

PENGARUH RUGI DAYA (LOSS)
AKIBAT PEMBENGGOKAN SERAT
OPTIK MODA TUNGGAL



Oleh

NUR ALAM

88 03 059



PERPUSTAKAAN PUSAT UNIV. HASANUDDIN	
Tgl. terima	16-1-95.
Asal dari	-
Jumlahnya	1 BOP
Harga	K
No. Inventaris	95 02 02 038
No. Klas	

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN

1994

S K R I P S I

O L E H

N U R A L A M

88 03 059

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN

1 9 9 4

PENGARUH RUGI DAYA (LOSS)
AKIBAT PEMBENKOKAN SERAT OPTIK MODA TUNGGAL

Skripsi untuk melengkapi tugas dan
memenuhi syarat untuk memperoleh
gelar sarjana

Oleh :

N U R A L A M

88 03 059

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN

1 9 9 4



PENGARUH RUGI DAYA (LOSS)
AKIBAT PEMBENGKOKAN SERAT OPTIK MODA TUNGGAL

Disetujui oleh

Pembimbing Utama

(Drs. Bualkar Abdullah, M. Eng. Sc)

Pembimbing Pertama

(Drs. Lantu, M. Eng. Sc)

Pembimbing Kedua

(Drs. Syamsu Arief)

KATA PENGANTAR

Assalamu Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji dan syukur Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. atas limpahan rahmat dan karuniaNya, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Penulisan skripsi ini adalah salah satu syarat untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin.

Terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya penulis haturkan kepada :

- 1 Bapak Drs. Bualkar Abdullah, M. Eng. Sc. sebagai ketua jurusan Fisika dan selaku dosen pembimbing utama atas bantuan moril dan materil yang diberikan dalam membimbing penulis mulai dari awal sampai rampungnya tulisan ini.
- 2 Bapak Drs. Lantu, M. Eng. Sc. dan Bapak Drs. Syansu masing-masing sebagai pembimbing pertama dan kedua telah membimbing dan mengarahkan penulis hingga selesainya tulisan ini.
- 3 Bapak Drs. Arsyad Sumah sebagai penasehat akademik yang mengarahkan penulis dalam menjalani kehidupan kemahasiswaan.
- 4 Bapak Dr. Dadang Ahmad S., Dr. Petrus Rampisella, Drs.

Arsyad Sumah, Drs. Halmar Halide, M.Sc.,
Drs. Syansir Dewang, M. Eng. Sc. selaku tim dosen
penguji atas masukan dalam penyempurnaan skripsi ini.

5. Para dosen dan staf administrasi jurusan Fisika F-MIPA Universitas Hasanuddin yang telah banyak memberikan bimbingan dan bantuan pada Penulis selama menjalani aktivitas kemahasiswaan.
6. Ibunda tercinta H. Mas Alam, Kakek dan Nenek serta seluruh keluarga dan khusus kepada Adik Nur Syansi dan Kakanda Burhanuddin yang telah banyak memberikan pengorbanan, perhatian serta pengertiannya selama ini.
7. KPP-KPS PERTAMINA yang telah memberikan bantuan Bea-Siswa selama kurang lebih dua setengah tahun.
8. Sahabatku Mukminati dan rekan-rekan mahasiswa jurusan Fisika yang telah rela berbagi suka duka dalam berbagai aktivitas dan kesempatan.
9. Serta semua pihak yang tidak sempat saya sebutkan namanya satu persatu atas peran dan bantuannya baik langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari skripsi ini masih terdapat kekurangan-kekurangan, olehnya itu masukan dan saran yang sifatnya membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini.

Ujung Pandang, Agustus 1994

Penulis

SARI BACAAN

Telah ditelusuri penurunan persamaan daya pandu optik dan persamaan daya radiasinya secara teoritik.

Kerugian daya yang diakibatkan oleh bengkokan serat optik, dapat diperoleh dengan membandingkan antara persamaan daya radiasinya setelah bengkokan dan persamaan daya pandu optik sebelum bengkokan.

Perhitungan dari kerugian daya dengan menggunakan simulasi komputer, diperoleh hasil $R_{min} = 0,005$ m dengan $2\alpha = 6,60569$
 $R_{maks} = 0,51$ m dengan $2\alpha = 2,42603$.

Kata Pustaka : Pembengkokan serat optik, kerugian daya.

ABSTRACT

The derivation of optical guided power and radiated power equation has been theoretically reconsidered.

Loss caused by the bending of optical fiber can be obtained by comparing between the equation of radiated power at back_bending and the equation of optical guided power at fore_bending.

The calculation of loss by means of computer simulation gives result as $R_{\min} = 0,005$ m with $2\alpha = 0.00303$ and $R_{\max} = 0,51$ m with $2\alpha = 2.42003$.

Key Words : Bending optical fiber, loss.



DAFTAR ISI

	<i>halaman</i>
KATA PENGANTAR	v
SARI BACAAN	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup Permasalahan	2
I.3 Tujuan Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
II.1 Serat Optik	3
II.2 Transmisi Sinar dalam Serat Optik	5
II.3 Kerugian Radiasi pada Bengkokan Serat Optik	7
II.4 Persamaan Karakteristik dan Medan	8
II.5 Penurunan Rumus Kerugian Bengkokan	12
BAB III METODE PENELITIAN	15
BAB IV PEMBAHASAN	16
IV.1 Persamaan Daya Optik pada Serat Optik	16
IV.2 Persamaan Daya Radiasi	18
IV.3 Simulasi Persamaan Kerugian Daya	19
BAB V SIMPULAN DAN SARAN	23
V.1 Simpulan	23
V.2 Saran	23
DAFTAR PUSTAKA	24

DAFTAR GAMBAR

Gambar	halaman
II.1 Skema struktur serat optik	4
II.2 Fenomena moda konversi pada bengkokan dalam pandu gelombang	6
II.3 Fenomena radiasi pada bengkokan dalam pandu gelombang	7
II.4 Pendekatan profil indeks bias dengan fungsi tangga	8
II.5 Serat bengkok dengan sistem koordinat silinder (r, θ, z) dan sistem koordinat kartesian (x, y, z)	12

DAFTAR LAMPIRAN

<i>Lampiran</i>	<i>Halaman</i>
A Penelusuran Persamaan Daya Radiasi	25
B Bagan Alir Program	31
C Program Komputer untuk Menghitung Kerugian Daya	32

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kemajuan dalam teknologi serat optik, memberikan pengaruh yang besar dan luas pada sistem telekomunikasi. Sifat-sifatnya yang mempunyai diameter kecil, ringan, fleksibel, pita frekuensi lebar dan tidak terpengaruh gangguan interferensi, membuat serat optik banyak dipakai sebagai pengganti kabel telepon, kabel antar komputer, kabel bawah laut. Aplikasi di bidang lain adalah di bidang instrumentasi, pengukuran, kedokteran, industri dan sensor optik.

