

Perhitungan Reflektansi dan Transmittansi Bahan Transparan Dalam Medan Listrik Luar

Asep Yoyo Wardaya¹ dan K. Sofjan Firdausi²

1. Lab. Fisika Atom & Nuklir, Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP, Semarang

2. Lab. Optoelektronik & Laser Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP, Semarang

Intisari

Telah dilakukan kajian pada sifat optis non linier dari medium transparan dalam medan listrik luar (E) yang kuat. Dengan mengenakan E sampai beberapa juta volt/m diperoleh indeks bias berbanding lurus terhadap E untuk bahan transparan seperti kaca kuarsa, KDP, KD*P, dan berbanding E^2 untuk material seperti air, nitrobenzin, dan nitrotoluen. Perubahan indeks bias bahan tersebut kemudian digunakan untuk menentukan reflektansi $\mathcal{R}$ dan transmittansi $\mathcal{T}$ menggunakan cahaya tampak ($\lambda=632,8$ nm) yang arah perambatannya tegak lurus terhadap arah medan E . Kenaikan medan dari 0-100 MV/m praktis hanya memberikan perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ yang relatif kecil. Teoritis diperoleh perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ yang cukup signifikan mulai orde 10^{12} V/m untuk bahan kuarsa, KDP, dan KD*P. Sedangkan untuk bahan air, nitrobenzin, dan nitrotoluen diperoleh perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ mulai orde 10^9 V/m.

Abstract

The characteristics of nonlinear optics of transparency media in a strong electric field (E) have been studied. By applied E for several million volts/m, it has been obtained that the refractive index of glass, quartz, KDP, and KD*P are linearly dependent from E , and the other hand quadratic dependent from E for water, nitrobenzene, and nitro toluene. The change of refractive index of the material is then used to calculate Reflectance and Transmittance at visible light ($\lambda=632,8$ nm), which its propagation assumed to be perpendicular to the direction of E field. The variation of field from 0-100 MV/m just contributed very small change of $\mathcal{R}$ and $\mathcal{T}$. Theoretically, a drastically change of $\mathcal{R}$ and $\mathcal{T}$ was obtained significantly for very large electric field, i.e. in the order of 10^{12} V/m for quartz, KDP, and KD*P. And the other hand, it needed in order of 10^9 V/m for water, nitro toluene, and nitro benzene.

Kata Kunci: optis tak linier, indeks bias tak linier, tensor elektro-optis, reflektansi dan transmittansi

PENDAHULUAN

Respon tak linier pada suatu media, seperti suseptibilitas, dielektrik, indeks bias, polarisabilitas, dan lain lain akan muncul bila dikenai cahaya dengan intensitas yang sangat kuat seperti laser daya tinggi, atau diletakkan dalam medan listrik luar (atau magnet) yang cukup besar. Secara umum, suseptibilitas media, χ karena adanya medan listrik luar E diberikan oleh persamaan [1,2]:

$$\chi = \chi_1 + \chi_2 E + \chi_3 E^2 + \dots \quad (1)$$

dengan χ_1 , χ_2 , $\chi_3, \dots$ adalah tensor suseptibilitas orde 1, 2, 3, ... dst.

Sifat ini disebabkan oleh ketidakmampuan dipol saat merespon gelombang datang. Elektron terluar dari atom berperan memberikan kontribusi polarisasi (P) dalam medium itu sebesar:

$$P = \chi E \quad (2).$$

Dengan mensubstitusikan (1) ke (2) diperoleh hubungan antara P yang dapat dituliskan sebagai fungsi deret dari E yaitu [1-4]

$$P = \chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots \quad (3)$$

dengan χ_1 adalah tensor suseptibilitas orde kesatu atau linier, sedangkan $\chi_2, \chi_3, \dots, \chi_n$ adalah tensor suseptibilitas orde kedua, ketiga, dst. Persamaan (3) menggambarkan secara umum bagaimana kelakuan nonlinier antara polarisasi medium terhadap medan listrik luar E .

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sifat tak linier lainnya juga diperoleh dari polarisabilitas molekul Azo Dyes, yang sering digunakan sebagai bahan pewarna pada makanan dan tekstil, bila digunakan laser dengan intensitas tinggi[5].

