

*Skripsi*

**ANALISIS PENGARUH RESPONS OPTIK TERHADAP  
POLARISABILITAS NANOPARTIKEL LOGAM**

**AHMAD NURUL FAHRI**

**H021 17 1305**



**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2020**

**ANALISIS PENGARUH RESPONS OPTIK TERHADAP  
POLARISABILITAS NANOPARTIKEL LOGAM**

**SKRIPSI**

*Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
Pada Program Studi Fisika Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin*



**DEPARTEMEN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2020**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Ahmad Nurul Fahri  
NIM : H021 17 1305  
Program Studi : Fisika  
Judul Skripsi : Analisis Pengaruh Respons Optik Terhadap  
Polarisabilitas Nanopartikel Logam

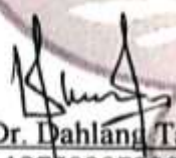



Makassar, 15 Oktober 2020

Disahkan oleh:

Pembimbing Pertama

Pembimbing Kedua

  
Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.  
NIP. 197509072000031006

  
Heryanto, S.Si., M.Si.  
NIP. 199111292020053001

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini merupakan karya orisinal saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasi atau telah ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk suatu gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau di lembaga pendidikan tinggi lainnya di manapun; kecuali bagian yang telah dikutip sesuai kaidah ilmiah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini atas izin Allah merupakan hasil kerja saya sendiri dan dalam batas tertentu dibantu oleh pihak pembimbing.

Penulis



Ahmad Nurul Fahri

## ABSTRAK

Sifat optik, elektrik, dan magnetik nanopartikel emas telah diteliti dengan menggunakan teori hamburan Mie sebagai dasar teori dengan memvariasikan radius partikelnya dari 10 nm hingga 50 nm dengan interval 10 nm. Polarisasi listrik nanopartikel emas juga dipelajari dengan menggunakan beberapa pemodelan: *virtual cavity*, *real cavity*, *hard-sphere*, dan *finite-size* dengan perak sebagai mediumnya. Disamping itu juga didapatkan data perubahan dan pergeseran polarisasi terhadap energi cahaya datang. Hal ini memungkinkan untuk melihat pengaruh radius terhadap sifat polarisasi nanopartikel logam dan perbedaan setiap model jika mediumnya berupa medium padat.

**Kata Kunci:** Emas, Teori hamburan Mie, Fungsi dielektrik, Model, Radius.

## **ABSTRACT**

The optical, electrical, and magnetic properties of gold nanosphere have been investigated by using Mie scattering theory as the basis by varying the radius from 10 nm to 50 nm with the interval value 10 nm. The electrical polarizability of gold nanosphere also studied by using virtual cavity, real cavity, hard sphere, and finite size model with silver as the solid medium. We present the the change and shift data of polarizability againts the energy of incident light. This enable to us to see the effect of radius to the polarizability properties of metallic nanosphere and the difference of every models when the medium is a solid medium.

**Keywords:** Gold, Mie scattering theory, dielectric function, model, radius.



## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah Yang Maha Pemberi Petunjuk lagi Maha Pemberi Manfaat, Yang Maha Mengetahui lagi Maha luas karuniaNya. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada baginda kita, Muhammad, Nabi yang perkataan, perilaku, dan diamnya menjadi patokan berperilaku dan beribadah umat Islam setelah kitab suci Al-Qur'an. Penulis sangat bersyukur karena telah diberikan kesempatan dan petunjuk dalam penyusunan skripsi yang berjudul "**ANALISIS PENGARUH RESPONS OPTIK TERHADAP POLARISABILITAS NANOPARTIKEL LOGAM**" yang tidak lain merupakan bentuk tanggung jawab penulis dan semoga dapat menjadi sumber rasa takut kepada Allah عزَّ وَّجَلَّ. Tidak ada satupun hal yang dapat dilakukan dan diraih oleh penulis yang dalam hal ini mengenai ilmu melainkan karena ridho Allah, karena sesungguhnya manusia adalah makhluk yang bodoh. Allah berfirman:

... إِنَّهُ كَانَ ظَلُومًا جَهُولًا ﴿٧٢﴾

"... *Sesungguhnya manusia itu amat zalim dan bodoh,*" (Al-Ahzab: 72)

