relationship.

A theoretical study of the polariton dispersion curves on the surface of the ferroelectric material $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BTO) has also been done. The direction of wave propagation is perpendicular to the easy axis without any external field. This study gives a theoretical description of the (BTO) surface and bulk modes at frequency range of $0-100\text{cm}^{-1}$. The dispersion relation is obtained through Maxwell equation. Substitution of $\mathbf{H}$ field and $\mathbf{E}$ field into the wave differential equation and application of boundary conditions will produce the dispersion relations. The internal dynamics or system parameters are included in the material permittivity.

From the research, it was obtained that the surface polariton only propagate in the TM (Transverse Magnetic) mode and they are

reciprocal, in which the change of wave vector direction, does not change the frequency. Mathematically, the result can be written as or $\omega(\vec{q}) = \omega(-\vec{q})$. However, in TE (Transverse Electric) mode, there is no propagation of surface mode and only the bulk polariton was found.

Kata kunci: Surface Polariton, Ferroelectric, dispersion relation, Resiprocal

A. Pendahuluan

Setiap bahan mempunyai eksitasi dasar (fonon, eksiton, magnon atau plasmon) yang dapat terganggu secara linier atau terkopling dengan gelombang elektromagnetik yang menjalar di dalamnya dengan frekuensi yang sama dengan keadaan eksitasi dasar bahan tersebut¹. Hasil gangguan foton dengan eksitasi dasar bahan disebut polariton. Sifat-sifat polariton ditentukan oleh jenis eksitasi dasar yang terlibat. Dengan mengamati perilaku polariton dalam suatu bahan, maka akan dapat diperoleh informasi mengenai sifat-sifat listrik dan optik dari bahan tersebut. Polariton fonon merupakan hasil gangguan antara foton dengan fonon.

Dalam beberapa tahun terakhir ini kajian tentang polariton banyak diminati oleh para peneliti bidang material di Universitas-universitas di seluruh dunia. Baru-baru ini, Jurusan Fisika bidang material di Indonesia juga mulai mengadakan penelitian mengenai ragam polariton ini, oleh para dosen dan mahasiswa, dalam hal ini dimulai dengan penelitian mengenai ragam polariton permukaan pada bahan antiferromagnetik uniaksial FeF_2 yang dijelaskan secara eksperimental melalui reflektivitas sinar infra merah jauh². Kemudian mengenai ragam polariton magnetik pada permukaan bahan magnetoelektrik³ dan ragam polariton magnetik pada permukaan bahan logam antiferromagnetik⁴. Sekarang penelitian mengenai ragam polariton tersebut dikembangkan lagi terutama mengenai ragam polariton permukaan pada bahan dielektrik. Hal ini dimaksudkan untuk memulai membangun pemaha-

¹Barnas, J., "Electromagnetic Modes in Magnetic System with Linear Magneto-Electric Interactions," dalam *Journal of Magnetism and Magnetic Material* 62, 1986, p. 381-391.

² K. Abroha, D.E. Brown, T.Dumelow, T.J. Parker, dan D.R. Tilley, "Oblique-incidence Far-Infrared Reflectivity Study of the Uniaxial Antiferromagnet FeF_2 ," dalam *Physical Review B* 50, 1994, p. 6808-6816

³ Malahayati., *Telaah Teoritis Kurva Dispersi Polariton Magnetik pada Permukaan Bahan Magnetoelektrik*, (Yogyakarta: Program Pasca Sarjana, UGM, 2003) p. 1

⁴ K. Gunawan, *Kajian Teoritis Ragam Polariton Magnetik dalam Bahan Logam Antiferromagnetik*, (Yogyakarta: Program Pasca Sarjana, UGM, 2003) p. 1

man mengenai ragam polariton dan menarik minat dosen dan mahasiswa yang lain untuk meneliti mengenai ragam polariton ini.

Frekuensi gelombang elastis (getaran kisi kristal) bahan dielektrik memiliki nilai frekuensi dalam jangkauan infra merah jauh yaitu dalam panjang gelombang 10^{-3} m sampai 10^{-5} m. Karakteristik ini memberikan peluang penerapan bahan dielektrik dalam pemrosesan sinyal pada frekuensi yang sangat tinggi, sehingga kajian tentang polariton fonon bahan dielektrik banyak dilakukan.