Pada sistem komunikasi, alamat penerima bermacam-macam dan karena itu rangkaian percabangan menjadi sangat penting. Dalam berbagai laporan diungkapkan usaha-usaha untuk pembuatan berbagai jenis rangkaian mikrooptik misalnya dengan kopler serat optik, "Star Coupler" dan lain-lain.

Pada penggunaan serat optik sebagai media transmisi, adanya bengkokan serat optik sangat berhubungan dengan kerugian daya, karena adanya konversi moda dan radiasi pada bengkokan tersebut sehingga memungkinkan terjadinya kebocoran. Bengkokan pada serat optik biasanya dipandang sebagai salah satu penyebab turunnya efisiensi transmisi dalam jalur.

I.2 Ruang Lingkup Permasalahan

Daya optik yang dipancarkan dari bengkokan diterangkan sebagai rugi radiasi dari energi yang dikirimkan melalui serat optik. Pada sisi lain penentuan rugi-rugi daya yang sesuai dengan bengkokan didapat lewat perolehan daya keluaran dan membandingkan daya input sebelum pembengkokan.

Untuk memperoleh persamaan kerugian bengkokan dari suatu serat optik sebuah formula diperkenalkan. Lebih jauh lagi akan dianalisis dengan menggunakan teori persamaan Maxwell, fungsi Bessel, fungsi Neuman dan fungsi Hankel. Kemudian dihitung dengan simulasi komputer.

I.3 Tujuan Penelitian

- 1 Menelusuri rumus kerugian daya akibat pembengkokan serat optik
- 2 Menggunakan simulasi komputer untuk memperoleh nilai kerugian daya (loss) akibat pembengkokan serat optik.

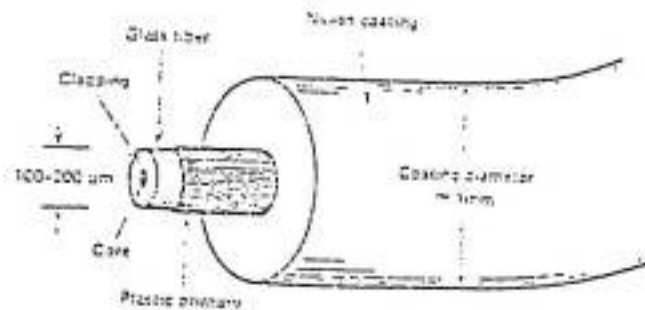
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Serat Optik

Serat optik adalah pemandu gelombang dielektrik yang terbuat dari gelas dan plastik beroperasi pada frekuensi optis, berbentuk silinder, pembawa energi elektromagnetik dalam bentuk cahaya pada keluarannya dalam arah yang sejajar dengan sumbu gerakannya. Transmisi gelombang optis ditentukan oleh karakteristik dari serat yang bersangkutan.

Struktur yang paling banyak adalah silinder dielektrik dengan radius a dan indeks refraksi n_1 . Silinder tersebut dikenal sebagai teras atau core dari serat. Teras ini dilapisi dengan selubung (cladding) dielektrik yang mempunyai indeks refraksi n_2 yang lebih kecil dari pada n_1 . Selubung diberi jaket pembungkus (coating) untuk melindungi inti dari berbagai gangguan mekanis, ataupun kemungkinan kerusakan oleh kondisi sekitarnya. Fungsi inti adalah untuk mentransmisikan gelombang cahaya sementara pembungkus mengarahkan gelombang cahaya tersebut. Struktur serat optik diperlihatkan pada gambar II.1.



Gambar 11.1 Skema struktur serat optik

Berdasarkan karakteristiknya dan jumlah moda yang dapat di transmisikan maka serat optik secara garis besarnya dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian : ^{1,2)}

1 Moda Tunggal (single mode)

Serat optik moda tunggal mempunyai diameter inti sekitar 3 - 10 μm , diameter selubung sekitar 150 μm . sehingga serat optik ini hanya memungkinkan terjadinya moda transmisi tunggal.

2 Moda Jamak (multimode)

Pada jenis serat optik ini, cahaya yang dipandu dari satu ujung ke ujung lainnya terjadi melalui beberapa lintasan. Umumnya diameter inti serat optik 50 - 100 μm dan selubung (cladding) berdiameter sekitar 150 μm . ¹⁾

Sifat transmisi serat optik sangat dipengaruhi oleh ukuran diameter inti. Dalam diameter inti yang besar memungkinkan terjadinya moda transmisi jamak sedangkan untuk ukuran diameter inti yang kecil hanya menghasilkan moda transmisi tunggal.

II.2 Transmisi Sinar dalam Serat Optik

Transmisi energi dalam pemandu gelombang optik didasarkan pada gejala pemantulan internal total. Ini terjadi jika tidak langsung datang pada muka suatu muka batas dari dua media dengan indeks bias yang berbeda, dari indeks tertinggi sampai indeks terendah.

Jika pemandu gelombang dibengkokkan, maka sudut pantulan total berubah dari θ ke θ' yaitu moda dari pemandu lurus bertransformasi ke dalam moda yang lain dengan sudut karakteristik yang berbeda. Pengaruh ini disebut konversi moda.

