

Ambar

3100098010191

**PERENCANAAN DAN PEMBUATAN
PERANGKAT LUNAK KOMPUTER UNTUK
MENAMPILKAN POLA MODE MEDAN LISTRIK
DAN MEDAN MAGNET SECARA TIGA DIMENSI**

TUGAS AKHIR

Oleh :

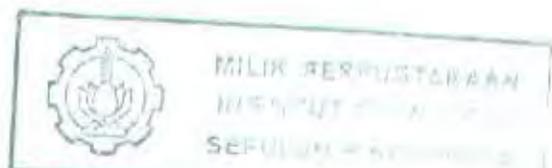
SUMUYUD
NRP. 2291 100 084

RSE
621 384 15
Sum
p-1
1997



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA**

1997



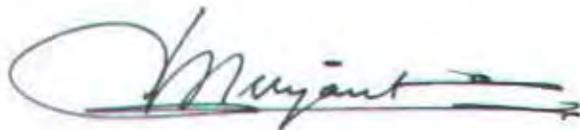
**PERENCANAAN DAN PEMBUATAN
PERANGKAT LUNAK KOMPUTER UNTUK
MENAMPILKAN POLA MODE MEDAN LISTRIK
DAN MEDAN MAGNET SECARA TIGA DIMENSI**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada**

**Bidang Studi Teknik Telekomunikasi
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
S u r a b a y a**

**Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing**



Dr. Ir. AGUS MULYANTO, M.Sc

**S U R A B A Y A
Pebruari, 1997**

ABSTRAK

Pemakaian waveguide sebagai saluran transmisi sangat luas, khususnya pada sistem komunikasi gelombang mikro. Untuk itu diperlukan suatu pemahaman yang lebih mendalam tentang sifat, kelakuan serta pola rambatan gelombang elektromagnetik dalam waveguide. Pemahaman tentang Pola Mode medan listrik (TE) dan medan magnet (TM) memegang peranan penting dalam analisa karakteristik rambatan gelombang dalam bumbung gelombang (waveguide).

Pada tugas akhir ini akan dibuat suatu perangkat lunak bantu guna menampilkan pola-pola medan listrik dan medan magnet dalam waveguide persegi. Pendekatan yang digunakan adalah penggambaran secara tiga dimensi, dan dalam hal ini akan digunakan metode pemetaan koordinat tiga dimensi ke koordinat layar monitor dengan menggunakan prinsip kamera sintetik. Pada tugas akhir ini mode gelombang TM_m atau TE_n yang digambarkan dibatasi untuk harga m dan n maksimal adalah dua.

Dalam analisa ini pertama-tama dibahas penurunan persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide. Penurunan persamaan ini didasarkan pada persamaan Maxwell dan persamaan Helmholtz serta syarat batas pada dinding-dinding waveguide. Dari persamaan medan yang diperoleh untuk mode TE dan TM kemudian dibuat suatu program yang dapat menampilkan pola garis gaya medan E dan medan H secara tiga dimensi dengan menggunakan metode kamera sintetik.

Dari tugas akhir ini dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain : Dengan suatu program komputer yang menggunakan algoritma kamera sintetik, maka dapat ditampilkan pola garis gaya yang terjadi dalam waveguide secara tiga dimensi pada layar monitor. Gambar pola garis gaya dan penampang waveguide dari berbagai sudut pandang dapat diperlihatkan di monitor. Pada penggambaran secara tiga dimensi dapat diperkirakan vektor (kecenderungan arah dan besar komponen-komponen medan) untuk setiap titik di ruang, sehingga dapat diperoleh pemahaman visual yang lebih baik tentang penjalaran gelombang dalam waveguide persegi.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas segala berkat dan kasih karunia-Nya yang telah diberikan, sehingga dapat terselesaikannya Tugas Akhir ini dengan judul :

***PERENCANAAN DAN PEMBUATAN
PERANGKAT LUNAK KOMPUTER UNTUK
MENAMPILKAN POLA MODE MEDAN LISTRIK DAN
MEDAN MAGNET SECARA TIGA DIMENSI***

Tugas Akhir yang berbobot 6 SKS ini, disusun guna memenuhi salah satu persyaratan akademis untuk menyelesaikan studi di Bidang Studi Teknik Telekomunikasi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Dengan menyadari akan keterbatasan yang ada dalam penulisan ini, penyusun berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan serta bahan masukan bagi pembaca.

Pebruari, 1997

Penyusun

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu penyelesaian Tugas Akhir ini :

1. Bapak Dr. Ir. Agus Mulyanto, M.Sc. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu dan memberikan bimbingan serta arahan kepada penulis baik secara langsung maupun tak langsung.
2. Bapak Ir. Moch. Moefadol Asyari, sebagai dosen wali yang telah banyak memberikan nasehat, motivasi serta dorongan selama saya kuliah di Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Ir. M. Aries Pumomo, selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Telekomunikasi - Jurusan Teknik Elektro ITS.
4. Bapak Ir. Teguh Yuwono, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, ITS.
5. Ibu dan kakak yang telah banyak memberikan doa, dorongan, semangat serta motivasi sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
6. Semua rekan yang telah banyak membantu, Iman (makasih dipinjami hardisk-nya), Puguh (atas buku-buku komputer dan software-nya), warga B301 ; Leak.Metal, Kadir, Yayan.jpg, Doni.pcx, A'an serta rekan-rekan lain yang belum disebutkan.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Permasalahan	2
I.3 Pembatasan Masalah	3
I.4 Metodologi	3
I.5 Sistematika Pembahasan	4
I.6 Tujuan	5
I.7 Relevansi	5
BAB II TEORI PENUNJANG	6
II.1 Umum	6
II.2 Persamaan Maxwell	7
II.2.1 Rumusan Persamaan Maxwell	7
II.2.2 Persamaan Konsitutif	10
II.2.3 Persamaan Medan Dalam Bentuk Kompleks	11
II.3 Teori Umum Waveguide Persegi	13
II.3.1 Syarat Batas pada Dinding-Dinding Waveguide Persegi	14
II.4 Dasar-Dasar Perumusan Gelombang dalam Waveguide	17
II.4.1 Mode yang Terjadi pada Waveguide Persegi	18
II.4.1.1 Mode TEM	18
II.4.1.2 Mode TE	18
II.4.1.3 Mode TM	18
II.4.1.4 Mode Hybrid	19
II.4.2 Pembangkitan Mode-Mode pada Waveguide sebagai Resultante dari dua Gelombang TEM	20
II.4.3 Kedudukan Medan Listrik dan Magnet untuk Mode TE dan TM	22
II.5 Komponen Medan Mode TE dan TM	22
II.5.1 Mode TE (Transverse Electric)	23
II.5.2 Mode TM (Transverse Magnetic)	23
II.6 Vektor Poynting Dan Peninjauan Daya	24
II.7 Kamera Sintetik	26
II.7.1 Sistem Koordinat Pandang	27
II.7.2 Menentukan Arah Kamera	30

BAB III ANALISA MODE TE DAN TM PADA WAVEGUIDE PERSEGI

III.1 Umum	33
III.2 Penyelesaian Persamaan Medan Pada Mode TE	34
III.3 Parameter-Parameter Mode TE Pada Waveguide Persegi	44
III.3.1 Konstanta Propagasi (γ_{mn})	44
III.3.1.1 Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mn}$)	45
III.3.1.2 Hubungan Antara Konstanta Propagasi (γ_{mn}) dengan Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mn}$)	46
III.3.2 Panjang Gelombang (λ_{mn})	47
III.3.3 Kecepatan Phase (V_p) dan Kecepatan Grup (V_g)	48
III.3.3.1 Kecepatan Phase (V_p)	48
III.3.3.2 Kecepatan Grup (V_g)	49
III.3.4 Impedansi Karakteristik Gelombang Mode TE ($Z_{o_{TE}}$)	51
III.3.4.1 Frekuensi Operasi $f > f_{c,mn}$	52
III.3.4.2 Frekuensi Operasi $f < f_{c,mn}$	53
III.4 Penyelesaian Persamaan Medan Pada Mode TM	54
III.5 Parameter-Parameter Mode TM Pada Waveguide Persegi	59
III.5.1 Konstanta Propagasi (γ_{mn}), Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mn}$) dan Panjang Gelombang (λ_{mn})	59
III.5.2 Kecepatan Phase (V_p) dan Kecepatan Group (V_g)	60
III.5.3 Impedansi Karakteristik Gelombang Mode TM ($Z_{o_{TM}}$)	61
III.6 Mode Dominan pada Waveguide Persegi	62
III.6.1 Analisa Mode Dominan TE	62
III.6.2 Analisa Mode Dominan TM	63
III.6.3 Mode TE_{10} Sebagai Mode Dominan.	64
III.7 Rugi-Rugi Dinding Waveguide Persegi	68
III.7.1 Rugi-Rugi Dinding Waveguide Persegi Mode TE_{10}	68
III.7.2 Rugi-Rugi pada Dinding Waveguide Mode TE_{mn}	73
III.7.3 Rugi-Rugi pada Dinding Waveguide Mode TM_{mn}	73
III.8 Komponen Medan Dalam Bentuk Waktu (t)	74

BAB IV PERENCANAAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK SERTA REPRESENTASI GRAFIK

IV.1 Umum	88
IV.2 Konsep Kamera Sintetik	89
IV.2.1 Cara Kerja Kamera Sintetik	89
IV.2.2 Proyeksi Balok Koordinat Tiga Dimensi ke Koordinat Dua Dimensi	90
IV.3 Perencanaan Mode TE_{10}	95
IV.3.1 Analisa Persamaan Medan Mode TE_{10}	95
IV.3.2 Pembentukan Kerangka Waveguide pada Sistem Koordinat Cartesian	97
IV.3.3 Pembentukan Citra Medan Mode TE_{10}	98

IV.3.3.1 Pembentukan Citra Medan Listrik	98
IV.3.3.2 Pembentukan Citra Medan Magnetik	100
IV.3.4 Pembentukan Citra Komponen Mode TE_{10}	107
IV.3.4.1 Pembentukan Citra Komponen E_y	107
IV.3.4.2 Pembentukan Citra Komponen H_x	108
IV.3.4.3 Pembentukan Citra Komponen H_z	109
IV.4 Perencanaan Mode TM_{11}	111
IV.4.1 Analisa Persamaan Medan Mode TM_{11}	111
IV.4.2 Pembentukan Citra Medan Mode TM_{11}	112
IV.4.2.1 Pembentukan Citra Medan Listrik	112
IV.4.2.2 Pembentukan Citra Medan Magnetik	114
IV.4.3 Pembentukan Citra Komponen Mode TM_{11}	121
BAB V PENUTUP	123
V.1 Kesimpulan	123
V.2 Saran	124
DAFTAR PUSTAKA	125
LAMPIRAN	126

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Bentuk Fisik Waveguide	14
Gambar 2.2 Lintasan Gauss Pada Perbatasan Konduktor	15
Gambar 2.3 Konfigurasi Dimensi Waveguide	17
Gambar 2.4 Bidang yang Dibentuk Oleh Mode-Mode pada Waveguide	19
Gambar 2.5 Resultante Medan E dan Medan H Dua Gelombang TEM	20
Gambar 2.6 Penempatan Dinding-Dinding Waveguide Mode TE_{10}	21
Gambar 2.7 Kedudukan Komponen Medan TE	23
Gambar 2.8 Kedudukan Komponen Medan TM	24
Gambar 2.9 Unsur-Unsur Kamera Sintetik	27
Gambar 2.10 Sistem Koordinat Pandang	28
Gambar 2.11 Posisi Jendela Dan Mata	30
Gambar 2.12 Menentukan Arah Dan Besar Vektor v	31
Gambar 3.1 Variasi Medan Magnetik Untuk Mode TE_{10} dan TE_{11}	42
Gambar 3.2 Komponen Kecepatan Dari Gelombang TEM	49
Gambar 3.3 Variasi Kecepatan Phase Dan Grup Terhadap Frekuensi	51
Gambar 3.4 Impedansi Karakteristik Terhadap Frekuensi	53
Gambar 3.5 Frekuensi Cut-Off Relatif Berbagai Mode	66
Gambar 3.6 Distribusi Arus Pada Dinding Waveguide Persegi	69
Gambar 3.7 Konfigurasi Dinding-Dinding Waveguide	69
Gambar 3.8 Grafik Redaman Terhadap Frekuensi untuk Mode TE_{10}	72
Gambar 3.9 Grafik Redaman Terhadap Frekuensi Mode TE dan TM	74
Gambar 4.1 Penggambaran Balok Tiga Dimensi Secara Manual	89
Gambar 4.2 Penggambaran Balok Pada Sistem Koordinat Dua Dimensi	94
Gambar 4.3 Variasi Amplitudo Komponen Medan Sebagai Fungsi x	96
Gambar 4.4 Kerangka Waveguide Pada Sistem Koordinat Rectanguler	97
Gambar 4.5 Pola garis Gaya Medan E Untuk Mode TE_{10}	99
Gambar 4.6 Pola garis Gaya Medan H Untuk Mode TE_{10}	101
Gambar 4.7 Pola garis Gaya Mode TE_{10}	103
Gambar 4.8 Komponen Medan E_y	107
Gambar 4.9 Komponen Medan H_x	109
Gambar 4.10 Komponen Medan H_z	110
Gambar 4.11 Pola garis Gaya Medan E Untuk Mode TM_{11}	114
Gambar 4.12 Pola garis Gaya Medan H Untuk Mode TE_{10}	116
Gambar 4.13 Pola garis Gaya Mode TM_{11}	117
Gambar 4.13 Pembentukan Komponen E_y Pada Mode TM_{11}	121

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Frekuensi Cut-Off Relatif Terhadap $f_{c,10}$	64
Tabel 3.2 Persamaan Komponen Medan Untuk Mode TE_{mn} dan TM_{mn}	76
Tabel 3.3 Persamaan Parameter Waveguide Untuk Mode TE_{mn} dan TM_{mn}	81
Tabel 4.1 Hasil Pemetaan Koordinat 3D Ke Koordinat 2D	94

(sekitar 10 kw). Selain itu waveguide juga memiliki kegunaan-kegunaan spesifik sebagai berikut : Ferrite Isolator, Frequency Meter, Variable Attenuator, Rotary Vane Attenuator, Standing Wave Detector, Slide Screw Turner, Termination dan lain-lain.

Mengingat pemakaian waveguide sebagai saluran transmisi yang sangat luas, khususnya pada sistem komunikasi gelombang mikro, untuk itu diperlukan suatu pemahaman yang lebih mendalam tentang sifat dan kelakuan serta pola rambatan gelombang elektromagnetik dalam waveguide. Pemahaman tentang Pola Mode medan listrik (TE) dan medan magnet (TM) memegang peranan penting dalam analisa karakteristik rambatan gelombang dalam bumbung gelombang (waveguide).

Untuk itu akan dibuat suatu perangkat lunak bantu guna menampilkan pola-pola medan listrik dan medan magnet dalam waveguide persegi. Pendekatan yang digunakan adalah penggambaran secara tiga dimensi, dan dalam hal ini akan digunakan metode pemetaan koordinat tiga dimensi ke koordinat layar monitor dengan menggunakan prinsip kamera sintetik.

1.2 Permasalahan

Penggambaran pola rambatan gelombang elektromagnetik dalam waveguide yang sering dijumpai terbatas pada bidang dua dimensi, dimana pada penggambaran ini kurang memberikan informasi yang lengkap tentang pola rambatan gelombang. Maka untuk dapat memberikan informasi atau pemahaman yang lebih mendalam tentang pola rambatan gelombang dalam waveguide

diperlukan suatu program komputer yang dapat menampilkan mode-mode yang terjadi pada waveguide secara tiga dimensi.

Pada Tugas Akhir ini yang menjadi permasalahan adalah bagaimana menganalisa dan membuat suatu program komputer yang dapat menampilkan pola medan elektromagnetik untuk berbagai mode gelombang dalam waveguide pada bidang tiga dimensi.

I.3 Pembatasan Masalah

Mengingat banyak jenis dari waveguide dan mode-mode yang dapat terjadi, maka pada Tugas Akhir ini analisa dan penggambaran pola medan elektromagnetik dengan program komputer dibatasi pada waveguide persegi dan untuk harga m dan n maksimal adalah dua.

Pemilihan waveguide persegi dalam pembahasan ini disebabkan waveguide persegi paling banyak digunakan dan pembahasannya sedikit lebih mudah sebab analisa gelombang dalam waveguide persegi menggunakan sistem koordinat cartesian. Selain itu harga m dan n dipilih maksimal dua karena keterbatasan grafis.

I.4 Metodologi

Pertama-tama akan dianalisa beberapa teori tentang pola perambatan gelombang dalam waveguide dari beberapa literatur. Pembahasan akan dilakukan dengan menurunkan persamaan gelombang yang menjalar dalam waveguide secara

matematis. Dari analisa tersebut diharapkan dapat diperoleh penegertian yang lebih mendalam mengenai masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini.

Selanjutnya dari penurunan teori secara matematis tersebut akan dibuat suatu algoritma untuk diimplementasikan menjadi sebuah program komputer yang dapat menampilkan pola medan listrik dan medan magnet pada waveguide secara tiga dimensi untuk berbagai mode yang terjadi.

1.5 Sistematika Pembahasan

Pembahasan dalam Tugas Akhir ini disusun dalam bab per bab. Secara terinci pembahasannya adalah sebagai berikut :

Bab I merupakan pendahuluan, yang menjelaskan latar belakang masalah, tujuan, pembatasan masalah, metodologi dan sistematika.

Bab II menjelaskan teori penunjang, yang membahas tentang teori-teori yang berhubungan dengan penurunan rumus rambatan gelombang dalam waveguide persegi. Juga akan dibahas mengenai konsep kamera sintetik, yaitu suatu metode pendekatan yang digunakan untuk memetakan koordinat tiga dimensi ke koordinat monitor (dua dimensi) agar diperoleh kesan tiga dimensi.

Bab III dibahas mengenai mode-mode TE dan TM yang terjadi serta parameter-parameter yang terdapat pada mode TE dan TM.

Bab IV membahas mengenai perencanaan pembuatan perangkat lunak. Dalam bab ini dijelaskan secara garis besar struktur program yang akan dibuat dan representasi grafis pola rambatan gelombang dalam waveguide.

Bab V menjelaskan kesimpulan dan penutup dari Tugas Akhir ini, dan sekaligus memuat saran-saran.

I.6 Tujuan

Penurunan rumus perambatan gelombang dalam waveguide dan pembahasan mengenai pola medan elektromagnetik yang terjadi, serta pembuatan perangkat lunak dalam Tugas Akhir ini, bertujuan untuk memberikan pemahaman visual yang lebih jelas agar diperoleh kemudahan dalam belajar memahami sifat, kelakuan serta pola rambatan gelombang dalam waveguide persegi.

I.7. Relevansi

Yang diharapkan dari pembuatan perangkat lunak ini adalah untuk mempelajari sifat rambatan gelombang dalam waveguide ditinjau dari segi pola medan yang terjadi untuk mode TE maupun TM. Jadi dengan ditunjang komputer sebagai perangkat keras akan dapat dianalisa fungsi-fungsi suatu gelombang dengan melihat pola-pola medan yang terjadi untuk tiap-tiap mode.

BAB II

TEORI PENUNJANG

II.1 Umum

Pada bab II ini akan dibahas beberapa teori penunjang yang berkaitan dengan pembuatan perangkat lunak komputer untuk menampilkan pola mode medan listrik dan medan magnet pada waveguide persegi secara tiga dimensi.

Pertama-tama akan dibahas teori Maxwell yang menjadi dasar dari perumusan rambatan gelombang dalam waveguide, kemudian akan ditinjau beberapa hal yang umum tentang waveguide persegi seperti syarat batas pada dinding-dinding waveguide, mode-mode yang terjadi pada waveguide, pembangkitan mode-mode pada waveguide sebagai resultante dari dua gelombang TEM, vektor poynting dan peninjauan daya. Hal-hal tersebut diperlukan untuk mendapatkan gambaran yang jelas tentang rambatan gelombang dalam waveguide.

Untuk memahami metode yang digunakan guna menampilkan gambar tiga dimensi ke layar komputer, juga akan dibahas konsep kamera sintetik yang menjelaskan teknik pemetaan obyek pada sistem koordinat tiga dimensi ke sistem koordinat dua dimensi (layar komputer) sehingga kesan tiga dimensi dari obyek bisa diperoleh.

II.2 Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell merupakan perluasan dari hukum-hukum yang ditentukan dari hasil percobaan dari hukum Faraday, hukum Gauss dan Ampere. Hukum-hukum tersebut dapat dipakai untuk mempelajari teori pokok gelombang dalam hal ini gelombang elektromagnetik. Sebagai hukum dasar dalam teori gelombang dan medan, persamaan Maxwell berlaku untuk semua medan dan untuk semua daerah frekuensi.

Secara umum medan elektromagnetik biasanya dinyatakan dalam enam besaran sebagai berikut :

\vec{E} :	Intensitas medan listrik	(Volt/m)
\vec{H} :	Intensitas medan magnet	(Ampere/m)
\vec{D} :	Kerapatan fluks listrik	(Coloumb/m ²)
\vec{B} :	Kerapatan fluks magnet	(Weber/m ²)
\vec{J} :	Kerapatan arus listrik	(Ampere/m ²)
ρ_v :	Kerapatan muatan ruang listrik	(Coloumb/m ³)

Apabila besaran-besaran diatas merupakan fungsi yang kontinyu dan mempunyai turunan yang kontinyu pula, maka besaran-besaran tersebut memenuhi persamaan Maxwell.

II.2.1 Rumusan Persamaan Maxwell

Untuk berbagai gelombang pada bahan konduktor dimana $J \neq 0$, persamaan maxwell dalam bentuk harga sesaat adalah :

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-1a)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J} \quad (2-1b)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2-1c)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho_v \quad (2-1d)$$

dimana : \bar{E} : medan listrik
 \bar{H} : medan magnet
 ρ_v : kerapatan muatan ruang
 \bar{D} : kerapatan fluks listrik
 \bar{B} : kerapatan fluks magnet

Pengertian fisis dari persamaan diatas adalah sebagai berikut : persamaan (2-1a) menyatakan bahwa jika \bar{B} berubah terhadap waktu pada suatu titik, maka medan Listrik \bar{E} mempunyai kurl pada titik tersebut dan dapat dianggap membentuk loop kecil yang tertutup; persamaan (2-1b) menyatakan bahwa jika \bar{D} berubah terhadap waktu pada suatu titik dan harga kerapatan arus ($\bar{J} \neq 0$), maka medan magnet \bar{H} mempunyai kurl pada titik tersebut dan dapat dianggap membentuk loop kecil yang tertutup; persamaan (2-1c) menyatakan bahwa banyaknya aliran kerapatan fluks magnet yang keluar dari sebuah permukaan tertutup per satuan volume yang menuju nol adalah nol dan persamaan (2-1d) menyatakan bahwa banyaknya aliran kerapatan fluks listrik yang keluar dari sebuah permukaan tertutup per satuan volume yang menuju nol adalah sama dengan kerapatan muatan ruang.

Persamaan (2-1) tersebut menunjukkan bentuk waktu nyata dari persamaan Maxwell, dimana :

$$\bar{E} = \bar{E}(x, y, z, t) \quad (2-2a)$$

$$\bar{H} = \bar{H}(x, y, z, t) \quad (2-2b)$$

$$\bar{D} = \bar{D}(x, y, z, t) \quad (2-2c)$$

$$\bar{B} = \bar{B}(x, y, z, t) \quad (2-2d)$$

Jika fungsi medannya "time-harmonic", yaitu fungsi medan terhadap waktu merupakan fungsi sinusoida atau cosinusoida, maka persamaan Maxwell bentuk phasor dapat diturunkan dari persamaan Maxwell bentuk sesaat. Dengan demikian yang diamati adalah medan beresilasi dengan satu kecepatan sudut atau frekuensi, sedangkan untuk fungsi medan yang lain diuraikan lebih dahulu menjadi komponen-komponen frekuensinya dengan menggunakan transformasi Fourier atau Laplace.

Untuk mendapatkan persamaan Maxwell bentuk phasor, maka medan-medan yang merupakan fungsi posisi dan fungsi waktu harus diubah terlebih dahulu menjadi fungsi posisi saja, sedangkan ketergantungannya terhadap waktu dianggap fungsi dari $e^{j\omega t}$.

Hubungan antara bentuk phasor dan bentuk harga sesaat medan elektromagnetik tersebut adalah :

$$E(x, y, z, t) = \text{Re}[E(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2-3a)$$

$$H(x, y, z, t) = \text{Re}[H(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2-3b)$$

dimana notasi $\text{Re}[]$ menyatakan bagaian real dari E, H . Hubungan diatas berlaku juga untuk besaran-besaran elektromagnetik yang lain yaitu :

$$B(x, y, z, t) = \text{Re}[B(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2-4a)$$

$$D(x, y, z, t) = \text{Re}[D(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2-4b)$$

$$\mathbf{J}(x, y, z, t) = \text{Re}[\mathbf{J}(x, y, z) e^{j\omega t}] \quad (2-4c)$$

Dengan demikian definisi phasor dari besaran elektromagnetik pada persamaan diatas kemudian disubstitusikan pada persamaan (2-1) dan mengeliminasi faktor $e^{j\omega t}$ pada kedua ruas akan didapatkan persamaan Maxwell bentuk phasor, yaitu :

$$\nabla \times \bar{\mathbf{E}} = -j\omega \bar{\mathbf{B}} \quad (2-5a)$$

$$\nabla \times \bar{\mathbf{H}} = j\omega \bar{\mathbf{D}} + \bar{\mathbf{J}} \quad (2-5b)$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} = 0 \quad (2-5c)$$

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} = \rho_v \quad (2-5d)$$

II.2.2 Persamaan Konstitutif

Untuk merepresentasikan medan elektromagnetik perlu adanya persamaan lain sebagai tambahan pada persamaan medan elektromagnetik yang telah diuraikan pada sub bab II.2.1, yaitu persamaan konstitutif. Persamaan konstitutif menyatakan hubungan antara \mathbf{D} , \mathbf{B} dan \mathbf{J} sebagai fungsi dari \mathbf{E} atau \mathbf{H} .

Untuk beberapa material atau dalam keadaan kondisi tertentu persamaan konstitutif mempunyai bentuk yang sederhana. Untuk bahan-bahan yang homogen persamaan konstitutif mempunyai bentuk sebagai berikut :

$$\bar{\mathbf{D}} = \epsilon \cdot \bar{\mathbf{E}} \quad (2-6a)$$

$$\bar{\mathbf{B}} = \mu \cdot \bar{\mathbf{H}} \quad (2-6b)$$

$$\bar{\mathbf{J}} = \sigma \cdot \bar{\mathbf{E}} \quad (2-6c)$$

dimana : ϵ : kapasitivitas atau permitivitas medan (farad/m)

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

μ : induktivitas atau permeabilitas medium (henry/m)

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

ϵ_r : konstanta dielektrik atau permitivitas relatif.

μ_r : induktivitas relatif atau permeabilitas relatif

σ : konduktivitas medium

Untuk medium berupa udara atau ruang hampa, ϵ_r dan μ_r berharga satu, maka:

$$\epsilon = \epsilon_0 \quad (2-7a)$$

$$\mu = \mu_0 \quad (2-7b)$$

11.2.3 Persamaan Medan Dalam Bentuk Kompleks

Untuk suatu gelombang yang merambat pada suatu medium pengaruh waktu t dan arah rambat gelombang yang searah dengan sumbu (z) dinyatakan masing-masing dengan faktor eksponensial $e^{j\omega t \pm \gamma z}$, dimana tanda (-) dan (+) menunjukkan arah rambatan gelombang masing-masing pada arah z positif dan z negatif. Persamaan medan E dan H dapat dinyatakan sebagai fungsi kompleks \mathbb{E} dan \mathbb{H} , yaitu :

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &\text{ menjadi } \mathbb{E}^\pm(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \\ H(x, y, z, t) &\text{ menjadi } \mathbb{H}^\pm(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \end{aligned} \quad (2-8)$$

Dengan menuliskan tanda *superscript* \pm pada simbol \mathbb{E} dan \mathbb{H} menunjukkan gelombang menjalar pada arah z positif dan z negatif. Sehingga diperoleh satu penyelesaian dari bentuk persamaan kompleks medan $\mathbb{E}^\pm(x, y)$ dan medan $\mathbb{H}^\pm(x, y)$ adalah bentuk real-time yaitu :

$$\begin{aligned} E^\pm(x, y, z, t) &= \text{Re}[\mathbb{E}^\pm(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z}] \\ H^\pm(x, y, z, t) &= \text{Re}[\mathbb{H}^\pm(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z}] \end{aligned} \quad (2-9)$$

Dengan menganggap kerapatan arus permukaan nol, maka $\vec{J} = 0$, sehingga persamaan (2-1a) dan (2-1b) menjadi :

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-10)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2-11)$$

Dengan memakai sistem koordinat rectanguler bentuk kompleks¹ $\mathbf{E}^{\pm}(x, y)$ dan bentuk $\mathbf{H}^{\pm}(x, y)$ dapat dijabarkan menjadi :

$$\mathbf{E}^{\pm}(x, y) = E_x^{\pm}(x, y) \bar{a}_x + E_y^{\pm}(x, y) \bar{a}_y + E_z^{\pm}(x, y) \bar{a}_z \quad (2-12a)$$

$$\mathbf{H}^{\pm}(x, y) = H_x^{\pm}(x, y) \bar{a}_x + H_y^{\pm}(x, y) \bar{a}_y + H_z^{\pm}(x, y) \bar{a}_z \quad (2-12b)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-12) ke persamaan (2-10) dan menyatakan $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, dapat ditulis dalam bentuk determinan sebagai berikut :

$$\begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x^{\pm} \cdot e^T & E_y^{\pm} \cdot e^T & E_z^{\pm} \cdot e^T \end{vmatrix} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} [a_x H_x^{\pm} + a_y H_y^{\pm} + a_z H_z^{\pm}] e^T$$

dimana $T = e^{j\omega t - \gamma z}$

Bentuk determinan diatas dapat dijabarkan menjadi beberapa persamaan sebagai berikut :

$$\left[\frac{\partial E_x^{\pm}}{\partial y} - (\pm \gamma) E_y^{\pm} \right] e^{j\omega t \pm \gamma z} = -j\omega \mu H_z^{\pm} e^{j\omega t \pm \gamma z}$$

$$\left[(\pm \gamma) E_x^{\pm} - \frac{\partial E_z^{\pm}}{\partial x} \right] e^{j\omega t \pm \gamma z} = -j\omega \mu H_y^{\pm} e^{j\omega t \pm \gamma z}$$

$$\left[\frac{\partial E_y^{\pm}}{\partial x} - \frac{\partial E_x^{\pm}}{\partial y} \right] e^{j\omega t \pm \gamma z} = -j\omega \mu H_z^{\pm} e^{j\omega t \pm \gamma z}$$

atau

$$\left[\frac{\partial E_x^{\pm}}{\partial y} - (\pm \gamma) E_y^{\pm} \right] = -j\omega \mu H_z^{\pm} \quad (2-13a)$$

$$\left[(\pm \gamma) E_x^{\pm} - \frac{\partial E_z^{\pm}}{\partial x} \right] = -j\omega \mu H_y^{\pm} \quad (2-13b)$$

¹ JOHNK CARL T.A., *Engineering Electromagnetic Fields and Waves*, John Wiley & Sons, hal 411

$$\left[\frac{\partial E_y^{\pm}}{\partial x} - \frac{\partial E_x^{\pm}}{\partial y} \right] = -j\omega\mu H_z^{\pm} \quad (2-13c)$$

Bentuk persamaan (2-13) dapat dituliskan dalam bentuk kurl, menjadi :

$$\nabla' \times E^{\pm} = -j\omega\mu H^{\pm} \quad (2-14)$$

Dengan menerapkan persamaan (2-14) terhadap medan magnetiknya yaitu:

$$\nabla' \times H^{\pm} = j\omega\epsilon E^{\pm}$$

Sehingga akan diperoleh persamaan hasil kurl medan magnetiknya sebagai berikut :

$$\frac{\partial H_z^{\pm}}{\partial y} - (\pm\gamma)H_y^{\pm} = j\omega\epsilon E_x^{\pm} \quad (2-15a)$$

$$(\pm\gamma)H_x^{\pm} - \frac{\partial H_z^{\pm}}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y^{\pm} \quad (2-15b)$$

$$\frac{\partial H_y^{\pm}}{\partial x} - \frac{\partial H_x^{\pm}}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z^{\pm} \quad (2-15c)$$

Operator kurl $\nabla' \times$ pada persamaan (2-14) menyatakan operasi kurl terhadap persamaan medan dalam bentuk kompleks yang akan menghasilkan harga $\pm\gamma$.

