

# DESAIN PANDU GELOMBANG PARALEL TERISOLASI DENGAN *METHOD OF LINES*

Ary Syahriar<sup>1.)</sup>  
Helmi Adam<sup>1.2)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Elektro, Fakultas Teknik - Universitas Al-Azhar Indonesia

<sup>2)</sup> Pusat Teknologi Informasi dan Komunikasi - Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

## Abstract

*Optical directional couplers are fundamental building components for the design of optical circuits. The proper treatment of a device that couples the guided modes of a waveguide with the radiation in free space is particularly difficult because of the continuum nature of the radiating modes. The desire of high-density integration poses additional problems due to the fact that the simplest used coupling structures need to be quite large. In order to reduce the size of the device we study non-periodic structures based on air gap isolated directional couplers, for which additional degrees of freedom are available. The analysis of this type of structures requires a rigorous method for the solution of the field equations. We employ the method of lines for the computation of such coupler characteristics.*

**Kata Kunci :** Pandu gelombang paralel, pandu gelombang terisolasi, *method of lines*.

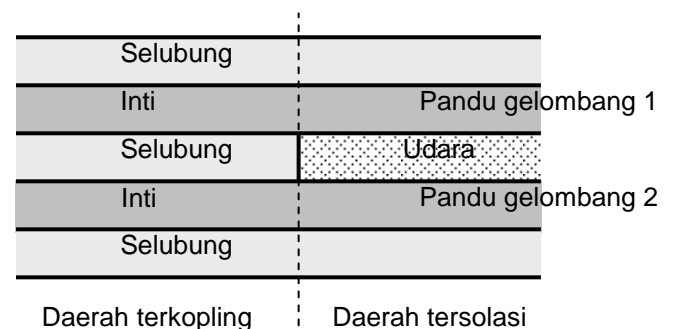
## 1. PENDAHULUAN

Pandu gelombang paralel banyak digunakan dalam membuat direksional kopler [2]. Komponen ini berfungsi membagi daya keluaran optic sesuai karakteristik yang dibutuhkan dalam sistim komunikasi fiber optik. Jika daya dimasukkan dalam salah satu pandu gelombang, maka akan terjadi berpindah daya ke pandu gelombang yang lain melalui mekanisme medan *evanescent* dari pandu gelombang pertama ke pandu gelombang kedua [1] dan kemudian kembali lagi ke pandu gelombang pertama dengan mekanisme interferometer pada panjang daerah kopling yang bergantung kepada panjang gelombang, panjang daerah kopling, jarak antar pandu gelombang dan lebar pandu gelombang.

Kendala utama dalam proses perpindahan daya pada pandu gelombang tersebut sangat sensitive terhadap panjang daerah kopling. Untuk menghindari kondisi tersebut diperlukan sebuah struktur pemisah agar perpindahan daya pada pandu gelombang tidak bergantung kepada jarak kopling. Salah satu solusi adalah dengan memisahkan pandu gelombang dengan menggunakan celah udara satu sama lainnya agar tidak terjadi perpindahan daya dari pandu

gelombang satu ke pandu gelombang dua. Sehingga daya keluaran dapat dipertahankan pada nilai tertentu dan pemilihan panjang kopling menjadi bebas.

Gambar 1. Menunjukkan struktur pandu gelombang dengan menggunakan celah udara setelah terjadinya kopling dengan karakteristik 3 dB.



Gambar 1. Struktur pandu gelombang terisolasi

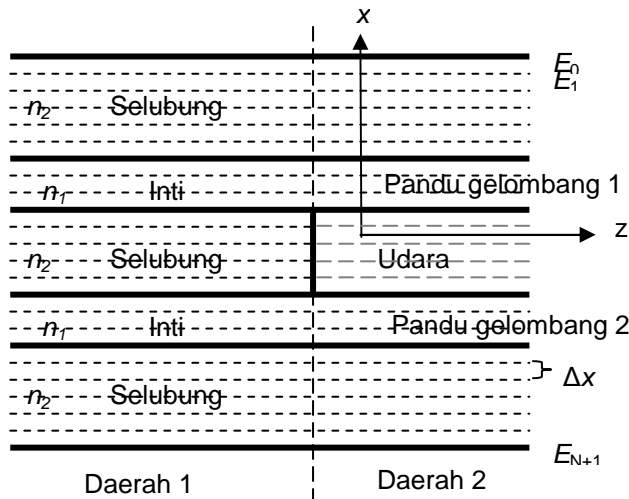
Solusi analitik struktur pada Gambar 1 sangat sulit untuk ditemukan karena kompleksnya persamaan gelombang yang terkopel pada