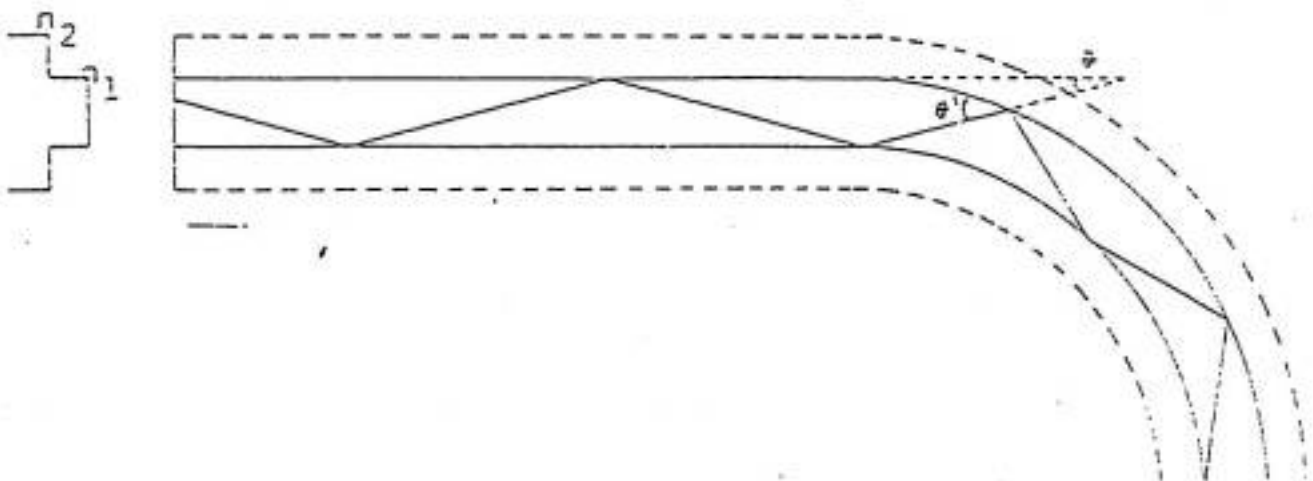
Laser merupakan sumber yang memancarkan sejenis cahaya dengan kemurnian dan intensitas yang tiada bandingnya, yang tidak dapat dijumpai dalam sumber-sumber radiasi elektromagnetis lainnya. Sebenarnya adalah sinar biasa tetapi memiliki ciri yang unik yaitu terdiri dari panjang gelombang yang tunggal (monochromatis), merupakan berkas sinar yang sangat sejajar dan merupakan sinar yang terpencar dalam fase yang sama (koheren).

Pulsa cahaya dengan lebar dan besar tertentu yang dipancarkan ke dalam salah satu ujung serat harus tiba di ujung yang jauh dari serat optik tersebut dengan bentuk dan panjang yang tidak berubah, dan hanya amplitudonya yang

berkurang karena kerugian daya. Bila kerugian tersebut menjadi lebih besar amplitudo pulsa pada penerima akan menjadi terlalu kecil untuk dideteksi.

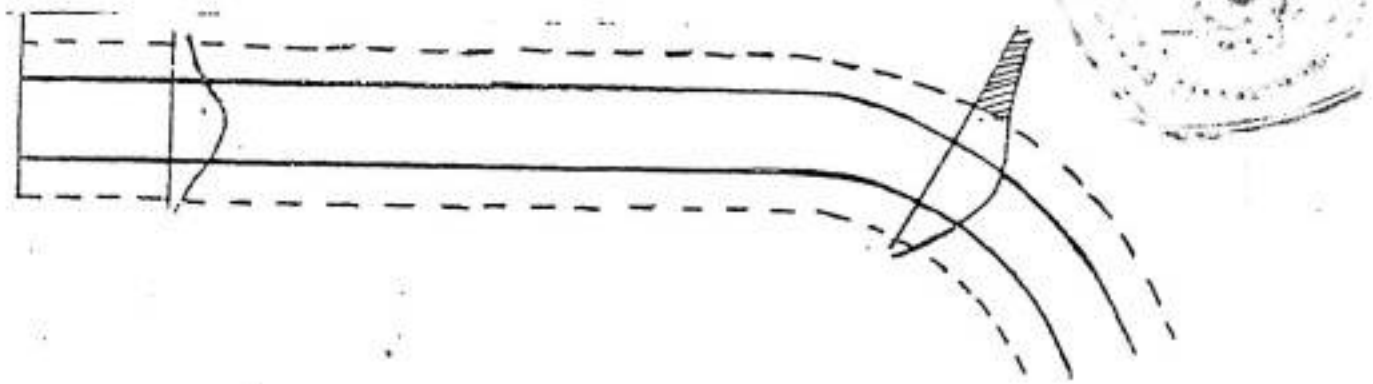
Pada pengiriman sinyal melalui serat optik, sudut datang pada batas inti dan selubung, harus lebih besar dari sudut kritis sehingga sinyal dipantulkan dalam inti sampai ke ujung serat. ^{1,2,3>}

Jika $\theta_i > \theta_c$ maka



Gambar 11.2 Fenomena mode konversi pada bengkokan dalam pandu gelombang

Jika dibuat bengkokan, $\theta_i < \theta_c$, terjadi konversi moda - moda ke tingkat moda yang lebih tinggi dan menyebabkan perubahan waktu perambatan. Sinyal akan dibiarkan keselubung. Ini merupakan kerugian yang diradiskan keluar.



Gambar II.3 Fenomena radiasi pada bengkokan dalam pandu gelombang

Gejala yang dilukiskan dalam gambar II.3 ekor distribusi medan moda yang diarsir tidak dapat mengikuti gerakan dari distribusi medan moda yang tidak diarsir, saat melewati bengkokan. Karena kecepatan tidak boleh lebih besar dari kecepatan cahaya c , ekor distribusi moda terlepas dari pemanduan, keluar sebagai medan moda radiasi.

II.3 Kerugian Radiasi pada Bengkokan Serat Optik.

Kerugian radiasi terjadi ketika serat optik mengalami pembengkokan dengan jari-jari kelengkungan yang sangat kecil. Ada 2 tipe bengkokan, yakni ^{1>} :

- 1 Bengkokan yang mempunyai jari-jari lebih besar daripada diameter serat,
- 2 Bengkokan mikroskopis acak dari sumbu serat yang dapat timbul ketika serat optik dihubungkan dengan kabel lain.

Diandaikan bahwa profil indeks bias inti adalah simetris secara axial, dan indeks selubung adalah seragam. Medan

dekat inti dalam serat bengkok diandaikan sama halnya dalam serat lurus. Kerugian bengkokan 2α didefinisikan oleh persamaan berikut ⁴⁾ :

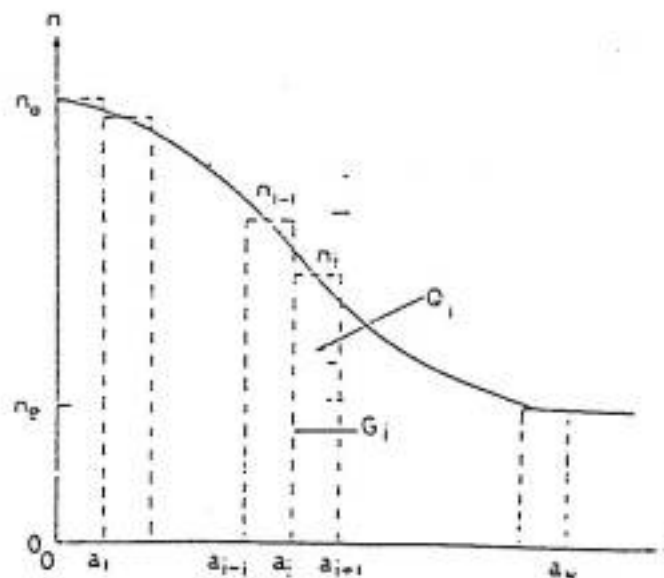
$$2\alpha = \frac{P_r}{P_g} \quad (II.3.1)$$

dengan : P_r = daya radiasi
 P_g = daya pandu optik

Daya optik P_g yang dipandu dalam serat bengkokan didekati dengan perambatan daya dalam serat lurus.