Perjalanan panjang telah penulis lalui mulai dari proses penelitian hingga perampungan penulisan skripsi. Berbagai hambatan berdatangan silih berganti, namun berkat kehendakNya-lah sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini patutlah kiranya penulis juga mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah Allah takdirkan untuk membantu penulis dalam menempuh studi bidang ilmu Fisika di Universitas Hasanuddin dan dalam penyelesaian skripsi ini:

1. Kedua orang tua, ibunda **Hasmawati** dan ayahanda **Mappatoba**, nenek **Imattarima**, serta seluruh keluarga besar penulis, terima kasih atas curahan kasih sayang, dorongan do'a, nasihat, motivasi, dan dukungan moril maupun materil selama penulis menempuh studi bidang ilmu Fisika di Universitas

Hasanuddin.

2. **Prof. Dr. Dahlang Tahir, M.Si.**, sebagai pembimbing utama penulis dalam menyelesaikan penelitian ini, dan lebih dari itu sebagai sosok guru bagi penulis selama menempuh studi di bidang ilmu Fisika ini, terima kasih atas arahan, nasihat, motivasi serta waktu yang atas izin Allah telah diluangkan untuk menurunkan ilmu yang Allah titipkan kepadanya kepada penulis.
3. Bapak **Heryanto, S.Si., M.Si.**, sebagai pembimbing pertama yang telah meluangkan waktu serta memberi masukan-masukan selama penulis melakukan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini.
4. **Prof. Dr. Sri Suryani, DEA.**, dan Ibu **Nurhasanah, S.Si., M.Si.** sebagai Tim penguji skripsi fisika yang telah banyak memberikan masukan dan saran yang membangun untuk kesempurnaan skripsi.
5. Bapak **Prof. Dr. Arifin, M.T.**, selaku Ketua Departemen Fisika, Universitas Hasanuddin.
6. **Prof. Dr. Paulus Lobo Gareso, M.Sc.**, sebagai Penasehat Akademik (PA) yang telah banyak memberikan nasihat, arahan, motivasi dan bimbingan selama proses perkuliahan.
7. Seluruh **Dosen FMIPA** dan terkhusus kepada seluruh **Dosen Departemen Fisika** yang atas izin Allah telah menurunkan ilmu yang Allah titipkan kepada mereka kepada penulis.
8. Seluruh **Pegawai dan Jajaran Staf FMIPA**. Terima kasih atas bantuannya yang membantu penulis dalam mengurus administrasi selama ini.
9. Kak **Bahrul Ulum, S.Si., M. Ling.**, sebagai Murabbi penulis yang atas izin Allah banyak menurunkan ilmu adab, fiqih, aqidah dalam beragama yang dititipkan kepadanya kepada penulis.
10. **Kakak-kakak lulusan Magister Fisika Universitas Hasanuddin**, kak **Inayatul Mutmainna, S.Si., M.Si.**, kak **Sultan Ilyas, S.Si, M.Si.**, dan kak **Muhammad Angga Anugrah, S.Si., M.Si.**, yang selalu kebersamai disetiap kondisi dan kesempatan, memberikan arahan dan masukan dalam masa studi, pengolahan data, dan penyusunan skripsi.
11. **Teman-teman seperjuangan Fisika angkatan 2017** terkhusus kepada



mereka yang banyak membagikan ilmu yang Allah titipkan kepadanya kepada penulis selama masa studi, **Safrullah, Aron Wiliyam Santo Mina, Agung Prawira Negara, dan Muqoil Darussalam**, serta terkhusus kepada mereka yang menemani perjuangan penulis dalam suka dan duka sejak awal masa studi bidang ilmu Fisika di Universitas Hasanuddin, **Ebiet Wanda Lestari, Roni Rahmat, dan Wahyudin Husain**.