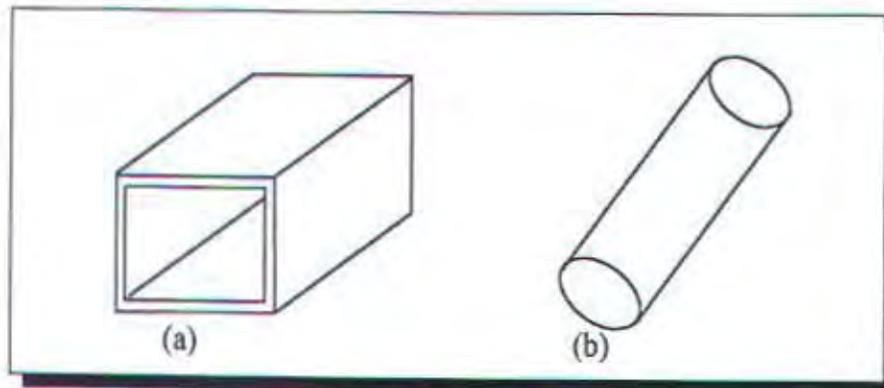
11.3 Teori Umum Waveguide Persegi

Waveguide adalah pemandu gelombang yang merupakan saluran penghantar tunggal yang beroperasi pada frekuensi sekitar 3 GHz - 30 GHz.

Macam-macam bentuk fisik waveguide adalah :

- waveguide persegi
- waveguide silinder

Dari beberapa bentuk fisik waveguide tersebut, pada tugas akhir ini dipilih waveguide persegi dengan pertimbangan seperti dijelaskan pada Bab 1.3.

Gambar 2-1²

Bentuk Fisik Waveguide

a) Persegi b) Silinder

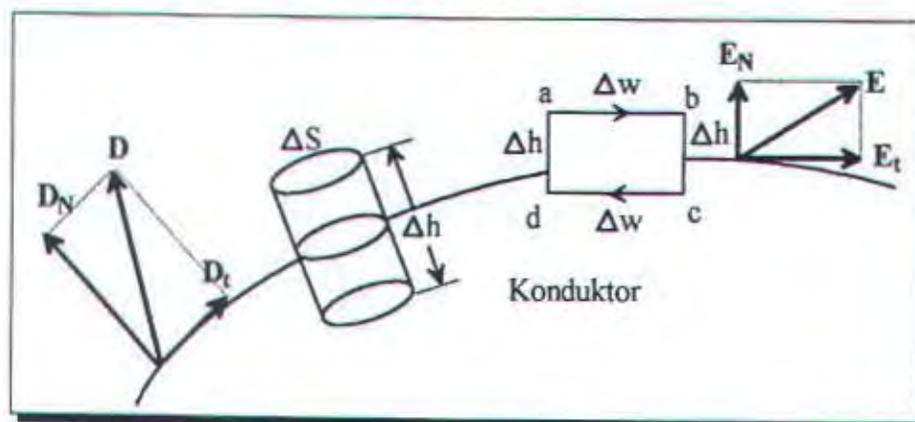
II.3.1 Syarat Batas Pada Dinding-Dinding Waveguide Persegi

Untuk menentukan pola rambatan gelombang elektromagnetik dalam waveguide persegi sebagai dasar digunakan persamaan Maxwell beserta syarat batas pada dinding-dinding penghantar waveguide. Oleh karena permukaan dinding-dinding waveguide adalah suatu penghantar sempurna, maka terlebih dahulu dicari syarat batas untuk medan listrik E pada penghantar sempurna.

Pada penghantar sempurna muatan-muatan elektron cenderung untuk meninggalkan bagaian dalam konduktor dan menuju ke permukaan konduktor. Sehingga yang ada hanyalah kerapatan muatan permukaan konduktor. Oleh karena di dalam konduktor tidak terdapat kerapatan muatan, maka medan listrik dalam konduktor sama dengan nol (E dalam konduktor = 0). Jadi medan listrik yang ada adalah medan listrik pada permukaan konduktor.

² *Ibid, hal 416*

Untuk mencari syarat batas medan listrik tangensial pada permukaan konduktor ditunjukkan pada gambar 2-2 berikut ini :



Gambar 2-2³

Lintasan tertutup Gauss untuk menentukan syarat batas pada perbatasan konduktor-ruang hampa

Medan listrik tangensial dapat ditentukan dengan mengintegrasikan E terhadap dl pada lintasan tertutup sebagai berikut :

$$\Rightarrow \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

$$\Rightarrow \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_b^c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_d^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

Dengan mengingat $E = 0$ di dalam konduktor, kita ambil panjang dari a ke b atau c ke d ialah Δw dan dari b ke c atau d ke a ialah Δh , sehingga didapatkan :

$$E_t \Delta w - E_{N,pada\ b} \frac{1}{2} \Delta h + E_{N,pada\ a} \frac{1}{2} \Delta h = 0$$

Jika Δh menuju nol, dan kita ambil Δw kecil tapi tetap berhingga, hasilnya tidak berbeda apakah medan normal di a sama dengan di b atau berbeda, karena Δh membuat suku ini menjadi kecil sehingga dapat diabaikan. Jadi :

$$E_t \Delta w = 0$$

³ WILLIAM H. HAYT, JR, *The Houw Liong, Ph.D penterj, ELEKTROMAGNETIKA TEKNOLOGI (Penerbit Erlangga 1989), hal 112.*

sehingga menghasilkan

$$E_t = 0$$

Syarat untuk medan normal diperoleh dengan meninjau D_N dan memilih tabung kecil sebagai permukaan Gauss. Jika tingginya Δh dan luas permukaan atas dan bawahnya ΔS . Kita asumsikan Δh menuju nol. Dengan memakai hukum Gauss.

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q$$

Integrasi pada tiga permukaan yang berbeda menghasilkan

$$\int_{atas} + \int_{bawah} + \int_{pinggir} = Q$$

$$\int \mathbf{D}_N \cdot \Delta \mathbf{S} + \int \mathbf{D}_N \cdot \Delta \mathbf{S} + \int \mathbf{D}_t \cdot \Delta \mathbf{h} = Q$$

dan didapati bahwa kedua suku terakhir sama dengan nol. Sebab \mathbf{D}_N dalam konduktor sama dengan nol dan dari $E_t = 0$, mengakibatkan $\mathbf{D}_t = 0$. Sehingga diperoleh :

$$\int \mathbf{D}_N \cdot \Delta \mathbf{S} = Q = \int \rho_s \cdot \Delta \mathbf{S}$$

atau

$$\mathbf{D}_N = \rho_s$$

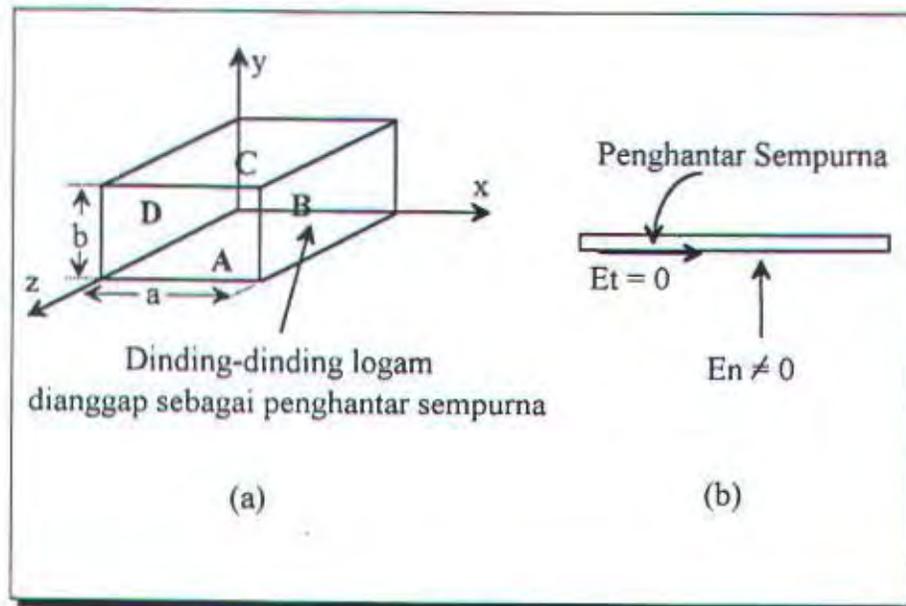
Hasil ini merupakan syarat batas konduktor dalam ruang hampa, sehingga dapat disimpulkan :

$$\mathbf{D}_t = \mathbf{E}_t = 0 \quad (2-16a)$$

$$\mathbf{D}_N = \epsilon_0 \mathbf{E}_N = \rho_s \quad (2-16b)$$

Dari syarat batas untuk konduktor sempurna di atas dapat ditentukan syarat batas untuk dinding-dinding waveguide sebagai berikut. Untuk medan E_x , tangensial pada dinding-dinding A dan C, sehingga pernyataan diatas dapat ditulis dalam bentuk matematis sebagai $E_x(x,0) = 0$ dan $E_x(x,b) = 0$. Untuk medan E_y ,

tangensial pada dinding-dinding B dan D, sehingga dapat ditulis $E_y(0,y) = 0$ dan $E_y(a,y) = 0$. Untuk medan E_x , tangensial pada dinding-dinding A, B, C dan D, sehingga dapat ditulis $E_x(x,0) = 0$, $E_x(x,b) = 0$, $E_x(0,y) = 0$ dan $E_x(a,y) = 0$. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2-3 berikut ini.



Gambar 2-3

(a). Konfigurasi Dimensi Waveguide

(b). Syarat Batas Penghantar Sempurna pada Dinding Waveguide

II.4 Dasar-Dasar Perumusan Gelombang Dalam Waveguide

Karena gelombang yang akan dirambatkan dalam waveguide persegi harus memenuhi syarat batas pada dinding-dindingnya, maka tidak semua mode gelombang pada waveguide persegi dapat dirambatkan.

II.4.1 Mode Pada Waveguide Persegi

II.4.1.1 Mode TEM

Pada mode TEM, medan listrik dan medan magnet saling tegak lurus satu sama lain terhadap arah transverse (melintang) terhadap arah rambatan gelombang. Oleh sebab itu akan ada medan \mathbf{H} yang tegak lurus sumbu waveguide yang berarti akan ada \mathbf{H} yang tegak lurus pula pada dinding-dinding waveguide. Ini berarti bahwa $H_n \neq 0$ padahal syarat batas konduktor sempurna $H_n = 0$, jadi mode TEM tidak mungkin ada.

II.4.1.2 Mode TE

Pada mode TE (Transverse Electric) ini, medan listrik \mathbf{E} seluruhnya akan melintang (transverse) terhadap arah rambatan gelombang, jadi tidak mempunyai komponen E_x ($E_x = 0$). Mode TE ini disebut juga "Mode H" karena sebgaiian dari medan \mathbf{H} terletak pada arah rambatan. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2-4b, yaitu bidang yang dibentuk oleh mode TE pada arah rambat gelombang.

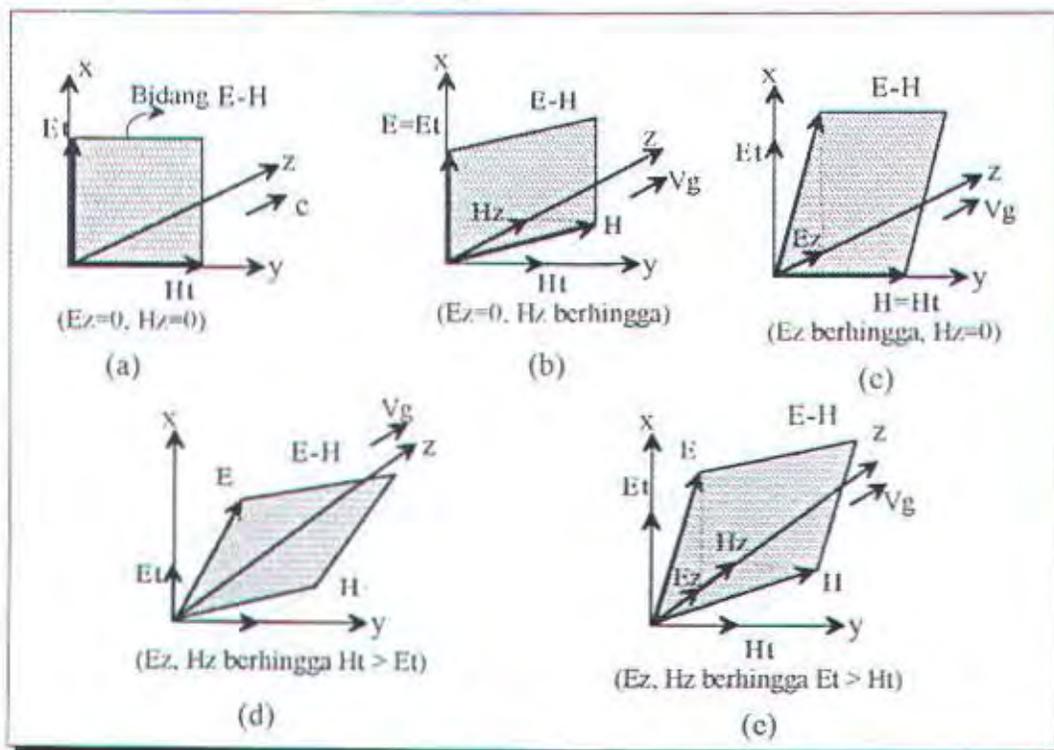
II.4.1.3 Mode TM

Mode dimana medan magnet \mathbf{H} seluruhnya akan melintang (transverse) terhadap arah rambatan gelombang, jadi tidak mempunyai komponen H_x ($H_x = 0$). Mode TM ini disebut juga "Mode E" karena sebgaiian dari medan \mathbf{E} terletak pada arah rambatan. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2-4c, yaitu bidang yang dibentuk oleh mode TM pada arah rambat gelombang.

II.4.1.4 Mode Hybrid

Pada mode ini akan terdapat komponen medan listrik dan medan magnet pada arah rambatannya ($E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$), sehingga baik medan listrik dan medan magnetnya tidak ada yang transverse terhadap arah rambatanya. Mode hybrid ini juga dikenal dengan mode "HE" atau "EH" seperti yang ditunjukkan pada gambar 2-4d dan 2-4e.

Oleh karena penurunan persamaan yang sangat rumit dan mode ini jarang digunakan, maka pada tugas akhir ini tidak akan dilakukan pembahasan mengenai mode hybrid pada waveguide persegi.



Gambar 2-4⁴

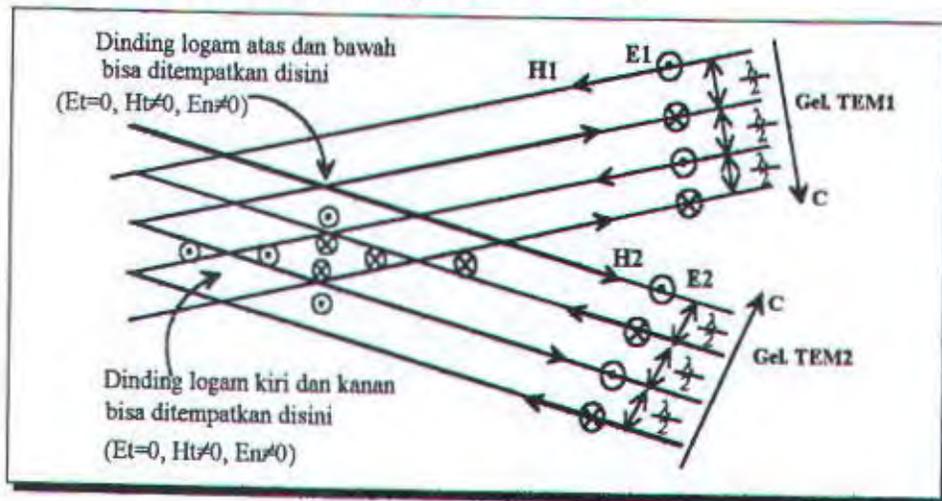
Bidang yang Dibentuk oleh Mode

(a). TEM (b). TE (c). TM (d). HE (e). EH

⁴ DENNIS RODDY, JOHN COOLEN, "Electronic communication"

II.4.2 Pembangkitan Mode-Mode pada Waveguide Sebagai Resultante dari Dua Gelombang TEM

Seperti telah dijelaskan pada subbab II.4.1 bahwa mode yang terjadi pada waveguide adalah mode TE dan TM (bukan mode TEM), dimana mode TE atau TM ini sebenarnya dibentuk sebagai resultante dari dua gelombang TEM. Gelombang TEM ini adalah dua gelombang datar yang merambat pada arah yang berlainan dan saling berpotongan. Sudut atau arah rambatan gelombang-gelombang datar tersebut tergantung pada panjang gelombang dan ukuran sisi lebar (sisi a) dari waveguide, seperti ditunjukkan gambar berikut ini :



Gambar 2-5¹

Medan Listrik dan Medan Magnetik dari Dua Gelombang TEM yang Berpotongan

Dari gambar 2-5 dapat dilihat bahwa pada titik-titik potong dimana medan listrik E saling menguatkan, yaitu pada titik-titik dimana medan keluar bidang (\odot) atau masuk bidang (\otimes), maka medan magnetik H akan diarahkan ke atas dan

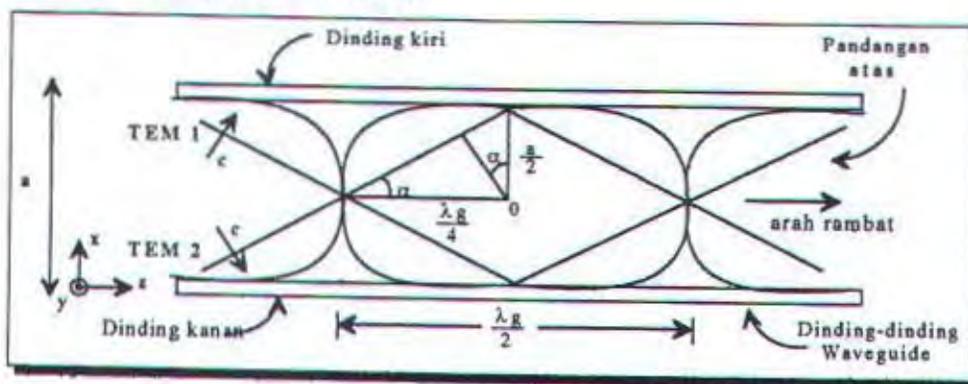
¹ DENNIS RODDY, JOHN COOLEN, Kamal Idris penterj, KOMUNIKASI ELEKTRONIKA (Penerbit Erlangga, 1990), hal 464

ke bawah ($\uparrow \downarrow$). Sedangkan pada titik-titik dimana medan listrik saling meniadakan, medan magnet H akan diarahkan ke kiri dan ke kanan ($\leftarrow \rightarrow$).

Dinding-dinding logam (dinding-dinding waveguide) dapat ditempatkan pada arah kiri-kanan seperti pada gambar 2-5 di atas. Hal ini dapat dilakukan tanpa melanggar syarat batas karena $E_t=0$ dan H tangensial pada dinding-dinding waveguide tersebut tidak sama dengan nol ($H_t \neq 0$).

Untuk dinding-dinding logam bagian atas dan bawah juga dapat ditempatkan pada posisinya karena medan listrik E akan berakhir tegak lurus pada dinding-dinding tersebut ($E_n \neq 0$), sedangkan medan magnet H terletak sejajar dinding-dinding tersebut ($H_t \neq 0$).

Berikut ini akan ditunjukkan penempatan dinding-dinding waveguide agar diperoleh mode TE maupun mode TM dari hasil resultante dua gelombang TEM. Untuk mode TE_{10} arah dari gelang-gelang (loop) medan magnet H adalah bolak-balik, dimana satu loop (satu gelang) menempati jarak setengah panjang gelombang dalam waveguide ($\lambda_g/2$).



Gambar 2-6⁶

Penempatan Dinding-Dinding Waveguide untuk Mode TE_{10}

II.4.3 Kedudukan Medan Listrik dan Magnet untuk Mode TE dan TM

Pada sub bab II.3.2 disebutkan bahwa syarat batas pada dinding-dinding waveguide dimana dinding-dindingnya merupakan penghantar sempurna adalah :

$$E_t = 0 \qquad E_n \neq 0$$

sehingga medan-medan yang mungkin ada pada waveguide persegi adalah :

> Medan magnetik **H** membentuk loop sepanjang arah rambatan yang terletak sejajar dengan dinding atas dan bawah serta tangensial ke dinding-dinding samping. Sedang medan listrik **E** seluruhnya transverse (melintang) terhadap rambatan gelombang. Keadaan ini dikenal sebagai mode TE_{mn} atau mode **H** dimana :

- ♦ m : banyak variasi setengah periode sepanjang sisi a
- ♦ n : banyak variasi setengah periode sepanjang sisi b

> Medan listrik **E** membentuk loop sepanjang arah rambatan yang terletak sejajar dengan sisi depan dan belakang, serta tangensial ke dinding-dinding samping. Sedang medan magnet **H** seluruhnya transverse (melintang) pada arah rambat. Keadaan ini dikenal sebagai mode TM_{mn} atau mode **E**.

II. 5 Komponen Medan Mode TE dan TM

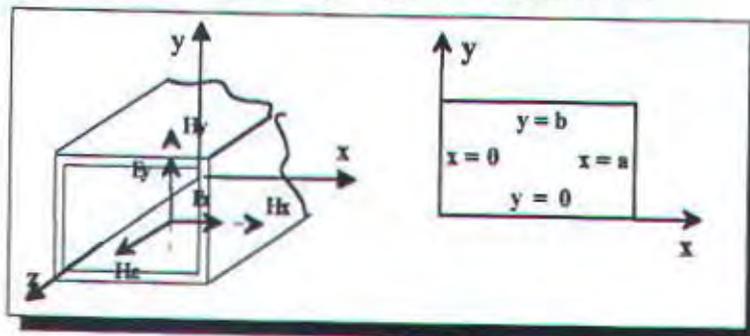
Dari mode gelombang TEM, TE dan TM, pada sub-bab II.4 tentang dasar-dasar rambatan gelombang dalam waveguide, dijelaskan bahwa mode gelombang yang ada pada waveguide persegi adalah mode TE dan TM. Sedang

mode TEM tidak pernah terjadi. Karena itu selanjutnya mengenai mode-mode gelombang dititik beratkan pada mode TE dan TM.

II.5.1 Mode TE (Tranverse Electric)

Pada mode TE diketahui bahwa komponen medan listrik pada arah rambat sama dengan nol ($E_z = 0$). Sehingga pada mode ini mempunyai lima komponen medan, yaitu : E_x , E_y , H_x , H_y dan H_z .

Secara geometris kedudukan dari komponen medan pada waveguide persegi untuk mode TE ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2-7⁷

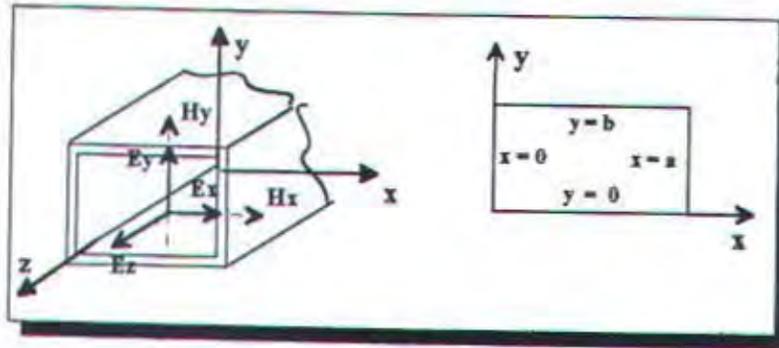
Kedudukan Komponen medan Mode TE pada Waveguide persegi

II.5.2 Mode TM (Transverse Magnetic)

Untuk mode TM, komponen medan magnetik pada arah rambat sama dengan nol ($H_z = 0$), sedang komponen medan listriknya tidak sama dengan nol. Sehingga komponen medan yang ada pada mode ini adalah : E_x , E_y , E_z , H_x dan H_y .

Secara geometris komponen medan pada mode TM pada waveguide persegi ditunjukkan pada gambar 2-8.

⁷ JOHNK CARL T.A, *op. cit*, hal 418

Gambar 2-8⁴

Kedudukan Komponen medan Mode TM pada Waveguide persegi

II.6 Vektor Poynting dan Peninjauan Daya

Untuk mendapatkan daya, kita perlu mengembangkan teorema daya untuk medan elektromagnetik yang lebih dikenal dengan teorema Poynting.

Untuk menganalisisnya dimulai dengan persamaan Maxwell :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-17)$$

dan kedua ruas dari persamaan (2-17) dikalikan dengan \vec{E} , sehingga diperoleh :

$$\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-18)$$

Dengan memakai identitas vektor dapat ditulis sebagai :

$$\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = -\vec{E} \cdot (\nabla \times \vec{H}) + \vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) \quad (2-19)$$

Persamaan (2-18) dan (2-19) dikombinasikan sehingga dapat diperoleh suatu persamaan, yaitu :

$$\vec{H} \cdot (\nabla \times \vec{E}) - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-20)$$

dengan mengganti $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, persamaan (2-20) menjadi :

$$-\vec{H} \cdot \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) = \vec{J} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2-21)$$

⁴ JOHNK CARL T.A, *op. cit*, hal 429

atau

$$-\nabla \cdot (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) = \bar{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{E}} + \epsilon \bar{\mathbf{E}} \cdot \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} + \mu \bar{\mathbf{H}} \cdot \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (2-22)$$

Karena $\epsilon \bar{\mathbf{E}} \cdot \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\epsilon \bar{\mathbf{E}}^2}{2} \right]$ dan $\mu \bar{\mathbf{H}} \cdot \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\mu \bar{\mathbf{H}}^2}{2} \right]$ maka persamaan (2-22) dapat

ditulis sebagai :

$$-\nabla \cdot (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) = \bar{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{E}} + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\epsilon \bar{\mathbf{E}}^2}{2} + \frac{\mu \bar{\mathbf{H}}^2}{2} \right] \quad (2-23)$$

Dengan mengintegrasikan keseluruhan volume maka diperoleh identitas :

$$-\int_v \nabla \cdot (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) dv = \int_v \bar{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{E}} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\epsilon \bar{\mathbf{E}}^2}{2} + \frac{\mu \bar{\mathbf{H}}^2}{2} \right) dv$$

Dengan memakai teorema divergensi maka identitas diatas dapat ditulis sebagai :

$$\oint_s (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) \cdot d\bar{\mathbf{s}} = \int_v \bar{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{E}} dv + \frac{\partial}{\partial t} \int \left(\frac{\epsilon \bar{\mathbf{E}}^2}{2} + \frac{\mu \bar{\mathbf{H}}^2}{2} \right) dv \quad (2-24)$$

Suku pertama pada ruas kanan dari persamaan (2-24) merupakan daya ohmik total yang didisipasikan dalam volume tersebut. Dan integral pada suku kedua dalam ruas kanan merupakan energi total yang tersimpan dalam medan listrik dan medan magnet. Jumlah dari kedua suku pada ruas kanan merupakan daya total yang mengalir masuk ke dalam volume tersebut. Sedang ruas kiri merupakan daya total yang mengalir ke luar dari volume tersebut, yaitu :

$$\oint_s (\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}) \cdot d\bar{\mathbf{s}} \quad (2-25)$$

Perkalian silang $\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}$ dikenal sebagai vektor Poynting \mathbf{P} , sehingga dapat ditulis rumus sebagai berikut :

$$\mathbf{P} = \bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}} \quad (2-26)$$

II.7 Kamera Sintetik

Pada subbab sebelumnya telah kita membahas persamaan matematis teori penunjang gelombang elektromagnetik yang meambat dalam waveguide persegi.

Pada subbab ini kita akan membahas metode yang digunakan untuk menampilkan obyek tiga dimensi ke tampilan layar monitor (dua dimensi), yaitu konsep kamera sintetik.

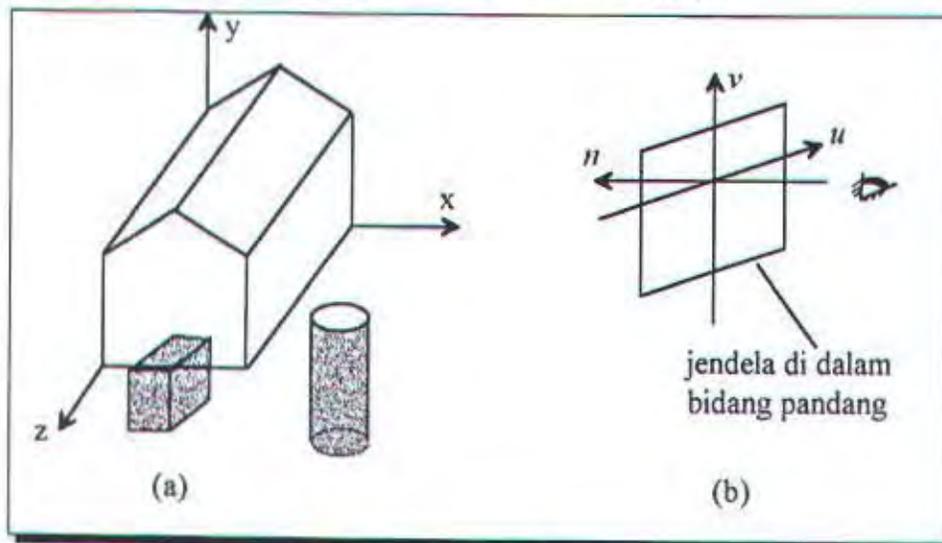
Penampilan obyek 3D layar komputer bisa dikatakan merupakan pemetaan fungsi dengan tiga parameter menjadi fungsi dengan dua parameter. Untuk memperoleh fungsi yang bisa menampilkan obyek 3D pada layar secara bebas, cara yang lebih tepat dan luwes adalah dengan menggunakan pendekatan kamera sintetik (*syntetic camera*).

Kamera sintetik adalah suatu cara untuk menempatkan kamera dan mengorientasikannya pada ruang 3D. Cara pandang dengan menggunakan sistem kamera sintetik mempunyai tiga komponen utama, yaitu bidang pandang dimana jendela ditempatkan, sistem koordinat yang disebut sistem koordinat pandang, dan mata di dalam sistem tersebut. Gambar 2-9 menunjukkan sistem kamera sintetik di dalam koordinat dunia.

Dengan cara ini, mata akan melihat sebaaian obyek yang ada lewat jendela di dalam bidang pandang, dan bagaian obyek inilah yang nantinya akan digambar pada layar.

II.7.1 Sistem Koordinat Pandang

Sistem koordinat pandang disebut sebagai sistem koordinat uvn , sesuai dengan nama-nama sumbu koordinat yang menjadi komponen pada sumbu ini. Bidang pandang berimpit dengan bidang uv . Jika kita menganggap bahwa mata terletak pada sumbu n , hal ini mirip dengan sistem koordinat cartesian dimana mata terletak pada sumbu z , dan bidang pandang adalah bidang xy .



Gambar 2-9⁹

(a) Gambar pada dunia nyata

(b) Unsur-unsur kamera sintetis yaitu sistem koordianat pandang, bidang pandang dan mata di dalam sistem tersebut.

Untuk bisa diprogram menggunakan komputer, perlu diketahui aspek matematis dari kamera sintetis. Aspek-aspek yang harus dinyatakan secara matematis adalah sistem koordinat pandang, posisi dan orientasi bidang pandang, batas-batas jendela, dan posisi mata pengamat. Gambar 2-10 menunjukkan

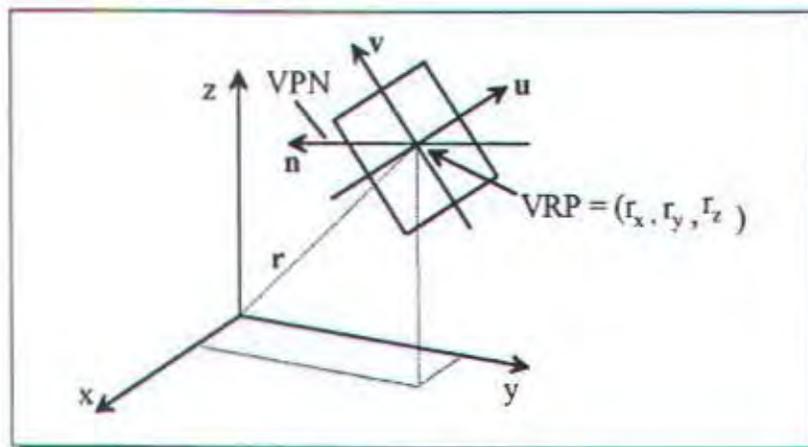
⁹ Ir. P. Insap Santosa, M. Sc, *GRAFIKA KOMPUTER dan ANTARMUKA GRAFIS* (Andi Offset Yogyakarta, 1994), hal 271

hubungan antara sistem koordinat pandang, yaitu sistem koordinat uvn , dengan sistem koordinat Cartesian, yaitu sistem koordinat xyz .

Dari Gambar 2-10, bidang uvn adalah bidang pandang. Pada bidang pandang ini ditentukan sebuah titik yang disebut sebagai titik acuan pandang (*view reference point*, VRP), dan dianggap sebagai titik pusat dari sistem koordinat pandang. Dalam sistem koordinat dunia, posisi VRP terletak pada koordinat (r_x, r_y, r_z) .