II.4 Persamaan Karakteristik dan Medan

Diandaikan bahwa indeks bias dari serat multimode graded indeks disajikan dengan suatu fungsi tangga, dapat dilihat pada gambar II.4.



Gambar II.4 Pendekatan profil indeks bias dengan fungsi tangga

Dimana, N menunjukkan jumlah lapisan, n_i menunjukkan indeks bias dari lapis ke- i , n_0 indeks pada pusat core, dan n_c

indeks selubung, dan a_i menunjukkan jejari batas ke- i . Ketebalan lapisan $a_{i+1} - a_i$ tidak perlu konstan tetapi dapat dipilih secara sembarang. Sistem koordinat kartesian (x, y, z) dan sistem koordinat silinder (r, θ, z) keduanya dipakai, bila z sepanjang arah perambatan. E dan H adalah medan listrik dan medan magnet. Untuk penyederhanaan, $E_x = 0$ diandaikan dalam setiap lapis akibatnya $H_z = 0$ dan medan listrik mendekati polarisasi dalam arah y . E_z dan E_y diberikan dalam bentuk matriks seperti berikut ⁴⁾

$$\begin{bmatrix} E_y \\ jE_z \end{bmatrix}_{r=a_i} = U \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (\text{II.4.1})$$

$$U = \exp j(\omega t - \beta_g z) \quad (\text{II.4.2})$$

A_i dan B_i menunjukkan amplitudo koefisien medan pada lapis ke- i . Unsur matriks diberikan di bawah, berdasarkan harga tetapan perambatan β_g dalam arah z .

$$(1) \quad n_i k > \beta_g$$

$$d_{11} = - \left(K_i / 2\beta_g \right) \left[J_{\nu+1} \sin(\nu+1)\theta + J_{\nu-1} \sin(\nu-1)\theta \right]$$

$$d_{12} = - \left(K_i / 2\beta_g \right) \left[N_{\nu+1} \sin(\nu+1)\theta + N_{\nu-1} \sin(\nu-1)\theta \right]$$

$$d_{21} = J_\nu \cos \nu\theta$$

$$d_{22} = N_\nu \cos \nu\theta \quad (\text{II.4.3})$$

$$K_i = (n_i^2 k^2 - \beta_g^2)^{1/2} \quad (\text{II.4.4})$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (\text{II.4.5})$$

dimana λ panjang gelombang dalam ruang bebas dan K_i tetapan perambatan sepanjang arah x dalam lapisan ke- i . J_ν dan N_ν berturut-turut adalah fungsi Bessel dan fungsi Neuman dari orde ν ^{4>}.

$$(2) \quad \beta_g > n_i k$$

$$d_{11} = (\gamma_i/2\beta_g) [K_{\nu+1} \sin(\nu+1)\theta - K_{\nu-1} \sin(\nu-1)\theta]$$

$$d_{12} = (\gamma_i/2\beta_g) [I_{\nu+1} \sin(\nu+1)\theta - I_{\nu-1} \sin(\nu-1)\theta]$$

$$d_{21} = K_\nu \cos \nu\theta$$

$$d_{22} = I_\nu \cos \nu\theta \quad (\text{II.4.6})$$

$$\gamma_i = (\beta_g^2 - n_i^2 k^2)^{1/2} \quad (\text{II.4.7})$$

I_ν dan K_ν adalah fungsi Bessel termodifikasi dari jenis pertama dan kedua berorde ν . Argumen $\gamma_i r$ dari fungsi ini diambil. Indeks ν berkaitan dengan bilangan moda azimut dari moda $LP_{\nu\mu}$, $\nu = 0$ berkaitan dengan moda LP_{01} atau moda HE_{11} . Komponen medan diberikan dengan memakai komponen E_z dan E_y .

Daya P_g yang dibawa oleh setiap moda, diperoleh lewat penyusunan $E_x = 0$ dan memakai E_y dalam bentuk ^{4>} :

$$P_g = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} (E_x H_y^* - E_y H_x^*) r dr d\theta$$

$$= \frac{\pi \epsilon_0 \beta_g}{2k} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} P \quad (\text{II.4.8})$$

$$S = \begin{cases} 2; & \nu = 0 \\ 1; & \nu \geq 1 \end{cases} \quad (\text{II.4.9})$$

$$P = \sum P_i \quad (\text{II.4.10})$$

Tanda * dalam persamaan (II.4.8) menunjukkan konjugasi kompleks. ϵ_0 dan μ_0 adalah permittivitas dan permeabilitas dari hampa. Di sini, P_i diberikan oleh :

$$(1) \quad n_i k > \beta_g$$

$$P_i = \left[\frac{A_i^2 r^2}{2} (J_\nu^2 - J_{\nu-1} J_{\nu+1}) + \frac{B_i^2 r^2}{2} (N_\nu^2 - N_{\nu-1} N_{\nu+1}) \right. \\ \left. + A_i B_i r^2 (J_{\nu-1} N_{\nu+1}) \right]_{a_i}^{a_i + 1} \quad (\text{II.4.11})$$