B. Tinjauan Pustaka

Pengamatan dan pembahasan terhadap polariton fonon telah beberapa kali dilakukan antara lain tentang interaksi antara medan radiasi dengan kristal ionik⁵. Kemudian telah dilakukan juga pengamatan polariton fonon pada GaP⁶. Secara eksperimen juga telah dilakukan pengamatan tentang dispersi polariton luar biasa (*extraordinary*) pada LiNbO₃⁷. Telah dilaporkan pula mengenai polariton fonon pada kristal ferroelektrik BaTiO₃ pada fase tetragonal⁸, polariton pada ferroelektrik MgSO₄·7H₂O⁹, polariton fonon pada kristal poliatomik LiNbO₃ pada daerah infra merah¹⁰, serta polariton fonon pada ferroelektrik KNaBa¹¹. Sebagai acuan utama penelitian ini adalah polariton fonon yang terjadi pada ferroelektik Bi₄Ti₃O₁₂ (BTO) diindrai dengan sinar infra merah jauh. Dijelaskan disini bahwa struktur BTO mempunyai stuktur perovskite, ferroelektrik *displacive* dan mempunyai suhu Curie pada 675 C^{0.12}

⁵ M. Born, dan K.Huang, *Dynamical Theory of Crystal Lattice*, (England: Oxford University Press, 1954)

⁶ E. Burstein, "Introductory Remark on Polariton," dalam *Proc of Taormina Research Conf* (New York: Pergamon Press, 1972), p.964.

⁷ Claus, dan H.W. Schotter, *Light Scattering in Solids*, ed M. Balkanski (Paris: Flamination, 1971)

⁸ E. Burstein A., Pinczuk, S. Ushioda, dan J.F. Scott, , *Light Scattering Spectra of Solids*, (New York: Spinger-Verlag, 1969),p. 347

⁹ L. Graf, G. Schaak, dan B. Unger, "Raman Scattering of Generalized Polaritons in a Biaxial Crystal," (Italy: *Proc of Taormina Research Conf*, 1972), p. 49

¹⁰ Merton, *Light Scattering in Solid*, (Paris: Balkanski, 1971), p.247

¹¹ G. Burn, "Polariton Studies in Ferroelectrics," dalam *Proc of Taormina Research Conf* (New York: Pergamon Press, 1972), p.45.

¹² Seiji,Kojima, Tsura Naoki, Wada Takeda Mitsuo, Nishizawa Seizi, "Far-infrared Phonon Polariton Dispersion Probed by Terahertz Time-domain Spectroscopy," dalam *Physical Review B* 67 (USA: American Physical Society, 2003), p. 035102.

Penelitian yang dilakukan penulis di sini adalah mengenai keberadaan polariton fonon permukaan pada $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BTO), yang dilakukan melalui kurva dispersinya, yang ditinjau pada suatu antarmuka pada $z = 0$, antara vakum ($z < 0$) dan medium ferroelektrik ($z > 0$). Gelombang dianggap merambat sepanjang sumbu y yang tegak lurus terhadap sumbu kristal (sumbu c).

Pada BTO sebagai salah satu kristal ferroelektrik, eksitasi dasar yang dimiliki adalah fonon¹³ sehingga sifat-sifat dari BTO ini dapat diperoleh melalui perilaku polariton fonon pada permukaan lapisan BTO. Fonon sebagai eksitasi dasar akan mengalami kopling dengan gelombang elektromagnetik yang dikenakan pada bahan, dimana kopling antara fonon dan foton tersebut dinamakan polariton fonon. Dinamika yang terjadi pada kristal ferroelektrik BTO ini akan diamati melalui karakteristik spektrum polariton fonon permukaan dan direpresentasikan oleh relasi dispersinya. BTO mempunyai kegunaan yang luas antara lain sebagai mikroaktuator ditinjau dari sifat piezoelektriknya, sebagai kapasitor untuk DRAM (*Dynamic Random Acces Memory*) ditinjau dari sifat permitivitas dan polarisabilitasnya yang tinggi dan sebagai sensor infra merah.

Yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu adalah adanya relasi dispersi polariton fonon limbak pada BTO,¹⁴ sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai relasi dispersi polariton fonon permukaan pada BTO.