Sejak tahun 2002, di Laboratorium Fisika Zat Padat, Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP telah dikembangkan penelitian-penelitian untuk menyelidiki sifat orientasi bahan dengan menempatkannya dalam medan luar. Hasil-hasil non-linier dari polarisabilitas ditunjukkan untuk bahan dielektrik KDP (KH_2PO_4) yang dilarutkan dalam air terhadap perubahan konsentrasi, suhu. Kecenderungan yang sama terjadi pula terhadap variasi frekuensi medan listrik bolak-balik [6-8].

Untuk bahan yang transparan, ketergantungan suseptibilitas terhadap medan listrik seperti pada persamaan (1) dapat digantikan oleh indeks bias. Yang menarik adalah perubahan indeks bias tentulah diikuti perubahan sifat lainnya, seperti reflektivitas. Dalam tulisan ini hendak dihitung perubahan indeks bias beberapa bahan transparan dalam medan listrik yang cukup kuat, kemudian sebagai dampaknya dihitung Reflektansi dan Transmittansinya.

HIPOTESA DAN PERHITUNGAN

Secara analog, penggambaran paling sesuai dari respon medium tak linier akibat interaksi medan luar dengan media berupa kristal, dapat dinyatakan dalam indeks bias n sebagai pengganti suseptibilitas, dengan pers. [3,9]:

$$\left(\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right) \right)_i = \sum_j p_{ij} E^j + \sum_{jk} p_{ijk} E^j E^k + \sum_{jkl} p_{ijkl} E^j E^k E^l + \dots \quad (4)$$

($i=1,2,3,\dots,6$ dan $j=x,y,z$.)

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2} \right) = \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2} \quad (5),$$

dengan p_{ij} , p_{ijk} , p_{ijkl} ,... adalah tensor elektro optis orde kesatu (atau linier), orde kedua, ketiga, dan seterusnya, sedangkan n_0 adalah indeks bias awal sebelum dikenakan medan luar. Persamaan (4) menunjukkan bahwa secara umum, indeks bias tergantung pada arah perambatan dan arah polarisasi relatif terhadap sumbu kristal. Karena E adalah vektor, maka p adalah tensor yang mencerminkan sifat simetri kristal. Terhadap derajat kesimetrian, beberapa komponen tensor elektro optis dapat dieliminasi (dihilangkan) atau satu sama lain nilainya identik.

Analog dengan persamaan (1), untuk bahan dari kristal, diperoleh komponen elektro optis tunggal yang dapat dituliskan kembali dari persamaan (4) dari indeks biasnya sebagai fungsi medan listrik sampai orde kedua[10]:

$$\frac{1}{n^2} = \frac{1}{n_0^2} + pE + PE^2 \quad (6)$$

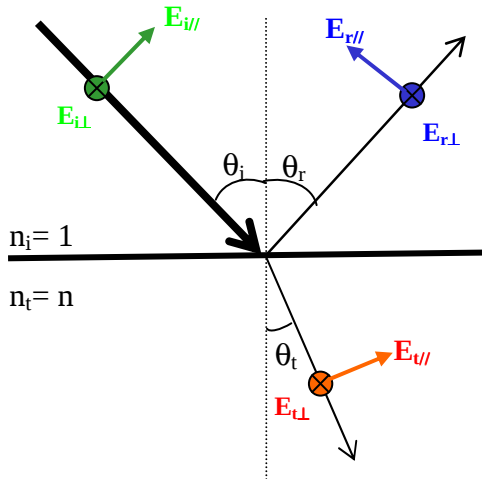
dengan p dan P adalah koefisien elektro optis linier dan kuadratik (asumsi tak ada *strain* dari kristal yang berakibat berubahnya n).

Persamaan Fresnel

Dengan berubahnya n terhadap E , maka dapat disimpulkan bahwa tentu ada aspek-aspek atau sifat-sifat lain yang berubah pada bahan. Beberapa sifat yang diperoleh adalah bila cahaya berinteraksi dengan media tersebut yakni reflektansi dan transmittansinya.

Pada gambar 1 ditampilkan proses pemantulan cahaya pada bidang batas dari suatu medium transparan semi tak berhingga. Perbandingan besar

medan listrik yang dipantulkan (ditransmisikan) terhadap medan listrik sinar datang disebut sebagai koefisien refleksi (r) dan koefisien transmisi (t).



Gambar 1. Proses pantulan dan pembiasan cahaya dari udara ke medium transparan (indek bias n) semi tak berhingga. Indeks i , r , dan t berturut-turut menyatakan sinar datang, pantul, dan transmisi. Tanda $\perp$ dan $\parallel$ menyatakan medan listrik yang tegak lurus dan sejajar bidang pantul/transmisi.