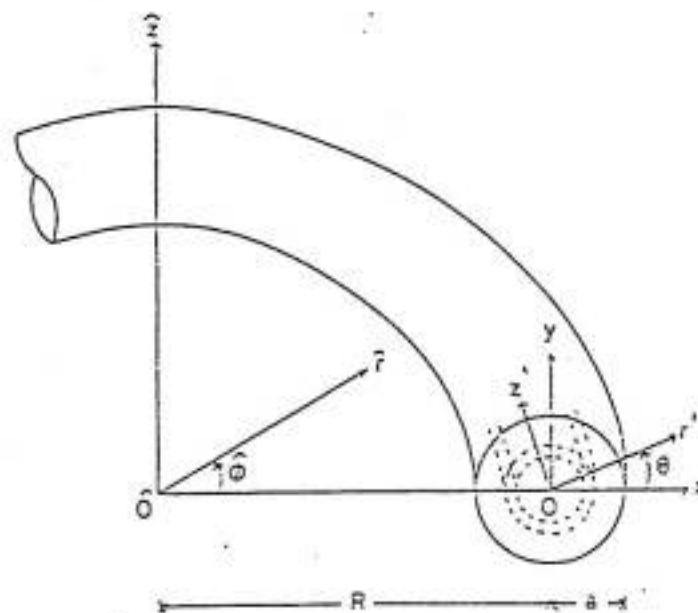
$$(2) \quad \beta_g > n_i k$$

$$P_i = \left[\frac{A_i^2 r^2}{2} (K_\nu^2 - K_{\nu-1} K_{\nu+1}) + \frac{B_i^2 r^2}{2} (I_\nu^2 - I_{\nu-1} I_{\nu+1}) \right. \\ \left. + A_i B_i r^2 (K_\nu I_\nu + K_{\nu+1} K_{\nu-1}) \right]_{a_i}^{a_i + 1} \quad (\text{II.4.12})$$

Argumen γ, r dari fungsi Bessel termodifikasi diberikan dalam persamaan (II.4.12).

II.5 Penurunan Rumus Rugi-Rugi Bengkokan

Sistem koordinat untuk kerugian bengkokan dilukiskan dalam gambar II.5. Sumbu Z tegak lurus bidang kelengkungan. Koordinat (r, θ, Z) dalam pasal II.4 berkaitan dengan koordinat silinder (r, θ, Z) dalam gambar II.5.



Gambar II.5 Serat bengkok dengan sistem silinder (r, θ, z) dan sistem koordinat kartesian (x, y, z) .

Komponen-komponen E_z dan E_θ moda terpandu untuk $r > a$ diberikan dengan memakai persamaan (II.4.2), (II.4.3), (II.4.6) dan mengambil $A_l = A_\theta$. B_l disusun menjadi nol untuk mengesampingkan medan-medan yang timbul secara tak berhingga dalam selubung 4 .

$$E_z = A_0 K_\nu (\gamma_0 r) \cos(\nu\theta) \exp(-j\beta_g R_\theta) \quad (\text{II.5.1})$$

$$E_\theta = \frac{jA_0 \gamma_0}{2\beta_g} \left[K_{\nu+1}(\gamma_0 r) \sin(\nu+1)\theta - K_{\nu-1}(\gamma_0 r) \sin(\nu-1)\theta \right] \exp(-j\beta_g R_\theta) \quad (\text{II.5.2})$$

$$\gamma_0 = (\beta_g^2 - n_0^2 k^2)^{1/2} \quad (\text{II.5.3})$$

Dengan memperhitungkan suku yang mengandung perambatan kecil β dari moda radiasi, koefisien ekspansi $c_1(\beta)$ dan $c_2(\beta)$ dari medan listrik terpandu diberikan oleh ^{4>} :

$$c_1(\beta) = \frac{iA_0 B_1^*}{2\pi N_{\mu\beta}} \frac{\omega n_0^2 \epsilon_0}{\rho \gamma} \left[\beta_g \frac{\beta}{\gamma} + \gamma_0 \right] H_\mu^{(2)*} [\rho(R+a)] I_{\nu\beta} \quad (\text{II.5.4})$$

$$c_2(\beta) = \frac{iA_0 B_2^*}{2\pi N_{\mu\beta}} \frac{\omega n_0^2 \epsilon_0}{\rho} H_\mu^{(2)*} [\rho(R+a)] I_{\nu\beta} \quad (\text{II.5.5})$$

dengan

$$I_{\nu\beta} = \int_{-\infty}^{\infty} K_{\nu\beta} [\gamma(a_\nu^2 + z_0^2)^{1/2}] \cos \nu [\tan^{-1}(z/a)] \exp(j\beta z) dz \quad (\text{II.5.6})$$

Daya radiasi persatuan panjang yang cocok dengan bengkokan diberikan oleh persamaan berikut ^{4>} :

$$P_r = \frac{\pi r}{R} \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |c_j(\beta)|^2 (\xi_{\theta\mu j} \xi_{z\mu j}^* - \xi_{z\mu j} \xi_{\theta\mu j}^*) d\beta \quad (\text{II.5.7})$$

Kerugian bengkokan dihitung dengan memakai persamaan (II.3.1), (II.4.8) dan (II.5.7) ditulis dalam bentuk berikut :

$$2\alpha = \frac{\gamma\pi A_0^2 a \exp\left[\frac{-4 \Delta w^3}{3av^2} R\right]}{2s P w \left[\frac{wR}{a} + \frac{v^2}{2\Delta w}\right]^{1/2}} \quad (\text{II.5.8})$$

Parameter s , A_0 dan P berturut-turut didefinisikan oleh persamaan (II.4.9), (II.4.10), (II.5.1). Disini, a adalah jejari Core, Δ adalah perbedaan indeks relatif antara n_m dan n_e , dan v adalah frekuensi ternormalisasi

$$v^2 = k^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2) \quad (\text{II.5.9})$$

Dalam persamaan (II.5.8), w diberikan oleh $\gamma_0 a$ dan dapat ditentukan oleh persamaan karakteristik.

BAB III

METODE PENELITIAN

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1 Menelusuri penurunan persamaan daya optik persamaan (II.5.7) pada serat optik.
- 2 Menelusuri penurunan persamaan daya radiasi persamaan (II.4.8) yang diakibatkan oleh bengkokan serat optik.
- 3 Menggunakan simulasi komputer untuk menghitung kerugian daya akibat pembengkokan serat optik.



BAB IV P E M B A H A S A N

IV.1 PERSAMAAN DAYA OPTIK PADA SERAT OPTIK

Besar daya yang dibawa oleh medan terpandu dalam inti dan selubung dapat diperoleh dengan mengintegrasikan komponen vektor aliran daya (vektor poynting) ⁵⁾ .