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ terdiri dari unit-unit bertipe perovskite, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{10}$ ($\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+1}$ untuk $n=3$), dengan TiO_6 tripel oktahedra yang disisipi lapisan-lapisan Bi_2O_2 , serta atom-atom Bi di luar oktahedra. BTO ini merupakan salah satu kristal uniaxial dengan parameter kisi $a=5,4\text{\AA}$, $b=5,4\text{\AA}$ dan $c=32,8$, merupakan bahan ferroelektrik bertipe *displacive* dengan polarisasi remanent yaitu $19,24\text{ mC/cm}^2$ ¹⁵

Sejauh ini, dari literatur-literatur yang telah ditelusuri, belum terdapat laporan mengenai penelitian yang membahas tentang polariton permukaan pada $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$.

¹³ *ibid.*, p.035103.

¹⁴ *Ibid.*, p. 035104.

¹⁵ Y.I. Kim, dan M. K. Jeon, "Combined Structural Refinement of BTO using X ray and Neutron Powder Diffraction Data," dalam *Material Letters* 58 (Netherland: Elsevier, 2004), p. 1889-1893.

Penelitian ini diharapkan menjadi acuan untuk memperoleh deskripsi teoritis ragam permukaan pada bahan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ pada frekuensi infra merah jauh, serta menunjukkan adanya ragam tergandeng pada bahan ferroelektrik $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$. Penelitian ini juga berfaedah bagi penulis untuk lebih memahami materi-materi yang diperoleh selama mengikuti pendidikan terutama menyangkut tentang fisika kristal, elektrodinamika dan fisika zat padat.

Dari latar belakang yang telah disebutkan di atas, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yang akan diteliti dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut :

1. Bagaimana bentuk relasi dispersi yang mengaitkan frekuensi dengan bilangan gelombang dalam bahan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$
2. Apakah polariton permukaan pada bahan tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan teknik ATR.

Sedangkan tujuan penelitian ini adalah menunjukkan adanya polariton permukaan pada bahan ferroelektrik $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ melalui kurva dispersinya pada daerah frekuensi infra merah jauh yang diharapkan memiliki manfaat untuk acuan untuk memperoleh deskripsi teoritis ragam permukaan dan menunjukkan adanya ragam tergandeng pada bahan $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ pada daerah frekuensi 0 sampai 100 cm^{-1} .

BTO mempunyai sifat permitivitas dan polarisabilitas yang tinggi sehingga dapat diterapkan dalam pemrosesan sinyal pada frekuensi tinggi, sebagai mikroaktuator, kapasitor untuk DRAM (*Dynamic Random Acces Memory*) dan sebagai sensor infra merah.

C. Metode Penelitian

Penelitian yang telah dilakukan merupakan suatu kajian teoritis dan komputasi terhadap polariton permukaan pada bahan ferroelektrik BTO. Materi penelitian diperoleh melalui penelusuran, pemahaman dan pengolahan pustaka yang relevan terhadap penelitian yang dikaji. Kajian terhadap polariton fonon pada BTO dilakukan dengan menu-runkan secara analitik relasi dispersi yang mengaitkan vektor gelombang dan frekuensi yang dikenakan pada bahan. Penyelesaiannya dilakukan secara numerik dengan komputasi, dimana diagram alirnya ditunjukkan pada lampiran, sehingga menghasilkan grafik relasi dispersinya. Metode bagi dua (*bisection method*) digunakan sebagai analisis untuk menyelesaikan ragam polariton permukaan pada relasi dispersi.

Komponen-komponen tensor dielektrik BTO adalah¹⁶

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\text{dengan } \epsilon_{xx} = \epsilon(\infty) \left(\frac{\omega_{LO1xx}^2 - \omega^2}{\omega_{TO1xx}^2 - \omega^2} \right) \left(\frac{\omega_{LO2xx}^2 - \omega^2}{\omega_{TO2xx}^2 - \omega^2} \right)$$

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_{zz} = \epsilon(\infty) \left(\frac{\omega_{LO1yy}^2 - \omega^2}{\omega_{TO1yy}^2 - \omega^2} \right) \left(\frac{\omega_{LO2yy}^2 - \omega^2}{\omega_{TO2yy}^2 - \omega^2} \right)$$

Parameter-parameter internal BTO tersaji pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter-parameter internal BTO¹⁷