12. Seluruh anggota **Laboratorium Material dan Energi angkatan 2017 (Sitti Rahmah Fauziah, Andi Tessiwoja Tenri Ola, Ardiansyah, Erviani Rusman, Nurul Fauziah, Maysarah A. Mallarangi, Sitti Hajar, Mutmainnah, Muh. Syahril G., Asni Damayanti, Fitria Hamza Lahu, Nova Marlina, dan Roni Rahmat)** yang menemani dan membawa keceriaan (meskipun terkadang beberapa dari mereka agak bisung) ditengah-tengah tuntutan studi, penelitian, dan penyelesaian skripsi.
13. **Kerabat-kerabat seangkatan Geofisika angkatan 2017** terkhusus kepada **Muhammad Ali Akbar dan Yusrin Annisa** yang telah memberikan dukungan kepada penulis selama penyelesaian skripsi, serta terkhusus kepada sosok dia, hamba Allah yang juga menjadi salah satu motivasi penulis dalam menyelesaikan studi Fisika di Universitas Hasanuddin dalam waktu yang seefisien mungkin.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan kontribusi sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Semoga karya tulis ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembacanya. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada semua pihak yang telah Allah takdirkan untuk membantu penulis dan semoga Allah melimpahkan karuniaNya dalam setiap amal dan diberikan balasan sesuai yang dibutuhkan, di akhirat maupun di dunia. Aamiin.

Makassar, 15 Oktober 2019

Ahmad Nurul Fahri

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUNG .....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vi
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Rumusan Masalah.....	2
I.3 Tujuan Penelitian .....	2
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	3
II.1 Dielektrik.....	3
II.2 Teori Hamburan Mie .....	3
II.3 Model Polarisabilitas.....	5
BAB III. METODE PENELITIAN.....	7
III.1 Sarana.....	7
III.2 Deskripsi Model .....	7
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN .....	10
IV.1 Polarisabilitas Nanopartikel Logam.....	10
IV.2 Model Polarisabilitas .....	15
BAB V. PENUTUP.....	20
V.1 Kesimpulan.....	20
V.2 Saran.....	21
DAFTAR PUSTAKA .....	22
LAMPIRAN .....	25

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1 Efek medan listrik pada material .....	4
Gambar II.2 Model nanopartikel emas dalam medium perak.....	5
Gambar III.1 Contoh grid 2D.....	8
Gambar III.2 Bagan alir penelitian.....	9
Gambar IV.1 Polarisabilitas listrik nanopartikel emas di ruang vakum dengan radius 10 nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm, dan 50 nm .....	11
Gambar IV.2 Rasio antara polarisabilitas magnetik dan listrik nanopartikel emas di ruang vakum dengan radius 10 nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm, dan 50 nm .....	12
Gambar IV.3 Serapan dan hamburan GEM oleh nanopartikel emas di ruang vakum dengan radius 10 nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm, dan 50 nm .....	13
Gambar IV.4 Ilustrasi partikel logam yang terpolarisasi (dipol) saat terkena GEM dalam 2D .....	14
Gambar IV.5 Polarisabilitas listrik nanopartikel emas pada medium perak.....	15
Gambar IV.6 Grafik real polarisabilitas listrik nanopartikel logam pada medium perak.....	18

## DAFTAR TABEL

Tabel IV.1 Posisi polarisabilitas listrik maksimum nanopartikel emas sebagai fungsi energi.....	10
Tabel IV.2 Posisi rasio antara polarisabilitas magnetik dan listrik nanopartikel emas bernilai maksimum sebagai fungsi energi.....	11
Tabel IV.3 Posisi puncak serapan dan hamburan GEM nanopartikel emas sebagai fungsi energi.....	13

## BAB I PENDAHULUAN

### I.1 Latar Belakang

Studi mengenai sifat dan kinerja material merupakan salah satu hal yang paling penting dalam perkembangan teknologi [1-4]. Pengetahuan dasar untuk memahami kinerja material didasarkan pada sifat optik, listrik, dan magnet. Respons optik material juga penting untuk dipahami melalui fenomena plasmonik [5-9]. Fenomena plasmonik terjadi ketika gelombang elektromagnetik (GEM) berinteraksi dengan material dan mengakibatkan elektron pada pita konduksi berosilasi dan kemudian membentuk momen dipol sesaat [10-11]. Fenomena ini dijelaskan secara teoritis pada teori hamburan Mie yang didasarkan pada fungsi dielektrik material [10, 12].