Arah normal dari bidang pandang disebut sebagai normal bidang pandang (*viewplane normal*, VPN), dan dinyatakan sebagai vektor satuan, \mathbf{n} . Dalam sistem koordinat dunia, komponen vektor \mathbf{n} dinyatakan sebagai (n_x, n_y, n_z) . Dengan adanya sumbu ke arah \mathbf{n} inilah sistem koordinat uvn terbentuk.

Vektor \mathbf{n} mempunyai arah tegak lurus terhadap bidang uv . Sehingga, karena sumbu u tegak lurus sumbu v , maka jelaslah bahwa arah vektor \mathbf{n} adalah tegak lurus terhadap kedua sumbu ini.



Gambar 2-10¹⁰

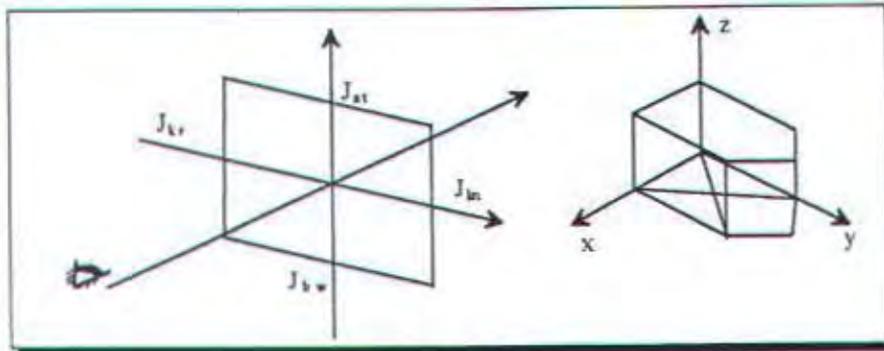
Sistem koordinat pandang

¹⁰ Ibid, hal 272

Untuk keperluan pemrograman, arah sumbu v selalu dinyatakan sebagai arah "ke atas", dan dinyatakan dengan vektor satuan v . Sehingga, jika vektor n dan v diketahui, dengan mudah bisa dihitung komponen vektor u . Karena arah vektor u adalah tegak lurus pada vektor n dan v , maka vektor u bisa dihitung dengan menggunakan *cross product* dari n dan v , yaitu $u = n \times v$.

Setelah sistem koordinat pandang lengkap dengan berbagai komponennya, kita harus menentukan batas jendela dan posisi mata yang harus ditentukan dalam sistem koordinat pandang, bukan sistem koordinat dunia atau Cartesian. Gambar 2-11 menyajikan contoh batas jendela dan posisi mata yang digunakan untuk melihat pada obyek yang dimaksud. Jendela terletak pada sistem koordinat bidang pandang, dan batas-batasnya dinyatakan sebagai $(J_{lv}, J_{lv}, J_{lv}, J_{lv})$. Dari batas-batas jendela di atas terlihat bahwa pada arah mendatar, jendela mempunyai batas dari $u = J_{lv}$ sampai $u = J_{lv}$; pada arah tegak jendela mempunyai batas dari $v = J_{lv}$ sampai $v = J_{lv}$.

Posisi mata, yaitu $m = (m_u, m_v, m_n)$ dapat diletakkan di sembarang tempat pada sistem koordinat pandang. Posisi mata yang paling sering dipakai adalah dengan menempatkannya pada sumbu n sejauh M dari VRP, yaitu pada posisi $m = (0, 0, M)$. Dengan mengubah posisi mata, bentuk pandangan *oblique* bisa diperoleh.



Gambar 2-11

Posisi jendela dan mata

II.7.2 Menentukan Arah Kamera

Seperti sudah dijelaskan di atas, untuk menentukan posisi dan orientasi kamera diperlukan tiga komponen, yaitu :

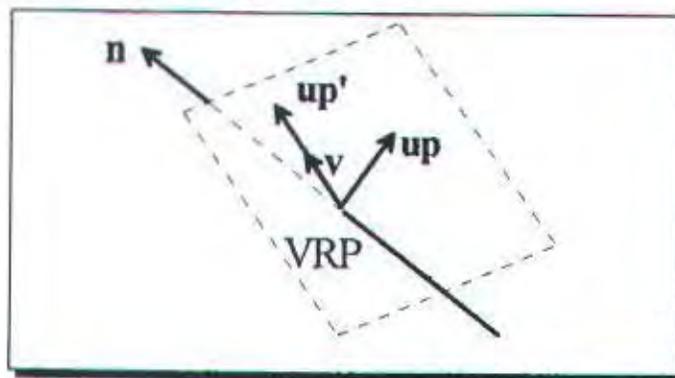
- VRP, yaitu $r = (r_x, r_y, r_z)$
- VPN, yaitu $n = (n_x, n_y, n_z)$
- Vektor dengan arah "ke atas", yaitu vektor v .

Vektor r bisa ditentukan secara bebas dan interaktif, dan biasanya dipilih pada posisi yang dekat dengan titik tengah dari obyek yang akan dilihat. Selanjutnya, perlu ditentukan vektor n . Penentuan vektor n tidak perlu harus memikirkan apakah vektor tersebut ternormalisir atau tidak. Kita bisa memasukkan sembarang vektor, misalnya $n1$, dan kemudian komputer diminta untuk menghitung normalnya dengan menggunakan persamaan :

$$n = \frac{n1}{|n1|} \quad (2-27)$$

dengan $|n1|$ menyatakan magnitudo dari vektor $n1$

Sebagai contoh, dengan menentukan $\mathbf{n1} = -\mathbf{r}$, maka $\mathbf{n1}$ adalah vektor yang arahnya menuju ke titik pusat sistem koordinat dunia. Jika dipilih $\mathbf{n1} = (0, 1, 0)$, maka $\mathbf{n1}$ adalah vektor yang mempunyai arah sejajar dengan arah positif sumbu y. Pilihan lain adalah dengan menggunakan bantuan sembarang vektor, misalnya vektor $\mathbf{n2}$, sedemikian rupa sehingga $\mathbf{n1} = \mathbf{n2} - \mathbf{r}$.



Gambar 2-12

Menentukan arah dan besar vektor \mathbf{v} .

Setelah \mathbf{r} dan \mathbf{n} ditentukan, masih ada satu persoalan lain, yaitu menentukan \mathbf{v} . Cara yang efektif untuk menentukan \mathbf{v} adalah dengan menggunakan bantuan sembarang vektor, misalnya \mathbf{up} , dan kemudian memproyeksikannya ke bidang pandang pada arah vektor \mathbf{n} , dan diperoleh vektor \mathbf{up}' . Gambar 2-12 mengilustrasikan hal ini. Vektor \mathbf{up}' bisa ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\mathbf{up}' = \mathbf{up} - (\mathbf{up} \cdot \mathbf{n}) \quad (2-28)$$

dengan $\mathbf{up} \cdot \mathbf{n}$ menyatakan *dot product* dari dua buah vektor. Sehingga, vektor \mathbf{v} bisa dihitung menggunakan persamaan :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{up}'}{|\mathbf{up}|} \quad (2-29)$$

Persamaan di atas memberikan satu gambaran, bahwa kita bisa memasukkan sembarang nilai untuk vektor \mathbf{u} , dan dengan persamaan di atas akan bisa dihitung arah vektor \mathbf{v} , yang berarti juga sumbu v , pada arah yang paling mendekati benar.

Setelah vektor \mathbf{n} , dan \mathbf{v} diperoleh, komponen terakhir dari sistem koordinat pandang uvm , yaitu vektor \mathbf{u} , bisa diperoleh dengan melakukan *cross product* dari vektor \mathbf{n} dan \mathbf{v} , yaitu :

$$\mathbf{u} = \mathbf{n} \times \mathbf{v} \quad (2-30)$$

Setelah semua aspek yang berhubungan dengan konsep kamera sintetik telah kita bahas secara matematis, sekarang kita telah siap untuk mewujudkannya menjadi sebuah program komputer. Berikutnya pada bab III akan dibahas penurunan persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide serta rumusan parameter-parameter dalam waveguide persegi.

BAB III

ANALISA MODE TE DAN TM PADA WAVEGUIDE PERSEGI

III.1 Umum

Dalam bab ini akan dibahas penurunan persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide dan parameter-parameter yang ada dalam waveguide baik untuk mode TE maupun mode TM. Disamping itu juga dibahas mengenai konsep rugi-rugi yang terjadi pada dinding waveguide.

Dengan menurunkan persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide ini diharapkan dapat lebih memahami konsep pola rambatan medan listrik dan medan magnetik dan mode-mode yang terjadi dalam waveguide. Konsep rugi-rugi pada dinding waveguide digunakan untuk menentukan besarnya konstanta redaman (α), yang nantinya dipakai sebagai pertimbangan dalam menentukan dimensi waveguide yang dipakai.

Sebelum menganalisa lebih jauh mengenai komponen-komponen medan ini, diperlukan beberapa asumsi yang berkaitan dengan sifat gelombang elektromagnetik dalam waveguide untuk mode gelombang tertentu, dan bentuk fisik dari waveguide yang dipakai.

Untuk mode gelombang TE dan TM, asumsi-asumsi yang dimaksud adalah sebagai berikut :

1. Lubang pipa waveguide persegi sangat panjang dimana dimensi penampang masing-masing a untuk sisi panjang dan b untuk sisi pendek.
2. Dielektriknya merupakan losless dengan parameter μ dan ϵ , dan $\rho_v = 0$, $J=0$.
3. Dinding-dinding waveguide merupakan penghantar sempurna.
4. Semua medan elektromagnetik merupakan variasi dari faktor $e^{j\omega t \pm \gamma_{mn} z}$
5. Gelombang merambat pada arah sumbu z positif ($+z$)
6. Untuk mode TE komponen medan listrik pada sumbu z adalah $E_z = 0$.
7. Untuk mode TM komponen medan magnet pada sumbu z adalah $H_z = 0$.

III.2 Penyelesaian Persamaan Medan Pada Mode TE

Komponen medan pada mode TE pada waveguide persegi pada arah yang sesuai dengan arah rambatan gelombang (sumbu z) adalah $H_z \neq 0$ dan $E_z = 0$. Ini berarti bahwa tidak ada komponen medan listrik dalam arah propagasi, tetapi ada pada arah komponen sumbu x dan sumbu y , yaitu E_x , E_y , H_x , H_y dan H_z .

Untuk menganalisa komponen-komponen pada waveguide persegi, dapat dilakukan pendekatan dengan menganalisa komponen medan untuk arah propagasi, dalam kasus ini diambil komponen medan magnetik H_z .

Persamaan gelombang yang berkaitan dengan komponen medan pada arah rambat (sumbu z) pada mode TE dinyatakan dalam komponen medan magnetik H_z . Persamaan gelombang yang dimaksud diatas adalah persamaan gelombang Helmholtz. Persamaan Helmholtz ini dapat diturunkan dari persamaan Maxwell.

Jika kita tuliskan kembali persamaan Maxwell dalam bentuk phasor dengan mengasumsikan kerapatan muatan ruang listrik sama dengan nol ($\rho_v = 0$), dan menyatakan $\bar{J} = \sigma \cdot \bar{E}$, $\bar{B} = \mu \cdot \bar{H}$ dan $\bar{D} = \epsilon \cdot \bar{E}$ maka persamaan (2-5) menjadi :

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H} \quad (3-1a)$$

$$\nabla \times \bar{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} \quad (3-1b)$$

$$\nabla \cdot \bar{H} = 0 \quad (3-1c)$$

$$\nabla \cdot \bar{E} = 0 \quad (3-1d)$$

Dengan menerapkan operasi kurl pada persamaan (3-1b) diperoleh :

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = (\sigma + j\omega\epsilon)(\nabla \times \bar{E})$$

dan mengganti harga $\nabla \times \bar{E}$ dengan persamaan (3-1a), maka persamaan diatas menjadi :

$$\nabla \times (\nabla \times \bar{H}) = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)\bar{H}$$

Dengan menerapkan identitas vektor pada ruas kiri persamaan diatas dan menyatakan $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$, maka didapatkan :

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} = -\gamma^2 \bar{H}$$

Dari persamaan (3-1c) diperoleh $\nabla \cdot \bar{H} = 0$, sehingga :

$$\nabla^2 \bar{H} - \gamma^2 \bar{H} = 0 \quad (3-2a)$$

Ini adalah persamaan Helmholtz untuk daerah yang bebas sumber.

Untuk gelombang yang merambat pada sumbu z dalam waveguide, maka persamaan medan H_z yang bersesuaian dengan persamaan Helmholtz adalah :

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + k_c^2 H_z = 0 \quad (3-2b)$$

dimana : k_c = Bilangan gelombang cut-off

Setelah kita dapatkan persamaan medan H_z yang bersesuaian dengan persamaan Helmholtz untuk gelombang yang merambat pada sumbu z, langkah

selanjutnya adalah menentukan persamaan medan lain yaitu E_x , E_y , H_x dan H_y , dimana masing-masing dinyatakan dalam H_z .

Dengan mengasumsikan gelombang merambat pada arah sumbu z positif dan mensubstitusikan $E_z = 0$ ke persamaan (2-13a), (2-13b), (2-13c), (2-15a), (2-15b) dan (2-15c), maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\gamma_{nm} E_y = j\omega\mu H_x \quad (3-3a)$$

$$\gamma_{nm} E_x = -j\omega\mu H_y \quad (3-3b)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (3-3c)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma_{nm} H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (3-3d)$$

$$\gamma_{nm} H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y \quad (3-3e)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = 0 \quad (3-3f)$$

- Menyatakan persamaan medan E_x sebagai fungsi H_x sebagai berikut :

Dari persamaan (3-3b) dapat diperoleh :

$$H_y = -\frac{\gamma_{nm}}{j\omega\mu} E_x$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-3d) diperoleh :

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{\gamma_{nm}^2 E_x}{j\omega\mu} = j\omega\epsilon E_x$$

$$E_x \left(j\omega\epsilon - \frac{\gamma_{nm}^2}{j\omega\mu} \right) = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x (-\omega^2 \mu \epsilon - \gamma_{nm}^2) = j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$E_x (\omega^2 \mu \epsilon + \gamma_{nm}^2) = -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

Dengan mendefinisikan bilangan gelombang cut-off (k_c) sebagai berikut :

$$k_c^2 = \gamma_{nm}^2 + \omega^2 \mu \epsilon \quad (3-4)$$

Maka diperoleh persamaan medan E_x yang dinyatakan dalam H_z sebagai berikut :

$$E_x = \frac{-j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3-5a)$$

- Menyatakan persamaan medan E_y sebagai fungsi H_z sebagai berikut :

Dari persamaan (3-3a) dapat diperoleh :

$$H_x = \frac{\gamma_{nm}}{j\omega\mu} E_y$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-3e) diperoleh :

$$\begin{aligned} \frac{\gamma_{nm}^2}{j\omega\mu} E_y - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j\omega\epsilon E_y \\ E_y \left(\frac{\gamma_{nm}^2}{j\omega\mu} - j\omega\epsilon \right) &= \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ E_y (\gamma_{nm}^2 + \omega^2 \mu\epsilon) &= j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ E_y &= \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (3-5b)$$

- Menyatakan persamaan medan H_x sebagai fungsi H_z sebagai berikut :

Dari persamaan (3-3a) dapat diperoleh :

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{\gamma_{nm}} H_x$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-3e) diperoleh :

$$\begin{aligned} \gamma_{nm} H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= \frac{-\omega^2 \mu\epsilon}{\gamma_{nm}} H_x \\ H_x \left(\gamma_{nm} + \frac{\omega^2 \mu\epsilon}{\gamma_{nm}} \right) &= \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ H_x (\gamma_{nm}^2 + \omega^2 \mu\epsilon) &= \gamma_{nm} \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ H_x &= \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (3-5c)$$

- Menyatakan persamaan medan H_x sebagai fungsi H_y sebagai berikut :

Dari persamaan (3-3b) dapat diperoleh :

$$E_x = \frac{-j\omega\mu}{\gamma_{nm}} H_y$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-3d) diperoleh :

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \gamma_{nm} H_y = \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{\gamma_{nm}} H_y$$

$$H_y \left(\gamma_{nm} + \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{\gamma_{nm}} \right) = \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$H_y (\gamma_{nm}^2 + \omega^2 \mu \epsilon) = \gamma_{nm} \frac{\partial H_z}{\partial y}$$

$$H_y = \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (3-5d)$$

Setelah E_x , E_y , H_x dan H_y yang masing-masing dinyatakan dalam H_z , sekarang kita selesaikan persamaan (3-2b) untuk mencari H_z . Untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial pada persamaan (3-2b), dipakai metoda pemisahan variabel.

Karena medan listrik H_z hanya merupakan fungsi dari variabel x dan y , maka penyelesaian dari persamaan diatas dapat diasumsikan sebagai :

$$H_z(x, y) = X(x) \cdot Y(y) \quad (3-6)$$

dimana :

- $X(x)$ adalah X fungsi x dalam bentuk kompleks.
- $Y(y)$ adalah Y fungsi y dalam bentuk kompleks.

Dengan mensubstitusikan persamaan (3-6) ke persamaan (3-2b) akan diperoleh :

$$\frac{\partial^2 [X(x) \cdot Y(y)]}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 [X(x) \cdot Y(y)]}{\partial y^2} + k_c^2 [X(x) \cdot Y(y)] = 0$$

dapat ditulis sebagai :

$$X'' Y + X Y'' + k_c^2 X Y = 0$$

atau

$$X'' Y + XY'' = -k_c^2 XY \quad (3-7)$$

Dengan membagi kedua ruas persamaan (3-7) oleh XY , maka diperoleh :

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = -k_c^2 \quad (3-8)$$

Karena X merupakan fungsi yang hanya tergantung pada x dan Y hanya tergantung y , maka masing-masing ruas dari persamaan (3-8) merupakan fungsi konstan untuk harga x dan y . Sehingga persamaan diatas dapat ditulis sebagai dua persamaan yang terpisah yaitu :

$$\frac{X''}{X} = -k_x^2 \quad \text{dan} \quad \frac{Y''}{Y} = -k_y^2 \quad (3-9a)$$

dimana k_x dan k_y masing-masing merupakan konstanta.

Dari persamaan (3-8) dan (3-9a) maka hubungan antara k_x dan k_y terhadap k_c dirumuskan sebagai :

$$k_c^2 = k_x^2 + k_y^2 \quad (3-9b)$$

Persamaan (3-9a) dapat juga ditulis dalam bentuk persamaan deferensial, yaitu :

$$\frac{d^2X}{dx^2} + k_x^2 X = 0 \quad \text{dan} \quad \frac{d^2Y}{dy^2} + k_y^2 Y = 0 \quad (3-9c)$$

Dari persamaan (3-9c), akan didapatkan penyelesaian umum, yaitu :

$$X(x) = C_1 \cos k_x \cdot x + C_2 \sin k_x \cdot x \quad (3-10a)$$

$$Y(y) = C_3 \cos k_y \cdot y + C_4 \sin k_y \cdot y \quad (3-10b)$$

dimana C_1 , C_2 , C_3 dan C_4 masing-masing adalah konstanta.

Berdasarkan asumsi dengan metoda pemisahan variabel seperti pada persamaan (3-6), maka penyelesaian persamaan gelombang medan listrik pada arah propagasi akan diperoleh :

$$H_z = [C_1 \cos k_x \cdot x + C_2 \sin k_x \cdot x] [C_3 \cos k_y \cdot y + C_4 \sin k_y \cdot y] \quad (3-11)$$

untuk mendapatkan penyelesaian khusus dari persamaan (3-11) diperlukan syarat batas yang berkaitan dengan komponen medan magnetik pada dinding-dinding waveguide yaitu pada $x = 0$, $x = a$, $y = 0$ dan $y = b$.

Syarat batas untuk medan magnetik dapat diturunkan dari syarat batas medan listrik tangensial pada dinding-dinding waveguide. Seperti dijelaskan pada subbab II.3.2, maka syarat batas komponen medan listrik tangensial pada dinding-dinding waveguide adalah sebagai berikut : $E_y(0,y) = 0$, $E_y(a,y) = 0$, $E_x(x,0) = 0$ dan $E_x(x,b) = 0$.

Jika syarat batas diatas masing-masing kita masukan ke persamaan (3-5a) sampai (3-5d), maka akan didapat syarat batas yang berkaitan dengan medan H_z sebagai berikut :

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3-12a)$$

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial x} \right|_{x=a} = 0 \quad (3-12b)$$

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (3-12c)$$

$$\left. \frac{\partial H_z}{\partial y} \right|_{y=b} = 0 \quad (3-12d)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3-12a), (3-12b), (3-12c) dan (3-12d) ke turunan dari persamaan (3-11) yang merupakan penyelesaian umum medan magnetik pada arah propagasi, akan diperoleh penyelesaian khusus secara matematis dapat dijabarkan sebagai berikut :

- Mendaferensialkan persamaan (3-11) terhadap x dan y , sehingga diperoleh :

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = [-C_1 k_x \sin(k_x x) + C_2 k_x \cos(k_x x)] [C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)] \quad (3-12e)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = [C_1 \cos(k_x x) + C_2 \sin(k_x x)] [-C_3 k_y \sin(k_y y) + C_4 k_y \cos(k_y y)] \quad (3-12f)$$

- Persamaan (3-12a) disubstitusikan ke persamaan (3-12e), sehingga diperoleh :

$$0 = [C_2 k_x] [C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)]$$

karena $[C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)] \neq 0$ maka $C_2 = 0$. Sehingga didapatkan bentuk persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = [-C_1 k_x \sin(k_x x)] [C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)] \quad (3-13a)$$

- Persamaan (3-12b) disubstitusikan ke persamaan (3-13a) maka diperoleh :

$$0 = [-C_1 k_x \sin(k_x a)] [C_3 \cos(k_y b) + C_4 \sin(k_y b)]$$

Karena $[C_3 \cos(k_y b) + C_4 \sin(k_y b)] \neq 0$ dan $C_1 \neq 0$, maka $\sin(k_x a) = 0$. Dari $\sin(k_x a) = 0$, diperoleh :

$$k_x a = m\pi \quad \text{atau} \quad k_x = \frac{m\pi}{a}$$

dimana $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

sehingga diperoleh fungsi deferensial terhadap x , sebagai :

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = \left[-C_1 k_x \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \right] [C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)] \quad (3-13b)$$

Karena harga m merupakan bilangan yang menyatakan variasi dari setengah gelombang, maka untuk selanjutnya m diambil harga positif saja sehingga penyelesaian persamaan umum dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan (3-13b) terhadap x , menjadi :

$$H_z = \left[C_1 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \right] [C_3 \cos(k_y y) + C_4 \sin(k_y y)] \quad (3-13c)$$

- Apabila persamaan (3-13c) didiferensialkan terhadap y sehingga diperoleh bentuk

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = \left[C_1 \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \right] [-C_3 k_y \sin(k_y y) + C_4 k_y \cos(k_y y)] \quad (3-13d)$$

- Dengan cara yang sama, bila persamaan (3-12c) dan (3-12d) disubstitusikan ke persamaan (3-13d), maka berturut-turut akan diperoleh $C_4 = 0$ dan $k_y = \frac{n\pi}{b}$, dimana harga $n = 0, 1, 2, 3 \dots$

Sehingga didapatkan bentuk persamaan medan sebagai :

$$H_z = \left[C_1 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \right] \left[C_3 \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \right]$$

atau

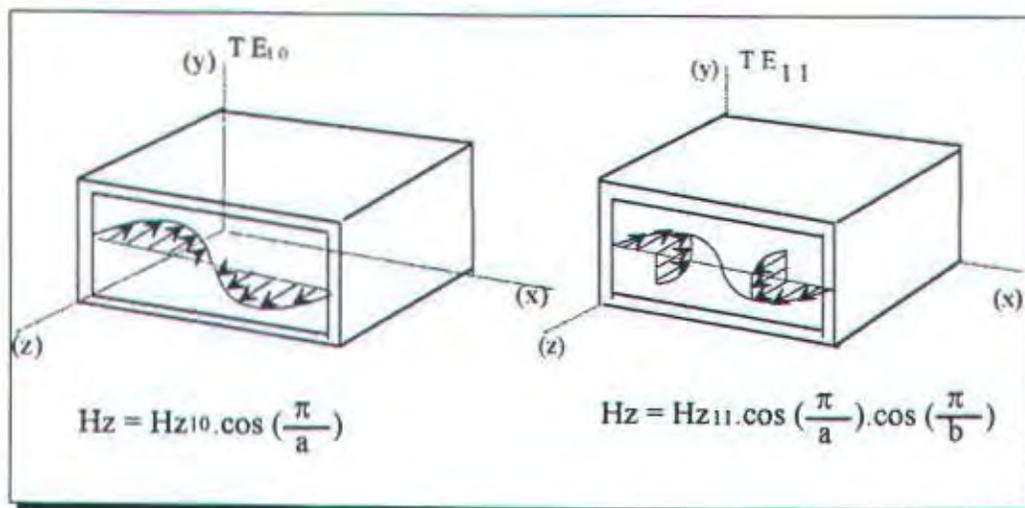
$$H_z = \left[C_1 \cdot C_3 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \right] \quad (3-14)$$

dimana C_1, C_3 merupakan amplitudo dalam bentuk kompleks. Dengan mengganti notasi C_1, C_3 dengan $H_{z, mn}$, maka persamaan (3-11) dapat dituliskan menjadi :

$$H_z = H_{z, mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (3-15a)$$

dimana $m, n = 0, 1, 2, 3 \dots$

Persamaan (3-15a) merupakan persamaan yang menyatakan variasi medan magnetik H_z dalam penampang melintang pada waveguide persegi. Sebagai contoh digambarkan medan magnetik H_z untuk mode TE_{10} dan TE_{11} , seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3-1

Variasi Medan Magnetik H_z untuk Mode TE_{10} dan TE_{11}

Dari gambar terlihat bahwa integer m dan n menunjukkan jumlah variasi setengah gelombang sinusoidal antara dinding-dinding waveguide persegi.

Komponen medan yang lain yaitu medan magnetik H_x dan H_y dan medan listrik E_x dan E_y dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (3-15a) ke persamann (3-5a), (3-5b), (3-5c), dan (3-5d) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_x &= \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] \\ &= \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_{z,mm} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \\ E_x &= E_{x,mm} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{aligned} \quad (3-15b)$$

$$\begin{aligned} E_y &= \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] \\ &= \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_{z,mm} \right] \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \\ E_y &= E_{y,mm} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{aligned} \quad (3-15c)$$

$$\begin{aligned} H_x &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] \\ &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_{z,mm} \right] \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \\ H_x &= H_{x,mm} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{aligned} \quad (3-15d)$$

$$\begin{aligned} H_y &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] \\ &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_{z,mm} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \\ H_y &= H_{y,mm} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{aligned} \quad (3-15e)$$

III.3 Parameter-Parameter Mode TE Pada Waveguide Persegi

III.3.1 Konstanta Propagasi (γ_{mn})

Dari hasil yang diperoleh pada penyelesaian persamaan medan dengan metode pemisahan variabel, diperoleh bahwa $k_x = m\pi/a$ dan $k_y = n\pi/b$, dan hubungan antara k_z , k_x dan k_y terlihat pada persamaan (3-9b), sehingga bila digabungkan dengan persamaan (3-4) akan diperoleh :

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 = \gamma_{mn}^2 + \omega^2\mu\epsilon$$

Dari rumusan diatas maka konstanta propagasi (γ) pada arah rambat gelombang dapat ditulis sebagai :

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] - \omega^2\mu\epsilon} \quad (3-16)$$

dimana indeks m,n adalah integer yang menunjukkan mode gelombang yang dipilih.

Berdasarkan rumusan yang diperoleh untuk konstanta propagasi (γ_{mn}), seperti pada persamaan (3-16), maka konstanta propagasi γ_{mn} merupakan suatu fungsi yang tergantung pada dimensi waveguide a dan b, frekuensi sudut ω , parameter μ dan ϵ dari bahan dielektrik pada waveguide yang dipakai dan mode gelombangnya.

Ada tiga kemungkinan harga untuk konstanta propagasi γ_{mn} , yaitu :

1. Bila $\gamma_{mn}^2 = 0$, maka tidak ada rambatan gelombang dalam waveguide.

Jika frekuensi operasi yang digunakan sedemikian sehingga didapatkan :

$$\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] = \omega^2\mu\epsilon, \text{ sehingga } \gamma_{mn} = 0.$$

Dalam hal ini akan terjadi kondisi cut-off, sehingga tidak akan ada gelombang yang dirambatkan.

III.3.1.1 Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mm}$)

Frekuensi cut-off rambatan gelombang elektromagnetik pada waveguide adalah frekuensi batas dimana tidak ada rambatan gelombang elektromagnetik bila frekuensi operasi berada dibawah frekuensi tersebut.

Pada frekuensi tengah, dimana merupakan transisi dari dua kondisi propagasi, diperoleh konstanta propagasi $\gamma_{mm} = 0$. Ini terjadi pada frekuensi angular $\omega = \omega_{c,mm}$ yang sering dikenal sebagai frekuensi cut-off. Sehingga kuantitas persamaan (3-16) ditulis sebagai fungsi frekuensi cut-off menjadi :

$$\omega_{c,mm}^2 \mu\epsilon = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (3-17a)$$

Dari hubungan bahwa $f_{c,mm} = (\omega_{c,mm}/2\pi)$, maka frekuensi cut-off dinyatakan sebagai :

$$f_{c,mm} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3-17b)$$

dimana :

$f_{c,mm}$ = frekuensi cut-off

$m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$

a, b = dimensi penampang waveguide (m)

μ = permeabilitas media dalam waveguide (Henry)

ϵ = permitivitas media dalam waveguide (Frad/m)

2. Bila $\gamma_{mm}^2 < 0$, maka gelombang akan dirambatkan dalam waveguide.

Jika frekuensi operasi yang digunakan sedemikian sehingga didapatkan :

$$\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right] < \omega^2 \mu\epsilon$$

maka diperoleh γ_{mm} yang bernilai imajiner sebagai berikut :

$$\gamma_{mn} = j\beta_{mn}$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] - \omega^2\mu\epsilon} = \pm j\sqrt{\omega^2\mu\epsilon - \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right]} \quad (3-17c)$$

berarti bahwa frekuensi operasi harus diatas frekuensi cut-off agar gelombang dapat merambat dalam waveguide.

3. Bila $\gamma_{mn}^2 < 0$, maka gelombang akan diredam.

Jika frekuensi operasi yang digunakan sedemikian sehingga didapatkan :

$$\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] > \omega^2\mu\epsilon$$

maka diperoleh γ_{mn} yang bernilai real sebagai berikut :

$$\gamma_{mn} = \alpha_{mn}$$

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] - \omega^2\mu\epsilon} \quad (3-17d)$$

Amplitudo gelombang akan diredam dan menurun secara eksponensial dengan faktor $-\alpha_{mn}$, juga tidak ada propagasi gelombang karena γ_{mn} berharga real.

III.3.1.2 Hubungan Antara Konstanta Propagasi (γ_{mn}) Dengan Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mn}$).

Untuk lebih menyederhanakan perhitungan, biasanya konstanta propagasi dinyatakan dalam frekuensi cut-off . Oleh sebab itu dengan mensubstitusikan persamaan (3-17b) ke persamaan (3-16), didapatkan konstanta propagasi dalam frekuensi cut-off sebagai :

$$\gamma_{mn} = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{[f_{c,mn}]^2}{f} - 1} \quad \text{m}^{-1} \quad (3-18a)$$

Apabila frekuensi kerja lebih besar dari frekuensi cut-off ($f > f_{c,mn}$), maka konstanta propagasi merupakan bilangan imajiner murni dan ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \gamma_{mn} &= j\beta_{mn} \\ &= j\omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \frac{[f_{c,mn}]^2}{f}} \\ &= j\beta_0 \sqrt{1 - \frac{[f_{c,mn}]^2}{f}} \quad \text{rad/m} \end{aligned} \quad (3-18b)$$

untuk dinding waveguide yang merupakan penghantar sempurna, hal ini berarti tidak ada redaman ($\alpha_{mn} = 0$), sehingga pada frekuensi operasi diatas frekuensi cut-off, memungkinkan terjadinya rambatan gelombang.

Bila frekuensi kerja lebih kecil dari frekuensi cut-off, konstanta propagasi merupakan konstanta real murni yaitu :

$$\begin{aligned} \gamma_{mn} &= \alpha_{mn} \\ &= \omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{[f_{c,mn}]^2}{f} - 1} \quad \text{Np/m} \end{aligned} \quad (3-18c)$$

Ini berarti ada redaman sepanjang waveguide yang mengakibatkan tidak ada gelombang yang merambat sepanjang waveguide.

III.3.2 Panjang Gelombang (λ_{mn})

Dalam analisa pola rambatan gelombang dalam waveguide baik untuk mode TE maupun TM, sebagai sinyal sampel diambil pola rambatan untuk satu panjang gelombang dari mode tertentu.