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\vec{E} \times \vec{H}) \quad (\text{IV.1.1})$$

Jika persamaan (IV.1.1) ditinjau terhadap seluruh ruang, maka diperoleh

$$P_g = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sim} \left[E_x H_y^* - E_y H_x^* \right] r \, dr \, d\theta \quad (\text{IV.1.2})$$

Dengan menganggap komponen x dari medan listrik adalah nol maka suku pertama pada persamaan (IV.1.2) menjadi

$$P_g = - \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\sim} E_y H_x^* \, r \, dr \, d\theta \quad (\text{IV.1.3})$$

Dengan menggunakan persamaan Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ dalam arah x yakni

$$\frac{\partial}{\partial y} E_z - \frac{\partial}{\partial z} E_y = - \frac{\partial B_x}{\partial t} \quad (\text{IV.1.4})$$

Dengan $\vec{B} = \mu \vec{H}$ dan $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

Andaikan medan berubah menurut $e^{j\omega t - j\beta z}$

$$\frac{\partial}{\partial z} = -j\beta e^{j\omega t - j\beta z} = -j\beta$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = +j\omega e^{j\omega t - j\beta z} = +j\omega$$

Dari persamaan (IV.1.4) diperoleh bahwa komponen H dalam hubungannya dengan E_y :

$$\frac{\partial}{\partial y} \bar{E}_z - \frac{\partial}{\partial z} \bar{E}_y = -\mu \frac{\partial}{\partial t} H_x$$

$$j\beta E_y = -\mu j\omega H_x$$

$$H_x^* = -\frac{\beta}{\omega \mu} E_y \quad (\text{IV.1.5})$$

Sehingga, substitusi persamaan (IV.1.5) ke dalam persamaan (IV.1.3) menghasilkan

$$P_g = \frac{\beta}{2 \omega \mu} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |E_y|^2 r dr d\theta \quad (\text{IV.1.6})$$

Dengan $\omega = k v$ dan $v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}}$ maka

$$P_g = \frac{\beta \pi}{2 k} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} |E_y|^2 r dr \quad (\text{IV.1.7})$$

Oleh karena sajian integral pada persamaan di atas merupakan daya total maka persamaan (IV.1.7) dapat dituliskan menjadi

$$P_g = \frac{\beta \pi}{2 k} \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} P \quad (\text{IV.1.8})$$

IV.2 PERSAMAAN DAYA RADIASI

Komponen medan listrik E_z dan E_ϕ mode terpandu untuk $r' > a$ adalah

$$E_z = A \left[\frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma a)} \right] H_\nu^{(1)}(i\gamma r') \cos \nu\theta e^{-i\beta_g R\phi} \quad (\text{IV.2.1})$$

dan

$$E_\phi = \frac{A \gamma}{2\beta_g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma a)} \left[H_{\nu+1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu-1)\theta \right] e^{-i\beta_g R\phi} \quad (\text{IV.2.2})$$

dengan parameter-parameter

$$\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$$

$$K = (n_1^2 k^2 - \beta_g^2)^{1/2}$$

$H_\nu^{(1)}$ adalah fungsi Hankel untuk jenis pertama dari orde ν , J_ν adalah fungsi Bessel, n_1 indeks bias inti, dan n_2 adalah indeks bias selubung, k adalah bilangan gelombang.

Di luar serat, medan-medan dapat dinyatakan sebagai superposisi dengan bentuk sebagai berikut

$$\mathcal{E}_{zuj} = B_j H_{j\mu}^{(2)}(\rho r) e^{-i\mu\phi} e^{-i\beta z} \quad (\text{IV.2.3})$$

$$\mathcal{E}_{\phi uj} = B_j F_j H_{j\mu}^{(2)}(\rho r) e^{-i\mu\phi} e^{-i\beta z} \quad (\text{IV.2.4})$$

Koefisien amplitudo F_j dapat diandaikan dua harga berbeda berdasarkan dua perangkat mode-mode yang saling ortogonal.

Koefisien ekspansi c_j dari medan listrik terpandu dapat ditentukan dari hubungan ortogonalitas dua perangkat mode. Koefisien ekspansi c_j dapat diberikan

$$\begin{aligned}
 c_j &= \frac{1}{2\pi N_{\mu\beta_j}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[E_{\phi} \mathcal{E}_{z\mu_j}^* - E_z \mathcal{E}_{\phi\mu_j}^* \right]_{r=R+a} dz \\
 &= \frac{-iAB_j^*}{2\pi N_{\mu\beta_j}} \frac{J_{\nu}(Ka)}{H_{\nu}^{(1)}(i\gamma a)} \frac{\omega n_2^2 \epsilon_0}{\rho} H_{\mu}^{(2)*}[\rho(R+a)] I_{\nu\beta}
 \end{aligned} \tag{IV.2.5}$$

dengan

$$I_{\nu\beta} = \int_{-\infty}^{\infty} H_{\nu}^{(1)} \left[i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2} \right] \cos \left[\nu \arctan(z/a) \right] e^{i\beta z} dz \tag{IV.2.6}$$

Daya radiasi dari serat optik yang dibengkokkan diberikan oleh persamaan

$$P_r = \frac{\pi r}{R} \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |c_j|^2 \left(\mathcal{E}_{\phi\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu_j}^* - \mathcal{E}_{z\mu_j} \mathcal{E}_{\phi\mu_j}^* \right) d\beta \tag{IV.2.7}$$

IV.3 Simulasi Persamaan Kerugian Daya

Penentuan kerugian daya akibat bengkokan serat optik diperoleh dari perbandingan daya radiasi dengan daya optik sebelum pembengkokan.

Perbedaan indeks relatif antara inti dengan selubung Δ diperoleh sekitar 0,004 dimana indeks bias inti $n_1 = 1,46$ dan indeks bias selubung $n_2 = 1,454^{6>}$. Dengan panjang gelombang LED λ sebesar $0,85 \mu\text{m}$ diperoleh bilangan gelombang $k = 7,38 \cdot 10^6$.

Konstanta perambatan β_g dapat ditentukan dengan hubungan $\beta_g = n_1 k \cos \theta^{7>}$, dengan sudut θ sebesar 8° diperoleh $\beta_g = 1,06 \cdot 10^7$. Dari nilai konstanta perambatan didapatkan parameter γ dengan hubungan $\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$ sebesar $6,212 \cdot 10^5$.

Jari-jari inti a untuk moda tunggal diambil sekitar $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ sehingga diperoleh parameter $w = 3,1$.

Untuk mendapatkan nilai frekuensi normalisasi v dapat dihitung dengan hubungan $v^2 = k^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2)$ sebesar 4,8.

Dengan memasukkan konstanta-konstanta ke dalam persamaan ^{4>}

$$C(\nu) = \frac{3 v^3 \lambda}{8\sqrt{2} \pi n_1 w^3 \Delta_1^{3/2} R_1}$$

dimana R_1 merupakan jari-jari kelengkungan pertama maka dapat ditentukan nilai-nilai dari $\frac{A_0^2}{P}$ yang sebanding dengan $C(\nu)/a^2$ diperoleh hasil sebesar $5,8 \cdot 10^9$.

