

**ANALISIS NUMERIK STUKTUR OPTIK 2-DIMENSI DEVAIS
FOTONIK MENGGUNAKAN METODE *TENSOR GREEN***

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Persyaratan untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains



**DYTCHIA SEPTI KESUMA
NIM 01979/2008**

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
2012**

PERSETUJUAN SKRIPSI

ANALISIS NUMERIK STUKTUR OPTIK 2-DIMENSI DEVAIS FOTONIK MENGGUNAKAN METODE *TENSOR GREEN*

Nama : Dytchia Septi Kesuma
NIM : 01979
Program Studi : Fisika
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 23 Juli 2012

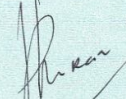
Disetujui Oleh

Pembimbing I



Dra. Hidayati, M.Si
NIP.19671111 199203 2 001

Pembimbing II



Pakhrur Razi, S.Pd., M.Si
NIP.19790812 200604 1 003

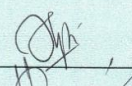
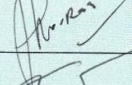
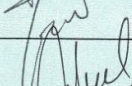
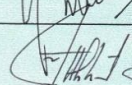

PENGESAHAN

Dinyatakan lulus setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi
Program Studi Fisika Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negri Padang

Judul : Analisis Numerik Struktur Optik 2-Dimensi Devais
Fotonik Menggunakan Metode *Tensor Green*
Nama : Dythia Septi Kesuma
NIM : 01979
Program Studi : Fisika
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Padang, 23 Juli 2012

Tim Penguji

	Nama	Tanda Tangan
1. Ketua	: Dra.Hidayati, M.Si	1. 
2. Sekretaris	: Pakhrur Razi, S.Pd., M.Si	2. 
3. Anggota	: Prof.Dr.Festiyed, M.S	3. 
4. Anggota	: Drs. Masril, M.Si	4. 
5. Anggota	: Zulhendri Kamus, S.Pd., M.Si	5. 

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau yang ditulis orang kecuali sebagai acuan atau kutipan tata penulisan karya ilmiah yang lazim.

Padang, 23 Juli 2012
Yang mengatakan

Dytchia Septi Kesuma

ABSTRAK

Dytchia Septi Kesuma: Analisis Numerik Struktur Optik 2-Dimensi Devais Fotonik Menggunakan Metode *Tensor Green*

Kristal fotonik adalah material dielektrik yang memiliki indeks bias atau permitivitas berbeda secara periodik. Kristal fotonik 2-dimensi dapat dimanfaatkan untuk mengontrol arah dan penjararan gelombang elektromagnetik. Penjararan gelombang elektromagnetik dalam kristal fotonik 2-dimensi sebagai pandu gelombang merupakan masalah pemandu gelombang elektromagnetik. Penelitian ini bertujuan menghasilkan dan menganalisis secara numerik model penjararan gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi sebagai pandu gelombang untuk menghitung kuat medan listrik. Menganalisis pengaruh variasi jarak antara kisi (a) dan variasi jumlah silinder.

Penelitian yang dilakukan termasuk jenis penelitian deskriptif menggunakan pendekatan numerik. Pendekatan numerik yang digunakan adalah metoda *Tensor Green* yaitu suatu metoda untuk mendekati harga integral didefinisikan dan diselesaikan pada daerah homogen. Selanjutnya dengan metoda ini dirancang program menggunakan *software* Matlab 2007.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan program dalam bentuk kontur dua dimensi. Dihasilkan model penjararan gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi sebagai pandu gelombang untuk menghitung medan listrik. Kuat medan listrik bernilai pada daerah saluran cacat sedangkan pada daerah diluar saluran cacat mendekati nol, kuat medan listrik semakin kuat seiring dengan penjararan gelombang elektromagnetik modus TM pada saluran cacat. Sehingga dapat dianalisis pengaruh variasi jarak antar kisi (a) dan variasi jumlah silinder. Jarak antara kisi berbanding terbalik dengan lebar celah, semakin kecil jarak antara kisi maka lebar celah semakin besar, sehingga gelombang elektromagnetik menjaral baik pada lebar celah yang lebar. Lebar celah yang sempit mempengaruhi kebocoran silinder dalam penjararan gelombang elektromagnetik. Variasi jumlah silinder yang digunakan untuk membuat saluran cacat juga mempengaruhi kebocoran penjararan gelombang elektromagnetik, semakin sedikit jumlah silinder maka akan terjadi kebocoran. Sehingga gelombang elektromagnetik menjaral ke luar saluran cacat.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan karuniaNya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dan menyelesaikan skripsi ini. Sebagai judul skripsi ini yaitu: “Analisis Numerik Stuktur Optik 2-Dimensi Devais Fotonik menggunakan metode *Tensor Green*. Penulisan laporan skripsi ini berguna untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) UNP.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis dibantu dan dibimbing oleh berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dra. Hidayati, M.Si, sebagai Penasehat Akademis dan dosen Pembimbing I yang telah membimbing dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
2. Pakhrur Razi, S.Pd, M.Si sebagai dosen Pembimbing II yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Drs. Akmam, M.Si sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA UNP.
4. Ibu Prof. Dr. Festiyed, M.S, Bapak Drs. Masril, M.Si, dan Bapak Zuhendri Kamus, S.Pd, M.Si sebagai dosen penguji.
5. Bapak dan Ibu Staf Pengajar Jurusan Fisika FMIPA UNP.
6. Semua pihak yang telah membantu dalam perencanaan, pelaksanaan, penyusunan dan penyelesaian skripsi ini.

Semoga bantuan dan bimbingan yang telah diberikan menjadi amal shaleh bagi Bapak dan Ibu serta mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT.

Penulis menyadari bahwa dalam laporan skripsi ini masih terdapat kekurangan dan kelemahan. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran untuk menyempurnakan skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca.

Padang, Juli 2012

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Perumusan Masalah	4
C. Pembatasan Masalah	4
D. Pertanyaan Penelitian	5
E. Tujuan Penelitian	5
F. Kegunaan Penelitian	6
BAB II KAJIAN TEORI	7
A. Fotonik dan Perkembangannya	7
B. Persamaan Gelombang Elektromagnetik pada Kristal Fotonik	10
C. Fungsi Green Dyadic pada Medium Homogen	17
D. <i>Tensor Green</i>	20
E. <i>Tensor Green</i> Kristal Fotonik 2 Dimensi	20
F. Persamaan Lippman Schwinger	22

G. Pandu Gelombang	24
H. Cacat Kristal.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	29
A. Jenis Penelitian.....	29
B. Tempat Penelitian.....	29
C. Pelaksanaan Penelitian	29
D. Instrumen Penelitian.....	30
E. Desain Penelitian.....	30
F. Analisa Data.....	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
A. Penjalaran Gelombang Elektromagnetik TM.....	38
B. Bandgap Gelombang Elektromagnetik TM Kristal Fotonik 2 Dimensi	39
C. Hasil Analisis Numerik Pengaruh Variasi Jarak antara Kisi (a)	40
D. Hasil Analisis Numerik dengan Variasi Jumlah Silinder	47
E. Pembahasan.....	61
BAB V PENUTUP	65
A. Kesimpulan	65
B. Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar

Halaman

1. Kristal Fotonik	8
2. Kristal Fotonik 2 Dimensi Berbentuk Silinder.....	9
3. Modus Gelombang TE	12
4. Modus Gelombang TM	13
5. Sistem 2 Dimensi Homogen Sepanjang Sumbu z	21
6. Perambatan Cahaya dalam Pandu Gelombang	25
7. Pemantulan Internal Total Pandu Gelombang	25
8. Medan Listrik pada Satu Silinder	27
9. Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus.....	28
10. Flowchart Kontur Gelombang Elektromagnetik sebagai Pandu Gelombang	32
11. Flowchart Pemodelan Gelombang Elektromagnetik sebagai Pandu Gelombang.....	33
12. Medan Listrik Pada Satu Silinder	36
13. Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus.....	37
14. Gelombang Elektromagnetik TM Menjalar Sepanjang Sumbu x.....	38
15. Bandgap Kristal Fotonik 5x5.....	39
16. Bandgap Kristal Fotonik dari Atas.....	39

17. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_1 = 0.38$ dari Atas	40
18. Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_1 = 0.38$	41
19. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_2 = 0.34$ dari Atas	43
20. Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_2 = 0.34$	43
21. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_3 = 0.30$ dari Atas	45
22. Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus dengan Variasi Jarak antara Kisi $a_3 = 0.30$	45
23. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus $a = 0.38$	47
24. Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus $a = 0.38$	48
25. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Dua Cacat Lurus $a = 0.38$	50
26. Pandu Gelombang Dua Cacat Lurus $a = 0.38$	50
27. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Berbelok 90° Cacat Lurus $a = 0.38$	52
28. Pandu Gelombang Berbelok 90° Cacat Lurus $a = 0.38$	52
29. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus $a = 0.34$	54
30. Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus $a = 0.34$	55
31. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Dua Cacat Lurus $a = 0.34$	57

32. Pandu Gelombang Dua Cacat Lurus $a = 0.34$	57
33. Tampilan Kontur Pandu Gelombang Berbelok 90^0 Cacat Lurus $a = 0.34$	59
34. Pandu Gelombang Berbelok 90^0 Cacat Lurus $a = 0.34$	59

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

Halaman

1. Program Kontur Gelombang Elektromagnetik modus TM Fungsi
Pandu Gelombang Satu Cacat Menggunakan Metode *Tensor Green*..... 69

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Kemajuan teknologi informasi memegang peranan yang sangat penting dalam kehidupan. Perkembangan teknologi ini ditandai dengan bermunculannya teknologi semikonduktor yang biasa kita temukan pada komputer, teknologi serat optik dan sistem komunikasi yang berkecepatan tinggi. Selama ini hampir sebagian besar peralatan elektronik disusun dari berbagai macam *Integrated Circuit* (IC). IC dibuat dari bahan semikonduktor, pada bahan semikonduktor yang berperan sebagai penghantar adalah elektron. Pada saat ini dengan kompleksnya aplikasi peralatan elektronik dan besarnya data yang harus diolah atau ditransfer, sehingga peralatan elektronik yang komponen penyusunnya terbuat dari semikonduktor sudah mencapai batas kecepatan maksimumnya. Untuk itu perlu terobosan teknologi baru yang bekerja dengan kecepatan lebih tinggi dalam mentransfer dan mengolah data.

Teknologi devais yang mampu menyampaikan data dengan kecepatan tinggi adalah teknologi fotonik. Teknologi fotonik memanfaatkan cahaya sebagai penghantar informasi/data yang dilewati pada bahan kristal. Bahan kristal yang digunakan seperti silikon (cahaya mempunyai kecepatan 3×10^8 m/s), yang jauh lebih cepat dibandingkan kecepatan elektron ($5,9 \times 10^5$ m/s). Para ilmuwan mengembangkan ide baru yang menjadi solusi keterbatasan semikonduktor yaitu mencari pengganti *Integrated Circuit* (IC) yang dikenal dengan nama *Integrated*

Optic (IO). IO dipercayai dapat membawa sekaligus mengontrol foton sebagai sinyal pembawa dan pemroses data, Teknologi foton itu memiliki ciri, data yang ditransmisikan memiliki lebar frekuensi (*bandwidth*) yang lebih besar dibandingkan IC atau dengan kata lain lebih banyak data yang dihantarkan dan menjadikannya lebih cepat.

Komponen penyusun IO terbuat dari kristal fotonik. Kristal fotonik adalah struktur periodik dari material dielektrik dengan indeks bias atau permitivitas berbeda (Ayi,2006). Pengontrolan desain dari kristal fotonik dapat memungkinkan kita dalam memanipulasi perambatan foton. Komponen-komponen pengontrolan yang diperlukan untuk IO seperti pemandu (*guiding*), penapis (*filtering*), pengandeng (*coupling*) dan berbagai fungsi lainnya. Salah satu komponen penting dalam IO adalah pemanduan gelombang (*waveguiding*). Pemanduan gelombang yaitu struktur yang dapat memandu gelombang elektromagnetik. Prinsip yang dipakai dalam pemanduan gelombang elektromagnetik adalah sifat pemantulan internal total. Pemanduan gelombang elektromagnetik saat ini memiliki dua struktur geometri yaitu pandu gelombang persegi dan pandu gelombang silinder.

Pandu gelombang silinder adalah struktur pandu dengan model berbentuk silinder. Struktur kristal fotonik silinder ini terdiri dari dua macam bentuk yaitu rongga silinder dan silinder dielektrik. Untuk kasus rongga silinder cocok untuk modus TE (*Transverse Electric*), sedangkan kasus silinder dielektrik cocok untuk modus TM (*Transverse Magnetic*). Rongga silinder hanya terjadi pada struktur kisi segienam, sedangkan silinder dielektrik baik untuk kisi segiempat ataupun segienam pada modus TM (Hidayat,2008).

Penelitian yang berkaitan bidang fotonik ini juga dikembangkan oleh Ulfa (2010), Telah dilakukan analisis jumlah modus yang dapat dilewatkan dari devais fotonik untuk fungsi pandu gelombang. Pandu gelombang yang diteliti adalah pandu gelombang persegi. Didapatkan bahwa jumlah modus pandu gelombang dapat diatur dengan cara memvariasikan indeks bias dan lebar celah. Pandu gelombang dipengaruhi oleh parameter fisis dan parameter geometri. Pemahaman karakteristik variasi parameter fisis dan parameter geometri, akan memberikan pengetahuan yang diperlukan untuk spesifikasi desain devais fotonik fungsi pandu gelombang. Sehingga dengan mengetahui parameter fisis dan parameter geometri dapat mengatur/mengontrol dalam pembuatan piranti fotonik. Melalui analisis didapatkan stuktur yang fungsional sehingga bisa mengolah foton untuk digunakan sebagai: sensor, modulator, dan lain-lain. Analisis terhadap pandu gelombang sudah dilakukan secara teoritik, namun membutuhkan waktu lama. Oleh karena itu dibutuhkan analisa numerik pemodelan atau simulasi dalam aplikasi komputasi.

Pemodelan gelombang elektromagnetik (EM) dilakukan melalui perhitungan medan listrik. Persamaan maxwell yang pada dasarnya adalah persamaan diferensial dapat diselesaikan dengan menggunakan metode persamaan integral. Untuk itu persamaan maxwell didefinisikan dan diselesaikan pada daerah homogen. Metode persamaan integral yang digunakan adalah metode *Tensor Green*. Metode *Tensor Green* dapat menghitung medan listrik (Hardhienata,2008).

Berdasarkan latar belakang ini, penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul analisis numerik struktur optik 2-dimensi devais fotonik menggunakan metode *Tensor Green*.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah dapat dirumuskan permasalahan penelitian yaitu Apakah analisis numerik pemodelan gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi sebagai fungsi pandu gelombang menggunakan metode *Tensor Green* ?

C. Pembatasan Masalah

Berdasarkan perumusan masalah dan mengingat luasnya cakupan penelitian ini, maka penulis memfokuskan permasalahan menjadi:

1. Struktur dari kristal fotonik 2-dimensi yang ditinjau berbentuk silinder dielektrik sebagai pandu gelombang.
2. Simulasi gelombang elektromagnetik pada kristal fotonik 2-Dimensi yang diteliti adalah gelombang elektromagnetik untuk modus TM.