Panjang gelombang dalam waveguide persegi didefinisikan sebagai :

$$\lambda_{nm} = \frac{2\pi}{\beta_{nm}} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c, nm}}{f}\right)^2}}$$

$$\lambda_{nm} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c, nm}}{f}\right)^2}} \quad \text{meter} \quad (3-19)$$

dimana : $\lambda_0 = 2\pi/\beta_0$ meter

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

λ_{nm} = panjang gelombang dalam waveguide (meter)

III.3.3 Kecepatan Phase (Vp) dan Kecepatan Grup (Vg).

III.3.3.1 Kecepatan Phase (Vp)

Kecepatan phase adalah kecepatan dimana phase dari rambatan gelombang adalah konstan pada waveguide persegi. Rumusan dari kecepatan phase dapat diperoleh melalui analisa persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide. Jika diasumsikan $\gamma_{nm} = -j\beta_{nm}$, maka persamaan (3-15a) dapat dituliskan dalam bentuk waktu sebagai berikut :

$$H_z = \hat{A} \cdot e^{j(\omega t - \beta z)}$$

dimana : \hat{A} = Amplitudo kompleks

Jika kita nyatakan kontanta phase : $\psi = \omega t - \beta z = \text{kontan}$. Kecepatan phase dapat dicari dengan menetapkan $d\psi / dt = 0$.

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d(\omega t)}{dt} - \frac{d(\beta z)}{dt} = 0$$

$$\omega - \beta \frac{dz}{dt} = 0$$

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}$$

$$v_p = \frac{\omega}{\omega \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}}$$

atau :

$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \quad \text{m/s} \quad (3-20)$$

dimana : μ, ϵ = permeabilitas dan permitivitas dari waveguide

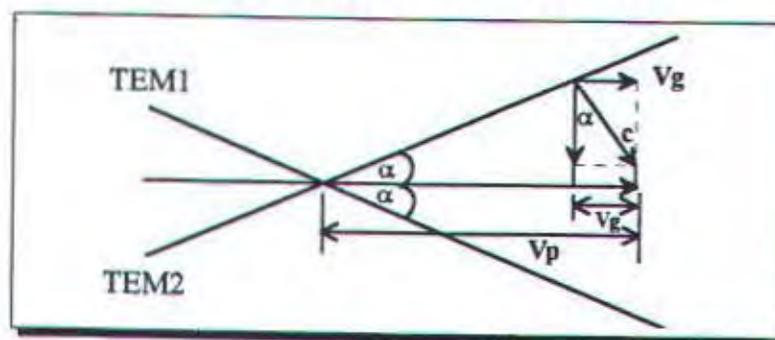
$f_{c,mn}$ = frekuensi cut-off

$v = 1 / \sqrt{(\mu\epsilon)}$

v_p = kecepatan phase (m/s)

III.3.3.2 Kecepatan Grup (V_g)

Kecepatan grup adalah suatu kecepatan yang menyatakan kecepatan dari aliran energi yang sesuai dengan arah rambatan gelombang (sumbu z). Kecepatan group juga menyatakan kecepatan aliran daya yang dirambatkan melalui waveguide pada mode tertentu. Dari gambar dibawah ini dapat dilihat bahwa kecepatan grup adalah komponen kecepatan gelombang TEM pada arah horizontal.



Gambar 3-2¹

Komponen kecepatan dari gelombang TEM

¹ DENNIS RODDY, JOHN COOLEN, Kamal Idris penterj, KOMUNIKASI ELEKTRONIKA (Penerbit Erlangga, 1990), hal 466

Dari gambar dapat diperoleh :

$$v_p = \frac{c}{\sin \alpha} \quad (3-21a)$$

dan

$$v_g = c \sin \alpha \quad (3-21b)$$

Perkalian persamann (3-21a) dan (3-21b) menghasilkan :

$$v_g \cdot v_p = c^2 \quad (3-21c)$$

atau :

$$v_g = \frac{c^2}{v_p} \quad (3-21d)$$

Karena gelombang TEM tersebut merambat dalam waveguide, dimana terdapat faktor ϵ dan μ , maka harga c dapat diganti dengan v , sehingga :

$$v_g = \frac{v^2}{v_p} = v^2 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}}{v}$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2} \quad \text{m/s} \quad (3-22)$$

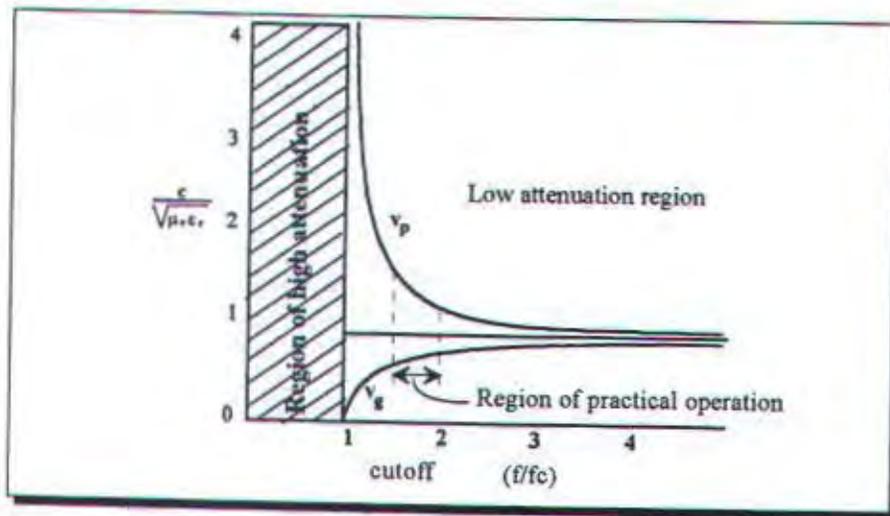
dimana :

v = kecepatan gelombang TEM pada waveguide

v_g = kecepatan grup mode TE (m/det)

Berdasarkan rumusan yang diperoleh diatas dapat disimpulkan bahwa kecepatan phase dan kecepatan grup (kelompok) besarnya tergantung pada frekuensi operasi dan mode yang terjadi.

Secara garfis hubungan tersebut ditunjukkan pada gambar 3.3

Gambar 3-3²

Variasi Kecepatan Phase dan Group Terhadap Frekuensi

III.3.4 Impedansi Karakteristik Gelombang Mode TE ($Z_{0_{TE}}$)

Seperti impedansi karakteristik pada saluran transmisi, waveguide persegi mempunyai impedansi karakteristik yang didefinisikan sebagai perbandingan antara komponen medan listrik E transverse dengan komponen medan magnet transverse H .

Konsep impedansi karakteristik ini dapat digunakan untuk penyesuaian impedansi jika waveguide dihubungkan ke peralatan lain. Tetapi oleh karena dalam praktek impedansi karakteristik ini sangat sulit untuk diukur, maka biasa untuk menyesuaikan impedansi digunakan metode Smith Chart.

Karena arah aliran daya pada saluran waveguide ini searah dengan sumbu z maka komponen transverse baik pada medan listrik maupun medan magnet adalah tegak lurus sumbu z pula. Jadi komponen medan yang dimaksud adalah komponen

² Sinema W, *Electronics Transmission Technology* PRENTICE -HALL, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, hal 141

medan pada arah sumbu x dan sumbu y , maka berdasarkan teori vektor komponen transverse dapat dinyatakan dalam komponen medan x dan komponen medan y sehingga impedansi karakteristik gelombang pada waveguide persegi dinyatakan sebagai :

$$Z_0 = \frac{E_{\text{transverse}}}{H_{\text{transverse}}} = \frac{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}}{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}} \quad (3-23a)$$

Rumusan lain dari impedansi karakteristik waveguide dapat juga diperoleh sebagai perbandingan dari komponen medan listrik dan medan magnet E_x , E_y , H_x , H_y yang diberikan pada persamaan (3-15b), (3-15c), (3-15d) dan (3-15e), diperoleh impedansi karakteristik gelombang mode TE_{mn} sebagai :

$$Z_{0TE} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \frac{E_x^+}{H_y^+} = -\frac{E_x^-}{H_y^-} = -\frac{E_y^+}{H_x^+} = \frac{E_y^-}{H_x^-} \quad (3-23b)^3$$

III.3.4.1 Frekuensi Operasi $f > f_{c,mn}$

Pada frekuensi operasi lebih besar dari frekuensi cutoff konstanta propagasi γ merupakan imajiner murni $j\beta_{mn}$. Sehingga impedansi karakteristik gelombang untuk mode TE_{mn} diperoleh :

$$Z_{0TE,mn} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \frac{j\omega\mu}{j\beta_{mn}} \quad (3-23c)$$

Dengan memakai rumusan konstanta propagasi γ pada persamaan (3-18b), maka persamaan (3-23c) dapat ditulis menjadi :

$$Z_{0TE} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \quad \Omega \quad (3-23d)$$

dimana : Z_{0TE} = impedansi karakteristik pada mode TE

$$\eta = \sqrt{(\mu/\epsilon)} = \text{impedansi intrinsik.}$$

³ JOHNK CARL T.A, *Enginnering Electromagnetic Field and Waves*, Wiley & Sons, hal 417

III.3.4.2 Frekuensi Operasi $f < f_{c,mn}$

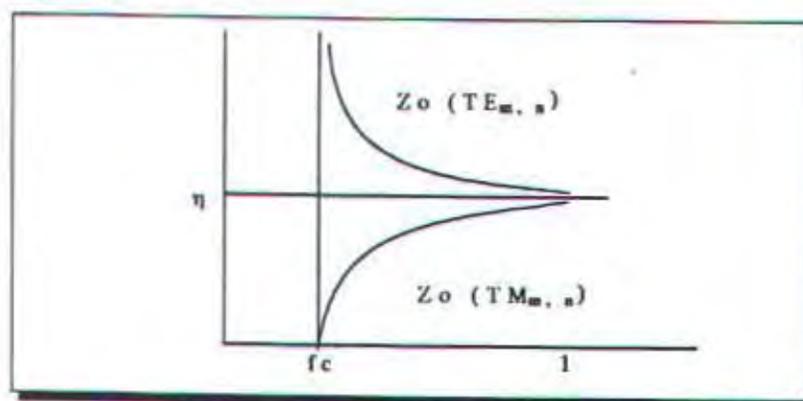
Untuk frekuensi operasi lebih kecil dari frekuensi cutoff, konstanta propagasi γ merupakan real murni dan sebagai fungsi redaman α . Sehingga impedansi karakteristik $Z_{0,TE}$ menjadi : $Z_{0,TE} = \frac{j\omega\mu}{\alpha_{mn}}$

Dengan memakai rumusan α_{mn} pada persamaan (3-18c) diperoleh :

$$Z_{0,TE} = \frac{j\eta}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2 - 1}} \quad \Omega \quad (3-23e)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa pada frekuensi $f < f_{c,mn}$ impedansi karakteristik gelombang $Z_{0,TE}$ menjadi imajiner. Ini berarti tidak ada aliran daya. Keadaan seperti ini dikenal dengan mode *evanescent*.

Dengan frekuensi operasi f bervariasi maka akan diperoleh suatu grafik yang menyatakan hubungan antara impedansi karakteristik gelombang dengan frekuensi, seperti gambar 3-4.



Gambar 3-4⁴

Impedansi Karakteristik terhadap Frekuensi

⁴ William Sinema, *op. cit.*, hal 147.

III.4 Penyelesaian Persamaan Medan Pada Mode TM

Komponen medan yang ada pada mode TM pada waveguide persegi pada arah yang sesuai dengan arah rambatan gelombang (sumbu z) adalah $E_z \neq 0$ dan $H_z = 0$. Ini berarti bahwa tidak ada komponen medan magnet dalam arah propagasi, tetapi ada pada arah komponen sumbu x dan sumbu y, yaitu H_x dan H_y .

Seperti pada mode TE maka untuk menganalisa komponen-komponen pada waveguide persegi, dapat dilakukan pendekatan dengan menganalisa komponen medan untuk arah propagasi, dalam kasus ini diambil komponen medan listrik E_z .

Maka persamaan (3-11) dapat dipakai juga untuk menyatakan komponen medan listrik yang pada arah rambat gelombang, sehingga :

$$E_z = [C_1 \cos k_x \cdot x + C_2 \sin k_x \cdot x] [C_3 \cos k_y \cdot y + C_4 \sin k_y \cdot y] \quad (3-24)$$

Bila dinding-dinding waveguide merupakan penghantar sempurna, diperlukan syarat batas seperti dijelaskan dalam subbab II.3.2 yaitu :

$$E_z \Big|_{x=0} = 0 \quad (3-25a)$$

$$E_z \Big|_{y=0} = 0 \quad (3-25b)$$

$$E_z \Big|_{x=a} = 0 \quad (3-25c)$$

$$E_z \Big|_{y=b} = 0 \quad (3-25d)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3-24) ke persamaan (3-25a) diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$0 = [C_1] [C_3 \cos k_y \cdot y + C_4 \sin k_y \cdot y]$$

karena $[C_3 \cos(k_y \cdot y) + C_4 \sin(k_y \cdot y)] \neq 0$, maka $C_1 = 0$. Sehingga diperoleh persamaan :

$$E_z = [C_2 \sin k_x \cdot x] [C_3 \cos k_y \cdot y + C_4 \sin k_y \cdot y] \quad (3-26a)$$

Substitusi persamaan (3-26a) ke persamaan (3-25b) diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$0 = [C_2 \sin k_x \cdot x] [C_3]$$

karena $C_2 \sin k_x \cdot x \neq 0$, maka $C_3 = 0$. Sehingga persamaan (3-26a) menjadi :

$$E_z = C_2 \sin k_x \cdot x \cdot C_4 \sin k_y \cdot y \quad (3-26b)$$

Jika kita substitusikan persamaan (3-26b) ke persamaan (3-25c) akan diperoleh :

$$0 = C_2 \sin k_x \cdot a \cdot C_4 \sin k_y \cdot y$$

karena $C_2 \neq 0$ dan $C_4 \sin k_y \cdot y \neq 0$, agar persamaan diatas terpenuhi maka $\sin k_x \cdot a = 0$, sehingga diperoleh :

$$k_x \cdot a = m\pi \quad \text{atau} \quad k_x = \frac{m\pi}{a}$$

dimana $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Dengan cara yang sama jika kita substitusikan persamaan (3-26b) ke persamaan (3-25d) akan diperoleh :

$$k_y \cdot b = n\pi \quad \text{atau} \quad k_y = \frac{n\pi}{b}$$

dimana $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Sehingga persamaan persamaan (3-26b) dapat dinyatakan sebagai :

$$E_z = C_2 \sin \frac{m\pi}{a} \cdot x \cdot C_4 \sin \frac{n\pi}{b} \cdot y$$

atau

$$E_z = C_2 \cdot C_4 \sin \frac{m\pi}{a} \cdot x \cdot \sin \frac{n\pi}{b} \cdot y \quad (3-27)$$

Dan jika kita nyatakan konstanta C_2 dan C_4 sebagai $E_{z,mm}$, diperoleh :

$$E_z = E_{z,mm} \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cdot \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \quad (3-28)$$

Persamaan (3-28) merupakan persamaan yang menyatakan variasi medan listrik E_z dalam penampang melintang pada waveguide persegi.

Pada mode TM_{mn} ini, jika salah satu harga m atau n sama dengan nol, atau m dan n sama dengan nol seperti TM_{00} , TM_{10} , TM_{01} , TM_{20} atau TM_{02} , maka tidak akan ada gelombang yang dirambatkan karena amplitudo gelombang bernilai nol. Jadi mode terendah untuk TM_{mn} adalah mode TM_{11} .

Untuk memperoleh komponen yang lain dari mode TM, yaitu E_x , E_y , H_x dan H_y dilakukan dengan mensubstitusikan $H_z = 0$ ke persamaan (2-13a), (2-13b), (2-13c), (2-15a), (2-15b) dan (2-15c), sehingga diperoleh :

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - (\pm\gamma_{nm}) E_y = -j\omega\mu H_x \quad (3-29a)$$

$$\pm\gamma_{nm} E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (3-29b)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = 0 \quad (3-29c)$$

$$-(\pm\gamma_{nm}) H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (3-29d)$$

$$\pm\gamma_{nm} H_x = j\omega\epsilon E_y \quad (3-29e)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (3-29f)$$

-Menyatakan persamaan medan E_x sebagai fungsi E_z sebagai berikut :

Dari persamaan (3-29d) dapat diperoleh :

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{\gamma_{nm}} E_x$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-29b) diperoleh :

$$\gamma_{nm} E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = \frac{-\omega^2\mu\epsilon}{\gamma_{nm}} E_x$$

$$E_x \left(\gamma_{nm} + \frac{\omega^2\mu\epsilon}{\gamma_{nm}} \right) = \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$E_x(\gamma_{mn}^2 + \omega^2 \mu \epsilon) = \frac{\gamma_{mn}}{\partial x} \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$E_x = \frac{\gamma_{mn}}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3-30a)$$

dimana : $k_c^2 = \gamma_{mn}^2 + \omega^2 \mu \epsilon$

Menyatakan persamaan medan E_y sebagai fungsi E_z sebagai berikut :

Dari persamaan (3-29e) dapat diperoleh :

$$H_x = \frac{j\omega \epsilon}{\gamma_{mn}} E_y$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-29a) diperoleh :

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma_{mn} E_y = \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{\gamma_{mn}} E_y \quad \text{atau}$$

$$E_y \left(\gamma_{mn} + \frac{\omega^2 \mu \epsilon}{\gamma_{mn}} \right) = \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$E_y (\gamma_{mn}^2 + \omega^2 \mu \epsilon) = \gamma_{mn} \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$E_y = \frac{\gamma_{mn}}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3-30b)$$

Menyatakan persamaan medan H_x sebagai fungsi E_z sebagai berikut :

Dari persamaan (3-29e) dapat diperoleh :

$$E_y = \frac{\gamma_{mn}}{j\omega \epsilon} H_x$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-29a) diperoleh :

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\gamma_{mn}^2}{j\omega \epsilon} H_x = -j\omega \mu H_x \quad \text{atau}$$

$$H_x \left(\frac{\gamma_{mn}^2}{j\omega \epsilon} - j\omega \mu \right) = \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$H_x (\gamma_{mn}^2 + \omega^2 \mu \epsilon) = j\omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y}$$

$$H_x = \frac{j\omega \epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (3-30c)$$

- Menyatakan persamaan medan H_y sebagai fungsi E_x sebagai berikut :

Dari persamaan (3-29d) dapat diperoleh :

$$E_x = -\frac{\gamma_{nm}}{j\omega\epsilon} H_y$$

Substitusi persamaan diatas ke persamaan (3-29b) diperoleh :

$$\frac{-\gamma_{nm}^2}{j\omega\epsilon} E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad \text{atau}$$

$$\left(\frac{\gamma_{nm}^2}{j\omega\epsilon} - j\omega\mu \right) H_y = -\frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$(\gamma_{nm}^2 + \omega^2\mu\epsilon) H_y = -j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x}$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (3-30d)$$

Dari persamaan-persamaan diatas dapat diperoleh persamaan-persamaan E_x , E_y , H_x dan H_y dengan mensubstitusikan E_z pada persamaan (3-28) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_x &= \pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c} \frac{m\pi}{a} E_{z, nm} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \\ &= E_{x, nm} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \end{aligned} \quad (3-31a)$$

$$\begin{aligned} E_y &= \pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ &= \left[\pm \frac{\gamma_{nm}}{k_c} \frac{n\pi}{b} E_{z, nm} \right] \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \\ &= E_{y, nm} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \end{aligned} \quad (3-31b)$$

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \\ &= \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c} \frac{n\pi}{b} E_{z, nm} \right] \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \end{aligned}$$

$$= H_{x,mm} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (3-31c)$$

$$\begin{aligned} H_y &= \frac{-j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ &= \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} E_{z,mm} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \\ &= H_{y,mm} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \end{aligned} \quad (3-31d)$$

III.5 Parameter-Parameter Mode TM Pada Waveguide Persegi

III.5.1 Konstanta Propagasi (γ_{mn}), Frekuensi Cut-Off ($f_{c,mn}$) dan Panjang Gelombang (λ_{mn})

Seperti halnya pada mode TE konstanta propagasi untuk mode TM didapatkan sebagai :

$$\gamma_{mn} = \sqrt{\left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] - \omega^2\mu\epsilon} \quad \text{atau}$$

$$\gamma_{mn} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{[f_{c,mn}]^2}{f^2} - 1}$$

Frekuensi cut-off untuk mode TM diperoleh dari persamaan (3-17a) yaitu :

$$\omega_{c,mn}^2 \mu\epsilon = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

sehingga diperoleh rumusan frekuensi cut-off sebagai berikut :

$$f_{c,mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

Panjang gelombang mode TM dalam waveguide persegi didefinisikan sebagai :

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}}$$

$$\lambda_{mn} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}}$$

dimana : $\lambda_0 = 2\pi/\beta_0$ meter

$$\beta_0 = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

λ_{mn} = panjang gelombang dalam waveguide (meter)

III.5.2 Kecepatan Phase (V_p) dan Kecepatan Grup (V_g)

Kecepatan phase yang terjadi pada mode TM dan dinyatakan sebagai berikut :

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \quad \text{m/s}$$

atau

$$v_p = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \quad \text{m/s}$$

Definisi kecepatan grup pada mode TM sama seperti pada mode TE dan dinyatakan secara matematis sebagai berikut :

$$v_g = \frac{v^2}{v_p} = v^2 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}}{v}$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2} \quad \text{m/s}$$

dimana : v = kecepatan gelombang TEM pada waveguide

V_g = kecepatan grup mode TM (m/s)

III.5.3 Impedansi Karakteristik Gelombang Mode TM (Z_{0TM})

Seperti impedansi karakteristik waveguide pada mode TE, pada mode TM ini impedansi karakteristik didefinisikan sebagai perbandingan antara komponen medan listrik E transverse dengan komponen medan magnet transverse H .

Untuk mencari impedansi karakteristik gelombang pada mode TM dicari dengan menggunakan rumus perbandingan antara medan listrik arah melintang (E transverse) dan medan magnet arah melintang (H transverse) terhadap arah rambatan gelombang. Hal ini dinyatakan seperti persamaan dibawah ini :

$$Z_0 = \frac{E_x^+}{H_y^+} \quad (3-32)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (3-31a) dan (3-31d) ke persamaan (3-32) diatas, akan diperoleh rumus impedansi karakteristik sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{0TM, mn} &= \frac{\left[\frac{\gamma_{mn}}{k_c} \frac{m\pi}{a} E_{z, mn} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a}\right)_x \sin\left(\frac{n\pi}{b}\right)_y}{\left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} E_{z, mn} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{a}\right)_x \sin\left(\frac{n\pi}{b}\right)_y} \\ &= \frac{\gamma_{mn}}{j\omega\epsilon} \end{aligned} \quad (3-33a)$$

Pada frekuensi operasi lebih besar dari frekuensi cutoff konstanta propagasi γ merupakan imajiner murni $j\beta_{mn}$. Sehingga impedansi karakteristik gelombang untuk mode TM_{mn} diperoleh :

$$Z_{0TM, mn} = \frac{\gamma_{mn}}{j\omega\epsilon} = \frac{j\beta_{mn}}{j\omega\epsilon}$$

Dengan memakai rumusan konstanta propagasi γ pada persamaan (3-18b), maka persamaan (3-33a) dapat ditulis menjadi :

$$Z_{0TM, mn} = \eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c, mn}}{f}\right)^2} \quad \Omega \quad (3-33b)$$

dimana : Z_{0TM} = impedansi karakteristik pada mode TM

$$\eta = \sqrt{(\mu / \epsilon)} = \text{impedansi intrinsik.}$$

Untuk frekuensi operasi lebih kecil dari frekuensi cutoff, konstanta propagasi γ merupakan real murni dan sebagai fungsi redaman α . Sehingga impedansi karakteristik Z_{0TM} menjadi : $Z_{0TM} = \frac{\alpha_{mn}}{j\omega\epsilon}$

Dengan memakai rumusan α_{mn} pada persamaan (3-18c) diperoleh :

$$Z_{0TM} = j\eta \sqrt{\left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2 - 1} \quad \Omega \quad (3-33c)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa pada frekuensi $f < f_{c,mn}$ impedansi karakteristik gelombang Z_{0TM} menjadi imajiner. Ini berarti tidak ada aliran daya. Keadaan seperti ini dikenal dengan mode *evanescent*.

III.6 Mode Dominan pada Waveguide Persegi

III.6.1 Analisa Mode Dominan TE

Mode dominan adalah mode yang mempunyai frekuensi cutoff terendah diantara mode-mode yang lain. Pada mode ini frekuensi operasi dipilih sedemikian sehingga frekuensi operasi tersebut berada diatas frekuensi cutoff dan dibawah frekuensi cutoff mode-mode yang lebih tinggi.

Frekuensi cutoff terendah dari mode gelombang pada waveguide persegi ditentukan oleh dimensi a dan b serta m dan n. Dengan memilih $m = 1$ dan $n = 0$, maka frekuensi cutoff pada persamaan (3-17b) untuk mode TE_{10} adalah :

$$f_{c,10} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{1}{a} = \frac{v}{2a} \quad (3-34a)$$

Hal ini menunjukkan bahwa dimensi b tidak mempengaruhi pada frekuensi cutoff untuk mode TE_{10} . Dan ini terjadi saat dimensi a sama dengan setengah panjang gelombang udara bebas ($0,5 \lambda_0$). Dengan cara yang sama untuk mode TE_{01} diperoleh frekuensi cutoff :

$$f_{c,01} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \frac{1}{b} = \frac{v}{2b} \quad (3-34b)$$

Dengan membandingkan kedua persamaan frekuensi cutoff pada persamaan (3-34a) dan (3-34b) diperoleh bahwa $f_{c,10} < f_{c,01}$, jika $a > b$, atau sebaliknya $f_{c,10} > f_{c,01}$, jika $a < b$. Atau dapat dikatakan jika $a > b$, mode dominan adalah TE_{10} , dan sebaliknya jika $a < b$ mode dominan adalah TE_{01} .

III.6.2 Analisa Mode Dominan TM.

Pada mode TM ini, karena mode terendah yang mungkin terjadi adalah mode TM_{11} , maka mode dominan yang terjadi tergantung dari berapa besar perbandingan a dan b . Jika kita asumsikan $a > b$ dan $a = 2b$, maka dengan memakai persamaan (3-17b), untuk mode TM_{11} frekuensi cut-off yang terjadi adalah :

$$f_{c,11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$$

Jika kita masukan nilai $a = 2b$, maka diperoleh persamaan :

$$f_{c,11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1}{2b}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\frac{5}{4b^2}} \quad (3-35a)$$

Untuk mode TM_{20} akan diperoleh frekuensi cut-off :

$$f_{c,20} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{b}\right)^2} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\frac{1}{b^2}} \quad (3-35b)$$

Untuk mode TM_{02} akan diperoleh frekuensi cut-off :

$$f_{c,02} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{0}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\frac{4}{b^2}} \quad (3-35c)$$

Dengan membandingkan persamaan (3-35a), (3-35b) dan (3-35c), dapat kita simpulkan bahwa mode dominan yang terjadi adalah mode TM_{20} .

Hasil yang diperoleh diatas akan berbeda jika $a < b$ atau $a \neq 2b$. Untuk $a < b$ dan $b = 2a$, maka mode dominan yang terjadi adalah mode TM_{02} ; dan jika $a/b < 2$ atau $b/a < 2$, maka mode dominan yang terjadi adalah mode TM_{11} . Hal ini juga berlaku untuk mode-mode yang lebih tinggi.

III.6.3 Mode TE_{10} Sebagai Mode Dominan.

Secara matematis dapat dihitung frekuensi cutoff untuk berbagai mode gelombang. Dengan membagi persamaan (3-17b) dengan persamaan (3-34a) diperoleh :

$$\frac{f_{c,mn}}{f_{c,10}} = a \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

Untuk selengkapnya berikut ini akan ditampilkan pada tabel 3.1

Tabel 3.1

Frekuensi Cutoff Relatif terhadap $f_{c,10}$

MODE TE_{mn}						
Mode	Integer		b/a = 1		b/a = 1/2	
TE_{mn}	m	n	f_c	$f_{c,mn}/f_{c,10}$	f_c	$f_{c,mn}/f_{c,10}$
TE_{10}	1	0	$K \times 1$	1	$K \times 1$	1
TE_{01}	0	1	$K \times 1$	1	$K \times 2$	2

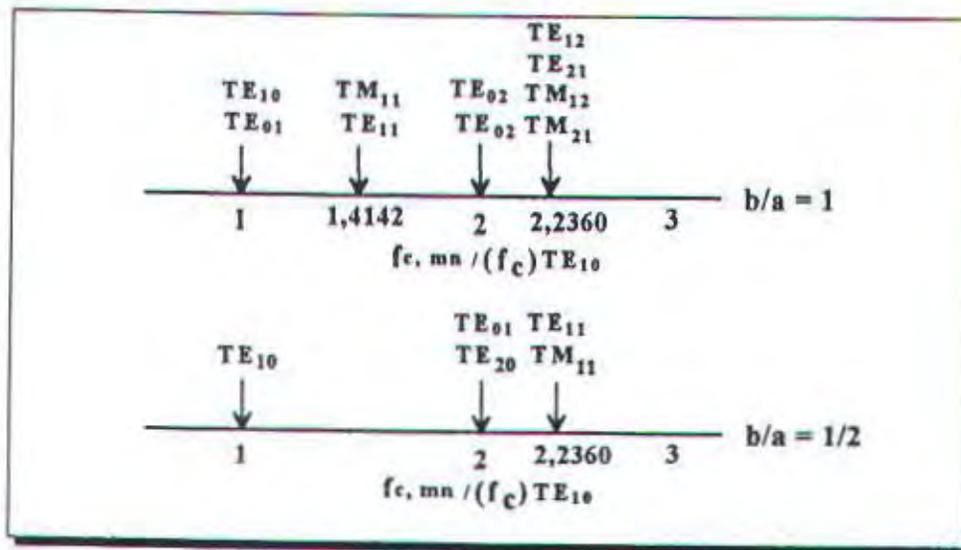
TE ₁₁	1	1	K x 1,4142	1,4142	K x 2,2360	2,2360
TE ₂₀	2	0	K x 2	2	K x 2	2
TE ₀₂	0	2	K x 2	2	K x 4	4
TE ₁₂	1	2	K x 2,2360	2,2360	K x 4,1231	4,1231
TE ₂₁	2	1	K x 2,2360	2,2360	K x 2,8284	2,8284

MODE TM _{mn}						
Mode	Integer		b/a = 1		b/a = 1/2	
	m	n	f _c	f _{c, mn} / f _{c, 10}	f _c	f _{c, mn} / f _{c, 10}
TM ₁₁	1	1	K x 1,4142	1,4142	K x 2,2360	2,2360
TM ₁₂	1	2	K x 2,2360	2,2360	K x 4,1231	4,1231
TM ₂₁	2	1	K x 2,2360	2,2360	K x 2,8284	2,8284

dimana : $K = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \times \frac{1}{a}$

a : ukuran dimensi waveguide peregi (m)

Sebagai gambaran dapat digambarkan kedudukan dari beberapa frekuensi cutoff untuk berbagai mode dari hasil perhitungan pada tabel 3.1 diatas.

Gambar 3-5⁵

Frekuensi Cutoff Berbagai Mode
Relatif terhadap Frekuensi Cutoff Mode TE_{10}

Dari tabel 3.1 maupun dari gambar 3-5 dapat disimpulkan bahwa frekuensi cutoff mode TE_{10} lebih rendah dari frekuensi cutoff mode yang lain, sehingga dapat disimpulkan bahwa mode TE_{10} adalah mode dominan pada waveguide persegi dengan asumsi $a > b$.

Karena mode TE_{10} ini merupakan mode dominan pada waveguide persegi maka rumusan mengenai sifat-sifat dan komponen medan untuk $f < f_{c, mn}$ perlu dituliskan tersendiri.

Komponen-komponen medan pada mode TE_{10} (mode dominan) untuk $f < f_{c, mn}$ adalah :

$$E_y = E_{y,10} \sin\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot x \quad (3-36a)$$

$$H_x = H_{x,10} \sin\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot x \quad (3-36b)$$

⁵ William Sinema, *op cit*, hal 142

$$H_z = H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot x \quad (3-36c)$$

$$E_x = E_z = H_y = 0 \quad (3-36d)$$

Dimana : $E_{y,10} = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,10}$

$$H_{x,10} = \pm \frac{\gamma_{10}}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,10}$$

Dan parameter-parameter yang berkaitan dengan rambatan gelombang elektromagnetik dalam waveguide persegi menjadi :

$$\gamma_{10} = \alpha_{10} = \beta_0 \sqrt{\left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2 - 1} \quad \text{Np/m} \quad f < f_{c,10} \quad (3-37a)$$

$$\gamma_{10} = j\beta_{10} = j\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2} \quad \text{rad/m} \quad f > f_{c,10} \quad (3-37b)$$

$$\lambda_{10} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad \text{m} \quad f > f_{c,10} \quad (3-37c)$$

$$V_{p10} = \frac{V_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad \text{m/s} \quad f > f_{c,10} \quad (3-37d)$$

$$Z_{0TE,10} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad \Omega \quad f > f_{c,10} \quad (3-37e)$$

$$Z_{0TE,10} = \frac{j\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}} \quad \Omega \quad f < f_{c,10} \quad (3-37f)$$

III.7 Rugi-Rugi Dinding Waveguide Persegi

III.7.1 Rugi-Rugi Dinding Waveguide Persegi Pada Mode TE_{10}

Konsep rugi-rugi diperlukan untuk mengetahui besarnya redaman yang diberikan oleh suatu waveguide terhadap suatu gelombang yang dilewatkan kepadanya. Dari redaman yang diperoleh akan diketahui besarnya konstanta redaman α , selanjutnya dari konstanta redaman ini akan digunakan sebagai pertimbangan dalam menentukan dimensi waveguide. Hal ini karena konstanta redaman juga tergantung dari ukuran dimensi waveguide (a dan b).