Tabel 1 Kerugian daya akibat pembengkokan serat optik

nomor	R [i]	dua alpa
01	0.00500	6.60569e-02
02	0.0100	5.02436e-05
03	0.01500	4.24381e-08
04	0.02000	3.76142e-11
05	0.02500	3.42785e-14
06	0.03000	3.18101e-17
07	0.03500	2.98985e-20
08	0.04000	2.83694e-23
09	0.04500	2.71160e-26
10	0.05000	2.60691e-29
11	0.05500	2.51815e-32
12	0.06000	2.44200e-35
13	0.06500	2.37601e-38
14	0.07000	2.31836e-41
15	0.07500	2.26767e-44
16	0.08000	2.22284e-47
17	0.08500	2.18299e-50
18	0.09000	2.14747e-53
19	0.09500	2.11567e-56
20	0.10000	2.08717e-59
21	0.10500	2.06153e-62
22	0.11000	2.03845e-65
23	0.11500	2.01767e-68
24	0.12000	1.99896e-71
25	0.12500	1.98208e-74
26	0.13000	1.96691e-77
27	0.13500	1.95326e-80
28	0.14000	1.94102e-83
29	0.14500	1.93005e-86
30	0.15000	1.92027e-89
31	0.15500	1.91157e-92
32	0.16000	1.90389e-95
33	0.16500	1.89715e-98
34	0.17000	1.89129e-101
35	0.17500	1.88624e-104
36	0.18000	1.88197e-107
37	0.18500	1.87841e-110
38	0.19000	1.87554e-113
39	0.19500	1.87331e-116
40	0.20000	1.87169e-119
41	0.20500	1.87065e-122
42	0.21000	1.87015e-125
43	0.21500	1.87018e-128
44	0.22000	1.87071e-131
45	0.22500	1.87172e-134
46	0.23000	1.87318e-137
47	0.23500	1.87508e-140
48	0.24000	1.87740e-143
49	0.24500	1.88013e-146
50	0.25000	1.88325e-149

nomor	R [i]	dua alpa
51	0.25500	1.88674e-152
52	0.26000	1.89061e-155
53	0.26500	1.89482e-158
54	0.27000	1.89938e-161
55	0.27500	1.90428e-164
56	0.28000	1.90950e-167
57	0.28500	1.91503e-170
58	0.29000	1.92088e-173
59	0.29500	1.92703e-176
60	0.30000	1.93347e-179
61	0.30500	1.94020e-182
62	0.31000	1.94721e-185
63	0.31500	1.95450e-188
64	0.32000	1.96206e-191
65	0.32500	1.96988e-194
66	0.33000	1.97798e-197
67	0.33500	1.98633e-200
68	0.34000	1.99493e-203
69	0.34500	2.00379e-206
70	0.35000	2.01290e-209
71	0.35500	2.02225e-212
72	0.36000	2.03185e-215
73	0.36500	2.04169e-218
74	0.37000	2.05176e-221
75	0.37500	2.06201e-224
76	0.38000	2.07256e-227
77	0.38500	2.08334e-230
78	0.39000	2.09435e-233
79	0.39500	2.10559e-236
80	0.40000	2.11706e-239
81	0.40500	2.12876e-242
82	0.41000	2.14068e-245
83	0.41500	2.15283e-248
84	0.42000	2.16520e-251
85	0.42500	2.17780e-254
86	0.43000	2.19062e-257
87	0.43500	2.20367e-260
88	0.44000	2.21694e-263
89	0.44500	2.23043e-266
90	0.45000	2.24415e-269
91	0.45500	2.25808e-272
92	0.46000	2.27224e-275
93	0.46500	2.28663e-278
94	0.47000	2.30123e-281
95	0.47500	2.31606e-284
96	0.48000	2.33112e-287
97	0.48500	2.34640e-290
98	0.49000	2.36190e-293
99	0.49500	2.37763e-296
100	0.50000	2.39358e-299
101	0.50500	2.40962e-302
102	0.51000	2.42603e-305
103	0.51500	0.00000e+00
104	0.52000	0.00000e+00

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

V.1 Simpulan

- Dari hasil perhitungan komputer diperoleh kerugian daya sebesar $6,60569e^{-02}$ pada $R = 0,005$ m (R minimum) dan $2,42603e^{-305}$ pada $R = 0,51$ m (R maksimum).
- Kerugian daya pada pembengkokan serat optik makin besar jika jari-kari kelengkungannya kecil dan sebaliknya jari-jari kelengkungan besar maka kerugian dayanya kecil. Makin kecil jari-jari kelengkungannya makin kuat sinyal yang teradiasi keluar dari bengkokan serat optik.

V.2 Saran

Untuk pengembangan berikutnya disarankan agar melakukan penelitian eksperimental supaya hasil yang diperoleh dapat dibandingkan dengan hasil simulasi komputasi.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Keiser, G., "Optical Fiber Communication", Mc. Graw-Hill, New York, 1983.
- 2 Suematsu, Y and Kenichi Iga, "Introduction to Optical Fiber Communication", John Willey & Sons, New York, 1982.
- 3 D. Marcuse, "Curvature Loss Formula for Optical Fiber", Journal Opt. Soc.Am Vol.66 No 3, March 1976.
- 4 Jun-Ichi Sakai dan Tatsuya Kimura, "Bending Loss of Propagation Mode in Arbitrary index Profile Optical Fiber", Applied Optic, Vol.17 No 10, May 1978.
- 5 Alan W.Snyder, John D.Love "Optical Waveguide Theory", London, New york.
- 6 Andani, Ir. 1990 "Diktat Kuliah Fiber optik" Universitas Hasanuddin, Ujung Pandang.
- 7 D. Marcuse, "Field Deformation and Loss Caused by Curvature of Optical Fiber", Journal Opt. Soc.Am. Vol.66 No 4, April 1976.