Untuk medan listrik yang tegak lurus atau sejajar bidang pantul (atau transmisi) diperoleh hubungan koefisien refleksi dan transmisi sebagai berikut:

$$r_{\perp, \parallel} = \frac{E_{r\perp, \parallel}}{E_{i\perp, \parallel}}$$

dan

$$t_{\perp, \parallel} = \frac{E_{t\perp, \parallel}}{E_{i\perp, \parallel}} \quad (7)$$

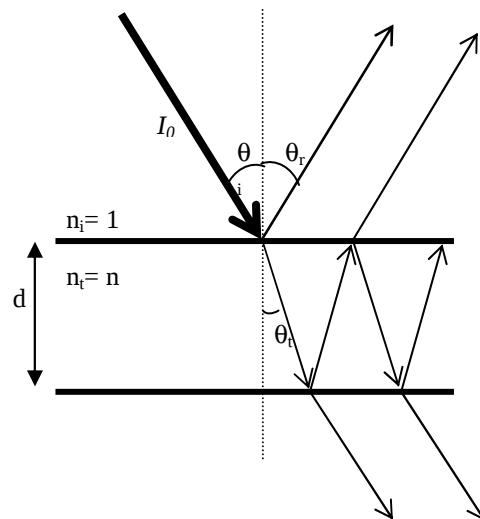
Dari teori pemantulan cahaya pada bidang batas media, diperoleh persamaan Fresnel untuk r dan t sebagai fungsi n , dan θ_i . Untuk kasus cahaya yang datang tegak lurus pada permukaan medium transparan dengan indeks bias n , dari pers. (7) diperoleh [1-2]:

$$r = \frac{n-1}{n+1} \quad (8).$$

$$t = \frac{2n}{n+1}$$

Sedangkan reflektansi adalah $R = r^2$ dan transmitansinya $T = t^2$.

Dalam kasus perubahan sifat optis non linier, ditempatkan sebuah material transparan dengan ketebalan tertentu (orde mm sampai cm), sehingga persamaan Fresnell dari proses gambar 1 perlu dimodifikasi untuk dimensi berhingga seperti terlihat pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Proses pemantulan dan pembiasan cahaya dari udara ke medium transparan (indek bias n) dengan tebal d . I_0 adalah intensitas cahaya yang datang.

Di dalam media setebal d antara batas udara dan bahan terjadi banyak pantulan dan pembiasan. Mengingat orde d dalam mm sampai cm, maka intensitas yang terpantul ataupun ditransmisikan bukan merupakan hasil superposisi medan listriknya, melainkan hanya merupakan penjumlahan dari intensitas pantul atau transmisi:

$$I_{\text{rt}} = I_0 (R + RT^2 + R^3T^2 + \dots) \quad (9)$$

$$I_{\text{st}} = I_0 (T^2 + R^2T^2 + R^4T^2 + \dots)$$

Pers. (9) menunjukkan bahwa baik intensitas pantul dan transmisi merupakan penjumlahan dari deret geometri yang konvergen terhadap R .

Reflektansi $\mathcal{R}$ dan transmitansi $\mathcal{T}$ total pada kasus gambar 2 dapat dituliskan sebagai:

$$\mathcal{R} = R + \frac{RT^2}{1-R^2}$$

$$\mathcal{T} = \frac{T^2}{1-R^2} \quad (10)$$

Hipotesa awal berangkat dari pers. (8), bila bahan diletakkan dalam medan listrik atau magnet luar yang cukup besar, dengan asumsi arah perambatan cahaya tegak lurus arah medan listrik E . Perubahan indek bias yang terjadi akan diikuti dengan perubahan reflektivitas. Dengan memisalkan $n = e^{2u}$ diperoleh:

$$R = \left(\frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}} \right)^2 = \tanh^2 u$$

$$T = \frac{1}{\left(\frac{e^u + e^{-u}}{2} \right)^2} = \sec^2 h^2 u \quad (11).$$

Sedangkan $u = -\frac{1}{4} \ln \left(\frac{1}{n^2} \right)$ atau

$$u = -\frac{1}{4} \ln \left(\frac{1}{n_0^2} + pE + PE^2 \right)$$

maka diperoleh:

$$R = \tanh^2 \left\{ \frac{1}{4} \ln \left(\frac{1}{n_0^2} + pE + PE^2 \right) \right\}$$

dan

$$T = \sec^2 h^2 \left\{ \frac{1}{4} \ln \left(\frac{1}{n_0^2} + pE + PE^2 \right) \right\} \quad (12).$$