D. Pertanyaan Penelitian

Untuk menjawab permasalahan penelitian ini perlu dikemukakan beberapa pertanyaan penelitian yaitu:

1. Apakah hasil analisis numerik dari penjalaran gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-Dimensi sebagai pandu gelombang untuk menghitung kuat medan listrik?
2. Apakah pengaruh variasi jarak antara kisi (a) dan variasi jumlah silinder dalam penjalaran gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi untuk fungsi pandu gelombang berbentuk silinder dielektrik ?

E. Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah dalam penelitian ini, dapat dijelaskan bahwa penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menghasilkan dan menganalisis secara numerik model penjalaran gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi sebagai pandu gelombang untuk menghitung kuat medan listrik.
2. Menganalisis pengaruh variasi jarak antara kisi (a) dan variasi jumlah silinder dalam penjalaran gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi untuk fungsi pandu gelombang berbentuk silinder dielektrik ?

F. Kegunaan Penelitian

Adapun penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi yaitu :

1. Peneliti sendiri, untuk mengaplikasikan ilmu yang didalami di perkuliahan dan merealisasikannya dalam bentuk informasi bagi masyarakat.
2. Peneliti lainnya, sebagai referensi dan acuan bagi penelitian lanjutan.

BAB II

KAJIAN TEORI

A. Fotonik dan Perkembangannya

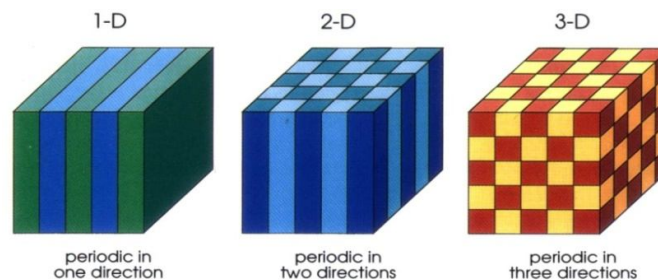
Foton adalah partikel dasar yang bertanggung jawab untuk fenomena elektromagnet, sebagai pembawa radiasi elektromagnetik pada semua panjang gelombang, sinar gamma, sinar X, sinar ultraviolet, cahaya tampak, sinar inframerah, gelombang mikro dan gelombang radio. Foton berbeda dari partikel dasar lainnya, seperti elektron dan quark. Foton tidak bermassa dan bergerak (dalam vakum) pada laju cahaya c . Foton memiliki sifat partikel sekaligus gelombang (dualisme gelombang partikel).

Foton tidak bermassa tidak memiliki muatan listrik dan tidak meluruh secara spontan di ruang hampa. Sebuah foton memiliki dua keadaan polarisasi yang dimungkinkan dan dapat dideskripsikan dengan tiga parameter kontinu yaitu komponen-komponen vektor gelombang, panjang gelombangnya dan arah perambatannya.

Salah satu bidang yang mempelajari mengenai interaksi cahaya dengan materi adalah fotonik. Teknologi fotonik memberikan sumbangan yang besar bagi perkembangan teknologi komunikasi dan informasi. Fotonik sebagai pendorong untuk inovasi teknologi dan kreatif produksi devais. Teknologi fotonik telah mempengaruhi perkembangan kapasitas data pada jaringan telekomunikasi. Disamping itu, teknologi fotonik juga berperan dalam kemajuan pada bidang kesehatan, penerangan, dan bidang lainnya.

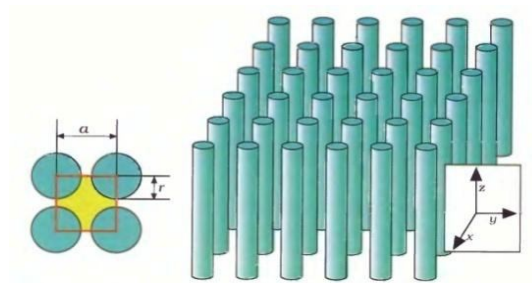
Teknologi fotonik terus berkembang hingga saat ini. Beberapa kemajuan yang didasari oleh teknologi ini adalah laser diode sebagai sumber komunikasi optik. Teknolgi laser diode mampu mentransmisikan data dengan kecepatan dalam orde terabit tiap detik. Selain itu, telah dikembangkan lampu LED (*light emitting diode*) yang berbahan dasar semikonduktor tipe III-V. Lampu LED ini menghasilkan cahaya dan energi listrik yang dibutuhkan jauh lebih kecil di bandingkan bola lampu yang digunakan saat sekarang. Sampai saat ini teknologi fotonik masih menjadi bidang yang sangat menarik dikaji. Untuk mengembangkan teknologi ini dibutuhkan banyak inovasi, baik secara teori maupun aplikasi langsung. Dalam perkembangannya teknologi ini diharapkan terus memberikan kontribusi dalam kesejahteraan kehidupan.

Kristal fotonik adalah material dielektrik yang memiliki indeks bias atau permitivitas berbeda secara periodic (Ayi,2006). Pada kristal fotonik pengaruh dari perbedaan indeks bias atau permitivitas menyebabkan terciptanya daerah energi dan daerah terlarang. Daerah yang memungkinkan adanya energi foton dikenal dengan istilah modus (*modes*) dan daerah terlarang disebut celah pita fotonik (*photonic bandgap*). Dasar teori mengenai kristal fotonik dikembangkan pertama kali oleh E. Yablonovic dan S. John pada tahun 1987.



Gambar1 . Kristal Fotonik (Joannopoulos,2008)

Gambar 1 kristal fotonik berbentuk persegi, arah kiri kristal fotonik 1 dimensi, tengah kristal fotonik 2 dimensi dan kanan kristal fotonik 3 dimensi. Kristal fotonik 2 dimensi tersusun periodik pada dua sumbu aksisnya, dan homogen sepanjang sumbu ketiga. Bentuk lain kristal fotonik 2 dimensi terdiri atas susunan kolom-kolom dielektrik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, kristal fotonik berbentuk silinder dielektrik. Pada kristal fotonik ini terdapat nilai *bandgap* pada bidang x - y . Di dalam *gap* ini, tidak ada transmisi yang terjadi dan cahaya yang menumbuknya akan dipantulkan seluruhnya. Kristal fotonik 2D dapat memantulkan cahaya yang datang dari arah manapun pada bidang sehingga tidak ada cahaya yang dapat ditransmisikan di dalamnya.



Gambar 2. Kristal Fotonik 2 Dimensi Berbentuk Silinder.
(Joannopoulos,2008)

Material ini homogen pada sumbu z (digambarkan seperti silinder yang panjang) dan periodik pada bidang x - y dengan konstanta jarak pada pusat silinder sebesar a . Jika $k_z = 0$, maka cahaya merambat sejajar pada bidang x - y (Hidayat,2008).

B. Persamaan Gelombang Elektromagnetik pada Kristal Fotonik

Gelombang merupakan suatu gejala gangguan yang merambat dalam selang waktu tertentu ke ruang sekitarnya. Gelombang dapat terjadi apabila suatu sistem diganggu dari posisi kesetimbangannya dan gangguan itu merambat dari suatu daerah sistem ke daerah lainnya. Gerak gelombang dapat dilihat sebagai perpindahan berupa pulsa energi dan momentum dari suatu tempat ke tempat lain (Giancolli, 1998).