Teori hamburan Mie telah digunakan dalam banyak penelitian untuk memecahkan masalah hamburan GEM oleh partikel berbentuk bola [10, 13-15] *nanoring* [10, 16], kubus [17], dan material berstruktur *nanostrip* [18, 19]. Dalam beberapa penelitian terbaru, teori ini digunakan untuk memprediksi efisiensi penyerapan nanofluida emas [20], menganalisis resonansi plasmon dari nanopartikel emas yang tertanam pada semikonduktor [21], dan menganalisis partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> berskala nano dan mikro menggunakan TEM (*Transmission Electron Spectroscopy*) kemudian menganalisis hamburan GEM yang diterima oleh partikel tersebut menggunakan teori hamburan Mie [22]. Penelitian mengenai hal ini berperan penting dalam perkembangan teknologi mengenai pencitraan optik [23], karakterisasi material [20], material penyerap GEM [22], *drug delivery* [24], metamaterial [25], dan perangkat penyimpanan data [26].

Ref. [27] telah menganalisis beberapa pemodelan yang efektif untuk polarisasi listrik suatu partikel dalam medium, yakni model *virtual cavity*, *real cavity*, *hard-sphere*, dan *finite-size*. Hasilnya menunjukkan bahwa pemodelan tersebut > 90% mendekati hasil data eksperimen (kondisi tertentu untuk setiap model) untuk molekul gas dengan medium air dan menggunakan hubungan Clausius-Mossotti dalam menentukan polarisabilitasnya. Dalam penelitian ini akan

diterapkan pemodelan tersebut untuk menganalisis pengaruh GEM terhadap sifat magnet dan polarisasi listrik nanopartikel emas dengan perak sebagai mediumnya. Sifat magnetik dan polarisasi listrik nanopartikel emas dalam ruang vakum dianalisis dengan menggunakan teori hamburan Mie sebagai dasarnya, kemudian sifat polarisasi listriknya dianalisis lebih lanjut menggunakan beberapa pemodelan.

### **I.2 Rumusan Masalah**

Berdasar pada latar belakang diatas, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh GEM terhadap polarisabilitas nanopartikel emas?
2. Bagaimana ilustrasi 2D pengaruh GEM terhadap polarisabilitas listrik nanopartikel emas?
3. Bagaimana pengaruh GEM terhadap polarisabilitas nanopartikel emas dalam berbagai pemodelan?

### **I.3 Tujuan Penelitian**

Berdasar pada rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh GEM terhadap polarisabilitas nanopartikel emas.
2. Menganalisis hasil ilustrasi 2D pengaruh GEM terhadap polarisabilitas listrik nanopartikel emas.
3. Menganalisis pengaruh GEM terhadap polarisabilitas nanopartikel emas dalam berbagai pemodelan.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### II.1 Dielektrik

Dielektrik merupakan material yang dapat terpolarisasi oleh medan listrik dan akan menciptakan momen dipol  $\sigma$  yang didefinisikan sebagai sebuah vektor [28]:

$$\sigma = q\mathbf{r} \quad (1)$$

$q$  adalah besar muatan dan  $\mathbf{r}$  adalah jarak antara pusat muatan negatif dan positif. Karakteristik spesifik material karena pengaruh medan listrik maka diperkenalkan konstanta relatif dielektrik  $\varepsilon$  [28]:

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E} \quad (2)$$

dengan  $D$  adalah rapat fluks listrik, dan  $\varepsilon_0$  adalah permitivitas vakum ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m).

Sebagai fungsi kompleks, konstanta relatif dielektrik menjadi fungsi dielektrik yang bergantung pada energi ( $\omega$ ) [24]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) + i\varepsilon_i(\omega) \quad (3)$$

dengan  $\varepsilon_r$  merupakan bagian real dan  $\varepsilon_i$  merupakan bagian imajiner. Untuk material dengan konduktivitas tinggi, fungsi dielektrik dijelaskan dalam fungsi Drude  $\varepsilon_p$  [27]:

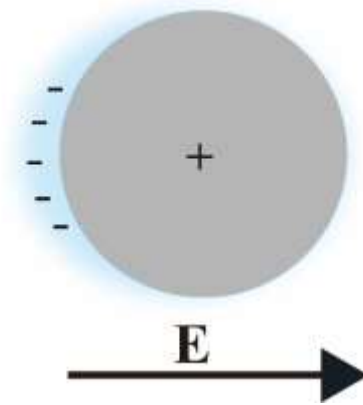
$$\varepsilon_p \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (4)$$

$\omega_p$  merupakan frekuensi fonon dan  $\gamma$  merupakan tingkat redaman material.