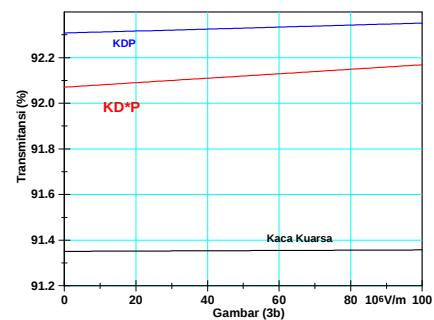
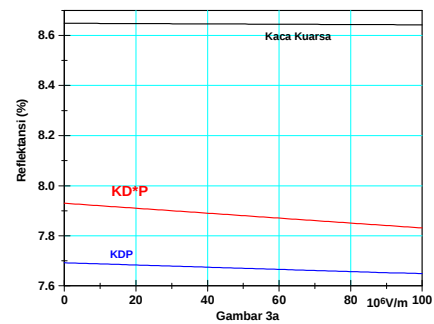
Substitusikan (12) ke (10) diperoleh hasil yang tuntas dari pers. (10) dan mengindikasikan dengan jelas bahwa $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ berubah terhadap medan listrik luar.

HASIL DAN DISKUSI

Untuk melihat keluaran $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ sebagai variasi E , diambil beberapa bahan yang mempunyai sifat simetri serta homogenitas tinggi. Untuk bahan KDP ($p = 11 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0 = 1,5$) KD*P ($p = 24,1 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0 = 1,51$) dan kaca kuarsa ($p = 1,4 \times 10^{-12}$ m/V, $n_0 = 1,54$) diperoleh hubungan indek bias yang linier terhadap E :

$$n \cong n_0 - \frac{n_0^3 p E}{2} \quad (13)$$

karena P yang cukup kecil sehingga komponen kuadrat dari E dapat diabaikan. Dari (13), (12), dan (10) diperoleh plot, grafik $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ sebagai fungsi E untuk KDP, KD*P dan kaca kuarsa ditampilkan pada **lampiran** sampai orde 10^{12} volt/m. Mengingat orde tersebut sangat susah diperoleh dalam skala eksperimen, kami menganalisa lagi plot tersebut untuk beberapa juta volt/m (0-100 juta V/m) seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik hubungan $\mathcal{R}$ (3a) dan $\mathcal{T}$ (3b) sebagai fungsi E untuk bahan kuarsa, KDP dan KD*P.

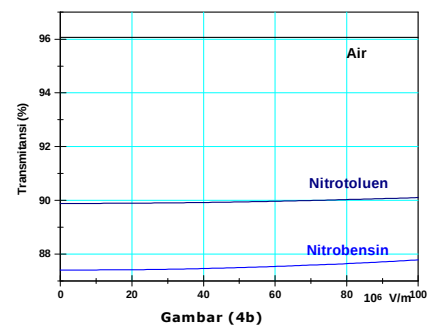
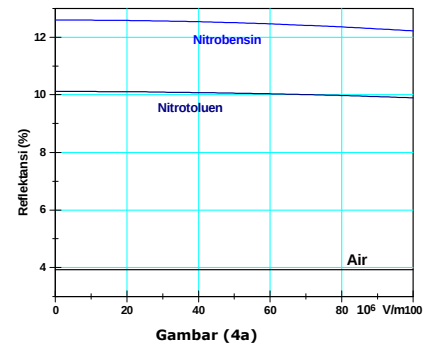
Dari gambar 3, nampak bahwa perubahan reflektansi dan transmitansi ketiga bahan dari mula-mula (tanpa medan) sampai dengan dikenakan medan 100 juta volt/m praktis sangat kecil. Terutama terlihat pada kuarsa yang hampir konstan. Pada KDP baik $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ mengalami perubahan hanya 0,04%, sedangkan pada KD*P perubahan 0,1%. Perubahan yang sangat kecil ini dalam interval medan listrik 0 sampai 100 juta volt/m menunjukkan bahwa bagaimana lemahnya polarisabilitas dan teraturnya susunan kristal. Perubahan yang drastis hanya diperoleh bila medan listrik diperbesar sampai orde 10^{12} volt/meter, yang mengindikasikan bahan susah terpolarisasi. (lihat lampiran). Hal ini tidak dibahas karena secara eksperimen sangat sulit diperoleh medan seorde itu.