Berdasarkan persamaan (3-23b), hubungan antara komponen medan listrik E_y dan medan magnetik H_x adalah :

$$E_y = -Z_{0TE} H_x = E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot x \quad (3-38)$$

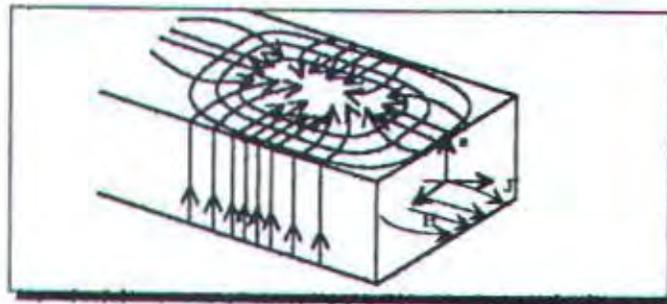
Untuk menentukan besarnya rugi-rugi (redaman) jika dinding-dinding waveguide merupakan penghantar tidak sempurna, langkah pertama adalah menentukan besarnya daya transfer (P_T) dengan teorema Poynting. Sehingga diperoleh :

$$P_T = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a (E_y \cdot H_x^*) dx \cdot dy \quad (3-39)$$

Dengan menggunakan persamaan (3-38), persamaan (3-39) menjadi :

$$P_T = \frac{|E_0|^2 \cdot b}{2Z_{0TE}} \int_0^a \sin^2\left(\frac{\pi}{a}\right) \cdot x \cdot dx = \frac{|E_0|^2 \cdot a \cdot b}{4Z_{0TE}} \quad (3-40)$$

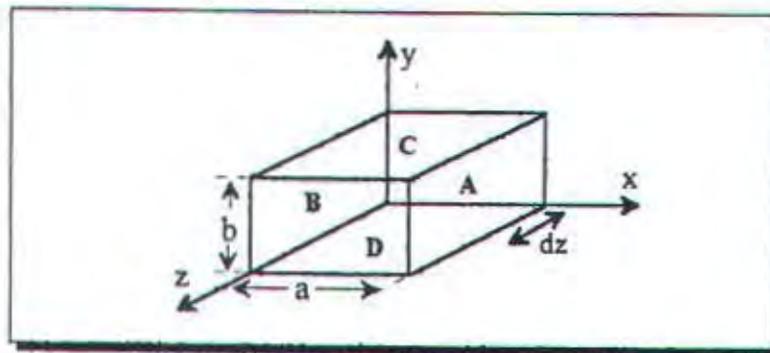
Untuk memperkirakan besarnya rugi-rugi pada dinding waveguide dipakai konsep arus permukaan pada mode ideal dengan resistivitas permukaan media R_s . Gambar dibawah ini menunjukkan distribusi arus pada dinding-dinding waveguide yang akan dihitung rugi-ruginya.

Gambar 3-6⁶

Distribusi Arus pada Dinding Waveguide Persegi

Arus pada permukaan penghantar ada kaitanya dengan medan magnetik tangensial H_z pada dinding-dinding samping yaitu $x = 0$ dan $x = a$. Besarnya arus permukaan persatuan lebar $|J_{sy}| = |H_z|$ dan arusnya vertikal pada dinding-dinding samping waveguide persegi.

Karena komponen medan H_x posisinya tangensial pada dinding-dinding atas dan bawah sehingga akan memberikan arus permukaan $|J_{sz}| = |H_x|$ dan $|J_{sx}| = |H_z|$. Secara grafis dapat dilukiskan distribusi arus pada dinding-dinding waveguide seperti pada gambar 3-6 sehingga besarnya rugi-rugi daya persatuan panjang dapat dicari sebagai berikut :



Gambar 3-7

Konfigurasi Dinding-Dinding Waveguide

⁶ JOHNK CARL T.A, *op cit*, hal 462

Pertama-tama akan dicari kerugian daya persatuan luas yang dinyatakan sebagai :

$$dP = \frac{1}{2} |J_s|^2 R_s \quad (3-41)$$

Losses pada dinding A :

$$\begin{aligned} (dP)_A &= \frac{1}{2} |J_s|^2 R_s = \frac{1}{2} |H_z|^2 R_s b dz \\ &= \frac{1}{2} R_s \frac{|E_0|^2}{\eta^2} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 b dz \end{aligned}$$

Losses pada dinding B sama dengan losses pada dinding A karena simetri, sehingga :

$$(dP)_B = (dP)_A = \frac{1}{2} R_s \frac{|E_0|^2}{\eta^2} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 b dz$$

Losses pada dinding C :

$$\begin{aligned} (dP)_C &= \frac{1}{2} |J_s|^2 R_s = \frac{1}{2} R_s \int_0^a (|H_x|^2 + |H_z|^2) dx dz \\ &= \frac{1}{2} R_s dz \left[\frac{|E_0|^2}{Z_{0TE}^2} \int_0^a \sin^2 \frac{\pi x}{a} dx + \frac{|E_0|^2}{\eta^2} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \int_0^a \cos^2 \frac{\pi x}{a} dx \right] \\ &= \frac{1}{4} R_s dz |E_0|^2 a \left[\frac{1}{Z_{0TE}^2} + \frac{1}{\eta^2} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] \end{aligned}$$

Losses pada dinding D sama dengan losses dinding C, sehingga :

$$(dP)_D = (dP)_C = \frac{1}{4} R_s dz |E_0|^2 a \left[\frac{1}{Z_{0TE}^2} + \frac{1}{\eta^2} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right]$$

Total losses per satuan panjang = $P_L = \frac{(dP)_A + (dP)_B + (dP)_C + (dP)_D}{dz}$, dengan

mengganti Z_{0TE} seperti pada persamaan (3-37e) diperoleh :

$$P_L = \frac{b \cdot R_s |E_0|^2 \lambda^2}{4 \eta^2 a^2} + \frac{a \cdot R_s |E_0|^2 \left(1 - \frac{\lambda^2}{4a^2}\right)}{2 \eta^2} + \frac{R_s |E_0|^2 \lambda^2}{8 \eta^2 a}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{b.R_s |E_0|^2 \lambda^2}{4\eta^2 a^2} + \frac{a.R_s |E_0|^2}{2\eta^2} - \frac{R_s |E_0|^2 \lambda^2}{8\eta^2 a} + \frac{R_s |E_0|^2 \lambda^2}{8\eta^2 a} \\
 &= \frac{R_s |E_0|^2}{2\eta^2} \left(\frac{b\lambda^2}{2a^2} + a \right) \quad (3-42)
 \end{aligned}$$

Untuk gelombang yang merambat pada suatu saluran transmisi dan diasumsikan mengalami redaman yang cukup kecil, maka akan mengalami redaman dengan faktor $e^{-2\alpha z}$. Sehingga besarnya daya yang dipancarkan pada setiap titik sejauh z dari sumber dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_T = \frac{(V_{ms}^+)^2}{R_s} e^{-2\alpha z}$$

dimana :

P_T = Daya pancar untuk setiap harga z

V_{ms}^+ = Tegangan pada titik $z = 0$

Kerugian daya persatuan panjang dapat dicari dengan mendiferensialkan P_T terhadap z , sehingga diperoleh :

$$P_L = -\left(\frac{dP_T}{dz}\right) = 2\alpha \frac{(V_{ms}^+)^2}{2} e^{-2\alpha z} = 2\alpha P_T \quad (3-43)$$

Dari persamaan (3-43) diperoleh konstanta redaman α yang berlaku untuk setiap sistem dimana transmisi daya mengalami penurunan secara eksponensial.

$$\alpha = \frac{P_L}{2P_T} \quad (3-44)$$

Dari persamaan (3-40) dan (3-42) diperoleh konstanta redaman yaitu :

$$\alpha = \frac{P_L}{2P_T} = \frac{\frac{R_s |E_0|^2}{2\eta^2} \left(\frac{b\lambda^2}{2a^2} + a \right)}{2 \frac{|E_0|^2 a b}{4 Z_{0TE}}} = \frac{R_s Z_{0TE}}{\eta^2 a b} \left(\frac{b\lambda^2}{2a^2} + a \right) \quad (3-45a)$$

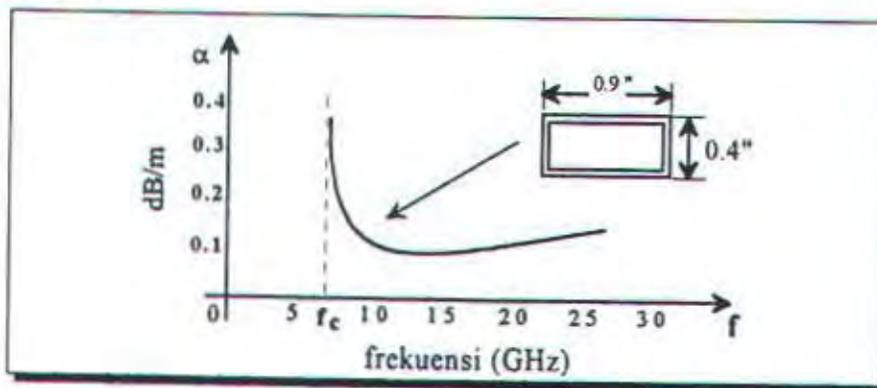
Dengan mengganti Zo_{TE} dengan persamaan (3-37e) diperoleh :

$$\alpha = \frac{R_s}{\eta b \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 \right] \quad (3-45b)$$

Dari persamaan (3-34a) didapatkan $f_{c,10} = \frac{v}{2a} = \frac{\lambda \cdot f}{2a}$, sehingga $\frac{\lambda}{2a} = \frac{f}{f_{c,10}}$, maka persamaan (3-45b) dapat ditulis kembali menjadi :

$$\alpha = \frac{R_s}{\eta b \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}} \left[1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2 \right] \quad (3-45c)$$

Berdasarkan persamaan yang diperoleh diatas, dapat dibuat grafik yang menyatakan besarnya redaman waveguide untuk mode TE_{10} sebagai fungsi frekuensi operasi.



Gambar 3-8⁸

Grafik Redaman Terhadap Frekuensi Pada Waveguide Persegi untuk Mode TE_{10}

⁸ JOHNK CARL, T.A, *op cit*, hal 452

III.7.2 Rugi-Rugi pada Dinding Waveguide Mode TE_{mn}

Dengan memakai pendekatan seperti pada pembahasan rugi-rugi untuk mode TE_{10} , maka besarnya rugi-rugi pada dinding waveguide persegi untuk mode TE_{mn} diperoleh :

$$\alpha_{TE_{mn}} = \frac{2R_s}{\eta b \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \left\{ \left(1 + \frac{b}{a}\right) \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2\right] \left[\frac{\frac{b}{a} \left(\frac{b}{a} m^2 + n^2\right)}{\frac{b^2 m^2}{a^2} + n^2} \right] \right\} \quad \dots \quad (3-46)^9$$

III.7.3 Rugi-Rugi pada Dinding Waveguide Mode TM_{mn}

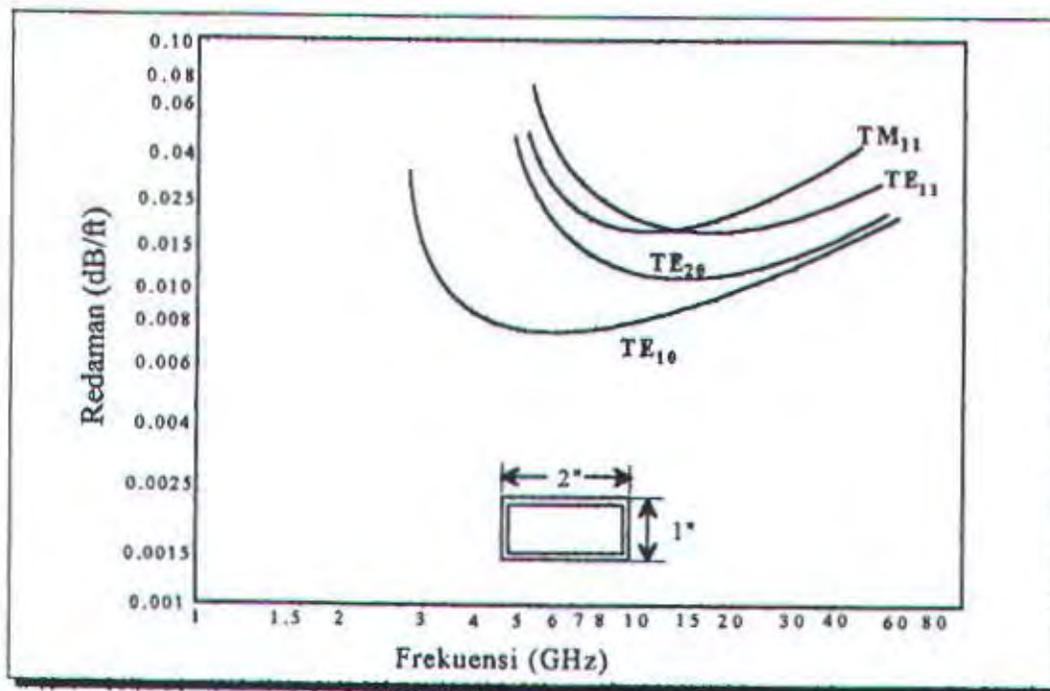
Dengan memakai pendekatan seperti pada pembahasan rugi-rugi untuk mode TE_{10} , ataupun mode TE_{mn} maka besarnya rugi-rugi pada dinding waveguide persegi untuk mode TM_{mn} diperoleh :

$$\alpha_{TM_{mn}} = \frac{2R_s}{\eta b \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,mn}}{f}\right)^2}} \left[\frac{m \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2}{m \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2} \right] \quad (3-47)^{10}$$

Dengan teori seperti pada perhitungan untuk mode TE_{10} , maka waveguide dengan ukuran tertentu dapat ditentukan hubungan antara besarnya redaman untuk berbagai mode TE dan TM terhadap frekuensi operasi f , seperti gambar 3-9.

⁹ BSHP, *op. cit.*, hal264

¹⁰ BSHP, *loc. cit.*

Gambar 3-9¹¹

Grafik Redaman terhadap Frekuensi untuk Mode TE dan TM

III.8 Komponen Medan Dalam Bentuk Waktu (t)

Dengan mengalikan komponen medan H_z pada persamaan (3-15a) dengan faktor eksponensial $e^{j\omega t \pm \gamma_{mn} z}$, dimana γ_{mn} dapat real atau imajiner, akan diperoleh medan rambatan gelombang elektromagnetik yang bergantung pada konstanta propagasi. Seperti pada persamaan (3-17c), yaitu jika $f > f_{c,mn}$ maka $\gamma_{mn} = j\beta_{mn}$, sehingga persamaan (3-17c) dapat dinyatakan sebagai eksponensial dalam t dan z menjadi :

$$H_z(x, y)[e^{j\omega t \pm \gamma_{mn} z}] = H_{z,mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) [e^{j\omega t \pm j\beta_{mn} z}] \quad (3-48a)$$

dimana : $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ dan $f > f_{c,mn}$

Persamaan (3-48a) diatas menunjukkan bahwa gelombang merambat kearah sumbu z positif bila faktor eksponensialnya adalah $e^{j\omega t - j\beta_{mn} z}$ dan akan merambat kearah

¹¹ William Sinema, *op cit*, hal 142

sumbu z negatif bila faktor eksponensialnya adalah $e^{j\omega t + j\beta_{mn}z}$. Bila $f < f_{c, mn}$ dimana $\gamma_{mn} = \alpha_{mn}$, dengan cara yang sama, persamaan (3-11a) dalam komponen t dan z dapat ditulis menjadi :

$$\begin{aligned} H_z(x, y)[e^{j\omega t \pm \gamma_{mn}z}] &= H_{z, mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) [e^{j\omega t \pm \alpha_{mn}z}] \\ &= H_{z, mn} \cdot e^{\pm \alpha_{mn}z} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(\cos\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (3-48b)$$

dimana : $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ dan $f < f_{c, mn}$

Mode dimana frekuensi kerja f dibawah frekuensi cutoff dinamakan *evanescent mode*.

Persamaan (3-48a) merupakan bentuk persamaan kompleks. Untuk memperoleh persamaan dalam bentuk waktu, maka persamaan (3-48a) diambil bentuk "real time" nya sehingga diperoleh bentuk $H_z(x, y, z, t)$ sebagai :

$$\begin{aligned} H_z(x, y, z, t) &= \text{Re}[H_z(x, y) \cdot e^{j(\omega t \pm \beta_{mn}z)}] \\ &= H_{z, mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(\omega t \pm \beta_{mn}z + \phi) \end{aligned}$$

dimana : β_{mn} : konstanta phase

ω : frekuensi angular (rad/s)

ϕ : Phase saat $t=0$ dan $z=0$ (rad)

Dengan cara yang sama untuk frekuensi $f < f_{c, mn}$ diperoleh bentuk persamaan "real time" nya sebagai :

$$H_z(x, y, z, t) = H_{z, mn} e^{\pm \alpha_{mn}z} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos(\omega t)$$

Dari bentuk persamaan medan magnet pada arah rambat sebagai fungsi waktu dan posisi akan diperoleh pengertian yang mendalam mengenai sifat dan karakteristik medan elektromagnetik dalam waveguide persegi.

Untuk mengetahui persamaan komponen medan untuk mode TE dan TM yang lain, berikut ini disertakan tabel 3.2a yang memuat persamaan komponen medan untuk mode TE_{mn} dan TM_{mn} .

Tabel 3.2a¹²Persamaan Komponen Medan untuk Mode TE_{mn}

No.	Mode	Persamaan
1	TE_{10}	$E_x = 0$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,10} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{10}}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,10} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = 0$ $H_z = H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
2	TE_{20}	$E_x = 0$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,20} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{20}}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,20} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = 0$ $H_z = H_{z,20} \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
3	TE_{11}	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,11} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,11} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{11}}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,11} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{11}}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,11} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,11} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

¹² JOHNS CARL, T.A, op cit, hal 421-422, 430

No.	Mode	Persamaan
4	TE ₂₁	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,21} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,21} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{21}}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,21} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{21}}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,21} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,21} \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
5	TE ₀₁	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,01} \right] \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = 0$ $H_x = 0$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{01}}{k_c^2} \frac{\pi}{b} H_{z,01} \right] \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,01} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
6	TE ₀₂	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,02} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = 0$ $H_x = 0$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{02}}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,02} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,02} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
7	TE ₁₂	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,12} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,12} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{12}}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_{z,12} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{12}}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,12} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,12} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

No.	Mode	Persamaan
8	TE ₂₂	$E_x = \left[\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,22} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[-\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,22} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\pm \frac{\gamma_{22}}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} H_{z,22} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[\pm \frac{\gamma_{22}}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} H_{z,22} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_z = H_{z,22} \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

Tabel 3.2b

Persamaan Komponen Medan untuk Mode TM_{mn}

No.	Mode	Persamaan
1	TM ₁₁	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{11}}{k_c} \frac{\pi}{a} E_{z,11} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{11}}{k_c} \frac{\pi}{b} E_{z,11} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,11} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\pi}{b} E_{z,11} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\pi}{a} E_{z,11} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
2	TM ₁₂	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{12}}{k_c} \frac{\pi}{a} E_{z,12} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{12}}{k_c} \frac{2\pi}{b} E_{z,12} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,12} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} E_{z,12} \right] \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\pi}{a} E_{z,12} \right] \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

No.	Mode	Persamaan
3	TM ₂₁	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{21}}{k_c} \frac{2\pi}{a} E_{z,21} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{21}}{k_c^2} \frac{\pi}{b} E_{z,21} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,21} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\pi}{b} E_{z,21} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} E_{z,21} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
4	TM ₂₂	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{22}}{k_c} \frac{2\pi}{a} E_{z,22} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{22}}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} E_{z,22} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,22} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} E_{z,22} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} E_{z,22} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
5	TM ₂₃	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{23}}{k_c} \frac{2\pi}{a} E_{z,23} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{23}}{k_c^2} \frac{3\pi}{b} E_{z,23} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,23} \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{3\pi}{b} E_{z,23} \right] \sin\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{a} E_{z,23} \right] \cos\left(\frac{2\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
6	TM ₃₂	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{32}}{k_c} \frac{3\pi}{a} E_{z,32} \right] \cos\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{32}}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} E_{z,32} \right] \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,32} \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

No.	Mode	Persamaan
		$H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{2\pi}{b} E_{z,32} \right] \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{3\pi}{a} E_{z,32} \right] \cos\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$
7	TM ₃₃	$E_x = \left[\pm \frac{\gamma_{33}}{k_c} \frac{3\pi}{a} E_{z,33} \right] \cos\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_y = \left[\pm \frac{\gamma_{33}}{k_c} \frac{3\pi}{b} E_{z,33} \right] \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $E_z = E_{z,33} \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_x = \left[\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{3\pi}{b} E_{z,33} \right] \sin\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$ $H_y = \left[-\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{3\pi}{a} E_{z,33} \right] \cos\left(\frac{3\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{b}y\right) \cdot e^{j\omega t - \gamma z}$

Tabel 3.3a

Persamaan parameter waveguide untuk mode TE

No	Mode	Persamaan
1	TE ₁₀	$\gamma_{10} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon\right]}$ $f_{c,10} = \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \frac{1}{a}$ $\beta_{10} = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{10} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,10}}{f}\right)^2}}$
2	TE ₀₁	$\gamma_{01} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \mu \epsilon\right]}$ $f_{c,01} = \frac{1}{2\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \frac{1}{b}$ $\beta_{01} = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{01} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}$

No.	Mode	Persamaan
		$Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,01}}{f}\right)^2}}$
3	TE ₁₁	$\gamma_{11} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$ $\beta_{11} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{11} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}}$
4	TE ₂₀	$\gamma_{20} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,20} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{a}$ $\beta_{20} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{20} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}}$

No.	Mode	Persamaan
		$v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,20}}{f}\right)^2}}$
5	TE ₀₂	$\gamma_{02} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,02} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{b}$ $\beta_{02} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{02} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,02}}{f}\right)^2}}$
6	TE ₁₂	$\gamma_{12} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,12} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2}$ $\beta_{12} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{12} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}}$

No.	Mode	Persamaan
		$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}}$
7	TE ₂₁	$\gamma_{21} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,21} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$ $\beta_{21} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{21} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}}$
		$\gamma_{22} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,22} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2}$ $\beta_{22} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}$

No.	Mode	Persamaan
8	TE ₂₂	$\lambda_{22} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}}$ $v_B = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TE} = \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}} = \frac{\eta}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}}$

Tabel 3.3b

Persamaan parameter waveguide untuk mode TM

No.	Mode	Persamaan
1	TM ₁₁	$\gamma_{11} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,11} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$ $\beta_{11} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{11} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}}$ $v_B = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}$

No.	Mode	Persamaan
		$Z_{0TM} = \sqrt{\mu/\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2} = \eta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,11}}{f}\right)^2}$
2	TM ₁₂	$\gamma_{12} = \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,12} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2}$ $\beta_{12} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{12} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TM} = \sqrt{\mu/\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2} = \eta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,12}}{f}\right)^2}$
3	TM ₂₁	$\gamma_{21} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,21} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$ $\beta_{21} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{21} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}$

No.	Mode	Persamaan
		$Z_{0TM} = \sqrt{\mu/\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2} = \eta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,21}}{f}\right)^2}$
4	TM ₂₂	$\gamma_{22} = \sqrt{\left[\left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon\right]}$ $f_{c,22} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^2 + \left(\frac{2}{b}\right)^2}$ $\beta_{22} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2} = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}$ $\lambda_{22} = \frac{2\pi}{\beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}}$ $v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}}$ $v_g = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2} = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}$ $Z_{0TM} = \sqrt{\mu/\epsilon} \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2} = \eta \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c,22}}{f}\right)^2}$

Demikianlah penurunan persamaan gelombang dalam waveguide persegi dan persamaan parameter-parameter dalam waveguide. Selanjutnya pada bab IV akan dibahas pembuatan perangkat lunak komputer untuk menampilkan medan listrik dan medan magnet secara tiga dimensi dengan algoritma kamera sintetik, disertai dengan representasi grafisnya.

BAB IV

PERENCANAAN DAN PEMBUATAN PERANGKAT LUNAK SERTA REPRESENTASI GRAFIK

IV.1 Umum

Dalam bab ini akan dibahas bagaimana konsep kamera sintetik merubah koordinat obyek tiga dimensi menjadi koordinat dua dimensi sehingga dapat digambar pada layar monitor tanpa menghilangkan kesan tiga dimensi. Juga akan dibahas interpretasi fisis dari gelombang yang merambat dalam waveguide untuk mode-mode tertentu. Sebab sebelum kita merencanakan untuk membuat suatu perangkat lunak guna menampilkan pola medan listrik dan medan magnet pada waveguide persegi secara tiga dimensi, terlebih dahulu kita harus mendapatkan pengertian fisis yang benar dari persamaan medan magnet dan medan listrik yang telah diturunkan pada bab sebelumnya.

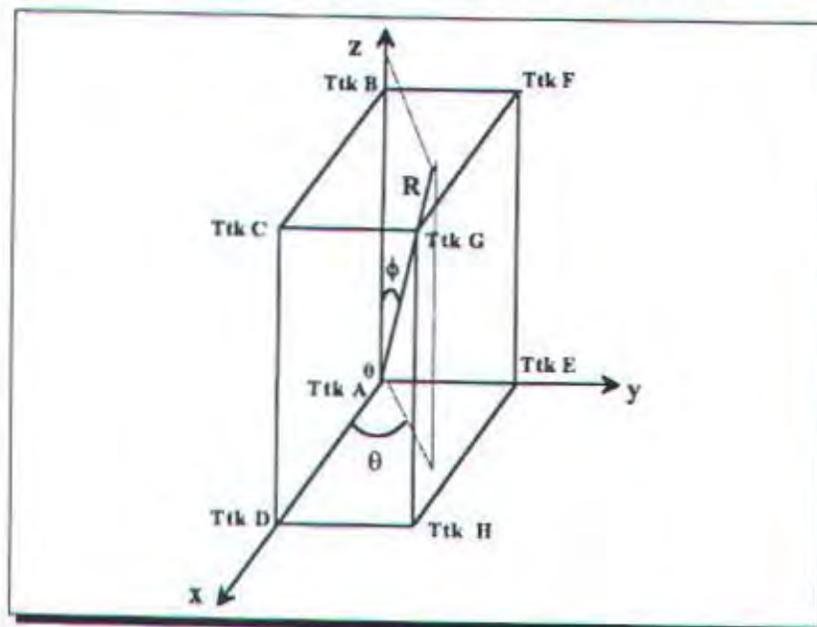
Setelah kita memperoleh interpretasi fisis gelombang, maka dengan menggunakan metode kamera sintetik akan dibuat suatu program yang dapat menampilkan gelombang yang dimaksud pada layar monitor.

IV.2 Konsep Kamera Sintetik

IV.2.1 Cara Kerja Kamera Sintetik

Sebelum kita merencanakan untuk menggambar medan listrik dan medan magnet secara tiga dimensi dengan menggunakan prinsip kamera sintetik, marilah terlebih dahulu memahami bagaimana kamera sintetik dapat menggambar sebuah balok secara tiga dimensi pada layar monitor.

Misalnya sebuah balok yang mempunyai koordinat titik pojok sebagai berikut : Ttk A(0; 0; 0), Ttk B(0; 0; 3), Ttk C(1,6; 0; 3), Ttk D(1,6; 0; 0), Ttk E(0; 0,8; 0), Ttk F(0; 0,8; 3), Ttk G(1,6; 0,8; 3) dan Ttk H(1,6; 0,8; 0). Misalkan posisi mata dalam melihat balok tersebut kita nyatakan dalam sistem koordinat bola sebagai berikut : $R=7$ satuan, $\phi=80^\circ$ dan $\theta=15^\circ$, maka jika kita gambar secara manual akan didapat kesan kira-kira seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4-1

Penggambaran balok tiga dimensi secara manual

Sampai disini kita tidak mengalami kesulitan dalam menggambar obyek dengan titik pojok-titik pojok yang diketahui, tetapi bagaimana kalau balok dilihat dari bawah, atau dari samping, atau balok kedudukannya miring. Disini kita akan mengalami kesulitan sebab kita tidak biasa menggambar balok pada posisi seperti itu. Disamping itu bagaimana cara menggambar balok pada layar monitor, padahal pada layar monitor hanya mempunyai sistem koordinat dua dimensi, sedangkan balok mempunyai koordinat tiga dimensi.

Dari kesulitan-kesulitan yang kita hadapi di atas, maka dicoba untuk mengembangkan suatu konsep kamera sintetik yaitu suatu algoritma yang dapat memetakan koordinat tiga dimensi ke koordinat dua dimensi. Jadi kamera sintetik disini berfungsi untuk melakukan transformasi dari obyek dengan koordinat tiga dimensi ke obyek dengan koordinat dua dimensi, tanpa menghilangkan kesan tiga dimensinya.

Misal titik P mempunyai koordinat $P(x,y,z)$ akan ditransformasi menjadi titik P' dengan koordinat $P'(x',y')$, hal ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P(x, y, z) \xrightarrow{\text{Kamera Sintetik}} P'(x', y')$$

Oleh karena titik P' hanya mempunyai koordinat dua dimensi yaitu ordinat x' dan absis y' , maka titik P' ini dapat kita gambar pada layar monitor.

IV.2.2 Proyeksi Balok Koordinat Tiga Dimensi ke Koordinat Dua Dimensi

Seperti sudah dijelaskan pada sub bab II.7 bahwa untuk menentukan posisi dan orientasi kamera diperlukan tiga komponen, yaitu :

- VRP, yaitu $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$
- VPN, yaitu $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$
- Vektor dengan arah "ke atas", yaitu vektor \mathbf{v}

Vektor \mathbf{r} bisa ditentukan secara bebas dan interaktif, dan biasanya dipilih pada posisi yang dekat dengan titik tengah dari obyek yang akan dilihat. Dalam hal ini vektor \mathbf{r} ditentukan dari posisi kita melihat obyek yaitu pada koordinat bola $R=7$, $\phi=80^\circ$ dan $\theta=15^\circ$. Jika koordinat tersebut dinyatakan dalam koordinat cartesian diperoleh :

$$\begin{aligned} r_x &= R * \sin(\phi) * \cos(\theta) \\ &= 7 * \sin(80) * \cos(15) = 6,6587 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_y &= R * \sin(\phi) * \sin(\theta) \\ &= 7 * \sin(80) * \sin(15) = 1,7842 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_z &= R * \cos(\phi) \\ &= 7 * \cos(80) = 1,215 \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh vektor $\mathbf{r} = (6,6587; 1,7842; 1,215)$. Kemudian kita tentukan vektor $\mathbf{n} = -\mathbf{r}$, maka diperoleh $\mathbf{n} = (-6,6587; -1,7842; -1,215)$. Vektor \mathbf{n} ini belum ternormalisasi, sehingga harus dinormalisasi menjadi :

$$n_x = \frac{-6,6587}{\sqrt{(-6,6587)^2 + (-1,7842)^2 + (-1,215)^2}} = -0,951$$

$$n_y = \frac{-1,7842}{\sqrt{(-6,6587)^2 + (-1,7842)^2 + (-1,215)^2}} = -0,25488$$

$$n_z = \frac{-1,215}{\sqrt{(-6,6587)^2 + (-1,7842)^2 + (-1,215)^2}} = -0,17357$$

maka didapat vektor \mathbf{n} yang ternormalisasi $\mathbf{n} = (-0,951; -0,25488; -0,17357)$.

Setelah r dan n ditentukan, langkah berikutnya adalah menentukan vektor v . Cara yang efektif menentukan v adalah dengan menggunakan bantuan sembarang vektor, misalnya $up = (0; 0; 1)$, dan kemudian memproyeksikannya ke bidang pandang pada arah vektor n , dan diperoleh vektor up' . Hal ini ditunjukkan gambar 2-12.