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
$\epsilon(\infty)$	6,76	$\epsilon(\infty)$	6,76
ω_{LO1yy}	32,5 cm ⁻¹ x (2 π c)	ω_{LO1xx}	42 cm ⁻¹ x (2 π c)
ω_{LO2yy}	74,5 cm ⁻¹ x (2 π c)	ω_{LO2xx}	98,5 cm ⁻¹ x (2 π c)
ω_{TO1yy}	28 cm ⁻¹ x (2 π c)	ω_{TO1xx}	36 cm ⁻¹ x (2 π c)
ω_{TO2yy}	68 cm ⁻¹ x (2 π c)	ω_{TO2xx}	85 cm ⁻¹ x (2 π c)

Prosedur penelitian, yang pertama adalah penentuan relasi dispersi untuk polariton bulk pada kristal ferroelektrik BTO dan yang kedua adalah penentuan relasi disperse untuk polariton permukaannya. Prosedur penurunan relasi dispersi yaitu dengan menggunakan persamaan-persamaan Maxwell untuk menurunkan bentuk persamaan differensial gelombang medan $\vec{E}$ dan $\vec{H}$. Substitusi ke dalam persamaan medan polariton $\vec{E}$ dan baik dalam vakum menghasilkan tetapan

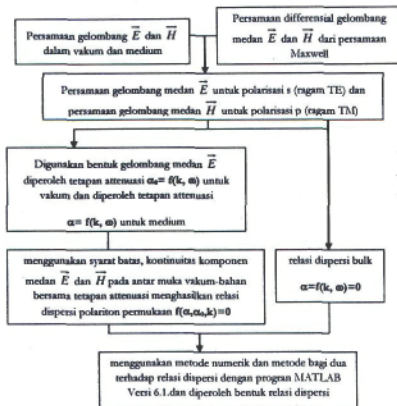
¹⁶ M.G. Cottam, D.R.Tilley, *Introduction to Surface and Superlattice Excitations*, (England: Cambridge University Press,1989), p. 202.

¹⁷ Seiji Kojima, Tsura Naoki, Wada Takeda Mitsuo, Nishizawa Seizi, "Far-infrared Phonon Polariton Dispersion Probed by Terahertz Time-domain Spectroscopy," dalam *Physical Review B* 67, 2003, hal 035102.

atenuasi ruang dalam vakum α_0 . dan tetapan atenuasi ruang dalam medium yaitu untuk ragam TE dan ragam TM.

Apabila terdapat dua buah nilai α maka jika α_1 dan α_2 keduanya real dan positif maka ragam permukaannya disebut ragam polariton permukaan standar atau *bona fide surface polariton*. Jika keduanya saling kompleks konjugat dengan bagian real positif, ragam permukaannya disebut sebagai ragam permukaan tergeneralisasi (*generalized surface mode*) dan jika α_1 real dan α_2 imajiner murni atau sebaliknya, ragam permukaannya disebut *pseudosurface mode* yang bukan merupakan ragam permukaan sebenarnya¹⁸. Komponen permeabilitas m , permitivitas μ adalah komponen tensor yang karakteristiknya tertentu pada bahan.

Syarat batas yang berupa kontinuitas komponen medan dan kontinuitas medan bila diterapkan pada antar muka vakum-medium serta digunakan tetapan atenuasi kedua ruang tersebut maka nantinya akan diperoleh relasi dispersi polariton fonon pada permukaan yang secara diagram diberikan pada gambar 1.

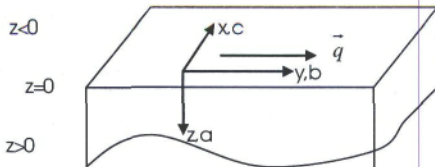


Gambar 1. Skema prosedur perhitungan relasi dispersi

¹⁸ K. Abraha, D.E. Brown, T. Dumelow, T.J. Parker, dan D.R. Tilley, "Oblique-incidence Far-Infrared Reflectivity Study of the Uniaxial Antiferromagnet FeF₂," *Physical Review B* 50, 1994, p. 6808-6816.