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang tidak memerlukan medium dalam perambatannya. Berikut perumusan persamaan Maxwell ada sumber yakni :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \dots\dots\dots (1.a)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j + \frac{\partial}{\partial t} D \dots\dots\dots (1.b)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \dots\dots\dots (1.c)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \dots\dots\dots (1.d)$$

Dimana E : medan listrik (volt/m)

B : fluks atau induksi magnetik (weber/m² atau Tesla)

H : medan magnet (ampere/m)

j : rapat arus (ampere/m²)

D : perpindahan listrik (coulomb/m²)

ρ : rapat muatan listrik (coulomb/m³)

Keempat persamaan ini merupakan hukum dasar kelistrikan dan kemagnetan dalam bentuk differensialnya (Hendragrandis,2010). Persamaan (1a) diturunkan dari hukum Faraday yang menyatakan bahwa perubahan fluks magnetik menyebabkan medan listrik dengan gaya gerak listrik berlawanan dengan variasi fluks magnetik yang menyebabkannya. Persamaan (1b)

merupakan generalisasi teorema Ampere dengan memperhitungkan hukum kekekalan muatan. Persamaan tersebut menyatakan bahwa medan magnet timbul akibat fluks total arus listrik yang disebabkan oleh arus konduksi dan arus perpindahan. Persamaan (1c) menyatakan hukum Gauss yaitu fluks elektrik pada suatu ruang sebanding dengan muatan total yang ada dalam ruang tersebut. Sedangkan persamaan (1d) yang identik dengan persamaan (1c) berlaku untuk medan magnet, namun dalam hal ini tidak ada monopol magnetik.

Menerapkan operasi curl terhadap persamaan (1a), (1b), (1c), dan (1d), hasil yang diperoleh berbentuk seperti berikut yang tidak lain adalah persamaan gelombang

$$\left(\nabla^2 - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \begin{Bmatrix} E(r,t) \\ H(r,t) \end{Bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

Solusi persamaan (2) disebut dengan gelombang elektromagnetik. Apabila solusi ini merambat di dalam ruang yang tak terbatas, bentuk yang paling sederhananya adalah:

$$\begin{Bmatrix} E(r,t) \\ H(r,t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - k \cdot r)} \dots\dots\dots (3)$$

Persamaan gelombang pada persamaan (3) dikenal dengan nama gelombang bidang harmonik (*harmonic plane wave*).

Gelombang ini memiliki sifat-sifat khusus yaitu

- ❖ Berfrekuensi tunggal (monokromatik).
- ❖ Amplitudonya tetap (\mathbf{E}_0 dan \mathbf{H}_0 adalah konstanta).

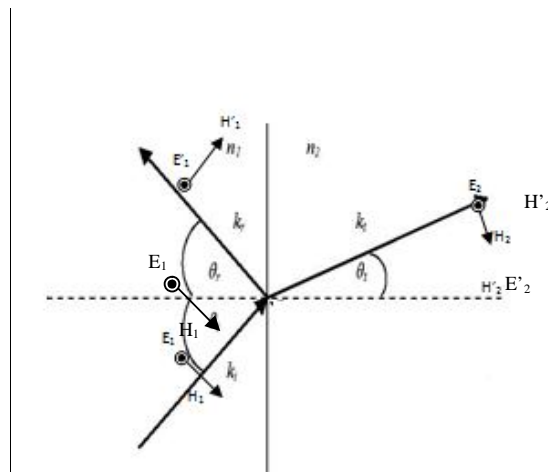
- ❖ Berpolarisasi transversal (medan \mathbf{E} , medan \mathbf{H} serta vektor propagasi \mathbf{k} terletak pada bidang-bidang yang saling tegak lurus).
- ❖ Muka gelombangnya berupa bidang datar.

Medan yang merambat dalam medium biasanya dapat dibedakan atas dua modus yaitu modus gelombang TE (*transverse electric*) yaitu dimana medan listrik \vec{E} tegak lurus bidang datang, dan modus gelombang TM (*transverse magnetic*) yaitu dimana medan magnetik \vec{H} tegak lurus bidang datang.

Modus *transverse electric* (TE) memiliki arah medan magnet \mathbf{H} yang tegak lurus terhadap bidang $\vec{H} = \vec{H}(\rho) \hat{z}$ dan medan listrik \mathbf{E} yang sejajar dengan bidang $\vec{E}(\rho) \cdot \hat{z} = 0$. Modus *transverse magnetic* (TM) bersifat sebaliknya yaitu $\vec{E} = \vec{E}(\rho) \hat{z}$ dan $\vec{H}(\rho) \cdot \hat{z} = 0$.

1. Modus Gelombang TE

Tinjau medan yang merambat dengan medan listrik \vec{E} tegak lurus bidang datang atau Modus TE (*Transverse Electric*) seperti pada Gambar.3

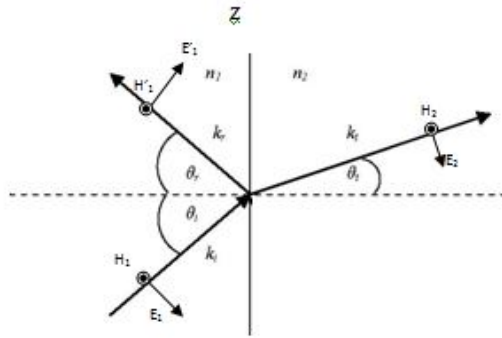


Gambar 3. Modus Gelombang TE (Hidayati,2009)

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa untuk modus TE : $\vec{k} \perp \vec{E} \perp \vec{H}$ yaitu $\vec{x} \perp \vec{E}_y \perp \vec{H}_z$

2. Modus Gelombang TM

Tinjau medan yang merambat dengan medan magnet \vec{H} tegak lurus bidang datang atau Modus TM (*Transverse Magnetic*)



Gambar 4. Modus Gelombang TM (Hidayati,2009)

Dari Gambar 4 dapat dilihat bahwa untuk modus TM : $\vec{k} \perp \vec{E} \perp \vec{H}$ berarti $\vec{x} \perp \vec{E}_z \perp \vec{H}_y$

Apabila struktur tempat penjalaran gelombang bersifat terbatas, solusi persamaan (3) harus memenuhi syarat batas yang ditentukan oleh struktur medium. Hal ini menyebabkan gelombang yang menjalar tidak lagi bersifat transversal dan beramplitudo tetap. Salah satu contoh struktur tersebut adalah pandu gelombang (*waveguide*).

Untuk ruang hampa berlaku untuk bahan dielektrik, dimana $\varepsilon = \varepsilon_0$ dan $\mu = \mu_0$. Jika digunakan untuk keadaan di atas, persamaan Maxwell dapat ditulis secara sederhana yakni:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} = 0 \dots\dots\dots(4.a)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} - \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \vec{E} = 0 \dots\dots\dots(4.b)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon \vec{E} = 0 \dots\dots\dots(4.c)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mu \vec{H} = 0 \dots\dots\dots(4.d)$$

Persamaan sederhana ini, bisa digunakan untuk memperoleh beberapa persamaan dasar dari gelombang. Untuk menjelaskan penjalaran gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa, Persamaan Maxwell harus disusun kembali menggunakan asumsi bahwa ε dan μ tidak tergantung waktu. Persamaan (4.a) dilakukan operasi curl ,akan diperoleh:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (5)$$

Menggunakan vektor identitas $\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \cdot (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ maka persamaan (5) menjadi

$$\nabla \cdot (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \dots\dots\dots (6)$$

Karena pada ruang hampa tidak ada muatan $\nabla \cdot E = 0$, sehingga persamaan (6) menjadi

$$\nabla^2 E - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

Melalui cara yang sama untuk medan H, dapat diturunkan dari persamaan (4.b) dan akan diperoleh

$$\nabla^2 H - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

Dari persamaan (6) dan (7) dapat dilihat bahwa perbedaan divergensi dari medan listrik dan medan magnetik adalah besar kedua medan tersebut. Solusi dari kedua persamaan (6) dan (7) masing-masing adalah

$$E = A_0 e^{i(\omega t - kr)} \dots\dots\dots (9)$$

$$H = H_0 e^{i(\omega t - kr)} \dots\dots\dots (10)$$

A_0 dan H_0 adalah amplitudo, ω adalah frekuensi dan k adalah vektor propagasi.

