

## KAJIAN PENGARUH NANOPARTIKEL MAGNETIK $\text{Fe}_3\text{O}_4$ PADA DETEKSI BIOSENSOR BERBASIS *SURFACE PLASMON RESONANCE* (SPR)

Yuan Alfinsyah Sihombing<sup>\*1</sup>, Kamsul Abraha<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Universitas Sumatera Utara, 20155  
<sup>2</sup>Jurusan Fisika, Universitas Gadjah Mada, 55281  
 \* Email: [yuanalfinsyah@yahoo.com](mailto:yuanalfinsyah@yahoo.com)

### ABSTRAK

Telah dilakukan kajian berkaitan dengan pengaruh nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada deteksi biosensor berbasis *surface plasmon resonance* (SPR). Penelitian ini bertujuan untuk melihat penyebab munculnya *dip* baru atau pergeseran *dip* ke arah kanan pada kurva ATR (*Attenuated Total Reflection*) setelah adanya penambahan nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Sifat magnetik nanopartikel berupa permeabilitas magnet disubstitusikan pada kurva ATR dan sudut SPR terbentuk pada sudut  $51,8^\circ$ ;  $47,3^\circ$ ;  $46,0^\circ$  dan  $45,6^\circ$  untuk ketebalan perak  $10\text{ nm}$ ,  $20\text{ nm}$ ,  $30\text{ nm}$  dan  $40\text{ nm}$  berturut-turut dengan ketebalan nanopartikel  $10\text{ nm}$ . Untuk melihat pengaruh permeabilitas magnet, diplot kurva ATR tanpa permeabilitas magnet. Hasilnya menunjukkan bahwa sudut SPR terbentuk pada sudut yang sama. Sehingga kemunculan *dip* baru pada panjang gelombang sinar laser  $632,8\text{ nm}$  bukan dikarenakan sifat magnetnya. Sifat magnet ini akan muncul pada rentang gelombang mikro. Dengan pendekatan Teori Medium Efektif (TME) Landauer dan Bruggeman untuk sistem empat lapisan prisma/perak/komposit (nanopartikel+udara)/udara, diperoleh kurva relasi dispersi *surface plasmon* pada angka gelombang  $1,3944 \times 10^7\text{ m}^{-1}$ ;  $1,3609 \times 10^7\text{ m}^{-1}$ ;  $1,3154 \times 10^7\text{ m}^{-1}$ ;  $1,2611 \times 10^7\text{ m}^{-1}$  dan  $1,2043 \times 10^7\text{ m}^{-1}$  untuk variasi fraksi volume ( $p$ )  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$  dan  $0,5$  berturut-turut mengalami kopling dengan gelombang *evanescent*. Ini menunjukkan bahwa pergeseran *dip* muncul dengan pendekatan teori medium efektif Landauer dan Bruggeman.

Kata Kunci : *Surface Plasmon Resonance* (SPR), nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , *Evanescent*, , TME Landauer dan Bruggeman.

### ABSTRACT

*Theoretical studies have been done related to the influence of magnetic nanoparticles  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  on the surface plasmon resonance (SPR)-based biosensor detection. This research aims to look at the causes of the emergence of a new dip or the shiftness of a dip to the right on the ATR (Attenuated Total Reflection) curve after the addition of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles. The property of magnetic nanoparticles with a magnetic permeability was substituted on the ATR curves and the SPR angle formed at angles of  $51,8^\circ$ ;  $47,3^\circ$ ;  $46,0^\circ$  and  $45,6^\circ$  for the silver thickness of  $10\text{ nm}$ ,  $20\text{ nm}$ ,  $30\text{ nm}$ , and  $40\text{ nm}$  respectively with a nanoparticles thickness is  $10\text{ nm}$ . For looking the effect of the magnetic permeability, the ATR curves plotted without the magnetic permeability. The results showed that the SPR angle formed at the same angle. Thus the appearance of a new dip on the laser wave length is  $632.8\text{ nm}$ , was not due to the magnetic property. This property of magnetic will appear on the microwave region. The effective medium theory (EMT) approach by Landauer and Bruggeman for four-layers system (prism/silver/composite (nanoparticles+air)/air) obtained the dispersion relation curve of surface*

plasmon at wave number  $1,3944 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  ;  $1,3609 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  ;  $1,3154 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  ;  $1,2611 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  and  $1,2043 \times 10^7 \text{m}^{-1}$  for variating volume fraction ( $p$ ) are 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 and 0.5 respectively having coupling with evanescent wave. This was proved that the shiftness of a dip appear with approximated by the Landauer and Bruggeman method of effective medium theory.