daerah terisolasi. Oleh karena itu digunakan metode analisa numerik menganalisisnya. Salah satu metode numerik yang cocok digunakan untuk menganalisa pandu gelombang terisolasi adalah *method of lines* [6].

## 2. BAHAN DAN METODE

Analisa pandu gelombang terisolasi dengan *method of lines*, kita bagi daerah perhitungan yang tegak lurus dengan arah propagasi yaitu arah  $x$  menjadi beberapa bagian dengan jarak antar garis  $\Delta x$  [6].

Karena perbedaan struktur pada arah propagasi searah sumbu  $z$ , kita membagi daerah perhitungan menjadi dua daerah. Daerah 1 adalah daerah terkopling dimana pada ujungnya telah terdapat output yang disesuaikan dengan kebutuhan, sementara daerah 2 adalah daerah terisolasi yang akan mempertahankan output pada kopling efisiensi yang telah diperoleh sebelumnya.



Gambar 2. Diskritisasi pandu gelombang terisolasi

Kedua daerah perhitungan itu tidak dapat di selesaikan secara langsung, tetapi harus dicari solusinya pada masing-masing daerah. Moda keluaran pada daerah terkopling merupakan moda masukan di dalam daerah terisolasi, output daerah terisolasi inilah yang merupakan solusi dari pandu gelombang terisolasi.

Untuk mendapat solusi pada masing-masing daerah, pertama kita gunakan persamaan Helmholtz [2] untuk moda TE,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k^2 E_y = 0 \quad (1)$$

Untuk  $\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}$  pada persamaan (1) dapat kita dekadati dengan *central difference* sbb,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{E_{i+1} - 2E_i + E_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (2)$$

Setelah persamaan (2) disubstitusikan ke dalam persamaan (1) akan diperoleh :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \frac{E_{i+1} - 2E_i + E_{i-1}}{\Delta x^2} + k_o^2 n^2(x) E_y = 0 \quad (3)$$

Persamaan (3) dapat kita tulis dalam bentuk vektor,

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_y}{\partial z^2} + \vec{Q}^2 \vec{E} = 0 \quad (4)$$

Dimana  $\vec{E}$  Adalah transpose dari vektor kolom yang berisikan medan  $E(x)$  dititik  $x_1, x_2, \dots, x_n$

Sedangkan matriks  $\vec{Q}^2$  dapat ditulis :

$$\vec{Q}^2 = \frac{1}{\Delta x^2} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & -2 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & -2 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -2 \end{bmatrix} + k_o^2 \begin{bmatrix} n_{x1} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & n_{x2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & n_{xN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$n_{x1}, n_{x2}, \dots, n_{xN}$  merupakan index bias pada pandu gelombang yang tersebar dititik  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Dalam struktur dua pandu gelombang paralel seperti pada gambar 2 terdapat lima daerah pada arah melintang  $x$  yang berbeda indeks biasnya. Kelima perbahan indeks bias itu dimasukkan dalam matriks secara diagonal, banyaknya tergantung pada ukuran dari masing-masing daerah pada arah melintang  $x$  dan jumlah garis yang membaginya.

Jika kita perhatikan terlihat bahwa matriks  $\vec{Q}^2$  berbentuk diagonal namun memiliki tiga

komponen sehingga akan sulit untuk diselesaikan. Oleh karena itu diperlukan transformasi agar matrik tersebut berbentuk satu diagonal. Transformasi tersebut dapat dilakukan dengan hubungan,

$$\vec{\beta} = \vec{T} \vec{Q} \vec{T}^{-1} \quad (6)$$

Dimana  $\vec{\beta}$  adalah hasil diagonalisasi matrik  $\vec{Q}^2$  yang berisi nilai eigen yang tersusun secara diagonal dan  $\vec{T}$  berisi vektor eigen yang tersusun dari matrik  $\vec{Q}^2$ .