D. Hasil dan Pembahasan

Ditinjau suatu antar muka pada $z=0$, antara vakum ($z<0$) dan medium ferroelektrik ($z>0$), seperti yang tersaji pada gambar 2. Penjalaran gelombang adalah sepanjang sumbu y tegak lurus terhadap sumbu mudah c



Gambar 2. Geometri yang digunakan dalam perambatan polariton permukaan sepanjang sumbu y dan tegak lurus terhadap sumbu c dengan vektor gelombang. Material ferroelektrik menempati daerah $z > 0$

Bahan ferroelektrik yang digunakan berupa bahan ferroelektrik dengan sumbu mudah sejajar sumbu x serta memiliki permitivitas dalam bentuk¹⁹

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Persamaan gelombang dalam daerah vakum adalah

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E} = 0 \quad (2)$$

sementara dalam medium berlaku persamaan Maxwell untuk bahan ferroelektrik

$$\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) + \mu \frac{\omega^2}{c^2} \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} = 0. \quad (3)$$

¹⁹ M.G. Cottam, D.R. Tilley, *Introduction to Surface and Superlattice Excitations*, (England: Cambridge University Press, 1989), p.202

Medan polariton permukaan dengan amplitudo yang meluruh terhadap jarak dari antar muka, menjalar sebagai suatu gelombang bidang dalam arah y dan dapat dituliskan sebagai komponen medan $\vec{E}$ dan medan $\vec{H}$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(iqy + \alpha_0 z) \exp(-i\omega t) \quad (4.a)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0 \exp(iqy + \alpha_0 z) \exp(-i\omega t) \quad (4.b)$$

untuk vakum, sedangkan

$$\vec{E} = \vec{E} \exp(iqy - \alpha z) \exp(-i\omega t) \quad (5.a)$$

$$\vec{H} = \vec{H} \exp(iqy + \alpha_0 z) \exp(-i\omega t) \quad (5.b)$$

untuk medium, dengan q adalah besar vektor gelombang dari polariton permukaan sedangkan α_0 dan α adalah konstanta peluruhan dalam vakum dan dalam medium.

Persamaan (4.4a) disubstitusikan ke persamaan (4.2) dan dengan mengambil pendekatan harmonik, akan memberikan nilai konstanta peluruhan dalam daerah vakum

$$\alpha_0^2 = q^2 - \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (6)$$

Sedangkan dalam medium, persamaan (4.5a) ke persamaan (4.3) memberikan tiga persamaan linier homogen

$$(\alpha^2 - q^2 + \epsilon_{xx} k^2) E_{1x} = 0, \quad (7.a)$$

$$(\epsilon_{zz} k^2 - q^2) E_{1y} + iq\alpha E_{1z} = 0, \quad (7.b)$$

$$iq\alpha E_{1z} + (\alpha^2 + \epsilon_{yy} k^2) E_{1z} = 0. \quad (7.c)$$

Penyelesaian dari ketiga persamaan di atas menunjukkan adanya pemisahan ragam polariton dalam bahan, yaitu ragam dengan vector polarisasi tegak lurus pada vector perambatan gelombang q atau gelombang terpolarisasi s (ragam TE) dan ragam dengan vector polarisasi sejajar dengan vector perambatan vektor gelombang q , atau gelombang terpolarisasi p (ragam TM)

Penyelesaian ragam TE untuk komponen-komponen E_{1x}, H_{1y}, H_{1z} adalah

$$\alpha = \left(q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{xx} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

yang merupakan nilai konstanta peluruhan dalam medium. Jika konstanta peluruhan sama dengan nol, maka akan diperoleh persamaan dispersi untuk ragam polariton limbak sebagai berikut

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{xx}. \quad (9)$$

Selanjutnya medan magnet dapat dicari melalui²⁰

$$\vec{H} = \frac{-i}{\mu_0 \omega} \nabla \times \vec{E} \quad (10)$$

Persamaan (4.4a) disubstitusikan ke persamaan (4.10) sehingga diperoleh

$$\vec{H} = \left(0, \frac{-i\alpha}{\mu_0 \mu \omega} E_{1x}, \frac{-q}{\mu_0 \mu \omega} E_{1x} \right) \exp(iqy - \alpha z) \quad (11)$$

untuk dalam vakum, sedangkan persamaan (5.a) disubstitusikan ke persamaan (10) sehingga diperoleh

$$\vec{H} = \left(0, \frac{-i\alpha}{\mu_0 \mu \omega} E_{1x}, \frac{-q}{\mu_0 \mu \omega} E_{1x} \right) \exp(iqy - \alpha z) \quad (12)$$

untuk dalam medium.