*Keywords* : surface plasmon resonance (SPR),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetic nanoparticles, evanescent, EMT by Landauer and Bruggeman.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan biosensor berbasis SPR beberapa dekade ini mengalami peningkatan secara terus menerus dan signifikan. Biosensor berbasis SPR banyak dikembangkan karena memiliki kemampuan deteksi yang cepat dan sensitif (Choi, dkk, 2011). Pada tahun 1986 Otto menunjukkan eksistensi *Surface Plasmon* (SP) melalui metode *Attenuated Total Reflection* (ATR), kemudian disusul oleh Krestchmann dan Raether melalui konfigurasi prisma terkopling pada tahun yang sama, sehingga ketiganya dikenal sebagai peletak dasar metode pembangkitan/eksitasi SP. Kedua konfigurasi ini berbeda pada pendeposisian lapisan tipis logam.

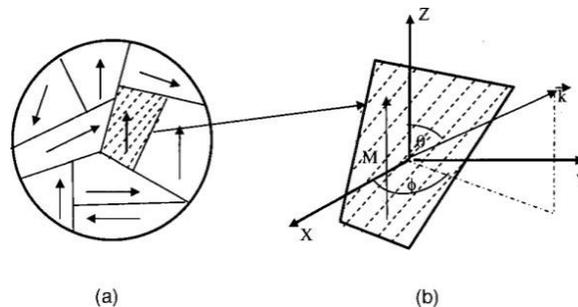
Kunci utama dari biosensor berbasis SPR ini adalah adanya perubahan sudut SPR yang terjadi. Besarnya sudut SPR sangat tergantung pada karakteristik optik dari sistem seperti indeks refraksi dari medium dari kedua sisi logam. Sementara indeks refraksi dari prisma tetap sedangkan indeks refraksi di permukaan logam berubah seiring dengan perubahan massa biomolekul yang diserapnya, atau juga bergantung pada konstanta dielektrik material logam pembangkit *Surface Plasmon* serta medium dielektrik di sekitar permukaan logam tersebut. Ketergantungan besarnya sudut SPR terhadap konstanta dielektrik medium di sekitar lapisan logam selanjutnya akan dijadikan sebagai prinsip pengukuran dalam biosensor berbasis SPR. Sehingga kondisi SPR ini berubah dan pergeseran sudut SPR cukup memberikan informasi absorpsi kinetik biomolekul yang ada di permukaan.

Dalam praktiknya proses deteksi biomolekul dengan menggunakan biosensor SPR belum mendapatkan hasil yang optimal karena imobilisasi biomolekul target pada permukaan lapisan logam (permukaan *sensing*) sulit untuk dioptimasi karena biomolekul target selalu bergerak dinamis dalam fluida. Hal ini menyebabkan perubahan konstanta dielektrik relatif di sekitar permukaan *sensing* menjadi sangat singkat dan tidak spesifik sehingga proses deteksi biomolekul menjadi tidak optimal (Lee, dkk, 2011) Teknik imobilisasi biomolekul yang telah dikembangkan dan dilakukan ialah dengan mengimobilisasi ligan pada permukaan *sensing*. Ligan merupakan molekul sederhana yang dalam senyawa kompleks bertindak sebagai donor pasangan elektron yang dalam aplikasi ini difungsikan untuk menangkap biomolekul.

Namun, pada faktanya melakukan optimasi imobilisasi ligan pada permukaan sensing cukup sulit dilakukan karena permukaan sensing (logam emas dan perak) merupakan logam yang cenderung stabil (*inert*) atau tidak reaktif terhadap unsur lain termasuk terhadap ligan (Daghestani dan Day, 2010). Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetit) merupakan material magnetik yang memiliki potensi untuk dijadikan sebagai kandidat material agen untuk meningkatkan imobilisasi biomolekul target pada permukaan *sensing* biosensor SPR.