Selanjutnya persamaan (4) dapat ditulis kembali menjadi

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \vec{\beta}^2 \vec{E} = 0 \quad (7)$$

Persamaan (7) adalah persamaan gelombang yang merambat dalam arah z, solusi dari persamaan tersebut adalah :

$$\vec{E} = e^{-i\vec{\beta}z} \vec{a} + e^{i\vec{\beta}z} \vec{b} \quad (8)$$

dimana  $\vec{a}, \vec{b}$  adalah amplitudo gelombang.

Persamaan (8) menggambarkan dua buah komponen gelombang yang merambat kearah z dan  $-z$ . Jika dianggap gelombang yang dipantulkan kearah  $-z$  sangat kecil sehingga bisa diabaikan, maka persamaan (23) dapat ditulis kembali menjadi :

$$\vec{E} = e^{-i\vec{\beta}z} \vec{a} \quad (9)$$

Untuk mencari solusi gelombang yang merambat pada arah z dapat digunakan hubungan :

$$\vec{E} = \vec{T} e^{-i\vec{\beta}z} \vec{T}^{-1} \vec{E}_{inp} \quad (10)$$

Daya keluaran pada setiap titik z dapat dihitung dengan menggunakan hubungan :

$$P(z) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(x,0) E(x,z) dx \right|^2 \quad (11)$$

Pada daerah 1, diantara pandu gelombang memiliki indeks bias yang sama dengan selubung, Sedangkan untuk daerah 2, antara kedua inti pandu gelombang diganti dengan udara yang

(12)

dimana  $\vec{E}_{inp}$  adalah input medan yang masuk kedalam daerah 1.

Sedangkan untuk daerah 2 dicari dengan menggunakan syarat batas  $\vec{E}_1 = \vec{E}_2$  dan

$\frac{\partial \vec{E}_1}{\partial z} = \frac{\partial \vec{E}_2}{\partial z}$ . Dengan demikian didapat solusi :

$$\vec{E}_2 = \vec{T}_2 e^{-i\vec{\beta}_2 z} \vec{T}_2^{-1} \vec{E}_1 \quad (13)$$

$\vec{E}_2$  merupakan solusi menyeluruh dari pandu gelombang terisolasi.

## 2.1. Absorbing Boundary Condition

Perhitungan menggunakan *method of lines* mengalami kendala utama berupa terjadinya refleksi di ujung jendela perhitungan yang disebabkan karena adanya efek cermin pada daerah tersebut.

Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sebuah syarat batas yang dapat melebarkan jendela perhitungan sehingga seakan-akan gelombang cahaya tidak melihat batas jendela perhitungan. Salah satu caranya adalah dengan menggunakan syarat batas penyerap gelombang (*absorbing boundary condition (ABC)*).

Metode yang paling umum dilakukan adalah dengan mendefinisikan ABC sebagai faktorasi fungsi gelombang sehingga persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk:

$$LE = (D_z^2 + D_x^2 + k_0^2 n^2) E = 0 \quad (14)$$

where :

$$D_x^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad D_z^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Operator  $L$  kemudian difaktorisasi menjadi  $L^+$  dan  $L^-$  sehingga:

$$LE = L^+ L^- E = 0 \quad (15)$$

Dimana  $L^+$  dan  $L^-$  didefinisikan menjadi :

$$L^\pm = D_x \pm j\sqrt{\epsilon}\sqrt{1+S^2}, \quad S^2 = \frac{D_z^2}{\epsilon} \quad (16)$$

dan :  $\epsilon = k_0^2 n^2$

Jika refleksi gelombang di dua ujung jendela perhitungan akan dihindari, maka hanya gelombang yang keluar saja yang dibolehkan pada titik tersebut. Sehingga dapat dibuktikan bahwa medan menjadi:

$$L^- E = 0 \quad (17)$$

Untuk gelombang searah  $-x$  dan

$$L^+ E = 0 \quad (18)$$

Untuk gelombang searah  $+x$ . ABC kemudian diturunkan dari kedua persamaan ini.