Persamaan gelombang harmonik dapat dituliskan dalam bentuk eksponensial kompleks $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}(\vec{r}) e^{-i\omega t}$ dan $\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t}$. Substitusikan ke dalam persamaan (4.a) maka

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) e^{-i\omega t} - i\mu \omega \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

Selanjutnya ambil suku realnya sehingga

$$\text{Re}[\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - i\mu \omega \vec{H}(\vec{r})] e^{-i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

Suku $e^{-i\omega t}$ tidak bernilai nol, maka suku di dalam kurung harus bernilai nol

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - i\mu \omega \vec{H}(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

Cara yang sama, maka persamaan (4.b) menjadi berbentuk

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t} - \frac{\partial}{\partial t} \epsilon \vec{E}(\vec{r}) e^{-i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t} + i\epsilon \omega \vec{E}(\vec{r}) e^{-i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (15)$$

Mengambil suku realnya menjadi

$$\text{Re}[\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) e^{-i\omega t} + i\epsilon \omega \vec{E}(\vec{r})] e^{-i\omega t} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

Suku $e^{-i\omega t}$ tidak bernilai nol, maka suku di dalam kurung harus bernilai nol

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) + i\epsilon\omega\vec{E}(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots(17)$$

Kemudian jika persamaan (13) dikenakan operasi *Curl*, maka akan didapatkan persamaan

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) &= \vec{\nabla} \times i\mu\omega\vec{H}(\vec{r}) \\ \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) &= i\mu\omega[\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r})] \\ \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - \epsilon\mu\omega^2\vec{E}(\vec{r}) &= 0 \dots\dots\dots(18)\end{aligned}$$

Menggunakan hubungan $k = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$, maka persamaan (18) menjadi

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - k^2\vec{E}(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots(19)$$

Sekarang ditinjau bila kristal fotonik, dengan medium berbentuk silinder yang memiliki fungsi dielektrik $\epsilon(r)$ berada pada medium dasar (*background*) dengan permitivitas ϵ_B .

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - k_0^2\epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots(20)$$

dengan $k = k_0\sqrt{\epsilon(\vec{r})}$ dan k_0 adalah bilangan gelombang dalam vakum. Selisih konstanta dielektrik antara dua medium adalah $\Delta\epsilon(\vec{r}) = \epsilon(\vec{r}) - \epsilon_B$. Untuk selisih konstanta dielektrik tersebut, maka persamaan gelombang vektor homogenya diubah menjadi bentuk yang tak homogenya

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) - k_0^2\epsilon_B\vec{E}(\vec{r}) = k_0^2\Delta\epsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) \dots\dots\dots(21)$$

C. Fungsi Green Dyadic pada Medium Homogen

Fungsi green dari persamaan gelombang adalah solusi dari persamaan gelombang sumber titik. Fungsi *green dyadic* terdiri atas *dyad* yang menghubungkan medan vector (fungsi bernilai vector) dengan sumber vektor

arus. Pada medium isotropik, homogen, dan jauh dari sumber muatan maka Medan Listrik $\vec{E}(\vec{r})$ dipenuhi menurut persamaan (20) dengan menggunakan identitas vektor $\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla \cdot (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E$ maka persamaan (4.c) menjadi

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon \vec{E} = \varepsilon (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) + (\vec{E} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon) = 0 \dots\dots\dots(22)$$

Dalam medium homogen dan isotropik, maka gradien dari ε bisa dianggap nol sehingga suku kedua bernilai nol, sehingga $\varepsilon (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) = 0$ dan $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$. Persamaan (19) dengan demikian menjadi

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E}(\vec{r}) + k^2 \vec{E}(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots(24)$$

Persamaan tersebut dikenal sebagai persamaan Helmholtz yang merupakan persamaan gelombang EM standar yang menggambarkan perambatan gelombang EM dalam kristal fotonik isotropik homogen dan jauh dari sumber muatan (bebas sumber).

Untuk mendapatkan solusi skalar persamaan gelombang dari satu titik sumber maka digunakan penurunan berikut ini. Menggunakan persamaan gelombang

$$(\vec{\nabla}^2 + k^2) \vec{E}(\vec{r}) = s(\vec{r}) \dots\dots\dots(25)$$

maka solusi persamaan gelombang dapat ditentukan fungsi greennya

$$(\vec{\nabla}^2 + k^2)g(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r} - \vec{r}') \dots\dots\dots(26)$$

Fungsi green ini merupakan solusi medan untuk sebuah sumber dan hanya bergantung dari jarak antara pengamat dan sumber tersebut. Medan total dapat dirumuskan

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int_V d\vec{r}' g(\vec{r}, \vec{r}') s(\vec{r}') \dots\dots\dots(27)$$

Pada sumber titik, akan lebih memudahkan jika digunakan sistem koordinat bola dengan titik asal \vec{r}' sehingga persamaan (27) berbentuk

$$(\vec{\nabla}^2 + k^2)g(\vec{r}) = -\delta(\vec{r}) \dots\dots\dots(28)$$

Dengan mengganti $\vec{\nabla}^2$ untuk koordinat bola

$$\left\{ \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} r + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right] + k^2 \right\} g(\vec{r}) = 0 \dots\dots(29)$$

Untuk persamaan gelombang isotropik homogenik, maka didapatkan bentuk yang lebih sederhana

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} \vec{r} g(\vec{r}) + k^2 \vec{r} g(\vec{r}) = 0 \dots\dots\dots(30)$$

Solusi umum dari persamaan (28)

$$g(\vec{r}) = \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}} + \frac{b}{\vec{r}} e^{-ik\vec{r}} \dots\dots\dots(31)$$

Keberadaan sumber dianggap tak hingga, sehingga hanya suku pertama yang digunakan

$$g(\vec{r}) = \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}} \dots\dots\dots(32)$$

Konstanta a ditentukan dengan mensubstitusikan persamaan (32) pada persamaan (27) kemudian mengintegalkannya dengan menganggap $\delta(r) = 1$ pada titik asalnya ($\vec{r}' = \vec{r}$)

$$\begin{aligned}
\int_{\Delta V} dV (\nabla \cdot \nabla \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}} + k^2 \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}}) &= -1 \\
\int_{\Delta V} dV (\nabla \cdot \nabla \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}}) &= \oint_{\Delta S} \nabla \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}} \cdot d\vec{S} = -1 \\
\lim_{r \rightarrow 0} 4\pi \vec{r}^2 \frac{\partial}{\partial r} \frac{a}{\vec{r}} e^{ik\vec{r}} &= -1 \\
a &= \frac{1}{4\pi} \dots\dots\dots(33)
\end{aligned}$$

Sehingga fungsi *green dyadic* skalar menjadi

$$g(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|} e^{ik|\vec{r} - \vec{r}'|} \dots\dots\dots(34)$$

D. Tensor Green

Tensor adalah identitas geometri yang diperkenalkan kedalam fisika untuk memperluas pengertian skalar, vektor dan matriks. Untuk merancang suatu program aplikasi dalam memodelkan suatu persamaan gelombang, diperlukan perhitungan numerik yang korelatif. Pemodelan gelombang elektromagnetik (EM) dilakukan melalui perhitungan medan listrik. Persamaan Maxwell yang pada dasarnya adalah persamaan diferensial dapat diselesaikan dengan menggunakan metoda persamaan integral. Untuk persamaan Maxwell cukup didefinisikan dan diselesaikan pada daerah homogen, metode persamaan integral yang digunakan adalah metode *Tensor Green* (Hardhienata,2008).