## 2. TEORI

Model Landau Lifshitz - Gilbert (LL-G) digunakan untuk mendapatkan permeabilitas magnet nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Model LL-G ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Struktur partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, (b) sistem koordinat dalam *single domain* (Wu, dkk, 2006)

Permeabilitas magnet nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ditentukan dengan mengasumsikan setiap nanopartikel tersebut terdiri dari butir-butir yang berukuran nano dengan distribusi *easy axis* magnetiknya acak. Setiap butir merupakan *single domain*. Persamaan LL-G yang digunakan adalah

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}) + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \quad (1)$$

dengan  $\vec{M}$  adalah magnetisasi,  $\vec{H}$  adalah medan magnet,  $\alpha$  adalah konstanta *damping* yang ditentukan dari data eksperimen dan  $\gamma$  adalah *gyromagnetic ratio* (2,8 MHz/Oe),

Vektor medan magnet dan magnetisasi diberikan sebagai

$$\vec{H}_{loc} = H_a \hat{z} + \vec{h} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2)$$

$$\vec{M}_{loc} = M_s \hat{z} + \vec{m} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (3)$$

dengan  $M_s$  merupakan magnetisasi saturasi dan  $H_a$  medan anisotropi.

**ATR (Attenuated Total Reflection) dan Relasi Dispersi**

ATR terjadi pada saat pemantulan sempurna oleh permukaan logam yang terkopling dengan prisma. Persamaan reflektansi untuk sistem 4 lapis (prisma/perak/nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /udara) diberikan oleh (Fujiwara, 2007)

$$R = \|r_{pr123}^p\|^2 = \left\| \frac{r_{pr1}^p + r_{123}^p e^{2ik_{z1}d_1}}{1 + r_{pr1}^p r_{123}^p e^{2ik_{z1}d_1}} \right\|^2 \quad (4)$$

dan

$$r_{ik}^p = \frac{\sqrt{\bar{\mu}_i \bar{\epsilon}_i - n_{pr}^2 \sin^2 \theta_{pr}} \frac{1}{\bar{\epsilon}_i} - \sqrt{\bar{\mu}_k \bar{\epsilon}_k - n_{pr}^2 \sin^2 \theta_{pr}} \frac{1}{\bar{\epsilon}_k}}{\sqrt{\bar{\mu}_i \bar{\epsilon}_i - n_{pr}^2 \sin^2 \theta_{pr}} \frac{1}{\bar{\epsilon}_i} + \sqrt{\bar{\mu}_k \bar{\epsilon}_k - n_{pr}^2 \sin^2 \theta_{pr}} \frac{1}{\bar{\epsilon}_k}}$$

dengan  $\bar{\mu}$  merupakan permeabilitas kompleks,  $\bar{\epsilon}$  dielektrik kompleks,  $n_{pr}$  indeks bias prisma,  $d_1$  ketebalan medium 1, dan  $d_2$  ketebalan medium 2.

Adapun relasi dispersi untuk sistem empat lapis digunakan Persamaan

$$e^{2ik_{z3}d_3} = \frac{P - Qe^{2ik_{z2}d_2}}{-R + Se^{2ik_{z2}d_2}} \quad (5)$$

dengan

$$P = (k_{2z}\epsilon_1 - k_{1z}\epsilon_2)(k_{2z}\epsilon_3 + k_{3z}\epsilon_2)(k_{3z}\epsilon_4 + k_{4z}\epsilon_3)$$

$$Q = (k_{2z}\epsilon_1 + k_{1z}\epsilon_2)(k_{2z}\epsilon_3 - k_{3z}\epsilon_2)(k_{3z}\epsilon_4 + k_{4z}\epsilon_3)$$

$$R = (k_{2z}\epsilon_1 - k_{1z}\epsilon_2)(k_{2z}\epsilon_3 - k_{3z}\epsilon_2)(k_{3z}\epsilon_4 - k_{4z}\epsilon_3)$$

$$S = (k_{2z}\epsilon_1 + k_{1z}\epsilon_2)(k_{2z}\epsilon_3 + k_{3z}\epsilon_2)(k_{3z}\epsilon_4 - k_{4z}\epsilon_3)$$

dan untuk gelombang *evanescent* digunakan Persamaan

$$k_{ev} = \frac{\omega_0}{c} n_{pr} \sin \theta \quad (6)$$

dengan  $\omega_0$  adalah frekuensi cahaya datang,  $n_{pr}$  indeks bias medium padat (prisma),  $\theta$  sudut sinar datang dan  $c$  kecepatan cahaya di ruang vakum.