Vektor up' bisa ditentukan dengan menggunakan persamaan (2-28) :

$$up' = up - (up \cdot n) n$$

dengan $up \cdot n$ menyatakan *dot product* dari dua vektor. Sehingga, vektor up' bisa dihitung :

$$\begin{aligned} up'_x &= up_x - (up_x \cdot n_x + up_y \cdot n_y + up_z \cdot n_z)n \\ &= 0 - (0 \cdot (-0,951) + 0 \cdot (-0,25488) + 1 \cdot (-0,17357))(-0,951) \\ &= 0 - (-0,17357) \cdot (-0,951) = -0,165 \end{aligned}$$

dengan cara yang sama untuk $up'_y = -0,044$ dan $up'_z = 0,969877$, sehingga $up' = (-0,165; -0,044; 0,969877)$.

Vektor v bisa dihitung menggunakan persamaan (2-29) :

$$v = \frac{up'}{|up'|}$$

sehingga diperoleh $v = (-0,1675; -0,04468; 0,9848)$. Vektor u diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-30) :

$$u = n \times v$$

Dengan $n \times v$ menyatakan *cross product*, diperoleh $u = (-0,2587; 0,9656; -0,00002)$.

Setelah memperoleh komponen VRP dan VPN, langkah selanjutnya adalah memproyeksikan koordinat balok pada sistem koordinat dunia ke sistem koordinat uvn dengan melakukan *dot product*. Misal kita ambil contoh koordinat titik pojok

$B(0; 0; 3)$. Kemudian kita hitung vektor t yang merupakan selisih titik B dan titik r , yaitu :

$$\begin{aligned} t(x,y,z) &= B(x,y,z) - r(x,y,z) \\ &= (0; 0; 3) - (6,6587; 1,7842; 1,215) \\ &= (-6,6587; -1,7842; 1,785) \end{aligned}$$

Titik B_1 , yang merupakan hasil proyeksi titik B ke sistem koordinat u,v,n diperoleh dengan rumus dot product :

$$B_{1,x} = t \cdot u$$

$$B_{1,y} = t \cdot v$$

$$B_{1,z} = t \cdot n$$

Dengan menjumlahkan perkalian komponen-komponen vektor t, u, v dan n didapatkan $B_1(0; 2,953; 6,477)$.

Sekarang kita dapatkan koordinat B' yang merupakan koordinat hasil pemetaan oleh kamera sintetik dengan rumus :

$$B'_x = \frac{-1 \cdot B_{1,x}}{-1 - B_{1,z}} \quad \text{dan} \quad B'_y = \frac{-1 \cdot B_{1,y}}{-1 - B_{1,z}}$$

Sehingga didapatkan :

$$B'_x = \frac{(-1) \cdot (0)}{-1 - 6,477} = 0$$

$$B'_y = \frac{(-1) \cdot (2,953)}{-1 - 6,477} = 0,395$$

Oleh karena titik $B'(0; 0,395)$, hanya mempunyai komponen absis dan ordinat, maka titik B' dapat kita gambar pada layar monitor.

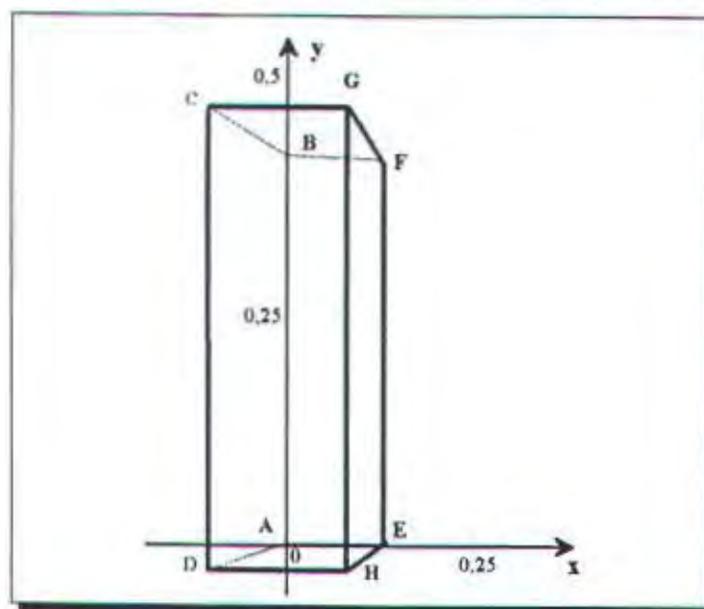
Untuk titik-titik pojok yang lain dapat dicari dengan mengikuti prosedur yang serupa dengan prosedur di atas. Berikut ini ditampilkan tabel hasil pemetaan koordinat balok tiga dimensi ke sistem koordinat dua dimensi.

Tabel 4-1

Hasil Pemetaan Koordinat 3D ke Koordinat 2D

Titik Pojok	Koordinat 3D			Koordinat 2D	
	x	y	z	x'	y'
A	0	0	0	0	0
B	0	0	3	0	0,395
C	1,6	0	3	-0,07	0,45
D	1,6	0	0	-0,064	-0,04
E	0	0,8	0	0,1	-0,004
F	0	0,8	3	0,1	0,4
G	1,6	0,8	3	0,06	0,46
H	1,6	0,8	0	0,057	-0,048

Apabila titik-titik koordinat 2D (dua dimensi) tersebut kita letakkan pada sistem salib sumbu dua dimensi diperoleh hasil seperti gambar 4-2 dibawah ini.



Gambar 4-2

Penggambaran Balok pada Sistem Koordinat Dua Dimensi

IV.3 Perencanaan Mode TE_{10}

IV.3.1 Analisa Persamaan Medan Mode TE_{10}

Jika kita tuliskan kembali persamaan medan listrik dan medan magnet untuk mode TE_{10} dan mengalikannya dengan faktor eksponensial $e^{j\omega t + \gamma_{nm}z}$, akan diperoleh medan rambatan gelombang elektromagnetik yang bergantung pada konstanta propagasi. Untuk frekuensi kerja yang berada diatas frekuensi cut-off ($f > f_c$), konstanta propagasi γ_{nm} akan menjadi $j\beta_{nm}$, sehingga diperoleh medan-medan sebagai berikut :

$$E_y = E_{y,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-1a)$$

$$H_x = H_{x,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-1b)$$

$$H_z = H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-1c)$$

Ketiga persamaan diatas menunjukkan suatu medan dimana amplitudonya berubah secara sinusoidal sebagai fungsi x atau y untuk mode TE_{nm} , atau hanya berubah terhadap x untuk mode TE_{10} . Dari persamaan diatas juga diketahui bahwa gelombang akan merambat sepanjang sumbu z, dan juga berubah terhadap waktu.

Karena gelombang yang akan kita gambar adalah gelombang yang tidak berubah terhadap waktu, maka ketergantungannya terhadap waktu dapat dieliminasi dengan menghilangkan faktor $e^{j\omega t}$. Sehingga akan kita peroleh persamaan medan yang bebas waktu sebagai berikut :

$$E_y = E_{y,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{-j\beta z} \quad (4-2a)$$

$$H_x = H_{x,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{-j\beta z} \quad (4-2b)$$

$$H_z = H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot e^{-j\beta z} \quad (4-2c)$$

Jika faktor $e^{j\beta z}$ kita nyatakan sebagai fungsi sinusoidal dengan mengambil bagian realnya, maka didapatkan persamaan :

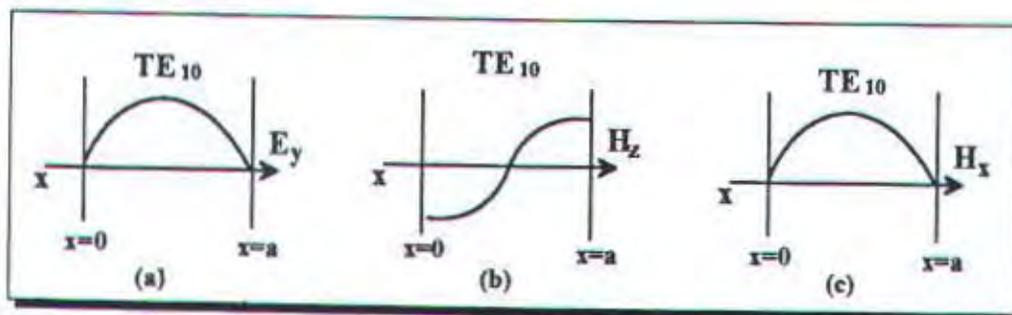
$$E_y = E_{y,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-2d)$$

$$H_x = H_{x,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-2e)$$

$$H_z = H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-2f)$$

Dari persamaan diatas diketahui amplitudo medan E_y akan bervariasi sebanyak setengah periode (π) pada sumbu x . Hal ini terjadi karena x maksimum yang ditempuh adalah sama dengan panjang penampang waveguide sisi a .

Hal ini berlaku juga untuk medan H_x dan medan H_z seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4-3

Variasi amplitudo komponen medan sebagai fungsi x

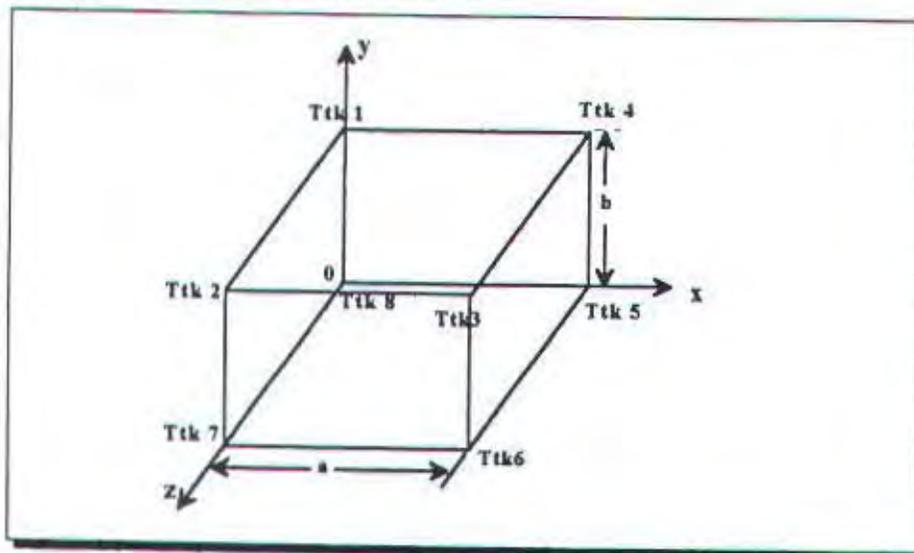
Persamaan (4-2d), (4-2e) dan (4-2f) juga memberikan informasi bahwa gelombang merambat sepanjang sumbu z . Karena itu untuk keperluan penggambaran gelombang, akan dibuat panjang waveguide sama dengan satu periode rambatannya. Hal dinyatakan sebagai berikut :

$$\beta z = 2\pi \quad (4-3)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan bentuk matematis yang dapat kita program dengan menggunakan komputer.

IV.3.2 Pembentukan Kerangka Waveguide pada Sistem Koordinat Cartesian

Agar bisa ditampilkan oleh komputer, maka harus dibuat kumpulan titik-titik dimana jika titik-titik itu dihubungkan akan membentuk sebuah kerangka waveguide. Gambar 4-4 menunjukkan kerangka waveguide yang dimaksud, dimana penampang waveguide sisi a terletak pada sumbu x, sisi b terletak pada sumbu y dan panjang waveguide terletak pada sumbu z.



Gambar 4-4

Kerangka waveguide pada sistem koordinat rectangular

Titik-titik pada pojok (Ttk1 sampai Ttk 8) inilah yang menyimpan informasi tentang bentuk waveguide jika titik-titik ini saling dihubungkan dengan aturan tertentu. Selanjutnya titik-titik inilah yang akan ditransformasikan untuk mendapatkan pandangan waveguide dari berbagai arah dan ukuran yang dikehendaki.

Jadi informasi yang disimpan untuk menampilkan citra waveguide adalah :

1. Titik-titik koordinat pada masing-masing pojok dari waveguide.

2. Cara menghubungkan titik satu dengan titik yang lain agar diperoleh bentuk yang dikendaki.

IV.3.3 Pembentukan Citra Medan Mode TE_{10}

IV.3.3.1 Pembentukan Citra Medan Listrik

Seperti halnya pada pembentukan citra waveguide, maka untuk mendapatkan citra medan E (listrik) pada mode TE_{10} juga dipakai metode kerangka dengan menentukan titik-titik yang akan menggambarkan pola medan yang terjadi.

Pada penggambaran medan E ini yang tergambar sebenarnya adalah garis gaya medan, yaitu suatu pola garis yang menggambarkan besar dan arah medan yang terjadi dalam ruang pada sistem koordinat rectanguler.

Untuk mode TE_{10} , medan listrik yang terjadi hanya pada arah sumbu y saja, sehingga dapat diketahui bahwa pola garis gaya yang terjadi akan berupa garis lurus sepanjang sumbu y. Arah dari garis gaya ini akan berubah sepanjang sumbu z, dan besarnya bervariasi sepanjang sumbu x.

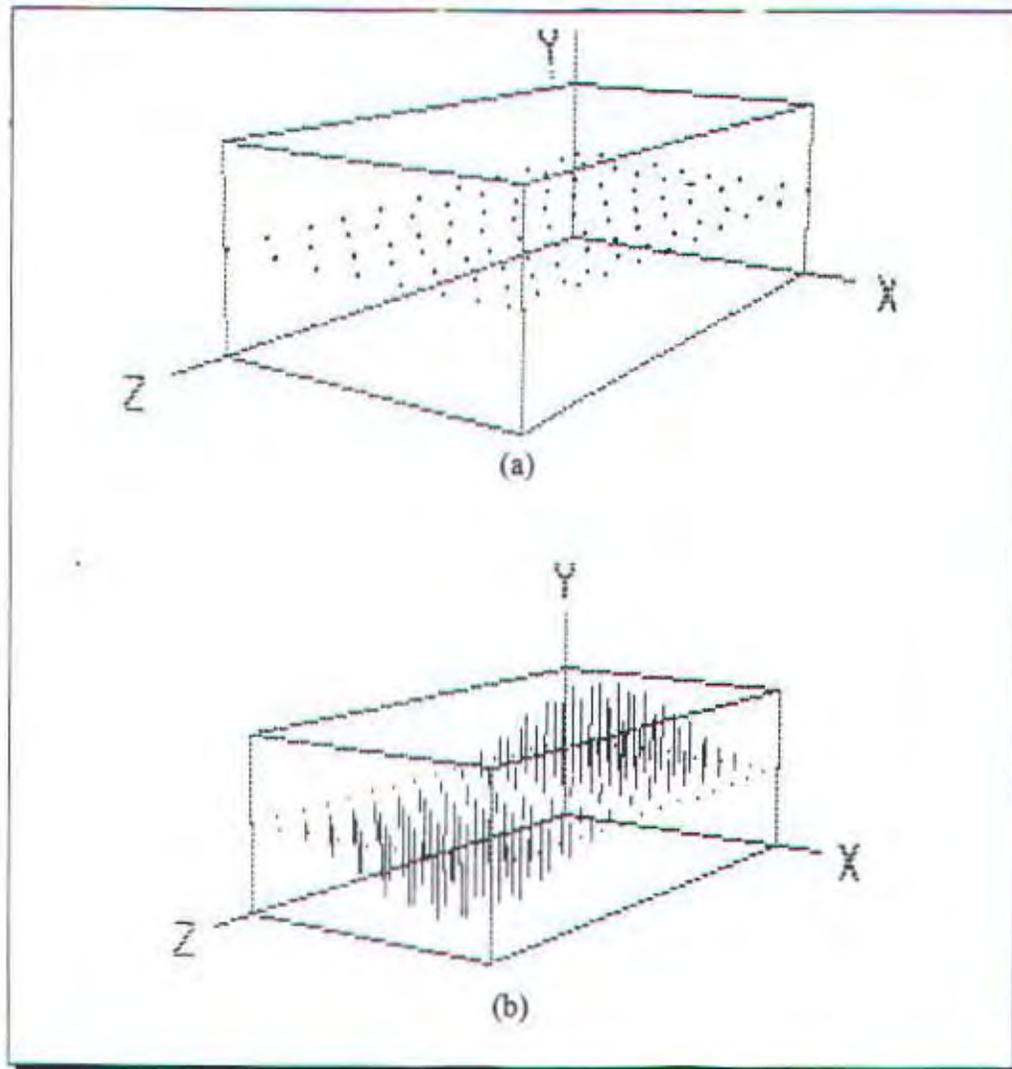
Untuk mengetahui pola sebenarnya yang terjadi, maka akan kita buat sekumpulan titik-titik uniform pada bidang $y=b/2$, yang ditunjukkan pada gambar 4-5a. Kemudian koordinat titik-titik tersebut kita masukkan ke persamaan (4-2d) dengan mengganti kuantitas $E_{y,10}$ dengan bilangan numerik tertentu sebagai amplitudo. Jika diambil $E_{y,10}=0.75$, maka persamaan (4-2d) dapat ditulis menjadi :

$$E_y = 0.75 \sin\left(\frac{\pi}{a} x\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-4)$$

Untuk keperluan pemrograman maka nilai a dan β juga kita ganti dengan nilai numerik tertentu, asalkan memenuhi syarat sebagai berikut :

- Untuk nilai a harus memenuhi $a/x = 1$.
- Untuk nilai β harus memenuhi $\beta z = 2\pi$.

Dengan suatu program komputer maka akan kita peroleh pola medan listrik untuk mode TE_{10} yang ditunjukkan pada gambar (4-5b) berikut ini :



Gambar 4-5

- (a). Kumpulan titik-titik serba-sama pada bidang $y=b/2$
 (b). Pola Garis Gaya medan E yang terjadi untuk Mode TE_{10}

Hasil yang diperoleh seperti tampak pada gambar 4-5b adalah pada bidang $y=b/2$. Jika sekumpulan titik-titik uniform kita buat pada bidang y yang lain, maka akan didapat hasil yang serupa. Hal ini terjadi karena medan E_y pada persamaan (4-4) diatas bukan merupakan fungsi dari y . Oleh sebab itu dapat kita simpulkan pola medan listrik yang terjadi pada mode TE_{10} adalah berupa garis lurus yang sejajar dengan sumbu y sepanjang $y=0$ sampai $y=b$. Dan arahnya berubah secara sinusoidal terhadap z .

Dari hasil yang diperoleh pada gambar 4-5b diatas, selanjutnya kita buat kumpulan titik-titik guna menyimpan informasi gambar yang terjadi, dan bagaimana titik-titik itu dihubungkan agar menghasilkan gambar yang dimaksud.

Titik-titik inilah yang nantinya akan diproses oleh komputer untuk menghasilkan gambar pada layar monitor sesuai dengan sudut pandang yang diambil dan ukuran gambar yang dikehendaki.

IV.3.3.2 Pembentukan Citra Medan Magnetik

Untuk mode TE_{10} , medan magnet yang terjadi adalah pada arah sumbu x dan pada arah sumbu z , sehingga dapat dianalisa bahwa pola garis gaya yang terjadi adalah merupakan jumlahan secara vektor dari medan magnet pada arah sumbu x dan medan magnet pada arah sumbu z . Pernyataan ini dapat ditulis secara matematis sebagai berikut :

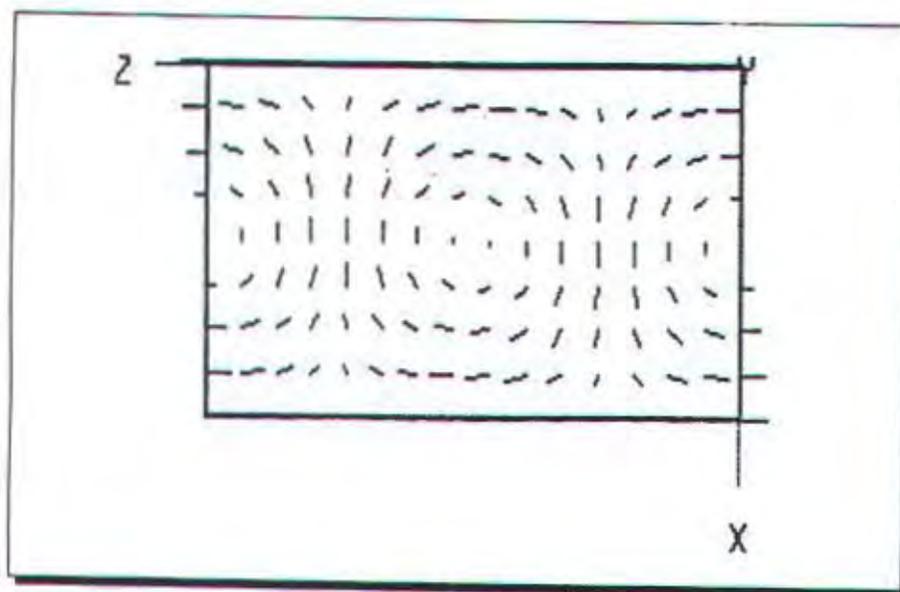
$$\begin{aligned}\vec{H} &= \vec{H}_x + \vec{H}_z \\ &= H_{x,10} \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \vec{a}_x + H_{z,10} \cos\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \vec{a}_z\end{aligned}\quad (4-5a)$$

Dari persamaan (4-5) dapat diketahui bahwa pola medan yang terjadi berupa kurva-kurva yang terletak pada bidang xz , sebab medan magnet mode TE_{10} tidak mempunyai komponen pada arah sumbu y .

Untuk mengetahui pola medan sebenarnya yang terjadi, maka akan kita buat sekumpulan titik-titik uniform pada bidang $y=b/2$. Kemudian koordinat titik-titik tersebut kita masukkan ke persamaan (4-5a) dengan mengganti kuantitas $H_{x,10}$ dan $H_{z,10}$ dengan bilangan numerik tertentu sebagai amplitudo. Jika diambil $H_{x,10}=1.0$, $H_{z,10}=0.5$ maka persamaan (4-5a) dapat ditulis menjadi :

$$\vec{H} = 1 \sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) + 0.5 \cos\left(\frac{\pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-5b)$$

Dengan mengganti a dan β dengan nilai numerik tertentu yang memenuhi syarat seperti diatas dan memasukkanya ke program komputer maka akan kita peroleh pola medan magnet untuk mode TE_{10} yang ditunjukkan pada gambar (4-6) berikut ini :



Gambar 4-6

Pola Garis Gaya medan H yang terjadi untuk Mode TE_{10}

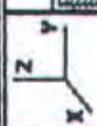
Hasil yang diperoleh seperti tampak pada gambar 4-6 adalah pada bidang $y=b/2$. Jika sekumpulan titik-titik uniform kita buat pada bidang y yang lain, maka akan didapat hasil yang serupa. Hal ini terjadi karena medan H_x dan H_z pada persamaan (4-5) diatas bukan merupakan fungsi dari y . Oleh sebab itu dapat kita simpulkan pola medan listrik yang terjadi pada mode TE_{10} adalah berupa kumpulan gelang-gelang dengan pusat yang konsentris yang terletak pada bidang xz , atau dapat dikatakan medan magnetik membentuk loop sepanjang rambatan yang terletak sejajar dengan dinding atas dan bawah serta tangensial ke dinding-dinding samping. Hal ini ternyata sesuai dengan apa yang telah dijabarkan secara teori pada pembahasan bab II.4.3 yaitu tentang kedudukan komponen medan Mode TE.

Selanjutnya dari hasil yang diperoleh pada gambar 4-6 diatas, akan kita buat kumpulan titik-titik guna menyimpan informasi gambar yang terjadi, dan bagaimana titik-titik itu dihubungkan agar menghasilkan gambar yang dimaksud.

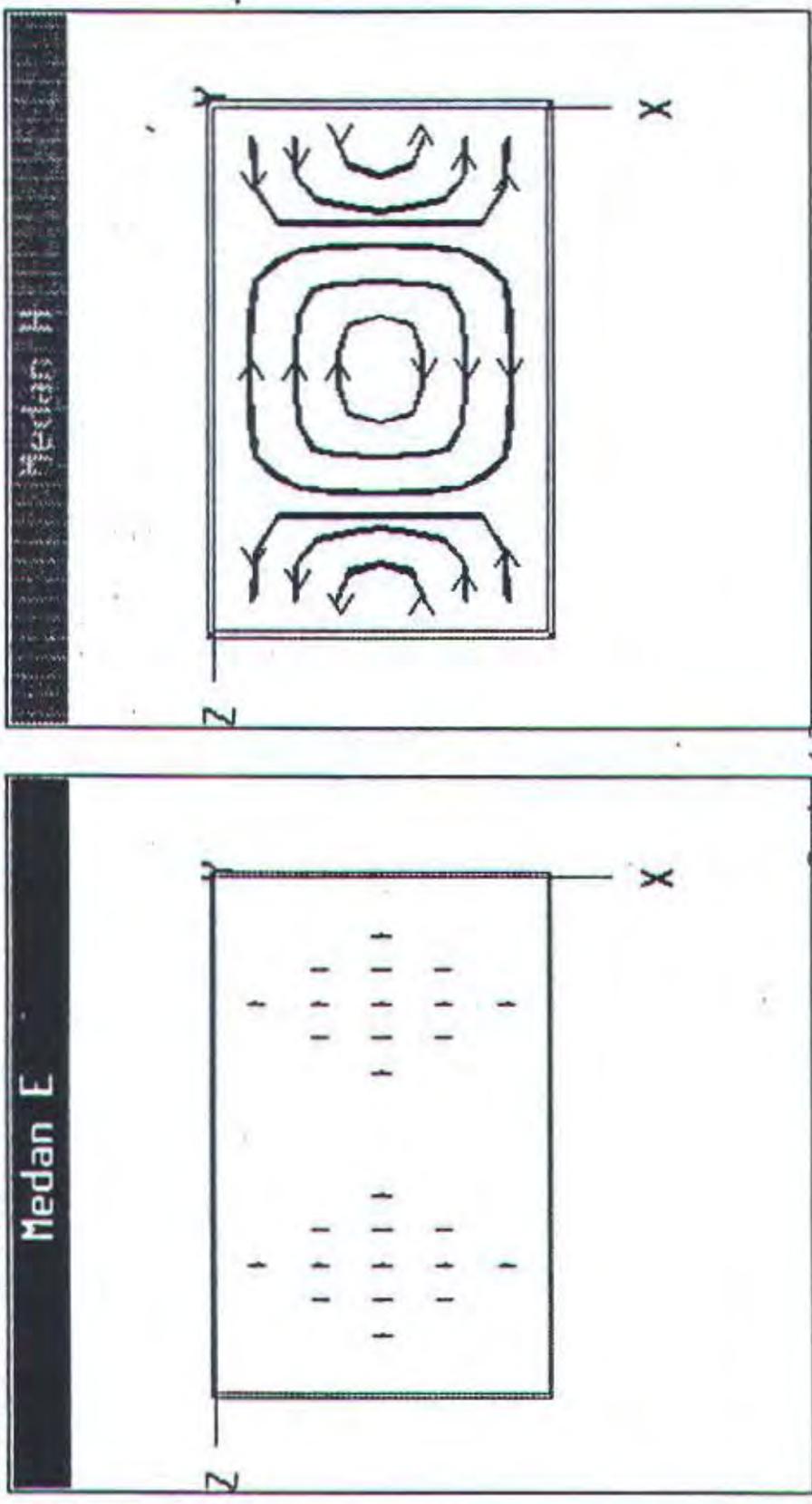
Titik-titik inilah yang nantinya akan diproses oleh komputer untuk menghasilkan gambar pada layar monitor sesuai dengan sudut pandang yang diambil dan ukuran gambar yang dikehendaki.

Setelah kita peroleh titik-titik yang menyimpan informasi tentang pola medan listrik dan medan magnetik yang terjadi pada mode TE_{10} ini, maka sekarang telah siap untuk menampilkan kembali dalam berbagai sudut pandang dan ukuran yang dikehendaki.

Berikut ini akan ditunjukkan hasil program yang menggambarkan pola medan listrik dan medan magnetik secara dua dimensi dan tiga dimensi.

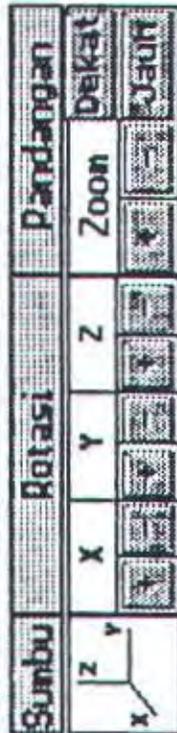
Sumbu	Rotasi	Pandangan	
			
			

View : Medan E & H Mode : TE10

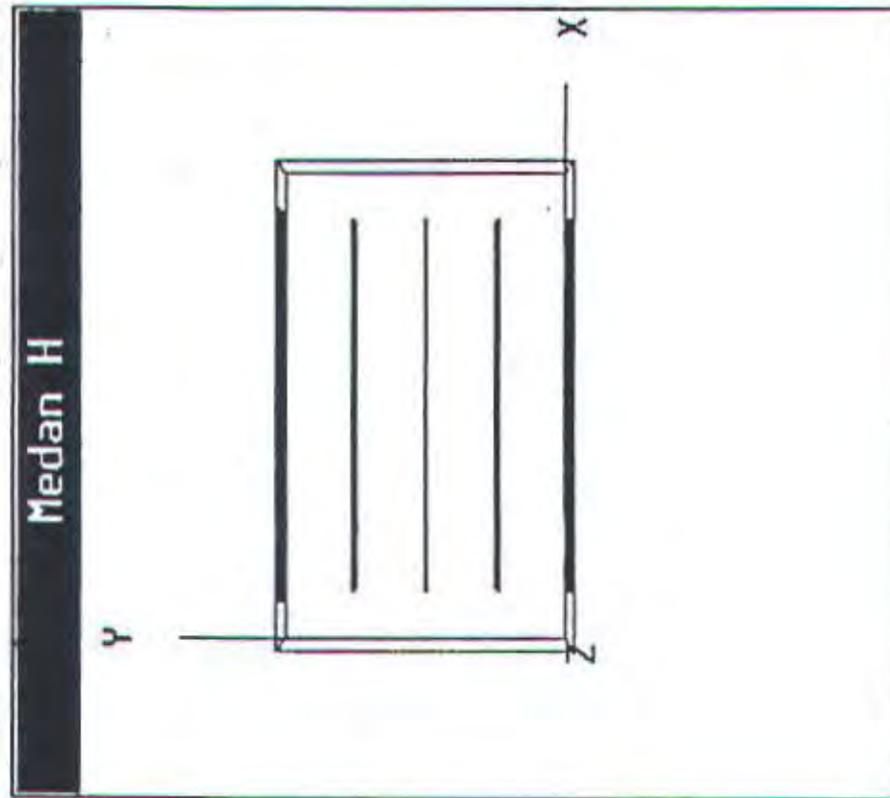
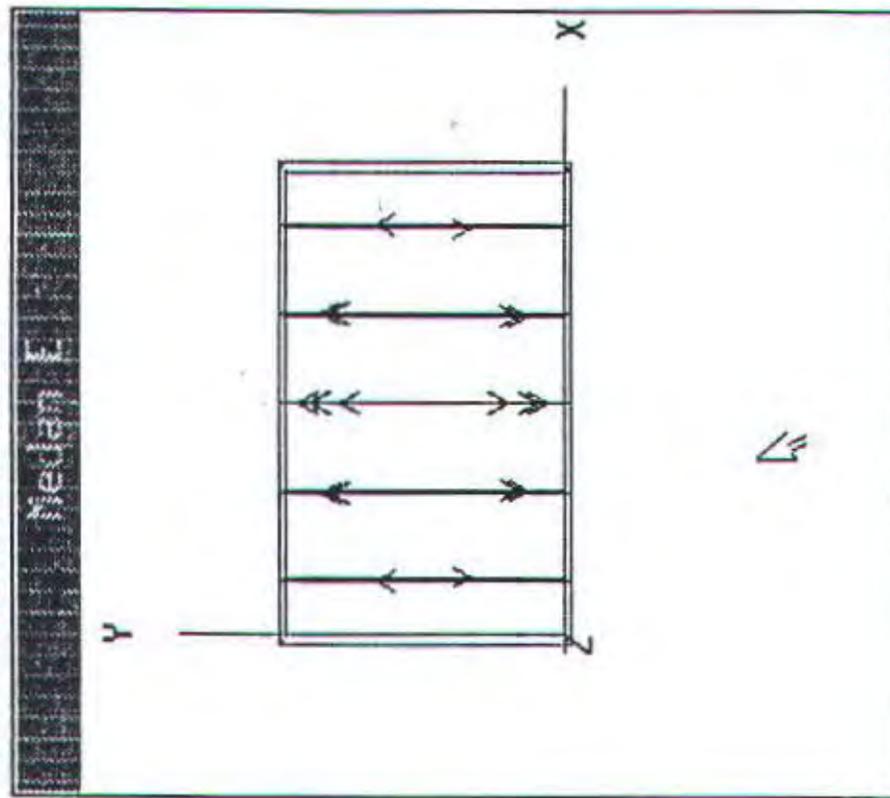