### II.2 Teori Hamburan Mie

Teori hamburan Mie menjelaskan fenomena hamburan GEM sebuah objek berbentuk bola [24,29]. Teori ini juga menjelaskan respon listrik dan magnetik dari sebuah nanopartikel berbentuk bola sempurna akibat pengaruh GEM yang ditunjukkan dalam polarisabilitas listrik dan magnetik. Disamping itu, teori ini juga telah digunakan dalam banyak bidang seperti astronomi, fisika atmosfer, dan meteorologi [24,29].

Untuk aplikasinya dalam menganalisis sifat listrik dan magnetik dari nanopartikel, dimisalkan terdapat medan listrik ( $\mathbf{E}$ ) luar yang mempengaruhi material seperti yang ditunjukkan pada dibawah:



**Gambar II.1** Efek medan listrik pada material.

akibat medan listrik luar, maka medan listrik dalam ( $\mathbf{E}_{in}$ ) dengan polarisasi:

$$\mathbf{E}_{in} = \mathbf{E} + \frac{1}{3\epsilon_0} \mathbf{P} \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 [\epsilon(\omega) - 1] \mathbf{E} \quad (6)$$

sedangkan polarisasi akibat respon medan listrik dalamnya:

$$\mathbf{P} = \alpha \mathbf{E}_{in} \quad (7)$$

dengan  $\alpha$  merupakan polarisabilitas listrik dari material. Polarisabilitas listrik dan magnetik material pada ruang vakum memenuhi [10, 12]:

$$\alpha_E = \frac{3t_l^E}{2k^3} \quad (8)$$

$$\alpha_M = \frac{3t_l^M}{2k^3} \quad (9)$$

dengan  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $t_1^E$  dan  $t_1^M$  merupakan konstanta Mie [10, 12]:

$$t_l^E = \frac{-\epsilon_m j_l(\rho_m) [j_l(\rho) + \rho j_l'(\rho)] + \epsilon j_l(\rho) [j_l(\rho_m) + \rho_m j_l'(\rho_m)]}{\epsilon_m h_l^{(+)}(\rho_m) [j_l(\rho) + \rho j_l'(\rho)] - \epsilon j_l(\rho) [h_l^{(+)}(\rho_m) + \rho_m h_l^{(+)}(\rho_m)]} \quad (10)$$

$$t_l^M = \frac{-\rho j_l(\rho_m) j_l'(\rho) + \rho_m j_l'(\rho_m) j_l(\rho)}{\rho h_l^{(+)}(\rho_m) j_l'(\rho) - \rho_m h_l^{(+)}(\rho_m) j_l(\rho)} \quad (11)$$

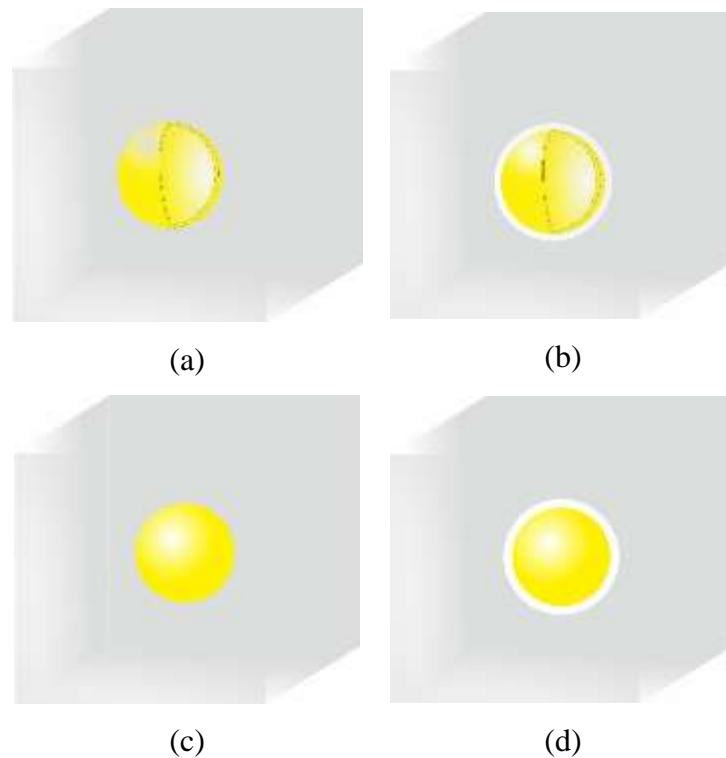
$l$  merupakan nomor momentum orbital,  $\rho = (kR)\sqrt{\epsilon}$ ,  $\rho_m = (kR)\sqrt{\epsilon_m}$ ,  $j_l(x)$  dan  $h_l^{(+)}(x)$  adalah fungsi Bessel dan fungsi Henkel,  $R$  adalah jari-jari partikel,  $\epsilon$  dan