**Teori Medium Efektif**

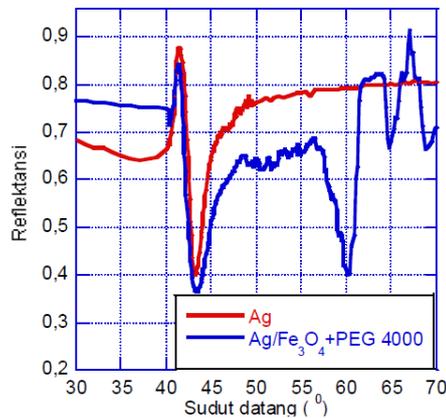
Pendekatan dengan teori medium efektif (TME) dilakukan untuk membuktikan adanya *dip* kedua atau terjadinya pergeseran sudut SPR ke arah kanan. Teori medium efektif yang digunakan berdasarkan Persamaan Landauer dan Bruggeman. Dalam TME ini pencampuran secara acak antara dua material yakni udara (A) dan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (B) dengan fraksi volum masing-masing  $p$  dan  $1 - p$ . Bentuk dari Persamaan TME oleh Landauer dan Bruggeman diberikan oleh (Stroud, 1998)

$$p \frac{\epsilon_{ef} - \epsilon_A}{\epsilon_A + 2\epsilon_{ef}} + (1 - p) \frac{\epsilon_{ef} - \epsilon_B}{\epsilon_B + 2\epsilon_{ef}} = 0 \quad (7)$$

dengan  $\epsilon_{ef}$  merupakan dielektrik kompleks material komposit,  $\epsilon_A$  dielektrik udara dan  $\epsilon_B$  dielektrik nanopartikel  $Fe_3O_4$ .

### 3. HASIL DAN DISKUSI

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Husain (2012) , yang membandingkan kurva ATR dengan dan tanpa menggunakan nanopartikel magnetik  $Fe_3O_4$  terlihat bahwa adanya peningkatan sensitivitas biosensor yang ditandai dengan *dip* yang semakin tajam. Akan tetapi penambahan nanopartikel magnetik ini mengakibatkan munculnya *dip* baru yang bergeser ke arah kanan. Kemunculan *dip* ini diprediksi karena adanya pengaruh sifat magnetik bahan berupa permeabilitas magnet nanopartikel atau bisa jadi hanya *dip* serapan biasa yang muncul ketika adanya penambahan nanopartikel magnetik  $Fe_3O_4$  pada permukaan perak.



**Gambar 2. Pengamatan kurva SPR dengan dan tanpa  $Fe_3O_4$  (Husain, 2012)**

Untuk melihat pengaruh dari sifat magnetik nanopartikel  $Fe_3O_4$ , terlebih dahulu permeabilitas magnetnya harus diketahui. Untuk mendapatkan nilai permeabilitas magnet nanopartikel  $Fe_3O_4$ , Persamaan (2) dan (3) disubstitusikan kedalam Persamaan (1), sehingga permeabilitas magnet intrinsiknya diberikan oleh

$$\mu_{real} = 1 + \frac{\omega_0 \omega_m [\omega_0^2 - \omega^2 (1 - \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega^2 \omega_0^2 \alpha^2} \quad (8)$$

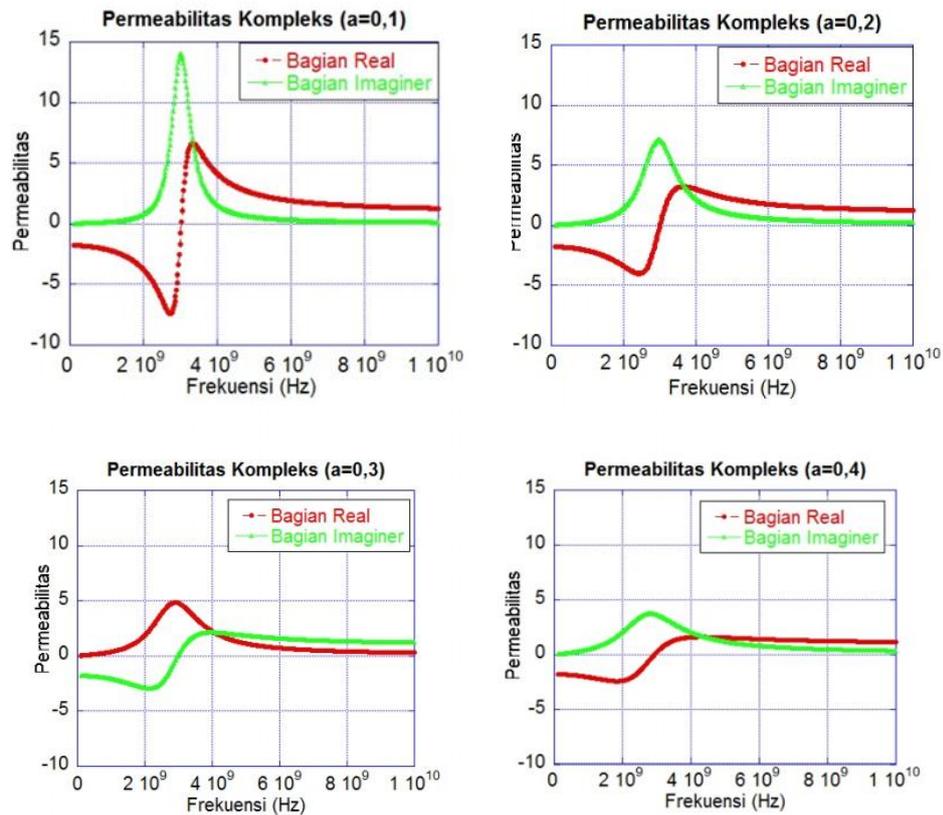
$$\mu_{im} = -i \frac{\omega \alpha \omega_m [\omega_0^2 + \omega^2 (1 + \alpha^2)]}{[\omega_0^2 - \omega^2 (1 + \alpha^2)]^2 + 4\omega^2 \omega_0^2 \alpha^2} \quad (9)$$