Tensor Green untuk medium 3 dimensi homogen berbentuk (Kurniawan ,2010)

$$\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') = \left[\vec{I} + \frac{\vec{\nabla} \vec{\nabla}}{k_B^2} \right] g(\vec{r}, \vec{r}') \dots\dots\dots(35)$$

Fungsi *green dyadic* pada medium homogen untuk $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ merupakan jarak mutlak antara sumber (r') dan pengamat (r) ditunjukkan pada persamaan (34) dapat dituliskan dalam bentuk

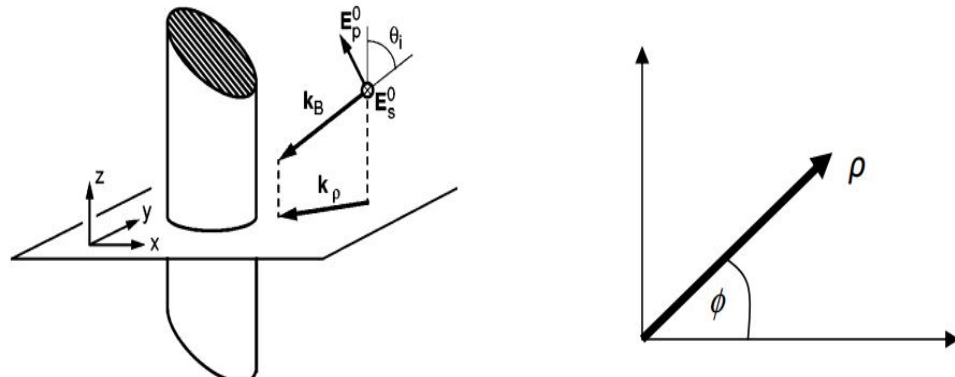
$$g(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi R} e^{ikR} \dots\dots\dots (36)$$

Konstanta k_B merupakan bilangan gelombang pada medium *background* yang memiliki hubungan dengan permitivitas *background* ϵ_B berbentuk

$$k_B = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_B} \dots\dots\dots (37)$$

E. Tensor Green Kristal Fotonik 2 Dimensi

Tensor Green dua dimensi dapat diperoleh dari *Tensor Green* tiga dimensi. Dalam sebuah ruang tiga dimensi kita anggap satu sumbu dalam keadaan homogen. Dalam hal ini sumbu z . Penggambaran yang cukup mudah adalah dengan menggambarkan sebuah medium berupa silinder. Dengan artian bahwa sepanjang sumbu z homogen. Gambar 5 adalah gambar sebuah silinder kristal fotonik dengan homogen sepanjang sumbu z . Gelombang elektromagnetik TM menjalar dengan arah k_B dan proyeksi k_B pada bidang xy adalah k_p , $k_B = k_p$.



Gambar 5. Sistem 2 Dimensi Homogen Sepanjang Sumbu z
(Paulus,2001)

Persamaan matematis tensor green 2D (Kurniawan,2010)

$$g_{2D}^B(\vec{r}, \vec{r}') = \int_{-\infty}^{\infty} dz' g_{3D}^B(\vec{r}, \vec{r}') e^{ik_z z} \dots (38)$$

Koordinat relatif $\rho^2 = x^2 + y^2$ asumsi bahwa sumber garis tersebut

terletak pada $x' = y' = 0$ Sehingga

$$g_{2D}^B(\vec{r}, \vec{r}') = \int_{-\infty}^{\infty} dz' \left[\frac{ik_B \sqrt{\rho^2 + (z - z')^2}}{4\pi \sqrt{\rho^2 + (z - z')^2}} \right] e^{ik_z z}$$

$$= \frac{i}{4} H_0(k_a, a) \exp[ik_z z] \dots (39)$$

Komponen-komponen *Tensor Green* 2D homogen didapatkan melalui penerapan pada persamaan dengan $z = 0$ (Kurniawan,2010)

$$\bar{G}_{xx}^B = \frac{i}{4} \left(1 - \frac{k_\rho^2}{k_B^2} \right) H_0(k_\rho, \rho) + \frac{i k_\rho^2 \cos 2\phi}{4 k_B^2 \rho} H_1(k_\rho, \rho)$$

$$\bar{G}_{xy}^B = \frac{i k_\rho^2 \sin 2\phi}{4 k_B^2} H_2(k_\rho, \rho)$$

$$\bar{G}_{xz}^B = \frac{1}{4} \frac{k_z k_\rho \cos \phi}{k_B^2} H_1(k_\rho, \rho)$$

$$\begin{aligned}
\vec{G}^B_{yy} &= \frac{i}{4} \left(1 - \frac{k_\rho^2 \sin^2 \phi}{k_B^2} \right) H_0(k_\rho, \rho) - \frac{i}{4} \frac{k_\rho^2 \cos 2\phi}{k_B^2 \rho} H_1(k_\rho, \rho) \\
\vec{G}^B_{yz} &= \frac{1}{4} \frac{k_z k_\rho \sin \phi}{k_B^2} H_1(k_\rho, \rho) \\
\vec{G}^B_{zz} &= \frac{i}{4} \left(1 - \frac{k_z^2}{k_B^2} \right) H_0(k_\rho, \rho) \dots\dots\dots (40)
\end{aligned}$$

Pada kasus polarisasi TM, tensor Green $G^B(\vec{\rho}, \vec{\rho}')$ disederhanakan menjadi fungsi *Green* skalar dengan $z = 0$

$$G^B(\vec{\rho}, \vec{\rho}') = G^B_{zz} \dots\dots\dots (41)$$

Karena gelombang datang pada bidang $x - y$, kemudian $k_\rho = k_B$ dan $k_z = 0$, sehingga

$$\vec{G}^B_{zz} = \frac{i}{4} \left(1 - \frac{k_z^2}{k_B^2} \right) H_0(k_\rho, \rho) \dots\dots\dots (42)$$

$$\vec{G}^B_{zz} = \frac{i}{4} H_0(K_\rho, \rho) \dots\dots\dots (43)$$

F. Persamaan Lippman Schwinger

Berdasarkan persamaan fungsi green maka medan listrik dari bahan dapat dinyatakan dalam bentuk (Kurniawan, 2010)

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}^0(\vec{r}) + \int_V d\vec{r}' G^B(\vec{r}, \vec{r}') \cdot k_0^2 \Delta \epsilon(\vec{r}') \vec{E}(\vec{r}') \dots\dots\dots (44)$$

dengan batas integral V adalah volume hamburan total. Dapat dilihat bahwa fungsi *Green* hanya bergantung jarak sumber dan pengamat. Maka ada kendala dalam penjumlahan total dari medan, yaitu ketika sumber dan pengamat dalam satu titik. Sehingga persamaan (44) menjadi

$$E(r)=E^0(r) + \lim_{\partial V \rightarrow 0} \int_{V-\partial V} dr' G^B(r, r') \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon(r') E(r') - L \cdot \frac{\Delta \varepsilon(R)}{\varepsilon_B} E(r) \quad (45)$$

Persamaan (45) disebut Persamaan lipmann- Schwinger dengan L sebagai suatu penghitungan dari medan yang tidak terhitung oleh fungsi green. Persamaan lippman Schwinger merupakan persamaan yang dapat didekati dengan numerik berupa diskrit, sehingga bentuk diskrit persamaan (45) yaitu

$$\vec{E}_i = \vec{E}_i^0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{G}_{ij}^B \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_j \vec{E}_j V_j + \vec{M} \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_i \vec{E}_i - \vec{L} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \varepsilon_B} \vec{E}_i \dots\dots\dots (46)$$