$\varepsilon_m$  adalah permitivitas partikel dan medium, dan tanda petik (‘) menunjukkan turunan fungsi.

### II.3 Model Polarisabilitas

Terdapat beberapa model polarisabilitas listrik dari partikel pada sebuah medium, yaitu model *virtual cavity*, *real cavity*, *hard-sphere* dan *finite-size*.



**Gambar II.2** Model nanopartikel emas dalam medium perak. (a) model *virtual cavity*, (b) model *real cavity*, (c) model *hard-sphere*, (d) model *finite-size*.

Model *virtual cavity* adalah model polarisabilitas yang mempertimbangkan pengaruh material dielektrik (bola berongga) terhadap medan listrik. Polarisasi dari model ini dituliskan sebagai [27]:

$$\alpha_{vc}(\omega) = \left( \frac{\varepsilon_m(\omega)+2}{3} \right)^2 \alpha(\omega) \quad (12)$$

dengan  $\varepsilon_m(\omega)$  merupakan permitivitas medium. Model selanjutnya mempertimbangkan adanya ruang vakum yang membungkus material pada model *virtual cavity*, sehingga terdapat tiga lapis sistem yakni medium, vakum dan

material. Model ini disebut model *real cavity*. Model polarisabilitas untuk jari-jari rongga ( $R_c$ ) yang lebih kecil dari panjang gelombang ( $R_c \ll 1/k$ ) dituliskan sebagai [27]:

$$\alpha_{Rc} = \alpha(\omega) \left( \frac{3\varepsilon_m(\omega)}{1+2\varepsilon_m(\omega)} \right)^2 \quad (13)$$

sedangkan untuk  $R_c$  diketahui:

$$\alpha_{Rc} = \alpha(\omega) \left( \frac{3\varepsilon_m(\omega)}{1+2\varepsilon_m(\omega)} \right) \left[ \frac{3\varepsilon_m(\omega)}{1+2\varepsilon_m(\omega)} - 2 \left( \frac{3\varepsilon_m(\omega)[10\varepsilon_m^2(\omega)-9\varepsilon_m(\omega)-1]}{10[1+2\varepsilon_m(\omega)]^2} \right) \left( \frac{\omega R_c}{c} \right)^2 \right] \quad (14)$$

dengan  $c$  sebagai kecepatan cahaya.

Model *hard-sphere* mendeskripsikan polarisasi material berbentuk bola pejal yang terdapat pada sebuah medium [27]:

$$\alpha_{HS} = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_m R^3 \frac{\varepsilon-\varepsilon_m}{\varepsilon+2\varepsilon_m} \quad (15)$$

dengan menggunakan model ini, selanjutnya dapat didefinisikan sebuah model yang memiliki tiga lapis sistem seperti pada model *real cavity*. Polarisabilitas untuk rongga yang mengelilingi material [27]:

$$\alpha_c = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_m R_c^3 \frac{1-\varepsilon_m}{1+2\varepsilon_m} \quad (16)$$

sehingga diperoleh model *finite-size*:

$$\alpha_{fs} = \alpha_c + \alpha(\omega) \left( \frac{3\varepsilon_m}{2\varepsilon_m+1} \right)^2 \frac{1}{1 + \left( \frac{\alpha_c \alpha_s}{8\pi^2 \varepsilon_0^2 R_c^6 \varepsilon_m} \right)} \quad (17)$$