Namun kehadiran radikal pada persamaan (16) menyebabkan solusi langsung persamaan (17) dan (18) menjadi sulit. Untuk itu perlu dilakukan aproksimasi terhadap radikan sehingga dapat digunakan dalam skema numerik. Radikal dapat didekati dengan menggunakan hubungan:

$$\sqrt{1+S^2} \approx p_0 + p_2 S^2 \quad (19)$$

Pilihan terhadap koefisien  $p_0$  dan  $p_2$  bergantung kepada metode interpolasi yang digunakan. Namun nilai  $p_0=1$  dan  $p_2=1/2$  biasanya digunakan dalam perhitungan.

Persamaan (16), (17), (18), dan (19) biasanya digunakan untuk menentukan medan yang tidak diketahui berupa komponen medan  $E_0$  and  $E_{N+1}$  dari medan yang didiskritisasi pada jendela bagian atas dan bagian bawah. Setelah dilakukan sedikit manipulasi aljabar maka medan menjadi:

$$\begin{aligned} E_0 &= -a_u E_1 + b_u E_2 \\ E_{N+1} &= b_l E_{N-1} - a_l E_N \end{aligned} \quad (20)$$

Dimana koefisien  $a_p$  and  $b_p$  diberikan oleh :

$$a_p = \frac{2+n_d^2}{1+jn_d}, \quad b_p = -\frac{1-jn_d}{1+jn_d}$$

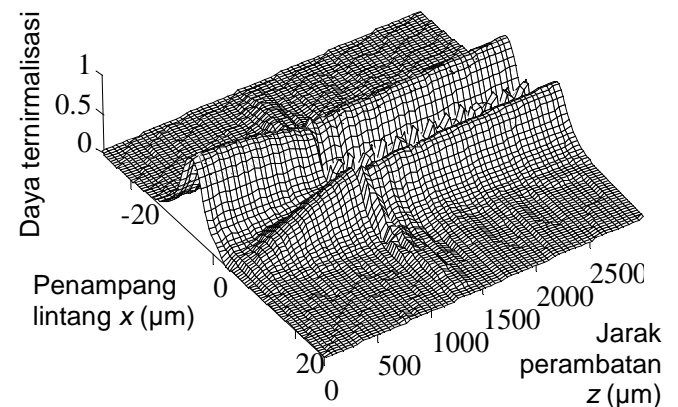
dimana :

$$n_d = \Delta x \epsilon_p^{1/2} \text{ and } p=u,l$$

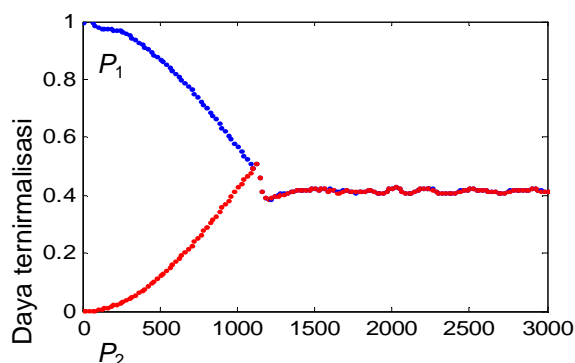
Selanjutnya pemilihan nilai  $p$  sangat bergantung kepada pendekatan numerik yang akan dilaksanakan. Setiap nilai  $p$  akan memberikan hasil yang berbeda. Hasil yang dapat dikatakan benar jika nilai refleksi yang diperoleh adalah nilai yang paling kecil. appendix 1. Menunjukkan beberapa pilihan nilai  $p$  dan  $q$  berdasarkan pendekatan yang berbeda satu dengan lainnya.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 3 menunjukkan perambatan gelombang dalam pandu gelombang paralel terisolasi, sedangkan gambar 4 menunjukkan perubahan daya sepanjang arah rambat. Parameter yang digunakan dalam perhitungan ini adalah lebar inti 5  $\mu\text{m}$ , indeks bias selubung 1.457, indeks bias inti 1.463, panjang gelombang 1.52  $\mu\text{m}$  dan jarak antar pandu gelombang 5  $\mu\text{m}$ .