M merupakan suatu cara untuk mengurangi faktor ketidaktelitian. Persamaan (46) digunakan untuk menghitung besar nilai total medan E. Persamaan lippman schwinger menunjukkan \vec{E}_i dan \vec{E}_j sebenarnya memiliki bentuk yang sama dihubungkan melalui persamaan

$$\vec{E}_i = \delta_{ij} \vec{E}_j \dots\dots\dots (47)$$

Sehingga persamaan (46) menjadi

$$\begin{aligned} \delta_{ij} \cdot \vec{E}_j &= \vec{E}_i^0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{G}_{ij}^B \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_j \vec{E}_j V_j + \delta_{ij} \cdot (\vec{M} \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_i \vec{E}_j - \vec{L} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \varepsilon_B} \vec{E}_j) \\ \delta_{ij} \cdot \vec{E}_j &= \vec{E}_i^0 + (\sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{G}_{ij}^B \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_j V_j + \delta_{ij} \cdot (\vec{M} \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_i - \vec{L} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \varepsilon_B})) \cdot \vec{E}_j \dots\dots\dots (48) \end{aligned}$$

Maka didefinisikan matriks baru

$$T_{ij} = \sum_{j=1, j \neq i}^N \vec{G}_{ij}^B \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_j V_j + \delta_{ij} \cdot (\vec{M} \cdot k_0^2 \Delta \varepsilon_i - \vec{L} \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\Delta \varepsilon_B}) \dots\dots\dots (49)$$

Sehingga bentuk persamaan (48)

$$\delta_{ij} \cdot \vec{E}_j = \vec{E}_i^0 + T_{ij} \cdot \vec{E}_j$$

$$\delta_{ij} \cdot \vec{E}_j - T_{ij} \cdot \vec{E}_j = \vec{E}_i^0$$

$$\begin{aligned}
 (\delta_{ij} - T_{ij}).E_j &= \vec{E}_i^0 \\
 \vec{E}_j &= (\delta_{ij} - T_{ij})^{-1} . \vec{E}_i^0 \dots\dots\dots(50)
 \end{aligned}$$

Dengan $\delta_{ij} = I_{ij}$ maka

$$\vec{E}_j = (I_{ij} - T_{ij})^{-1} . \vec{E}_i^0 \dots\dots\dots(51)$$

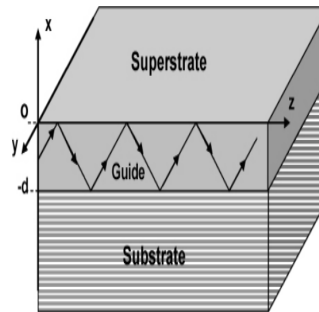
G. Pandu Gelombang

Pengolahan dan transmisi sinyal *IO (Integrated Optic)* dilakukan salah satunya dengan pemanduan terhadap gelombang yang lebih dikenal dengan pandu gelombang. Pandu gelombang digunakan untuk mentransferkan energi elektromagnetik dari suatu titik dari suatu daerah ke daerah lainnya. Pandu gelombang dielektrik adalah struktur yang digunakan untuk membatasi dan memandu cahaya dalam sebuah piranti pemandu gelombang dan sirkuit *Integrated Optic*.

Modus pandu gelombang dielektrik sebagai sebuah medan elektromagnetik yang berpropagasi. Modus merupakan daerah yang dapat dilewati oleh foton. Bentuk umum gelombang elektromagnetik harmonik yang berpropagasi ke arah sumbu z dapat dituliskan dalam bentuk:

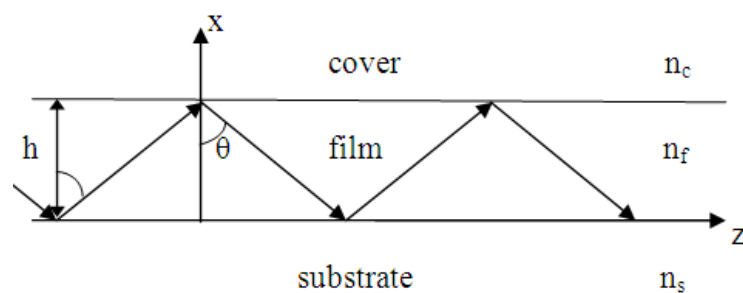
$$\begin{Bmatrix} \mathbf{E}(x, y, z, t) \\ \mathbf{H}(x, y, z, t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{E}(x, y) \\ \mathbf{H}(x, y) \end{Bmatrix} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (52)$$

hal ini dapat dilihat pada Gambar 6, dimana cahaya merambat dalam bentuk zig-zag pada bagian film.



Gambar 6. Perambatan Cahaya dalam Pandu Gelombang
(Boudrioua,2009)

Secara sederhana apabila dilewatkan gelombang pada modulus pemanduan tersebut, yang terjadi pada piranti serat optik berupa pemantulan total. Adanya pemantulan total menyebabkan kehilangan data yang ditransmisikan dapat diminimalkan. Syarat batas yang harus dipenuhi untuk terjadinya pemantulan total adalah apabila indeks bias pada modulus pelewatan data (indeks bias film n_f) lebih besar dari pada indeks bias lingkungan sekitarnya. Secara grafis peristiwa pemantulan total pada struktur fungsi pandu gelombang diperlihatkan pada gambar 7.



Gambar 7. Pemantulan Internal Total Pandu Gelombang (Tamir,1975)

Sinar dikurung dan dibatasi dalam film dan propagasinya berupa zig-zag. Gelombang yang mengalami pemantulan total adalah gelombang monokromatik

dan koheren dengan frekuensi sudut ω , panjang gelombang ruang bebas λ dan merambat dengan sebuah vektor gelombang \mathbf{k} pada arah gelombang normal.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega/c \dots\dots\dots(53)$$

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi / \lambda}$$

$$c = \lambda.f \dots\dots\dots(54)$$

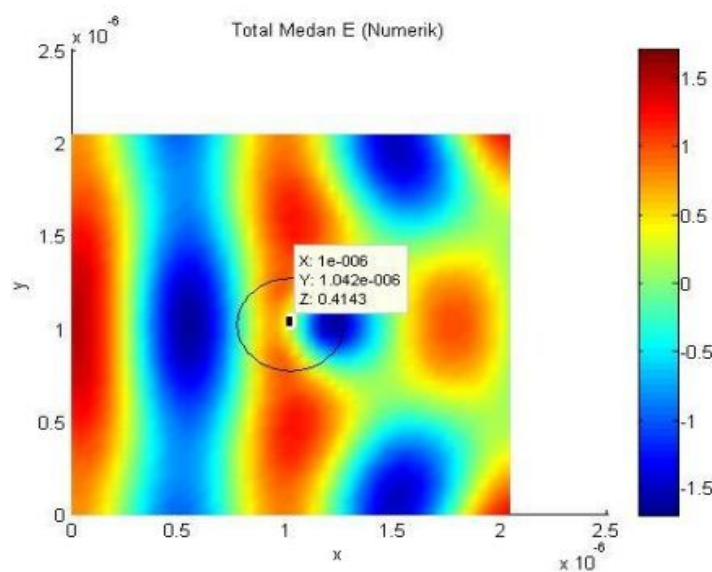
keterangan: c = cepat rambat
 f = frekuensi
 λ = panjang gelombang

Pada pandu gelombang ini terjadi pengurungan cahaya sepanjang sumbu x . Diasumsikan bahwa cahaya yang dipandu menjalar searah z , sehingga pengurungan secara transversal terjadi sepanjang arah x . Hal ini menyebabkan struktur dan cahaya akan seragam (uniform) disepanjang sumbu y tegak lurus bidang x - z (Hidayati, 2009).