Dengan  $\omega_m = \gamma M_s$ ,  $\omega_0 = \gamma H_a$ , dan  $\omega_n = \omega_0 + i\omega\alpha$ .

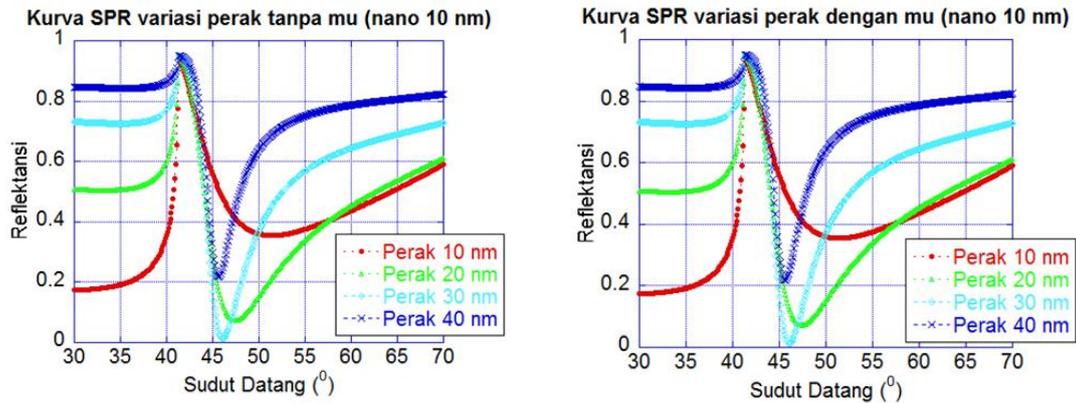
Nilai dari konstanta *Gyromagnetic ratio*  $\gamma = 2,8 \times 10^6 \text{ Hz/Oe}$ , magnetisasi saturasi nanopartikel  $Fe_3O_4$  ( $M_s = 46,7 \text{ emu/g} = 0,24 \times 10^6 \text{ A/m}$ ) (Ghandoor, dkk, 2012) dan medan anisotropi ( $H_a = 2K/M_s$ ) disubstitusikan ke Persamaan (8) dan (9) dengan

$K$  merupakan konstanta *Crystalline Anisotropy* ( $K = -13 \times 10^3 \text{ J/m}^3$ ) (Coey, 2009) maka nilai  $H_a = 0,108 \text{ T}$ . Dari semua konstanta yang diketahui ini, akan mendapatkan nilai permeabilitas real dan imajiner yang bergantung kepada frekuensi. Kemudian nilai permeabilitas ini diplot pada grafik untuk melihat resonansi yang terjadi antara nilai real dan imajiner. Bagian real dan imajiner permeabilitas nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ditunjukkan pada Gambar 3 dengan variasi konstanta *damping*.