Sedangkan syarat batas yang harus dipenuhi adalah

$$H_{oy} = H_{1y} \text{ dan } E_{0x} = E_{1x} \quad (13)$$

sehingga

$$\frac{i\alpha_0 E_{0x}}{\mu_0 \omega} = \frac{-i\alpha E_{1x}}{\mu_0 \mu \omega} \quad (14)$$

²⁰ D.L. Mills, E.Burstein, "Polariton: The Electromagnetic Modes of Media," *Rep. Prog. Phys.* 37 (Philadelpia: Institute of Physics and IOP Publishing, 1974), p.821

penerapan syarat batas di atas menghasilkan

$$\alpha = -\mu\alpha_0 \quad (15)$$

Persamaan (15) merupakan relasi dispersi implisit untuk ragam TE. Tetapi karena antara α dan α_0 sama-sama real dan positif, maka dikatakan tidak terdapat ragam polariton permukaan dengan $\mu > 0$

Sedangkan penyelesaian untuk ragam TM untuk komponen-komponen H_{1x}, E_{1y}, E_{1z} diperoleh dengan menyelesaikan persamaan (7.b) dan persamaan (7.c)

$$\begin{pmatrix} 0 & (\epsilon_{zz}k^2 - q^2) & iq\alpha \\ 0 & iq\alpha & (\alpha^2 + \epsilon_{yy}k^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{1z} \end{pmatrix} = 0 \quad (16)$$

Penyelesaian determinan ini memberikan

$$\alpha^2 = \frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{zz}} \left(q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \mu \epsilon_{zz} \right) = q^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \mu \epsilon_{yy} \quad (17)$$

persamaan di atas merupakan nilai konstanta peluruhan dalam medium. Jika konstanta peluruhan sama dengan nol, maka akan diperoleh persamaan dispersi untuk ragam polariton limbak

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \mu \epsilon_{yy} \quad (18)$$

Selanjutnya medan listrik pada dapat dicari melalui²¹

$$\vec{E} = \frac{i}{\epsilon_0 \epsilon \omega} \nabla \times \vec{H} \quad (19)$$

Persamaan (4.b) disubstitusikan ke persamaan (19) sehingga diperoleh

$$\vec{E} = \left(0, \frac{i\alpha_0}{\epsilon_0 \omega} H_{0x}, \frac{-q}{\epsilon_0 \omega} H_{0x} \right) \exp(iqy + \alpha_0 z) \quad (20)$$

²¹ *ibid*, p. 821

untuk dalam vakum, sedangkan persamaan (5.b) disubstitusikan ke persamaan (19) sehingga diperoleh

$$\vec{\epsilon} \cdot \vec{E} = \frac{i}{\epsilon_0 \omega} \nabla \times \vec{H} = \left(0, \frac{-i\alpha}{\epsilon_0 \epsilon \omega} H_{1x}, \frac{-q}{\epsilon_0 \epsilon \omega} H_{1x} \right) \exp(iqy - \alpha z) \quad (21)$$

untuk dalam medium.

Sehingga

$$E_{1x} = 0, \quad E_{1y} = \frac{-i\alpha}{\epsilon_0 \omega} \frac{H_{1x}}{\epsilon_{yy}}, \quad E_{1z} = \frac{-q}{\epsilon_0 \omega} \frac{H_{1x}}{\epsilon_{yy}} \quad (22)$$

Sedangkan syarat batas yang harus dipenuhi adalah

$$E_{0y} = E_{1y} \text{ dan } H_{0x} = H_{1x} \quad (23)$$

penerapan syarat batas di atas menghasilkan

$$\epsilon_{yy} \alpha_0 + \alpha = 0 \quad (24)$$

Persamaan (24) merupakan relasi dispersi implisit untuk ragam TM dan terdapat polariton permukaan pada $\epsilon_{yy}(\omega) < 0$ yaitu pada jarak frekuensi $\omega_r < \omega < \omega_r$.

Persamaan (4.24) dapat dituliskan secara lebih eksplisit dalam bentuk

$$q^2 = \frac{\omega^2 \epsilon_{yy} (\epsilon_{yy} - \mu)}{c^2 \epsilon_{yy}^2 - 1} \quad (25)$$

Pada persamaan di atas q merupakan fungsi genap sehingga ragam polariton merupakan ragam resiprok dimana $\omega(\vec{q}) = \omega(-\vec{q})$.