H. Cacat Kristal

Cacat kristal memiliki pengaruh yang sangat besar dalam menentukan sifat suatu bahan dan pengaturan cacat sangat penting dalam pemrosesan bahan. Contoh relevansi cacat kristal dalam kehidupan pada umumnya dan dalam bahan pada khususnya yaitu, ketika kita membeli cincin berlian, sebenarnya kita membayar untuk tipe cacat pada kristal pada cincin berlian tersebut. Pembuatan device fotonik tidak hanya membutuhkan silikon murni tetapi juga meliputi cacat kristal tertentu pada sample. Menempa suatu logam akan menghasilkan cacat pada logam tersebut dan meningkatkan kekuatan dan kelenturan logam. Dimana sifat-sifat tersebut dicapai tanpa mengubah komposisi penyusun bahan tetapi hanya manipulasi cacat kristal.

Sebuah pandu gelombang dibuat dengan memilih satu baris silinder dalam susunan kristal fotonik untuk membuat saluran cacat. Sehingga gelombang elektromagnetik dapat lewat dalam susunan kristal fotonik. Pandu gelombang dilihat adalah pandu gelombang silinder. Kristal fotonik berbentuk silinder yang tersusun secara periodik dari silinder tunggal.

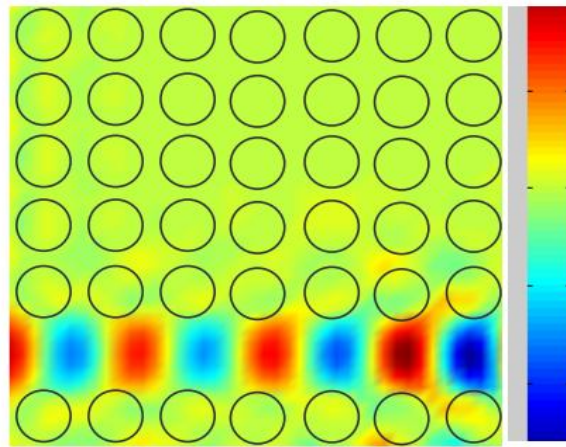


Gambar 8. Medan Listrik Pada Satu Silinder(Kurniawan,2010)

Berdasarkan penelitian (Kurniawan,2010) seperti Gambar 8 menunjukkan bentuk kontur medan listrik pada satu silinder/ silinder tunggal. Parameter yang digunakan permitivitas silinder 4, permitivitas *background* (udara) 1. Didapatkan x (1×10^{-6}), y (1.042×10^{-6}) dan z (0.4143). Skala pewarnaan menunjukkan kuat medan listrik.

Pada kristal fotonik dibuat sebuah saluran cacat yang digunakan untuk melewati gelombang elektromagnetik. Berdasarkan perhitungan numerik Sakoda, parameter yang digunakan adalah jarak antara kisi 0.38, frekuensi

bandgap 0.65, permitivitas bahan (alumina) 9 dan permitivitas *background* (udara) 1 hasil kesalahan numerik 1% (Hardhienata,2008). Bentuk kontur model cacat lurus pandu gelombang sebagai berikut:



Gambar 9. Kontur Pandu Gelombang Satu Cacat Lurus
(Hardhienata,2008)

Gambar 9. Menunjukkan bentuk kontur pandu gelombang satu cacat lurus. Terlihat Gelombang elektromagnetik menjalar lurus mengikuti bentuk pandu gelombang. Pandu gelombang didalam kristal fotonik 2-dimensi dibuat dengan mengambil salah satu susunan baris silinder dalam stuktur kristal. Pandu gelombang dibuat dengan mengambil baris keenam dalam susunan kristal fotonik 2-dimensi berukuran 7x7. Skala warna menunjukkan kuat medan listrik. Merah menyatakan puncak gelombang dan biru menyatakan lembah gelombang. Warna merah semakin tua menyatakan puncak gelombang maksimum dan warna biru semakin tua menyatakan lembah gelombang maksimum sedangkan warna hijau bernilai mendekati nol. Kuat medan listrik maksimum berada pada daerah saluran cacat sedangkan di daerah berada diluar saluran cacat dengan nilai mendekati nol.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa numerik dan pembahasan yang telah dilakukan pada bab sebelumnya menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Dihasilkan model penjalaran gelombang elektromagnetik TM pada kristal fotonik 2-dimensi berbentuk silinder dielektrik sebagai pandu gelombang dan Kuat medan listrik bernilai pada daerah saluran cacat sedangkan pada daerah diluar saluran cacat mendekati nol, medan listrik semakin kuat seiring dengan perambatan gelombang elektromagnetik modus TM pada saluran cacat.
2. Pengaruh variasi jarak antara kisi (a) dan variasi jumlah silinder dalam perambatan gelombang elektromagnetik modus TM pada kristal fotonik 2-dimensi untuk fungsi pandu gelombang berbentuk silinder dielektrik:
 - a. Penjalaran pandu gelombang dengan jarak antara kisi (a) terhadap lebar celah (d), semakin besar jarak antara kisi maka semakin kecil lebar celah. Lebar celah yang sempit mempengaruhi kebocoran silinder dalam penjalaran gelombang elektromagnetik.
 - b. Kebocoran juga dipengaruhi jumlah silinder yang digunakan dalam membuat saluran cacat, semakin sedikit jumlah silinder maka akan terjadi kebocoran.

B. Saran

Dari kesimpulan yang penulis dapatkan, penulis menyarankan untuk lebih lanjut :

1. Menggunakan silinder lebih banyak untuk membuat saluran cacat agar tidak terjadi kebocoran. Akan tetapi juga silinder banyak, perhitungan numerik menjadi cukup lama dan membutuhkan perangkat komputer dengan memori tinggi.
2. Memodelkan variasi model pandu gelombang berbelok 45^0 , pandu gelombang berbentuk Y, dan pandu gelombang berbentuk T.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwaril Mubasiroh. (2008). *Pandu Gelombang (Waveguide)*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ayi Bachtiar. (2006). "Kristal Fotonik Nonlinier untuk Aplikasi All-Optical Switching." *Proceeding Research and Studies VII, TPSDP, 2007*
- Beiser, Arthur. (1992). *Konsep Fisika Modern Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.
- Boudrioua, Azzedine. (2009). *Photonic Waveguides*. British ISTE.
- Fusell D.P, McPhedran R.C, Sterke Martijn. (2004). *Three Dimensional Green Tensor, Local Density of States and Spontaneous Emission in Finite Two Dimensional Photonic Crystal Composed of Cylinders*. *Physical Review E* 70
- Giancoli, Douglas C. (1998). *Physics Fifth Edition*. Jakarta : Erlangga.
- Hardhienata, Hendradi. (2008). "Study Of Electromagnetic Wave Propagation in 2d Photonic Crystal with Defect Using Green's-Tensor Method." *Thesis ITB*
- Hidayat S, Bahtiar A, Siregar RE. (2008). "Perhitungan Photonic Bandgap Model Kristal Fotonik 2D dengan Metoda Plane-wave Expansion." *Prosiding Seminar Nasional Fisika*
- Hidayati dan Yulia Jamal. (2009). "Struktur Optik Linier Periodik untuk Spesifikasi Disain Piranti Fotonik Fungsi Pandu Gelombang." *Laporan Penelitian Hibah Bersaing, Universitas Negeri Padang*.
- Hendragrandis. (2010). *Metoda Magnetotellurik*. www.hendra.com (diakses 20 januari 2012)
- Ishi S, Kengo N, Toshihiko B. (2006). "Photonic Molecules in Photonic Crystals." *Japanese Journal of Applied Physics*
- Joannopoulos JD, Meade RD, Winn JN. 2008. *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*, 2nd ed. New Jersey : Princeton University Press.
- Kern Andreas, Martin O.J.F. 2009. *Modeling Near-Field Properties of Plasmonic Nanoparticles: a Surface Integral Approach*. SPIE Volume 7395
- Kurniawan, candra. (2010). "Analisis Kopling Medan Elektromagnetik Transverse Magnetic (Tm) Pada Kristal Fotonik 2d Dengan Defek Indeks Bias Simetrik Menggunakan Metode Tensor Green." *Jurnal IPB*