Dari Gambar 3 tersebut dapat dilihat bahwa untuk nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  terjadi resonansi pada frekuensi 3,03 GHz; 2,97 GHz, 2,91 GHz dan 2,82 GHz untuk konstanta *damping* ( $\alpha$ ) 0,1; 0,2; 0,3 dan 0,4 secara berturut-turut. Nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  rata-rata memiliki resonansi pada frekuensi 3.0 GHz yang termasuk dalam wilayah *microwave*. Kemudian nilai dari permeabilitas kompleks nanopartikel pada Persamaan (8) dan (9) disubstitusikan ke dalam Persamaan (4). Nilai dari Persamaan (4) ini diplot pada kurva hubungan antara sinar datang terhadap reflektansi yang dikenal dengan kurva ATR.



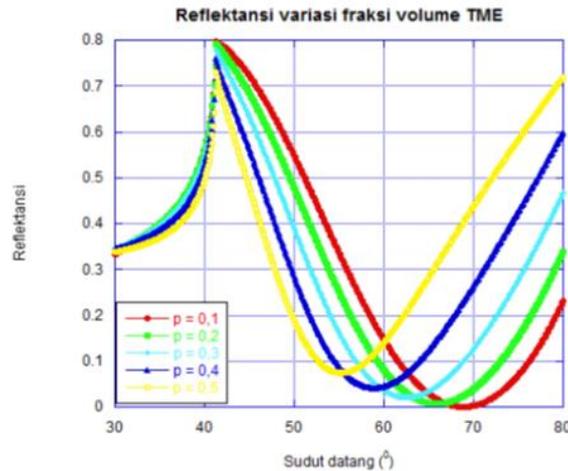
**Gambar 3. Bagian real dan imajiner permeabilitas kompleks nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  variasi konstanta *damping*  $\alpha$**



**Gambar 4. Kurva ATR dengan dan tanpa permeabilitas kompleks nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (10 nm) variasi ketebalan perak**

Gambar 4 memperlihatkan bahwa kedua gambar menunjukkan sudut SPR terbentuk pada sudut  $51,8^\circ$ ;  $47,3^\circ$ ;  $46,0^\circ$  dan  $45,6^\circ$  untuk variasi ketebalan perak yaitu 10 nm, 20 nm, 30 nm dan 40 nm berturut-turut pada ketebalan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  10 nm. Pada kurva ATR yang terbentuk ini, sama sekali tidak ada perbedaan baik dengan menggunakan nanopartikel magnetik maupun tanpa menggunakan nanopartikel magnetik. Artinya bahwa nilai permeabilitas nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  tidak mempengaruhi secara signifikan terjadinya pergeseran *dip* atau penambahan *dip* baru seperti yang terlihat pada Gambar 2. Ini dikarenakan bahwa kopling antara sinar yang datang terhadap permeabilitas magnetik nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  tidak terjadi saat sinar yang digunakan berada pada daerah sinar tampak. Nilai permeabilitas magnetik nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  akan mempunyai pengaruh jika sinar yang diberikan berada pada daerah *microwave*.

Untuk menunjukkan adanya serapan baru tersebut dilakukan pendekatan Teori Medium Efektif (TME). TME ini dilakukan untuk membuktikan adanya *dip* baru pada kurva ATR akibat penambahan nanopartikel magnetik. TME digunakan untuk sistem material komposit dengan menganggap nanopartikel magnetik bercampur dengan udara. TME yang digunakan pada pembahasan ini melalui pendekatan Landauer dan Bruggeman. Kurva reflektansi untuk TME dilakukan dengan variasi fraksi volume ( $p$ ) pada sistem empat lapis yakni prisma, perak, komposit (nanopartikel+udara) dan udara ditunjukkan pada Gambar 5.