Untuk bahan air ($n_0 = 1,33$; $P = 1,61 \times 10^{-20}$), nitrotoluen ($n_0 = 1,6$; $P = 4,33 \times 10^{-19}$), dan nitrobenzin ($n_0 = 1,6$; $P = 7,42 \times 10^{-19}$), serta mengingat sifat simetri kristal $E(-x) = E(+x)$, maka hanya komponen kuadrat saja yang muncul. Komponen pangkat 4, 6, 8, dst dapat diabaikan. Sedangkan komponen linier, pangkat 3, 5, dst terhapus karena sifat simetri:

$$n \cong n_0 - \frac{n_0^3 P E^2}{2} \quad (14).$$

Substitusi (14) ke (12) dan (10) diperoleh plot grafik $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ sebagai fungsi medan listrik E sampai orde 10^9 volt/m (lihat lampiran). Karena orde ini masih relatif besar secara eksperimen, maka kami analisa lagi untuk orde juta volt/m seperti pada gambar 4.

Seperti halnya gambar 3, gambar 4 menunjukkan perubahan reflektansi dan transmitansi yang sangat kecil sebelum dan sesudah diberikan medan listrik sampai orde 100 juta V/m. Pada interval 0-100 MV/m, media air merupakan bahan yang cukup stabil ditinjau dari polarisabilitasnya.



Gambar 4. Grafik hubungan $\mathcal{R}$ (4a) dan $\mathcal{T}$ (4b) sebagai fungsi E untuk media air, nitrotoluen, dan nitrobenzin.

Hal ini ditunjukkan dari nilai $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ yang relatif konstan pada orde medan listrik itu. Perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ yang cukup kecil terjadi pada nitrotoluen sebesar 0,24%, dan pada nitrobenzin sebesar 0,37%. Efek ini menunjukkan betapa lemah polarisabilitas bahan untuk terinduksi dalam medan listrik pada orde sampai 100 juta V/m. Perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{T}$ yang cukup drastis diperoleh bila medan dikenakan di atas 10^9 volt/meter (lihat lampiran L2

KESIMPULAN DAN SARAN

Polarisasi medium dapat diungkapkan sebagai deret pangkat dari fungsi medan listrik luar E yang menunjukkan sifat non linier dari polarisasi apabila dikenakan medan luar tertentu yang cukup besar.

Bahan kristal padat seperti kuarsa, KDP, dan KD*P memberikan perubahan indeks bias yang linier

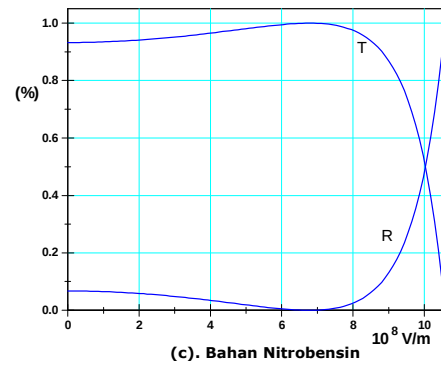
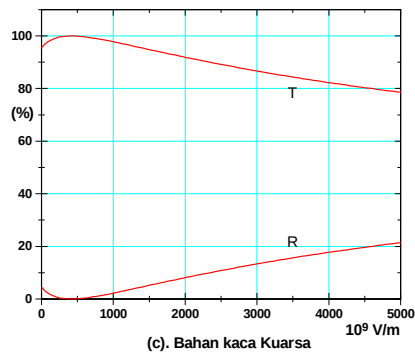
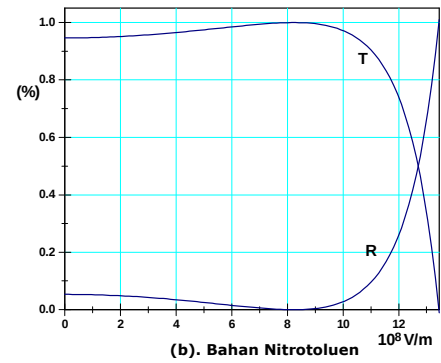
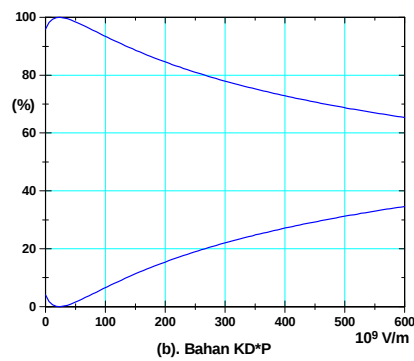
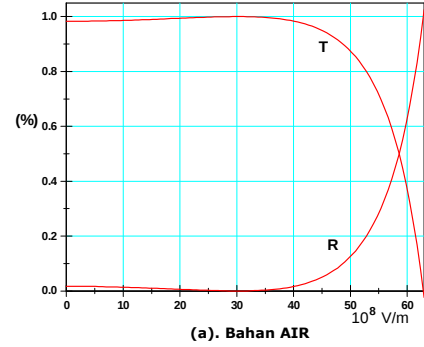
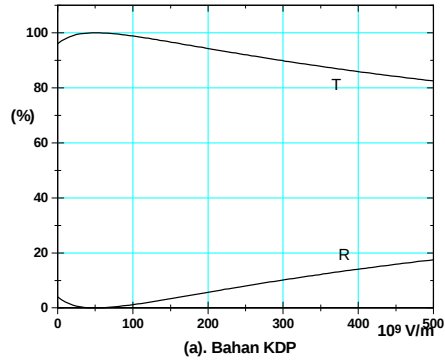
terhadap E . Perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{I}$ ternyata relatif sangat kecil pada interval 0-100 MV/m. Diperlukan medan seorde 10^{12} V/m untuk menginduksi bahan sehingga $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{I}$ berubah secara radikal.