Pendekatan elektrostatis yaitu $q \gg \frac{\omega}{c}$, dapat digunakan untuk mencari frekuensi batas elektrostatis. Apabila pendekatan ini digunakan maka α dan α_0 akan mendekati q sehingga persamaan (24) tereduksi menjadi

$$\epsilon_{yy} |q| + |q| = 0 \quad (26)$$

sehingga

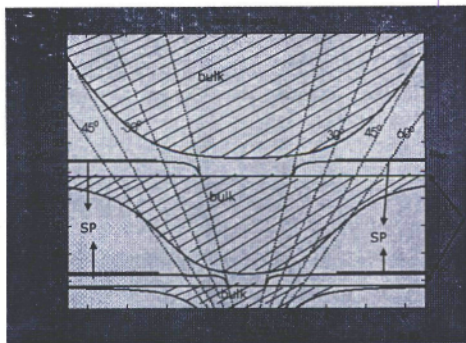
$$\varepsilon_{yy} = -1 \quad (27)$$

Penyelesaian persamaan ini memberikan ungkapan frekuensi batas elektrostatis sebagai berikut

$$\omega_{sp}^4(\varepsilon_{\infty} + 1) - \omega_{sp}^2(\varepsilon_{\infty}\omega_{LO1}^2 + \varepsilon_{\infty}\omega_{LO2}^2 + \omega_{TO1}^2 + \omega_{TO2}^2) + \varepsilon_{\infty}\omega_{LO1}^2\omega_{LO2}^2 + \omega_{TO1}^2 + \omega_{TO2}^2 = 0 \quad (28)$$

Apabila nilai-nilai konstanta pada Tabel 3.1 dimasukkan, maka akan diperoleh frekuensi batas magnetostatiknya yaitu $\omega_{sp1} = 32,05 \text{ cm}^{-1}$ dan $\omega_{sp2} = 73,6 \text{ cm}^{-1}$.

Penyelesaian bentuk relasi dispersi dapat diperoleh secara numerik dengan menggunakan MATLAB versi 6.1. Relasi dispersi polariton limbak pada persamaan (18) ditunjukkan pada gambar (3) yaitu grafik keterkaitan frekuensi sudut ω terhadap vektor gelombang q . Pada grafik tersebut, frekuensi disajikan dalam bentuk ω dengan dimensi cm^{-1} , sementara vektor gelombang disajikan dalam bentuk yang berdimensi scm^{-2} . Garis cahaya yang ditandai dengan L dinyatakan dalam bentuk persamaan $q = \frac{\omega}{c}$ sedangkan garis ATR dinyatakan dalam bentuk persamaan $q = \frac{\omega}{c} \varepsilon_p^{\frac{1}{2}} \sin \phi$ dengan $\varepsilon_p = 11,56$ menyatakan permitivitas prisma silikon dan menyatakan sudut gelombang elektromagnet pada ATR (*Attenuated Total Reflection*) yang disajikan dengan besar sudut $30^\circ, 45^\circ$, dan 60°



Gambar 3. Kurva dispersi ragam *bulk* dan ragam permukaan

Pada grafik gambar (3) di atas ditunjukkan adanya ragam polariton *bulk* (limbak) dan ragam polariton permukaan yang bersifat *reciprocal*. Hal ini sesuai dengan bentuk polariton *bulk* yang dirumuskan dalam persamaan (18) maupun bentuk polariton permukaan yang dirumuskan dalam persamaan (25) dimana keduanya merupakan fungsi genap terhadap variable q .

ω_T dan ω_L masing-masing adalah pole dan zero dari $\epsilon(\omega)$. Pole $\omega = \omega_T$ adalah frekuensi ragam fonon optik transversal, sedangkan zero $\omega = \omega_L$ adalah frekuensi ragam fonon optik longitudinal.

Dalam kurva relasi dispersi ditunjukkan bahwa pole dari permitivitas listrik adalah pada frekuensi 28 cm^{-1} dan 68 cm^{-1} sedangkan zero dari permitivitas listrik adalah pada frekuensi $32,50 \text{ cm}^{-1}$ dan $74,50 \text{ cm}^{-1}$. Nilai-nilai frekuensi pole dan zero ini membatasi pita polariton *bulk*. Pita polariton *bulk* bagian bawah dibatasi oleh nilai frekuensi pole 28 cm^{-1} , pita polariton *bulk* bagian tengah dibatasi oleh nilai frekuensi zero $32,50 \text{ cm}^{-1}$ dan nilai frekuensi pole 68 cm^{-1} . Sedangkan polariton *bulk* atas dibatasi oleh nilai frekuensi $74,50 \text{ cm}^{-1}$.