**Gambar 5. Kurva ATR untuk TME variasi fraksi volume ( $p$ ) untuk tebal perak 10 nm dan komposit 30 nm.**

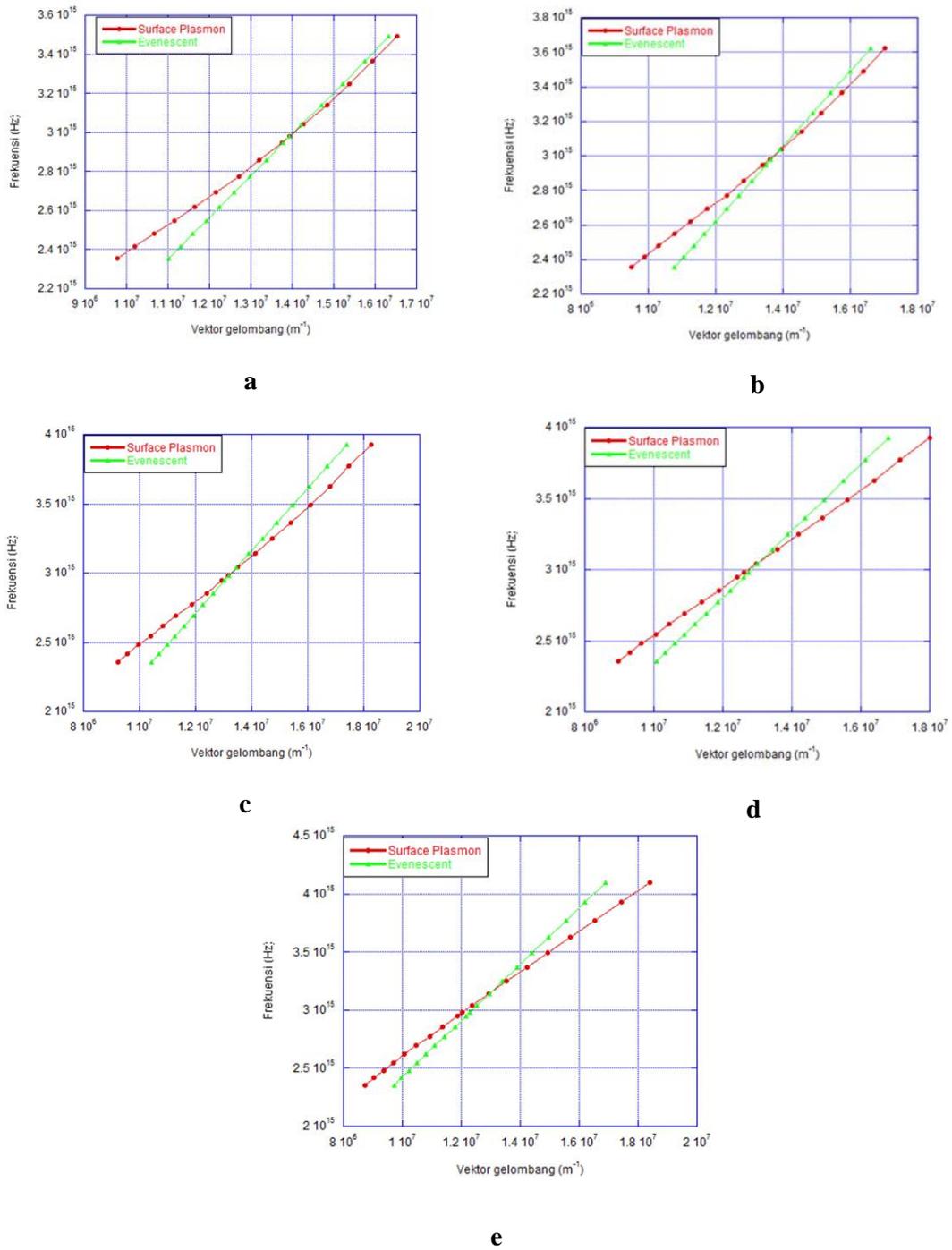
Gambar 5 menunjukkan bahwa sudut SPR terbentuk pada sudut  $68,9^\circ$ ;  $65,9^\circ$ ;  $62,5^\circ$ ;  $58,9^\circ$  dan  $55,2^\circ$  untuk variasi fraksi volume ( $p$ ) yaitu 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 dan 0,5 berturut-turut pada ketebalan perak 10 nm dan ketebalan komposit 30 nm. Nilai sudut SPR ini sesuai dengan hasil yang diperoleh secara eksperimen yang terlihat pada Gambar 2. Kemudian dalam pembahasan ini ditentukan relasi dispersi untuk sistem empat lapis yakni prisma, perak, komposit (nanopartikel+udara), dan udara. Kurva relasi dispersi untuk variasi fraksi volume diplot pada panjang gelombang 400 nm sampai 800 nm dan relasi dispersi ini didapatkan untuk *surface plasmon* dan gelombang *evanescent*. Relasi dispersi ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan Vektor gelombang *surface plasmon* pada angka  $1,3944 \times 10^7 m^{-1}$ ;  $1,3609 \times 10^7 m^{-1}$ ;  $1,3154 \times 10^7 m^{-1}$ ;  $1,2611 \times 10^7 m^{-1}$  dan  $1,2043 \times 10^7 m^{-1}$  serta sudut resonansinya  $68,9^\circ$ ;  $66,0^\circ$ ;  $62,0^\circ$ ;  $57,9^\circ$  dan  $54,0^\circ$  untuk fraksi volume ( $p$ ) adalah 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 dan 0,5 secara berturut-turut. Untuk lebih jelasnya nilai vektor gelombang *evanescent* dan *surface plasmon* serta sudut resonansi kurva ATR dan relasi dispersi ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

**Tabel 1.** Nilai vektor gelombang dan sudut resonansi dari kurva ATR dan relasi dispersi pada ketebalan perak 10 nm dan ketebalan komposit 30 nm.