Bahan cair seperti air, nitro toluen, dan nitro bensin menunjukkan perubahan indek bias yang kuadratis terhadap E . Perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{I}$ juga masih relatif kecil, meskipun lebih besar sedikit dari kristal padat (terutama untuk nitrobensin dan nitrotoluen). Untuk memperoleh perubahan $\mathcal{R}$ dan $\mathcal{I}$ yang cukup signifikan, ternyata diperlukan medan pada orde 10^9 V/m. Hal ini juga membuktikan bahwa polarisabilitas cairan biasanya lebih besar dari kristal padatan, khusus untuk media yang digunakan pada tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].Hecht, Eugene. *Optics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1992.
- [2].Pedrotti, Frank L., S.J. Leno S. Pedrotti. *Introduction to Optics*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey. 1993 (Hal 411-419, dan hal 541-559).
- [3].Mills,D.L. *Nonlinear Optics*. Springer -Verlag.Bab 1. 1991
- [4].Butcher, P.N. & D. Cotter. *The Elements of Nonlinear Optics*. Cambridge University Press. 1990.
- [5].Firdausi, K. Sofjan, K. Kneipp, K. Gueldner, R. Liedtke. *Surface Enhanced Raman Scattering on Azo Dyes in colloidal silver solution*, Berkala Fisika, Vol. 4, no. 1, Januari, Jurusan Fisika UNDIP, 2000.
- [6].Oktavian, Yopie. *Karakteristik Polarizabilitas Bahan Dielektrik KH_2PO_4 Terhadap Perubahan Konsentrasi*, Skripsi, Jurusan Fisika FMIPA UNDIP, 2002.
- [7]. Oktavian, Yopie, W. Setia Budi, Priyono. *Karakteristik Polarizabilitas Bahan Dielektrik KH_2PO_4 Terhadap Perubahan Konsentrasi dan Temperatur*, Berkala Fisika, Vol. 5, no. 4, Oktober, Jurusan Fisika UNDIP, 2002.
- [8].Mulyadi. *Pengaruh perubahan Frekuensi Medan Bolak-Balik Terhadap Karakteristik Permittivitas Relatif Bahan Dielektrik KH_2PO_4* . Skripsi, Jurusan Fisika FMIPA UNDIP, 2004.
- [9].Yariv, Amnon. *Optical Electronic*, 3rd ed.,Holt, Rinehart and Winston, New York, chapter 8-9, 1985.
- [10].Kaminov, Ivan P. *An Introduction to Electrooptic devices*. Academic Press, New York, chapter 3, 1974.

LAMPIRAN



Gambar L1. Grafik Transmittansi (T) dan Reflektansi (R) sebagai fungsi medan listrik E untuk bahan a. KDP, b. KD*P, dan c. Kuarsa.

Gambar L2. Grafik Transmittansi (T) dan Reflektansi (R) sebagai fungsi medan listrik E untuk bahan a. Air, b. Nitrotoluen, dan c. Nitrobensin.