Polariton permukaan bawah muncul dalam perpotongan antara batas atas pita polariton limbak bawah dengan garis cahaya dalam ruang vakum sampai menuju daerah elektrostatik dengan nilai frekuensi yang mendekati . Perpotongan terjadi pada frekuensi di sekitar $31,90 \text{ cm}^{-1}$ dan $73,55 \text{ cm}^{-1}$. Sedangkan polariton permukaan atas muncul dalam

perpotongan antara batas atas pita polariton *bulk* tengah dengan garis cahaya dalam ruang vakum sampai menuju daerah elektrostatik dengan nilai frekuensi yang mendekati.

E. Penutup

Berdasar hasil pembahasan, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Terdapat dua ragam gelombang elektromagnetik yang merambat dalam bahan BTO dengan arah penjalaran yang tegak lurus terhadap sumbu mudah yaitu ragam TE (*Transverse Electric*) atau polarisasi p dan ragam TM (*Transverse magnetic*) polarisasi s.
2. Polariton fonon pada permukaan bahan BTO diperoleh dalam ragam TM (polarisasi p) dan bersifat resiprokal atau perubahan arah vektor perambatan tidak mengubah nilai frekuensi atau $\omega(\vec{q}) = \omega(-\vec{q})$.
3. Dalam jangkauan frekuensi infra merah jauh diperoleh ragam polariton pada bahan BTO.

Penelitian secara eksperimen perlu dilakukan untuk membuktikan hasil-hasil yang diperoleh melalui kajian teoritik ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraha, K., Brown, D.E., Dumelow, T., Parker, T.J., dan Tilley, D.R., "Oblique-incidence Far-Infrared Reflectivity Study of the Uniaxial Antiferromagnet FeF_2 ", dalam *Physical Review B* 50, 1994, p. 6808-6816.
- Barnas, J., "Electromagnetic Modes in Magnetic System with Linear Magneto-Electric Interactions" dalam *Journal of Magnetism and Magnetic Material* 62, 1986, p. 381-391.
- Born, M dan Huang, K., *Dynamical Theory of Crystal Lattice*, Oxford University Press, 1954.
- Burn, G., "Polariton Studies in Ferroelectrics," dalam *Proc of First Taormina Research Conf. Italy*, Pergamon Press, 1972.
- Burstein, E., Introductory Remark on Polariton, dalam *Proc of Taormina Research Conf, Italy*, Pergamon Press 1972.
- Burstein, E., Pinczuk, A., Ushioda, S dan Scott, J.F., *Light Scattering Spectra of Solids*, New York: G.B Wright, 1969.
- Cottam, M.G dan Tilley, D.R., *Introduction to Surface and Superlattice Excitations*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- Claus, Schotter, H.W., *Light Scattering in Solids*, ed M. Balkanski, Paris: Paris Flamman, 1971).
- Griffith, J., *Introduction Classical Electrodynamics*, New York: John Wiley & Sons, 1989.
- Gunawan, K., *Kajian Teoritis Ragam Polariton Magnetik dalam Bahan Logam Antiferromagnetik*, Yogyakarta: Program Pasca Sarjana, UGM, 2003.
- Graf, L., Schaak, G dan Unger, B., "Raman Scattering of Generalized Polaritons in a Biaxial Crystal," dalam *Proc of Taormina Research Conf, Italy*, 1972.
- Jackson J. D., *Classical Electrodynamics*, 3rd ed, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- Kojima, Seiji, Naoki Tsuru, Mitsuo Wada Takeda, Seizi Nishizawa, , "Far-infrared Phonon Polariton Dispersion Probed by Terahertz Time-domain Spectroscopy," dalam *Physical Review B* 67, 2003.
- Malahayati., *Telaah Teoritis Kurva Dispersi Polariton Magnetik pada Permukaan Bahan Magnetoelektrik*, Yogyakarta: Program Pasca Sarjana, UGM, 2003.

- Merton., *Light Scattering in Solid*, Paris: Balkanski, 1971.
- Mills, D.L dan Burstein, E., Polariton: "The Electromagnetic Modes of Media", dalam *Rep. Prog. Phys.* 37, 1974.
- Nelson,D.F., *Electric, Optic, and Acoustic Interactions in Dielectrics*, New York: John Wiley and Sons, 1930.
- Kim, Y.I dan Jeon M. K., "Combined Structural Refinement of BTO using X Ray and Neutron Powder Diffraction Data", *Material Letters* 58, 2004, p.1889-1893.