Gambar 4-7a

Pola mode TE10 tampak atas



View : Medan E & H Mode : TE10

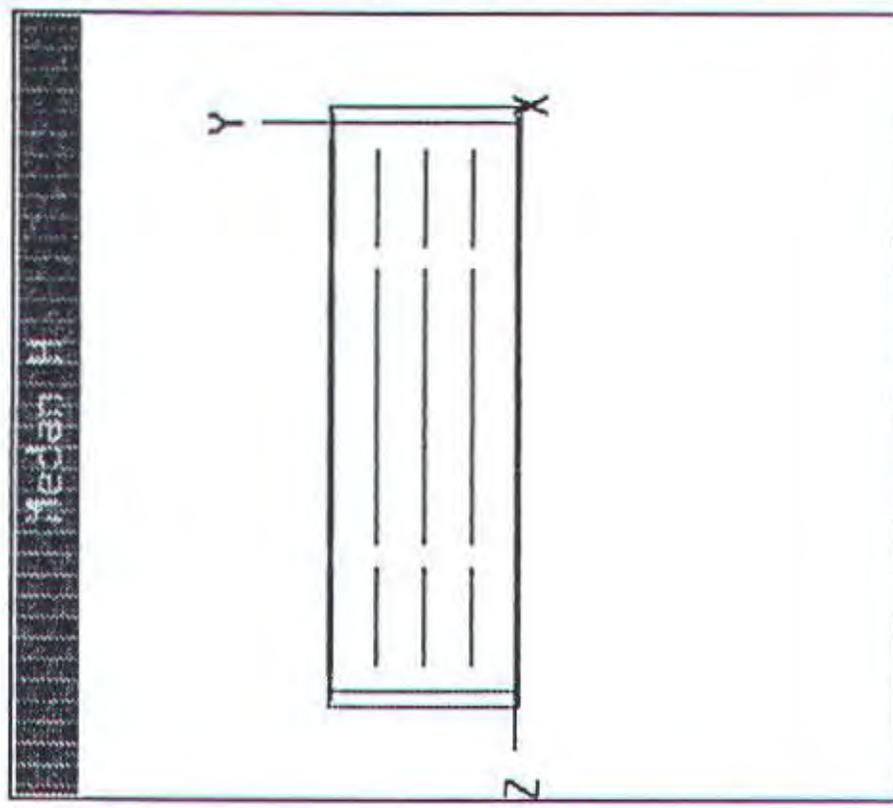
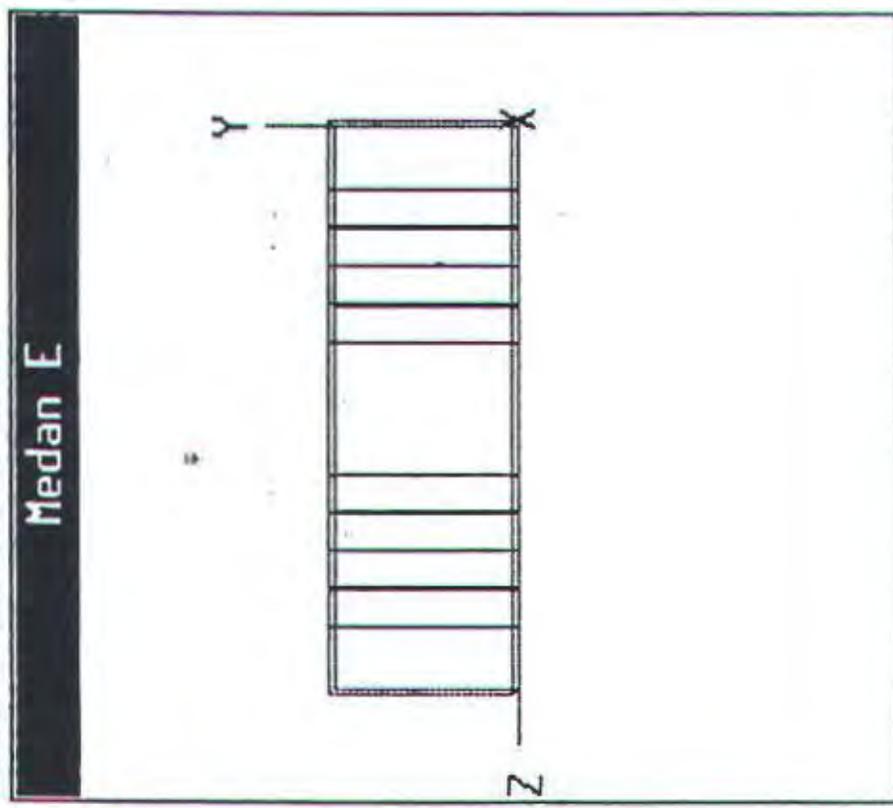


Gambar 4-7b

Pola mode TE10 tampak depan

Sumbu	Rotasi			Pandangan	
	X	Y	Z	Dekat	Jauh

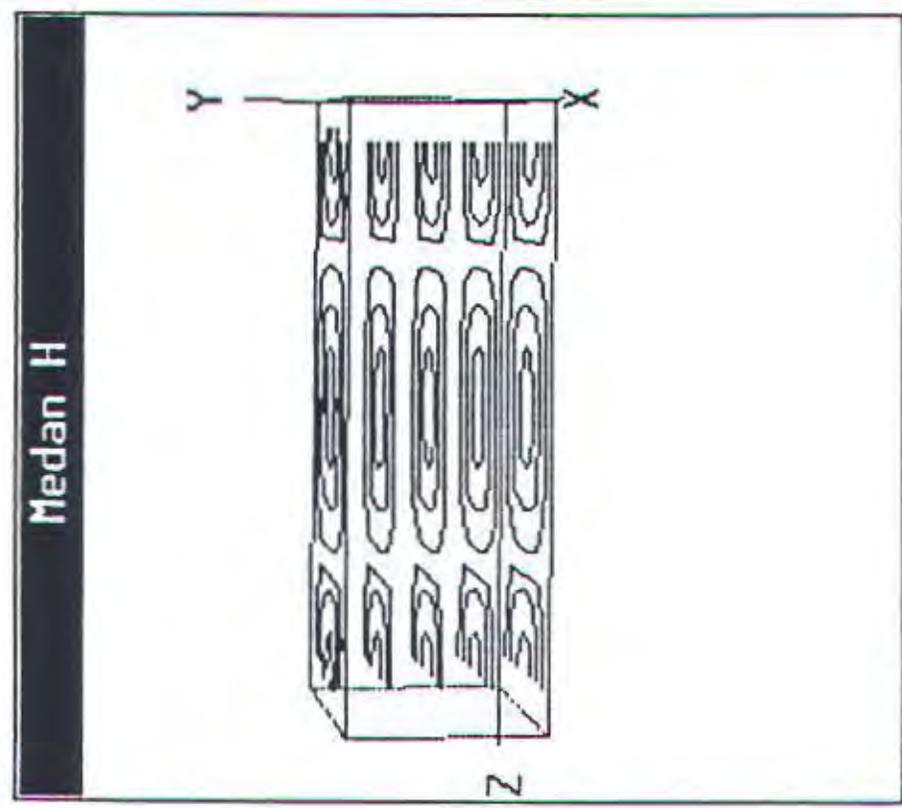
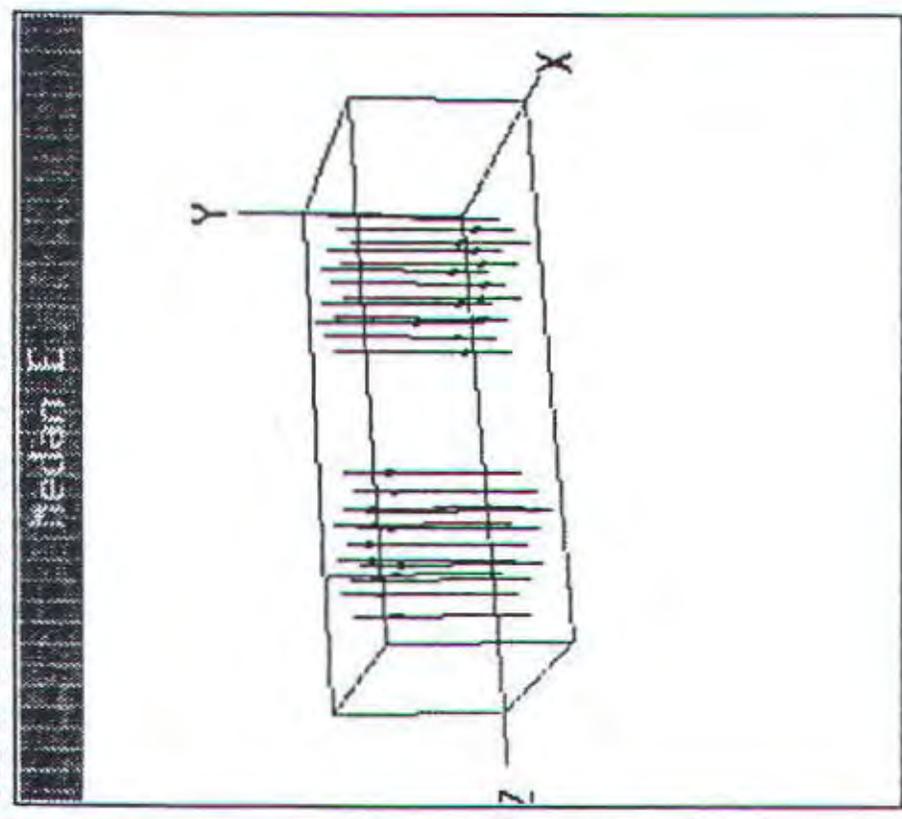
View : Medan E & H Mode : TE10



Gambar 4-7c
Pola mode TE10 tampak samping

Sumbu	Rötasi			Pandangan	
	X	Y	Z	Zoom	Dekat

View : Medan E & H Mode : TE10



Gambar 4-7d
Pola mode TE10 tampak dari sudut pandang tertentu

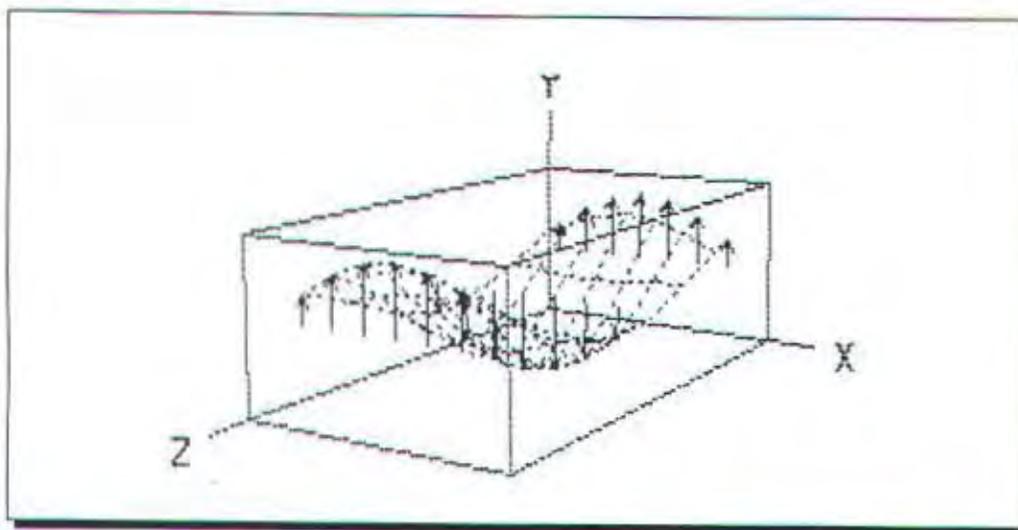
IV.3.4 Pembentukan Citra Komponen Mode TE_{10}

IV.3.4.1 Pembentukan Citra Komponen E_y

Pada penggambaran citra komponen E_y ini, yang digambar adalah titik-titik yang menunjukkan besarnya amplitudo gelombang sebagai fungsi x, y atau z , dengan cara mengambil sekumpulan titik-titik pada bidang tertentu dimana besarnya amplitudo gelombang akan diperoleh. Kemudian titik-titik yang menyatakan besarnya amplitudo tersebut saling dihubungkan sehingga menghasilkan gambar yang dimaksud.

Untuk itu, pada pembentukan komponen medan E_y ini akan dipilih kumpulan titik-titik uniform pada bidang $y=b/2$ seperti ditunjukkan pada gambar (4-5a). Titik-titik yang saling dihubungkan adalah titik-titik yang mempunyai koordinat x yang sama sepanjang arah rambatan gelombang yaitu sumbu z .

Dengan suatu program komputer akan diperoleh tampilan yang ditunjukkan gambar 4-8 dibawah ini.



Gambar 4-8
Komponen Medan E_y

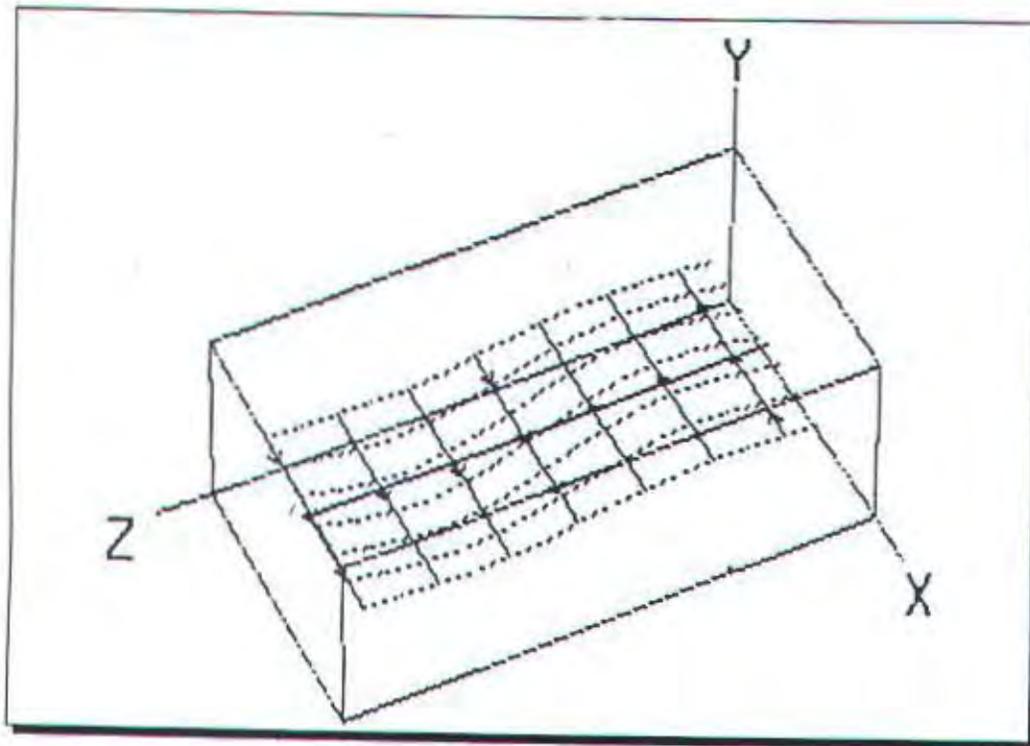
Pada gambar 4-8 terlihat bahwa amplitudo gelombang berubah secara sinusoidal sebagai fungsi dari x . Dari beberapa variasi sinusoidal yang terjadi dapat dilihat bahwa untuk sinusoidal yang terletak pada $x=a/2$ mempunyai amplitudo terbesar dibanding sinusoidal yang lain. Hal ini bersesuaian dengan apa ditunjukkan pada gambar 4-3a, yaitu variasi amplitudo komponen medan sebagai fungsi x .

Gambar 4-8 juga memberikan informasi bahwa sebagai fungsi x , pada $x \rightarrow 0$ dan $x \rightarrow a$ amplitudo gelombang akan mendekati nol pula sehingga akan memenuhi syarat batas konduktor sempurna pada dinding waveguide, yaitu bahwa medan listrik tangensial pada dinding waveguide adalah sama dengan nol ($E_t = 0$).

IV.3.4.2 Pembentukan Citra Komponen H_x

Seperti halnya pada penggambaran komponen E_y , pada pembentukan komponen medan H_x ini juga akan dipilih kumpulan titik-titik uniform pada bidang $y=b/2$ seperti ditunjukkan pada gambar (4-5a). Untuk penggambaran komponen medan H_x ini titik-titik yang saling dihubungkan adalah titik-titik yang mempunyai koordinat x yang sama sepanjang arah rambatan gelombang yaitu sumbu z .

Dengan suatu program komputer akan diperoleh tampilan yang ditunjukkan gambar 4-9 dibawah ini.



Gambar 4-9
Komponen Medan H_x

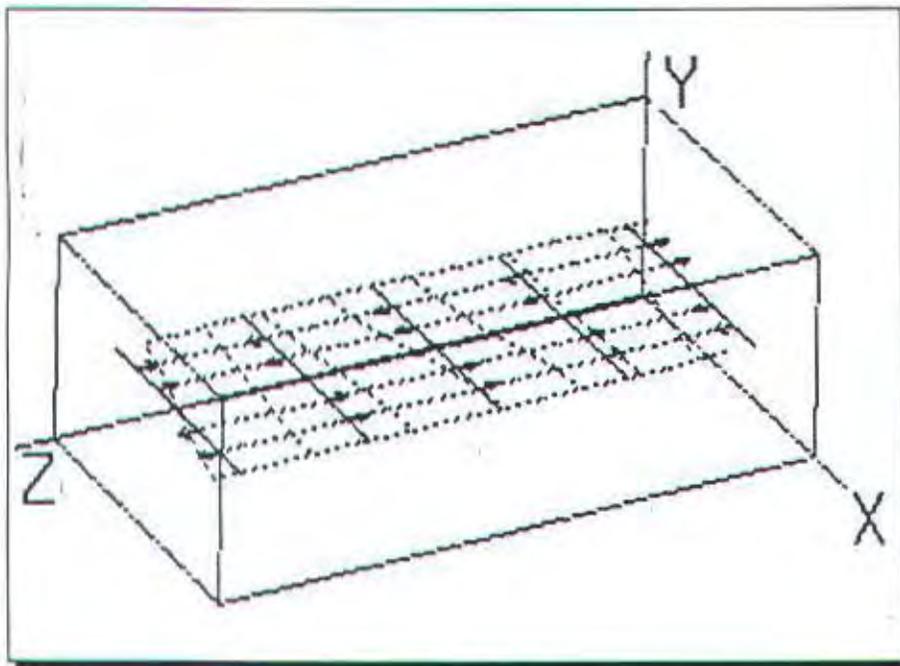
Pada gambar 4-9 terlihat bahwa amplitudo gelombang berubah secara sinusoidal terhadap x dan z . Amplitudo gelombang yang terletak pada $x=a/2$ adalah nol. Hal ini bersesuaian dengan apa ditunjukkan pada gambar 4-3b, yaitu variasi amplitudo komponen medan sebagai fungsi x .

IV.3.4.3 Pembentukan Citra Komponen H_x

Seperti halnya pada penggambaran komponen E_y dan H_x , pada pembentukan komponen medan H_x ini juga akan dipilih kumpulan titik-titik uniform pada bidang $y=b/2$ seperti ditunjukkan pada gambar (4-5a). Untuk penggambaran komponen

medan H_x ini titik-titik yang saling dihubungkan adalah titik-titik sepanjang sumbu x .

Dengan suatu program komputer akan diperoleh tampilan yang ditunjukkan gambar 4-10 dibawah ini.



Gambar 4-10
Komponen Medan H_x

Pada gambar 4-10 terlihat bahwa amplitudo gelombang berubah secara sinusoidal terhadap x dan z . Amplitudo gelombang untuk yang terletak pada $x=a/2$ adalah maksimum. Hal ini bersesuaian dengan apa ditunjukkan pada gambar 4-3c, yaitu variasi amplitudo komponen medan sebagai fungsi x .

Setelah kita menganalisa dan membuat citra pola medan yang terjadi pada mode TE_{10} , selanjutnya akan dianalisa dan dibuat pola medan yang terjadi pada mode TM_{11} .

IV.4 Perencanaan Mode TM_{11}

IV.4.1 Analisa Persamaan Medan Mode TM_{11}

Jika kita tuliskan kembali persamaan medan listrik dan medan magnet untuk mode TM_{11} dan mengalikannya dengan faktor eksponensial, akan diperoleh medan rambatan gelombang elektromagnetik yang bergantung pada konstanta propagasi. Untuk frekuensi kerja yang berada diatas frekuensi cut-off ($f > f_c$), konstanta propagasi γ_{nm} akan menjadi $j\beta_{nm}$, sehingga persamaan (3-28) dan (3-31a) sampai (3-31d) dituliskan menjadi :

$$E_z = E_{z,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-6a)$$

$$E_x = E_{x,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-6b)$$

$$E_y = E_{y,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-6c)$$

$$H_x = H_{x,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-6d)$$

$$H_y = H_{y,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4-6e)$$

Persamaan diatas menunjukkan suatu medan dimana amplitudonya berubah secara sinusoidal sebagai fungsi x , y . Dari persamaan diatas juga diketahui bahwa gelombang akan merambat sepanjang sumbu z , dan juga berubah terhadap waktu.

Karena gelombang yang akan kita gambar adalah gelombang yang tidak berubah terhadap waktu, maka ketergantungannya terhadap waktu dapat dieliminasi dengan menghilangkan faktor $e^{j\omega t}$. Sehingga akan kita peroleh persamaan medan yang bebas waktu sebagai berikut :

$$E_x = E_{x,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (4-7a)$$

$$E_y = E_{y,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (4-7b)$$

$$E_z = E_{z,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (4-7c)$$

$$H_x = H_{x,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (4-7d)$$

$$H_y = H_{y,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (4-7e)$$

Jika faktor $e^{-j\beta z}$ kita nyatakan sebagai fungsi sinusoidal dengan mengambil bagaian realnya, maka didapatkan persamaan :

$$E_x = E_{x,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-8a)$$

$$E_y = E_{y,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-8b)$$

$$E_z = E_{z,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-8c)$$

$$H_x = H_{x,nn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-8d)$$

$$H_y = H_{y,nn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cdot \cos(\beta z) \quad (4-8e)$$

Dari persamaan diatas diketahui amplitudo medan E_x akan berubah secara sinusoidal sebagai fungsi x dan y . Hal ini berlaku juga berlaku untuk keempat persamaan yang lain, yaitu : E_y , E_z , H_x dan H_y .

Ini menunjukkan bahwa amplitudo komponen-komponen medan pada mode TM_{11} akan berubah pada setiap titik pada bidang xy . Persamaan diatas merupakan persamaan bentuk matematis yang dapat kita program dengan menggunakan komputer.

IV.4.2 Pembentukan Citra Medan Mode TM_{11}

IV.4.2.1 Pembentukan Citra Medan Listrik

Dengan menggunakan metode yang sama seperti halnya pada pembentukan citra medan mode TE_{10} , maka untuk mendapatkan citra medan E (listrik) pada

mode TM_{11} juga dipakai metode kerangka dengan menentukan titik-titik yang akan menggambarkan pola medan yang terjadi.

Untuk mode TM_{11} , medan listrik yang terjadi pada arah sumbu x , y dan z , sehingga pola garis gaya yang terjadi adalah berupa penjumlahan vektor dari ketiga komponen medan listriknya yaitu E_x , E_y dan E_z . Hal ini dapat dituliskan seperti persamaan dibawah ini :

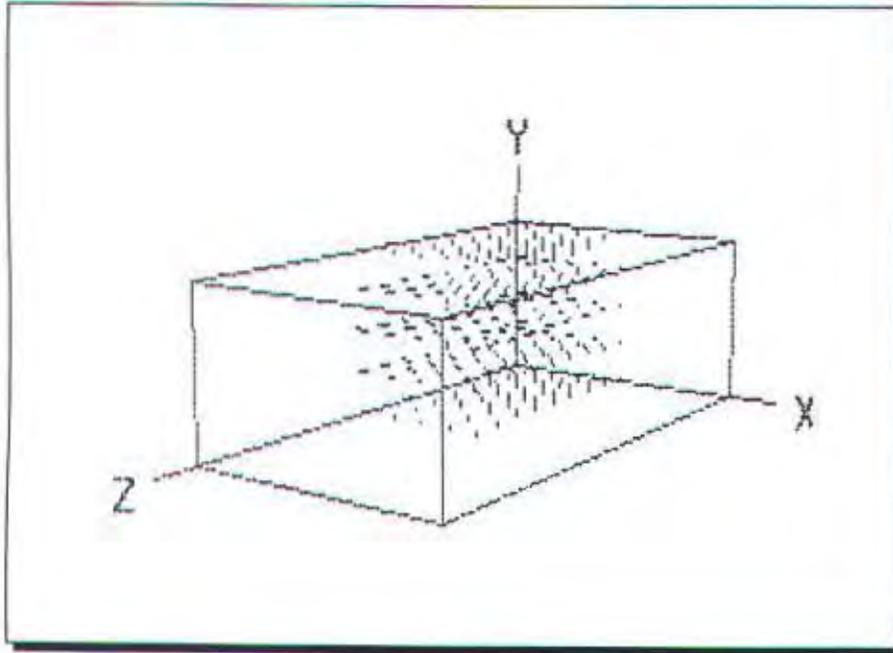
$$\begin{aligned}\bar{E} &= \bar{E}_x + \bar{E}_y + \bar{E}_z \\ &= \left[E_{x,mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_x + E_{y,mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_y + \right. \\ &\quad \left. E_{z,mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_z \right] \cdot \cos(\beta z)\end{aligned}\quad (4-9a)$$

Dari persamaan (4-9a) dapat diketahui bahwa pola medan listrik yang terjadi berupa kurva-kurva yang akan menempati ruang sebab terdapat komponen-komponen pada sumbu x , y dan z .

Untuk mengetahui pola medan sebenarnya yang terjadi, maka akan kita buat sekumpulan titik-titik uniform pada pada ruang dalam waveguide. Kemudian koordinat titik-titik tersebut kita masukkan ke persamaan (4-9a) dengan mengganti kuantitas $E_{x,11}$, $E_{y,11}$ dan $E_{z,11}$ dengan bilangan numerik tertentu sebagai amplitudo. Jika diambil $E_{x,11}=1.0$, $E_{y,11}=0.75$ dan $E_{z,11}=0.5$ maka persamaan (4-9a) dapat ditulis menjadi :

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \left[1 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_x + 0.75 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_y + \right. \\ &\quad \left. 0.5 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_z \right] \cdot \cos(\beta z)\end{aligned}\quad (4-9b)$$

Dengan suatu program komputer maka akan kita peroleh pola medan listrik untuk mode TM_{11} yang ditunjukkan pada gambar (4-11) berikut ini :



Gambar 4-11

Pola Garis Gaya medan E yang terjadi untuk Mode TM_{11}

Hasil yang diperoleh seperti tampak pada gambar 4-11 adalah medan yang menempati ruang.

Dari hasil yang diperoleh pada gambar 4-11 diatas, selanjutnya kita buat kumpulan titik-titik guna menyimpan informasi gambar yang terjadi, dan bagaimana titik-titik itu dihubungkan agar menghasilkan gambar yang dimaksud.

Titik-titik inilah yang nantinya akan diproses oleh komputer untuk menghasilkan gambar pada layar monitor sesuai dengan sudut pandang yang diambil dan ukuran gambar yang dikehendaki.

IV.4.2.2 Pembentukan Citra Medan Magnetik

Untuk mode TM_{11} , medan magnet yang terjadi adalah pada arah sumbu x dan pada arah sumbu y , sehingga dapat dianalisa bahwa pola garis gaya yang terjadi adalah merupakan jumlahan secara vektor dari medan magnet pada arah sumbu x dan medan magnet pada arah sumbu y . Pernyataan ini dapat ditulis secara matematis sebagai berikut :

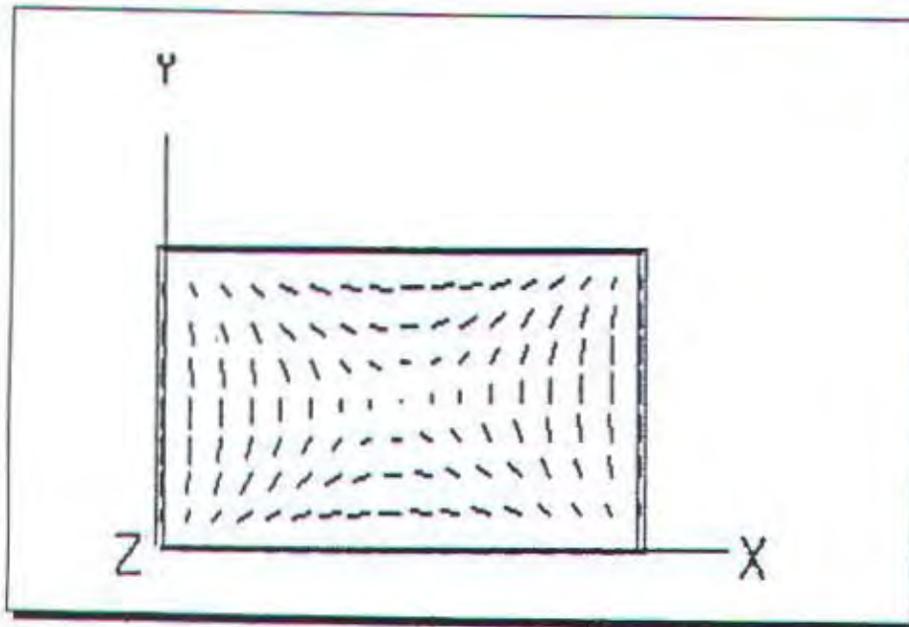
$$\begin{aligned}\bar{H} &= \bar{H}_x + \bar{H}_y \\ &= \left[H_{x,mm} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_x + H_{y,mm} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_y \right] \cos(\beta z) \\ &\dots \quad (4-10a)\end{aligned}$$

Dari persamaan (4-10) dapat diketahui bahwa pola medan yang terjadi berupa kurva-kurva yang terletak pada bidang xy , sebab medan magnet mode TM_{11} tidak mempunyai komponen pada arah sumbu z .

Untuk mengetahui pola medan sebenarnya yang terjadi, maka akan kita buat sekumpulan titik-titik uniform pada bidang $z = \pi$. Kemudian koordinat titik-titik tersebut kita masukkan ke persamaan (4-10a) dengan mengganti kuantitas $H_{x,11}$ dan $H_{y,11}$ dengan bilangan numerik tertentu sebagai amplitudo. Jika diambil $H_{x,11}=1.0$, $H_{y,11}=0.75$ maka persamaan (4-10a) dapat ditulis menjadi :

$$\begin{aligned}\bar{H} &= \left[1 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_x + 0.75 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \bar{a}_y \right] \cos(\beta z) \\ &\dots \quad (4-10b)\end{aligned}$$

Dengan mengganti a dan β dengan nilai numerik tertentu yang memenuhi syarat seperti diatas dan memasukkannya ke program komputer maka akan kita peroleh pola medan magnet untuk mode TM_{11} yang ditunjukkan pada gambar (4-12) berikut ini :



Gambar 4-12

Pola Garis Gaya medan H yang terjadi untuk Mode TM_{11}

Selanjutnya dari hasil yang diperoleh pada gambar 4-12 diatas, akan kita buat sekumpulan titik-titik guna menyimpan informasi gambar yang terjadi, dan bagaimana titik-titik itu dihubungkan agar menghasilkan gambar yang dimaksud.