Gambar 3. Perambatan gelombang pada pandu gelombang paralel terisolasi.



Gambar 4. Perubahan daya sepanjang arah rambat  
Jarak perambatan ( $\mu\text{m}$ )

Dari gambar 3 dan 4 terlihat daya dimasukkan pada pandu gelombang pertama dan mulai berpindah pada pandu gelombang kedua. Terlihat daya menjadi sama besar pada 1100  $\mu\text{m}$ . Untuk membuat direksional kopler 3db yang membagi daya sama besar, perambatan pada daerah terkopling dihentikan pada titik ini. Output pada daerah terkopling tersebut kemudian masuk kedalam daerah isolasi agar outputnya tetap dipertahankan sepanjang arah perambatan. Terlihat pada daerah isolasi tidak ada lagi pertukaran daya antar pandu gelombang.

Walaupun daya dapat dipertahankan, namun terjadi penurunan puncak daya pada daerah terisolasi, seperti ditunjukkan gambar 4, daya yang seharusnya terbagi menjadi 50% tidak mencapai nilai tersebut. Karena tidak ada medan *evanescent* lagi antara dua inti pandu gelombang maka sebagian medan pada inti di daerah tersebut ikut menurun dan berpindah ke bagian selubung terluar. Sebagai akibatnya jumlah daya yang berada dalam inti kedua pandu gelombang tersebut menurun.

#### 4. KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dinalisa pandu gelombang terisolasi dengan menggunakan *method of lines*. Terbukti bahwa pandu gelombang terisolasi dapat digunakan untuk mempertahankan output dari pandu gelombang paralel. Struktur seperti ini dapat dijadikan alternatif dalam mendisain direksional kopler. Namun kelemahannya adalah daya yang coba dipertahankan mengalami kehilangan akibat radiasi pada daerah batas antara pandu gelombang dan udara.

#### DAFTAR PUSTAKA

- A.H. Cherin, "An introduction to optical fiber", McGraw Hill, New York, 1983.
- D. Marcuse, "Bending losses of the asymmetric slab waveguide", Bell Syst. Tech. J. vol. 50, 2551-2563, 1971.
- D.L Lee, "Electromagnetic principles of integrated optics", John Wiley & Sons, New York, 1986.
- H.A Haus, W. Huang, "Coupled mode theory", Proceeding of the IEEE, vol. 79, 1505-1518, 1998.
- J. Saijonmaa, D. Yevick, "Beam-propagation analysis of loss in bent optical waveguides and fibers", J. Opt. Soc. Amer., vol. 73, 1785-1791, 1983.
- J. Yamauchi, S. Kikuchi, T. Hirooka, M. Nakano, "Beam propagation analysis of bent step-index slab waveguide", Elect. Lett., vol. 26, 822-824, 1990.
- Kiusalaas, "Numerical methods in engineering with MATLAB". Cambridge University Press, New York, 2005.
- M. Rivera, "Lowest-order mode transmission in multimode dielectric S-bends", Opt. Quantum Electron., vol. 29, 323-333, 1997.
- R. Syms, J. Cozens, "Optical guided waves and devices", McGraw Hill, London 1992J.
- S.J. Garth, "Mode behaviour on bent planar dielectric waveguides", IEE Proc. Optoelectron., vol. 142, 115-120, 1995.
- T.G. Moore, J.G. Blaschak, A. Taflove, G.A. Kriegsmann, "Theory and application of radiation boundary operators", IEEE Trans. Antenna and Prop., vol. 36, 1797-1812, 1988.
- U. Rogge, R. Pregla, "Method of lines for the analysis of dielectric waveguides", IEEE journal of lightwave technology, vol. LT-11, 2015-2020, 1993