Fraksi volume ( <i>p</i> )	Vektor Gelombang ( $m^{-1}$ )		Sudut Resonansi	
	<i>Evanescent</i>	<i>SurfacePlasmon</i>	Kurva ATR	elasi Dispersi
0,1	$1,3944 \times 10^7$	$1,3944 \times 10^7$	68,9 <sup>c</sup>	68,9°
0,2	$1,3644 \times 10^7$	$1,3609 \times 10^7$	65,9 <sup>c</sup>	66,0°
0,3	$1,3194 \times 10^7$	$1,3154 \times 10^7$	62,5 <sup>c</sup>	62,0°
0,4	$1,2744 \times 10^7$	$1,2611 \times 10^7$	58,9 <sup>c</sup>	57,9°
0,5	$1,2294 \times 10^7$	$1,2043 \times 10^7$	55,2 <sup>c</sup>	54,0°

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai vektor gelombang *evanescent* dan *surface plasmon* cenderung sama yang berarti bahwa terjadi kopling pada nilai vektor gelombang tersebut untuk variasi fraksi volume (*p*). Perpotongan ini terjadi di sekitar panjang gelombang sinar laser yang digunakan yaitu 632,8 nm. Sudut resonansi yang terjadi juga cenderung sama meskipun ada sedikit perbedaan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa dip kedua atau pergeseran dip SPR muncul ketika sistem dipandang dengan pendekatan teori medium efektif oleh Landauer dan Bruggeman.



Gambar 6. Simulasi kurva relasi dispersi *surface plasmon* antara  $k_x$  vs  $\omega$  untuk variasi fraksi mol ( $p$ ) (a) 0,1; (b) 0,2; (c) 0,3; (d) 0,4 dan (e) 0,5

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan diskusi yang telah dipaparkan, dapat dikatakan bahwa fungsi permeabilitas magnet nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  berubah menurut fungsi frekuensi. Permeabilitas magnet ini beresonansi pada rentang *microwave*. Penambahan nanopartikel magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada permukaan dielektrik dapat menyebabkan pergeseran *dip* yang lebih ke kanan. Pergeseran *dip* ini didekati dengan teori medium efektif Landauer dan Bruggeman.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Choi, S.H., Kim Y.L. dan Byun K.M., 2011, Graphene on silver substrates for sensitive surface plasmon resonance imaging biosensors, *Optic Express* 19, 2, 458.
2. Coey, J.M.D., 2009, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, New York.
3. Daghestani, H.N. dan Day B.W., 2010, Theory and Applications of Surface Plasmon Resonance, Resonant Mirror, Resonant Waveguide Grating, and Dual Polarization Interferometry Biosensors, *Sensor*, 10, 9630-9646.
4. Fujiwara, H., 2007, *Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications*, John Wiley & Sonc, Ltd, England.
5. Ghandoor, H.E., Zidan, H.M., Khalil, M.M.H., Ismail, M.I.M., 2012, Synthesis and Some Physi-cal Properties of Magnetite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanoparticles, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7, 5734-5745.
6. Husain, S., 2012, Pemanfaatan Fenomena *Surface Plasmon Resonance* (SPR) dengan Menggunakan Nanopartikel Magnetik  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  untuk Deteksi Biomolekul, *Tesis*, Program Studi S2 Ilmu Fisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
7. Lee, K.S., Lee, M., Byun, K.M., dan Lee, I.S., 2011, Surface plasmon resonance biosensing based on target responsive mobility switch of magnetic nanoparticles under magnetic fields, *J. Mater. Chem*, 21, 5156-5162.
8. Stroud, D., 1998, The Effective Medium Ap-proximations: Some Recent Deve-lopments, *Superlattices and Microstructures*, 23, 3/4, 567-573.
9. Wu, L.Z., J.Ding, H.B.Jiang, C.P.Neo, L.F.Chen, and C.K.Ong, 2006, High Frequency Complex Per-meability of Iron Particles in a Nonmagnetic Mat-rix, *Journal of Applied Physics*, 99, 083905-(1-7).