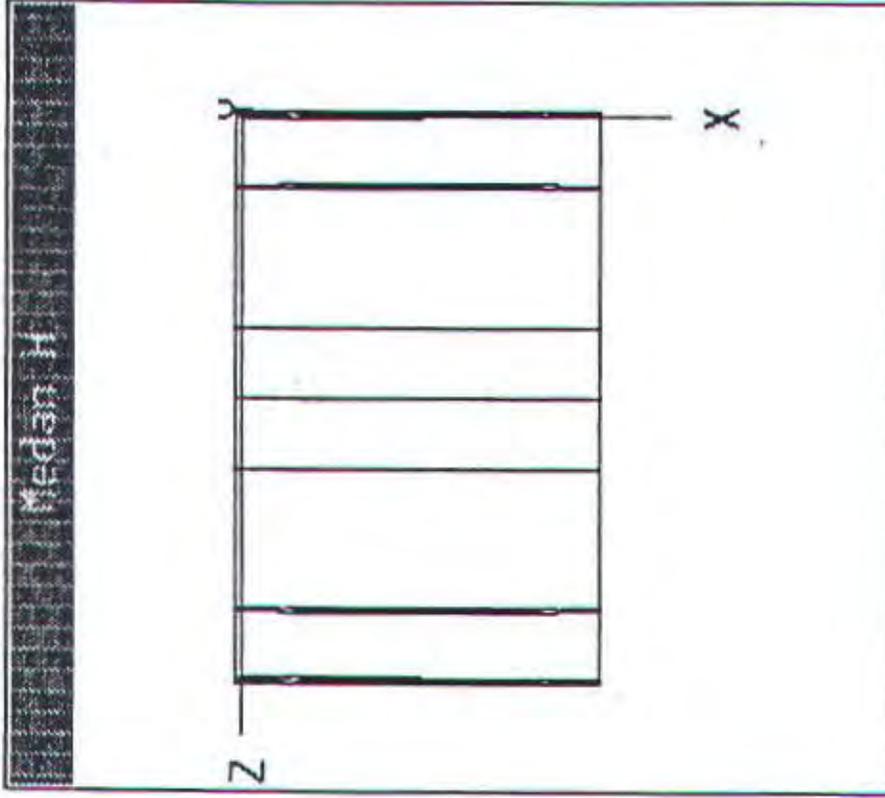
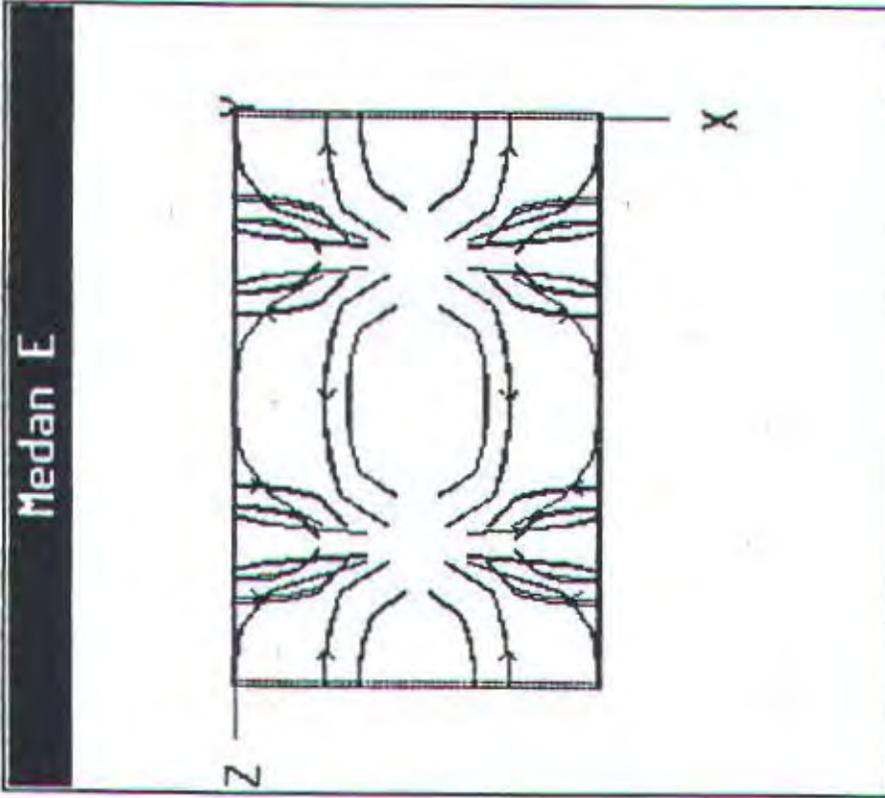
Titik-titik inilah yang nantinya akan diproses oleh komputer untuk menghasilkan gambar pada layar monitor sesuai dengan sudut pandang yang diambil dan ukuran gambar yang dikehendaki.

Setelah kita peroleh titik-titik yang menyimpan informasi tentang pola medan listrik dan medan magnetik yang terjadi pada mode TM_{11} ini, maka sekarang telah siap untuk menampilkan kembali dalam berbagai sudut pandang dan ukuran yang dikehendaki.

Berikut ini ditunjukkan hasil program yang menggambarkan pola medan listrik dan medan magnetik secara dua dimensi dan tiga dimensi.

Sumbu	Rotasi			Pandangan	
	X	Y	Z	Zoom	Dekat
	Jauh				

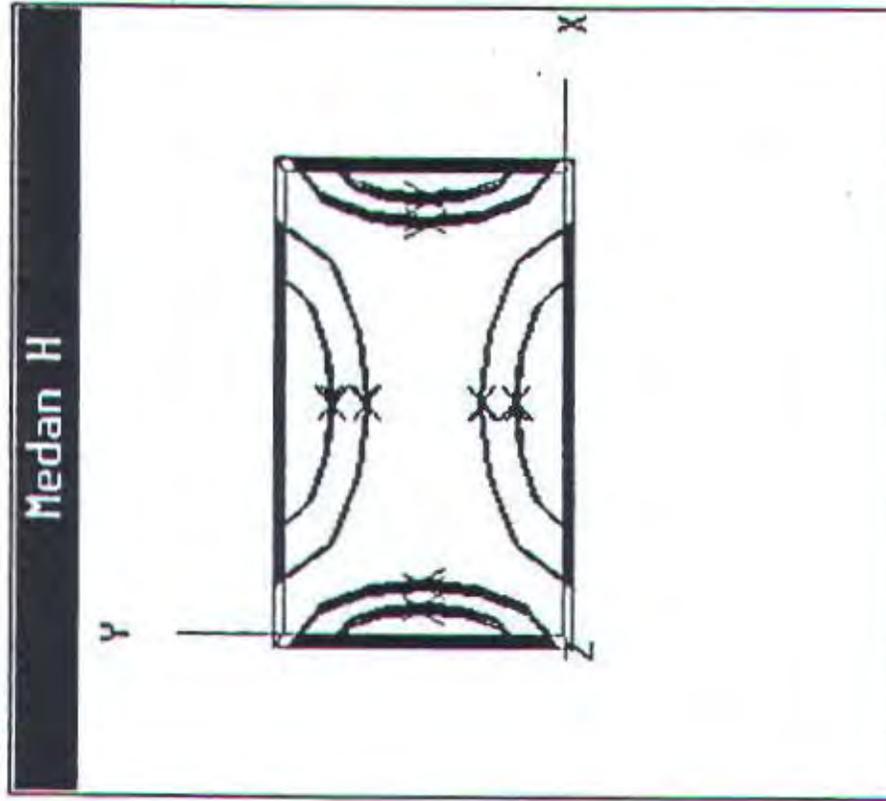
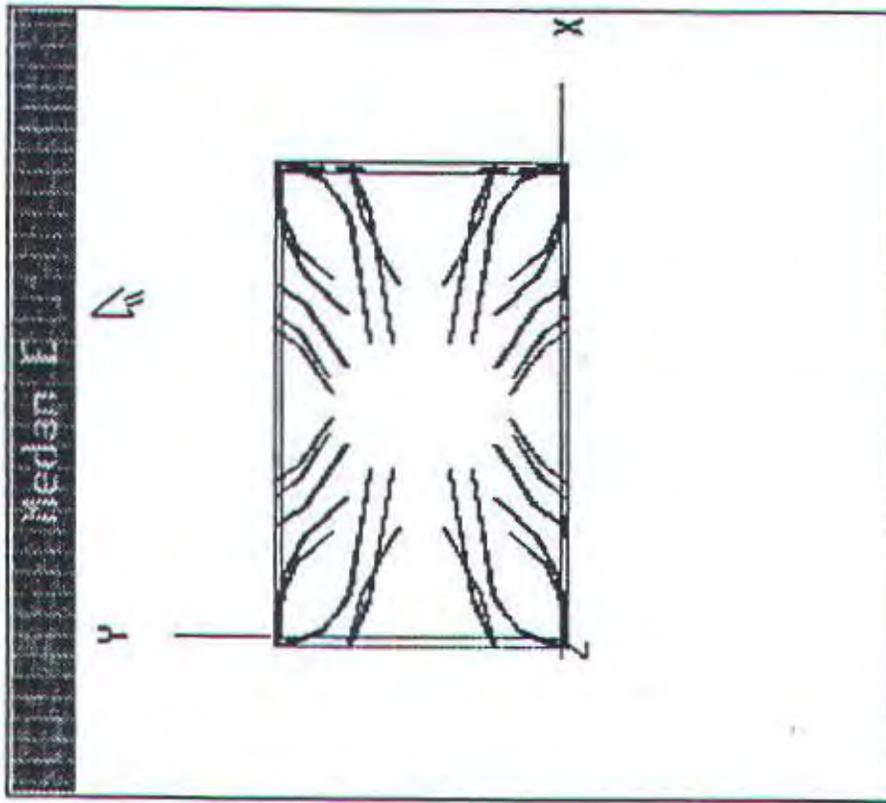
View : Medan E & H Mode : TM11



Gambar 4-13a
Pola mode TM11 tampak atas

Sumbu	Rotasi			Pandangan	
	X	Y	Z	Zoom	Dekat

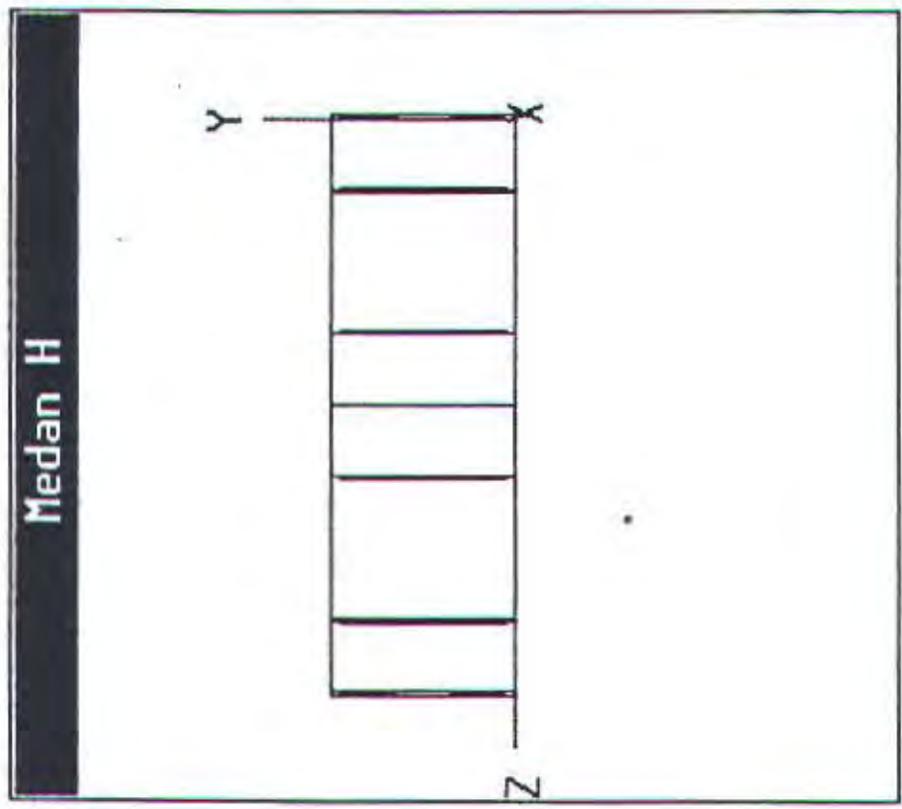
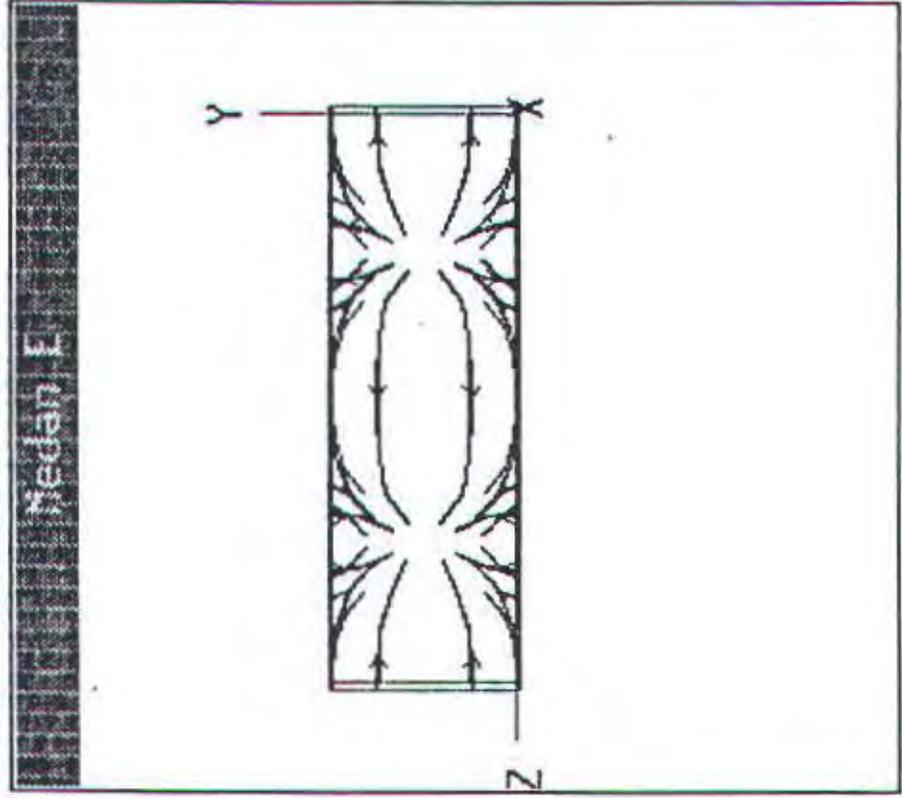
View : Medan E & H Mode : TM11



Gambar 4-13b
Pola mode TM11 tampak depan

Sumbu	Rotasi			Pandangan	
	x	y	z	Zoom	Dekat

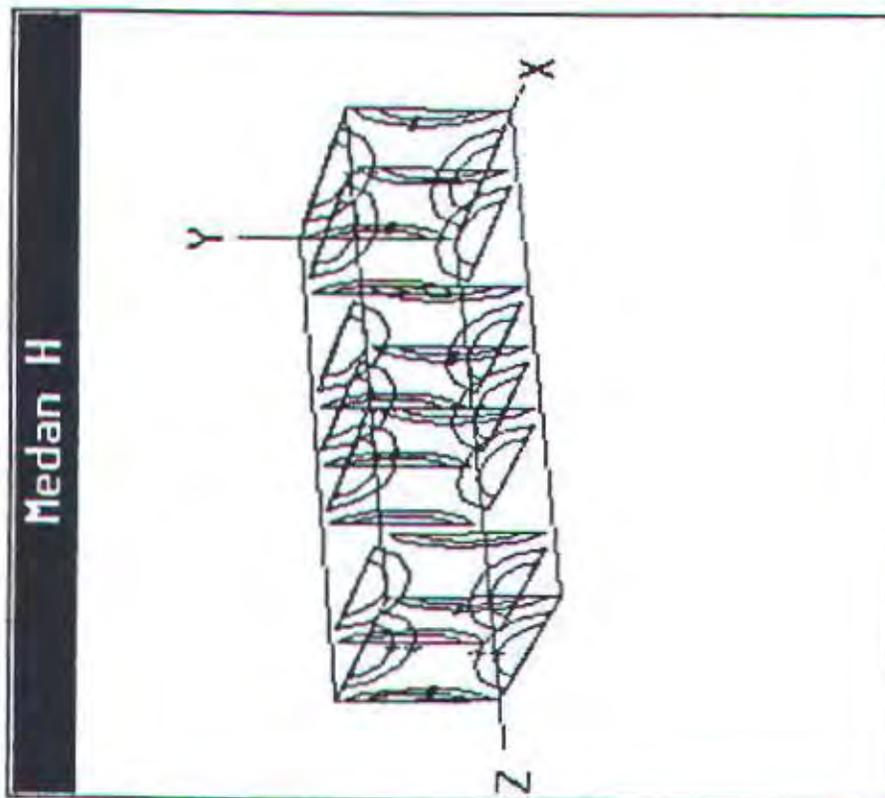
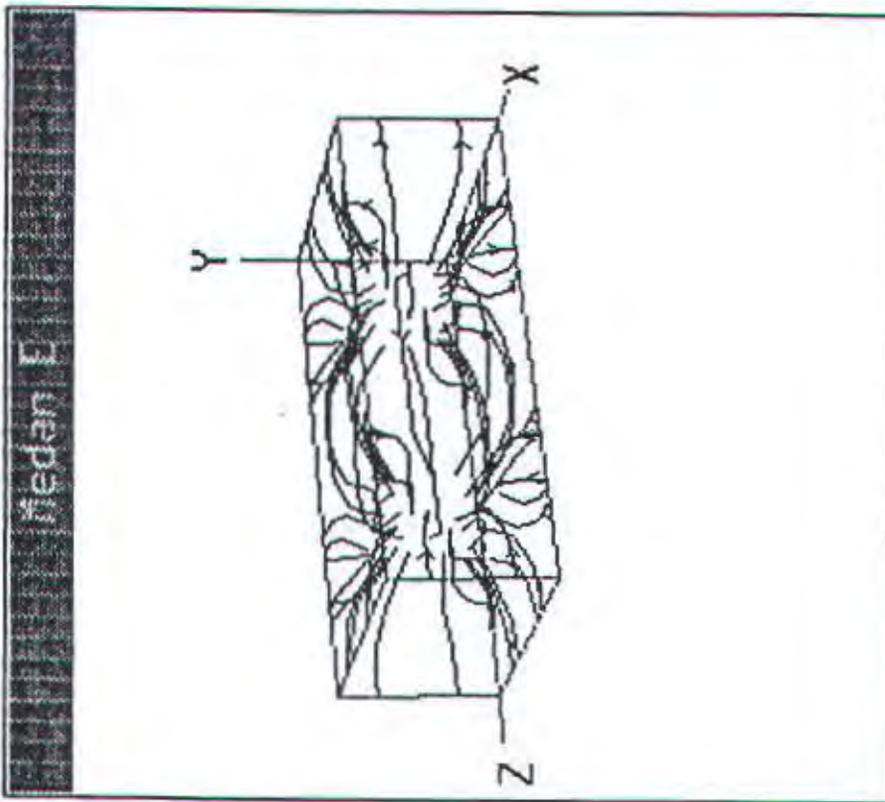
View : Medan E & H Mode : TM11



Gambar 4-13c
Pola mode TM11 tampak samping

Sumbu	Rotasi			Pandangan	
	X	Y	Z	Zoom	Dekat

View : Medan E & H Mode : TM11

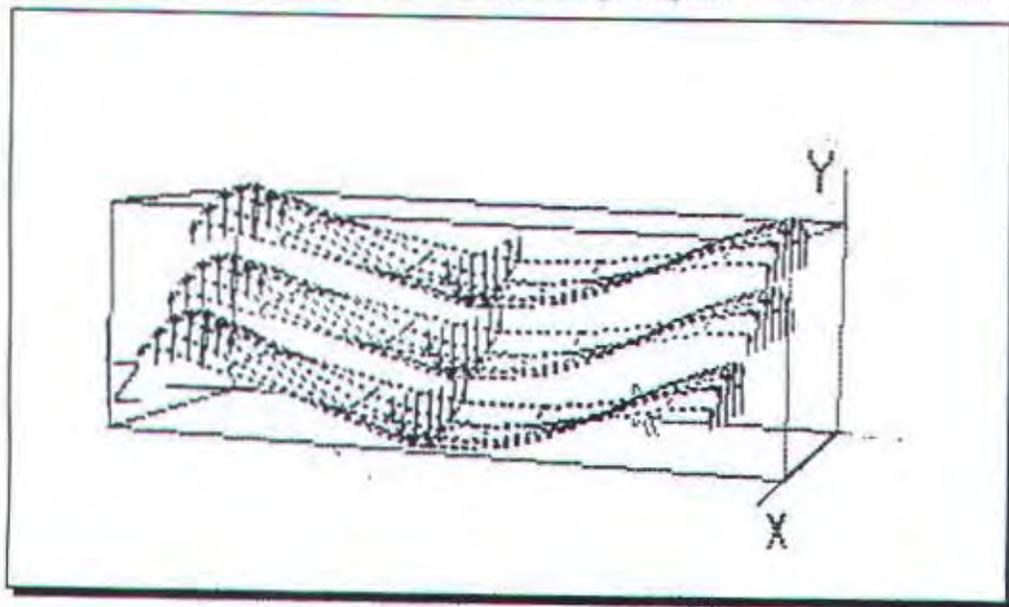


Gambar 4-13d
Pola mode TM11 dari sudut pandang tertentu

IV.4.3 Pembentukan Citra Komponen Mode TM_{11}

Dari rumus komponen medan pada mode TM_{11} yang ditunjukkan oleh persamaan (4-8) dapat dilihat bahwa baik komponen E_x , E_y , E_z , H_x dan H_y adalah merupakan fungsi dari tiga peubah yaitu x , y dan z . Untuk itu maka penggambaran komponen medan ini pada suatu bidang adalah tidak dimungkinkan, sebab medan berubah terhadap koordinat ruang.

Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk menyatakan komponen medan tersebut. Metode pertama adalah menggambarkannya pada suatu bidang tertentu dengan membuat salah satu peubahnya konstan. Jika kita gambar pada bidang $y=0$, maka besarnya medan sebagai fungsi y kita buat konstan. Setelah diperoleh gambar pada bidang $y=0$, kemudian kita buat gambar berikutnya pada bidang $y=1$. Demikian seterusnya sehingga didapatkan gambar pada bidang, untuk harga y yang berubah-ubah. Hal ini ditunjukkan pada gambar 4-14 dibawah ini.



Gambar 4-14

Pembentukan komponen E_y pada mode TM_{11}

Dari metode yang digunakan diatas tampak adanya kemiripan dari cara penggambaran komponen medan sebelumnya, hanya saja pada metode ini medan digambar pada bidang y yang berbeda. Hasil yang diperoleh tidak menunjukkan representasi dari medan yang sebenarnya, sebab yang kita gambar adalah medan pada bidang yang terpisah sehingga tidak menunjukkan kesatuan dari gambar sebenarnya.

Metode kedua adalah dengan menggambarkan komponen medan sebagai fungsi dari tiga variabel x , y dan z . Metode ini sangat sulit untuk diimplementasikan pada program komputer sehingga tidak dimasukkan dalam tugas akhir ini.

Demikianlah metode penggambaran medan dan komponen medan untuk mode TE₁₀ dan TM₁₁, dan untuk mode-mode yang lain dibuat dengan cara yang sama seperti cara diatas. Hasil dari penggambaran untuk mode-mode yang lain akan disertakan pada lampiran.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan secara matematis dan representasi grafis dari persamaan-persamaan medan dalam waveguide, maka dari tugas akhir ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- (i). Dari penurunan persamaan gelombang yang merambat dalam waveguide, baik untuk mode TE atau TM diperoleh masing-masing enam persamaan phasor kompleks komponen-komponen medan listrik dan medan magnet sebagai fungsi waktu (t), frekuensi kerja (ω), konstanta propagasi (γ) dan jarak rambatan (z).
- (ii) Jika ketergantungan terhadap waktu dihilangkan dan dituliskan dalam bentuk sinusoidal, maka dapat digambarkan pola garis gaya medan listrik dan medan magnetiknya. Pola-pola garis gaya yang terjadi harus memenuhi syarat-batas pada dinding waveguide yaitu medan listrik tangensial sama dengan nol ($E_t=0$) dan medan magnet normal sama dengan nol ($H_n=0$) pada dinding-dinding samping waveguide (bidang $x = 0$, dan $x = a$), juga pada dinding atas-bawah waveguide (bidang $y = 0$, dan $y = b$).

- (iii). Dengan suatu program komputer yang menggunakan algoritma kamera sintetik, maka akan dipetakan kumpulan titik-titik koordinat tiga dimensi dari medan yang terjadi ke koordinat dua dimensi tanpa menghilangkan kesan tiga dimensinya. Dengan cara ini pola medan yang terjadi dapat dilihat dari jarak dan sudut pandang yang dikehendaki sehingga dapat ditampilkan pola garis gaya yang terjadi dalam waveguide secara tiga dimensi pada layar monitor.
- (iv). Pada penggambaran secara tiga dimensi dapat diperkirakan vektor (kecenderungan arah dan besar masing-masing komponen medan sehingga membentuk pola garis gaya tertentu) untuk setiap titik di ruang, sehingga dapat diperoleh pemahaman visual yang lebih baik tentang penjalaran gelombang dalam waveguide persegi.

5.2 SARAN

- (i). Dalam Tugas Akhir ini hanya digambarkan mode gelombang untuk harga m dan n maksimal adalah dua, untuk itu diharapkan pengkajian yang lebih lanjut agar diperoleh teknik pemrograman yang lebih baik sehingga dapat menggambarkan mode gelombang yang lebih tinggi.
- (ii). Kamera Sintetik bukan satu-satunya algoritma yang terbaik untuk menggambarkan obyek secara tiga dimensi pada layar monitor, maka diharapkan adanya pembuatan program serupa dengan menggunakan algoritma dan teknik pemrograman lain yang lebih baik sehingga didapatkan penggambaran yang lebih realistis.

DAFTAR PUSTAKA

1. JOHNK CARL T.A, "*Engineering Electromagnetic Fields and Waves*", John Wiley & Sons, 2nd Edition.
2. DENNIS RODDY, JOHN COOLEN, Kamal Idris penterj, "*KOMUNIKASI ELEKTRONIKA*", Erlangga, 1990.
3. Sinema W, "*Electronics Transmission Technology*", PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, New Jersey.
4. ROBERT GROVER BROWN, ROBERT A. SHARPE, WILLIAM LEWIS HUGHES, ROBERT E.POST, "*LINES, WAVES, AND ANTENNAS*", Wiley & Sons, Inc. 1973.
5. WILLIAM H. HAYT, JR, The Houw Liong, Ph.D penterj, "*ELEKTROMAGNETIKA TEKNOLOGI*", Erlangga, 1989.
6. Ramo, S, J.R Whinnery, T. Van Duzer, "*Field And Waves in Communication Electronic*", 2d ed., John Wiley & Sons, New York, 1965.
7. John D. Kraus, "*Electromagnetic*", 3 rd Edition, Mc-Graw Hill.
8. Ir. P. Insap Santosa, M. Sc, "*GRAFIKA KOMPUTER dan ANTARMUKA GRAFIS*", Andi Offset Yogyakarta, 1994.
9. JOGIYANTO.HM, "*PASCAL Tingkat Lanjutan*", Andi Offset Yogyakarta, 1988.
10. SRIYANTO ALI, SUSANTO, "*MEMBEDAH PC dengan TURBO PASCAL*", PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 1994.

11 APR 1996

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO - ITS

EL 1799 TUGAS AKHIR (6 SKS)

Nama Mahasiswa : Sumuyud
Nomor Pokok : 2912201709
Bidang Studi : Telekomunikasi
Dosen Pembimbing : DR.Ir. Agus Mulyanto, M.Sc.
Tugas diberikan : Maret 1996

Judul Tugas Akhir :

"Perencanaan dan Pembuatan Perangkat Lunak Komputer untuk Menampilkan Pola Mode Medan Listrik (TE) dan Medan Magnet (TM) dalam Bubungan Gelombang Persegi secara Tiga Dimensi beserta Analisanya"

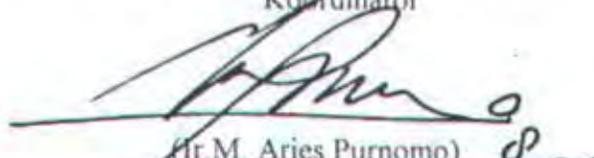
Uraian Tugas Akhir :

Pemahaman tentang Pola Mode Medan Listrik (TE) dan Medan Magnet (TM) memegang peranan penting dalam analisa karakteristik rambatan gelombang dalam Bubungan Gelombang.

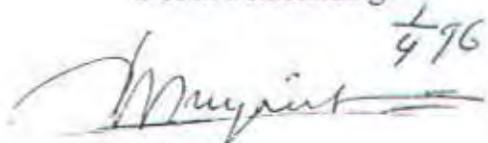
Untuk itu akan dibuat suatu perangkat lunak bantu guna menampilkan pola-pola medan listrik dan medan magnet dalam wave persegi. Pendekatan yang digunakan adalah penggambaran secara tiga dimensi, dan dalam hal ini akan digunakan metode pemetaan koordinat tiga dimensi ke koordinat layar monitor dengan menggunakan prinsip kamera sintetik.

Surabaya, 25 Maret 1996

Menyetujui
Bidang Studi Teknik Telekomunikasi
Kordinator

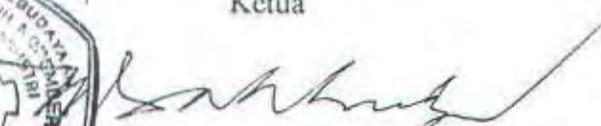

(Ir. M. Aries Purnomo)
NIP. 130 532 040
8/96

Dosen Pembimbing


(Dr. Ir. Agus Mulyanto, M.Sc.)
NIP. 130 422 813
4/96

Mengetahui,
Jurusan Teknik Elektro
Ketua




(Dr. Moch. Salehudin, M.Eng. Sc.)
NIP. 130 532 026

USULAN TUGAS AKHIR

1. JUDUL : Perencanaan dan Pembuatan Perangkat Lunak Komputer untuk Menampilkan Pola Mode Medan Listrik (TE) dan Medan Magnet (TM) dalam Bubungan Gelombang Persegi secara Tiga Dimensi beserta Analisisnya.
2. RUANG LINGKUP : - Transmisi Gelombang Elektromagnetik II
- Teori Dan Rancangan Gelombang Mikro
- Medan Elektromagnetik II
- Pemrograman Komputer
3. LATAR BELAKANG : Bubungan Gelombang (Wave Guide) digunakan untuk mengkopel energi dari pemancar ke antena diperlukan suatu wave guide, dimana pada frekuensi ini gelombang tidak bisa merambat dalam saluran transmisi biasa (kabel/serat). Disamping itu wave guide juga digunakan sebagai suatu antena untuk sistem pemancar yang mentransfer energi yang sangat besar dan bekerja pada frekuensi yang sangat tinggi. Selain berfungsi seperti yang disebutkan diatas secara spesifik penggunaan wave guide adalah sebagai berikut : Ferrite Isolator, Frequency Meter, Variable Attenuator, Rotary Vane Attenuator, Standing Wave detector, Slide Screw Turner, Detector, Termination dan lain-
- Pemahaman tentang Pola Mode Medan Listrik (TE) dan Medan Magnet (TM) memegang peranan penting dalam analisa karakteristik rambatan gelombang dalam Bubungan Gelombang.

Untuk itu akan dibuat suatu perangkat lunak bantu guna menampilkan pola-pola medan listrik dan medan magnet dalam wave persegi. Pendekatan yang digunakan adalah penggambaran secara tiga dimensi, dan dalam hal ini akan digunakan metode pemetaan koordinat tiga dimensi ke koordinat layar monitor dengan menggunakan prinsip kamera sintetik.

4. PENELAAHAN STUDI :

Tugas akhir ini dilaksanakan dengan studi literatur tentang wave guide, teknologi mikrostrip dan stripline, analisa medan elektromagnetik, serta pemrograman komputer berbasis GUI (Graphical User Interface). GUI adalah interaksi antara manusia dengan komputer sebagai mesin dengan cara membuat suatu antarmuka grafis. Akan dianalisa juga mode komponen-komponen medan listrik dan medan magnet dalam wave guide. Akhirnya dari konsep-konsep tersebut akan dibuat suatu perangkat lunak bantu komputer yang dapat menampilkan pola-pola medan yang dimaksud.

5. TUJUAN

- Menampilkan interpretasi grafis dari enam persamaan gelombang yang terjadi dalam bumbung gelombang (Wave Guide) persegi secara tiga dimensi.
- Menunjukkan pola garis gaya yang terjadi dalam wave guide untuk mode-mode yang terjadi, baik mode TE (Transverse Electric) maupun mode TM (Transverse Magnetic).

6. LANGKAH-LANGKAH : 1. Studi Literatur
 2. Pengumpulan data
 3. Analisa Permasalahan
 4. Pembuatan Program
 5. Membuat kesimpulan dan penulisan naskah

7. JADWAL KEGIATAN :

KEGIATAN	BULAN					
	1	2	3	4	5	6
STUDI LITERATUR	■	■				
PENGUMPULAN DATA		■	■			
ANALISA PERMASALAHAN			■	■		
PEMBUATAN PROGRAM			■	■	■	
PENULISAN NASKAH				■	■	■

8. RELEVANSI : Yang diharapkan dari pembuatan perangkat lunak bantu ini adalah untuk mempelajari tentang wave guide dari pola medan yang terjadi untuk mode TE maupun TM. Jadi dengan ditunjang komputer sebagai perangkat keras akan dapat dianalisa fungsi-fungsi suatu wave dengan melihat pola-pola medan yang terjadi untuk tiap-tiap mode. Dari analisa ini diharapkan akan dapat dibuat suatu alat dari wave guide yang mempunyai fungsi-fungsi spesifik yang lain.

RIWAYAT HIDUP

A. IDENTITAS PENULIS



Nama : Sumuyud
Tempat Lahir : Surabaya, Jawa Timur
Tanggal lahir : 7 Mei 1973
Agama : Kristen
Nama Ayah : Marsidi
Nama Ibu : Murawani
Alamat : Jl. Wiyung No.28 Surabaya

Penyusun adalah putra kedua dari dua bersaudara

B. RIWAYAT PENDIDIKAN :

1. SDN Wiyung II, Surabaya tahun 1979 - 1985
2. SMPN 16 Surabaya tahun 1985 - 1988
3. SMAN 18 Surabaya tahun 1988 - 1991
4. Jurusan Teknik Elektro FTI - ITS tahun 1991 - sekarang

C. PENGALAMAN KEMAHASISWAAN

1. Pengajar HCC (Himatektro Computer Course) 1992
2. Panitia dan pembina Electrical Workshop 1993, 1994
3. Asisten Praktikum Dasar Sistem Komunikasi