LAMPIRAN A

A. PENELUSURAN PERSAMAAN DAYA RADIASI

Komponen medan listrik E_z dan E_θ mode terpadu untuk $r > a$

$$E_z = A \left[\frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma a)} \right] H_\nu^{(1)}(i\gamma r) \cos \nu\theta e^{-i\beta_g R\theta} \quad (A-1)$$

dan

$$E_\theta = \frac{A\gamma}{2\beta_g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma a)} \left[H_{\nu+1}^{(1)}(i\gamma r) \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)}(i\gamma r) \sin(\nu-1)\theta \right] e^{-i\beta_g R\theta} \quad (A-2)$$

$$\delta_{z\mu j} = B_j H_\mu^{(2)}(\rho r) e^{-i\mu\theta} e^{-i\beta z} \quad (A-3)$$

$$H_{z\mu j} = B_j F_j H_\mu^{(2)}(\rho r) e^{-i\mu\theta} e^{-i\beta z} \quad (A-4)$$

$$F_1 = n_2 \left[\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right]^{1/2} \left\{ H_\mu^{(2)}[\rho(R+a)] / H_\mu^{(2)' }[\rho(R+a)] \right\} \quad (A-5)$$

$$F_2 = n_2 \left[\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right]^{1/2} \left\{ H_\mu^{(2)' }[\rho(R+a)] / H_\mu^{(2)}[\rho(R+a)] \right\} \quad (A-6)$$

dengan parameter-parameter :

$$\rho = (n_2^2 k^2 - \beta^2)^{1/2}$$

$$\gamma = (\beta_g^2 - n_2^2 k^2)^{1/2}$$

$$K = (n_1^2 k^2 - \beta_g^2)^{1/2}$$

diketahui

$$E_z = \int_{-\infty}^{\infty} [C_1(\beta) \delta_{z\mu 1} + C_2(\beta) \delta_{z\mu 2}] d\beta \quad (A-7)$$

$$E_\theta = \int_{-\infty}^{\infty} [C_1(\beta) \delta_{\theta\mu 1} + C_2(\beta) \delta_{\theta\mu 2}] d\beta \quad (A-8)$$

sehingga persamaan (A-7) dan (A-8) dapat dituliskan :

$$E_z = \sum_{j=1}^2 \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{z\mu_j} d\beta \quad (\text{A-9})$$

$$E_\theta = \sum_{j=1}^2 \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{\theta\mu_j} d\beta \quad (\text{A-10})$$

tinjau

$$E_\theta = \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{\theta\mu_j} d\beta$$

$$E_\theta \mathcal{E}_{z\mu',j}^* = \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{\theta\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^* d\beta$$

$$\int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} E_\theta \mathcal{E}_{z\mu',j}^* dz = \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{\theta\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^* d\beta dz \quad (\text{A-11})$$

tinjau

$$E_z = \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{z\mu_j} d\beta$$

$$-E_z \mathcal{E}_{z\mu',j}^* = \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} -\tilde{C}_j(\beta) \delta_{z\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^* d\beta$$

$$\int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} -E_z \mathcal{E}_{z\mu',j}^* dz = -\int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) \delta_{z\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^* d\beta dz \quad (\text{A-12})$$

kombinasi dari persamaan (A-11) dan (A-12) akan menghasilkan

$$\begin{aligned} \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} E_\theta \mathcal{E}_{z\mu',j}^* dz - \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} -E_z \mathcal{E}_{z\mu',j}^* dz &= \\ \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \int_{-\tilde{z}}^{\tilde{z}} \tilde{C}_j(\beta) (\delta_{\theta\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^* - \delta_{z\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu',j}^*) d\beta dz &= \\ = C_j \left[(2\pi) \delta_{\mu\mu'} \delta_{jj'} N_{\mu\beta j'} \right] \end{aligned}$$

untuk $\mu = \mu'$; $j = j'$

$$= C_j [2\pi N_{\mu\beta_j}] \quad (A-13)$$

dari persamaan (A-13) dapat diperoleh

$$C_j = \frac{1}{2\pi N_{\mu\beta_j}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\delta}_\theta \mathcal{E}_{z\mu, j}^* - \delta_z \mathcal{E}_{\theta\mu, j}^* dz \right] \quad (A-14)$$

$$\text{tinjau } \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\delta}_\theta \mathcal{E}_{z\mu, j}^* dz \quad (A-15)$$

dengan memasukkan persamaan (A-2) dan persamaan (A-4) kedalam persamaan (A-15) diperoleh

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{A}\gamma}{2\beta g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(i\gamma a)} \left[H_{\nu+1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)}(i\gamma r') \sin(\nu-1)\theta \right] e^{-i\beta g R\theta} \\ \times \left[B_j^* F_j^* H_\mu^{(2)*}(pr) e^{i\mu\theta} e^{i\beta z} \right] dz$$

untuk $j = 1$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_\theta \mathcal{E}_{z\mu 1}^* dz = \frac{A\gamma}{2\beta g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(Ka)} \\ \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ H_{\nu+1}^{(1)}[\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)}[\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin(\nu-1)\theta \right\} e^{-i\beta g R\theta} \\ \times \left\{ B_1^* n_2 \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \left[H_\mu^{(2)*}(pr) / H_\mu^{(2)}(pr) \right] \right\} dz e^{-i\mu\theta} e^{-i\beta g z}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_\theta e^{z\mu_1} dz = \frac{A\gamma}{2\beta g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(Ka)} B_{12}^* \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{H_\mu^{(2)*}(pr)}{H_\mu^{(2)*}(pr)} e^{-i\beta g R \theta}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[H_{\nu+1}^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin(\nu+1)\theta + H_{\nu-1}^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin(\nu-1)\theta \right] dz \quad (A-16)$$

dimana

$$H_{\nu-1}^{(1)} \sin(\nu-1)\theta + H_{\nu+1}^{(1)} \sin(\nu+1)\theta =$$

$$\frac{2\nu}{i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}} H_\nu^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin \nu \theta \cos \theta$$

$$+ 2H_\nu^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin \nu \theta \cos \theta \quad (A-17)$$

dengan memasukkan persamaan (A-17) kedalam persamaan (A-16) akan diperoleh

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_\theta e^{z\mu_1} dz = \frac{A\gamma}{2\beta g} \frac{J_\nu(Ka)}{H_\nu^{(1)}(Ka)} B_{12}^* \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \frac{H_\mu^{(2)*}(pr)}{H_\mu^{(2)*}(pr)} e^{-i\beta g R \theta}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{2\nu}{i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}} H_\nu^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin \nu \theta \cos \theta + 2H_\nu^{(1)} [i\gamma(a^2 + z^2)^{1/2}] \sin \nu \theta \cos \theta \right] dz \quad (A-18)$$

sehingga

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_\theta e^{z\mu_1} dz = 0 \quad (A-19)$$

Tinjau

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z e^{z\mu_1} dz \quad (A-20)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z \mathcal{E}_{z\mu_1}^* dz = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{J_v(Ka)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{A}{H_v^{(1)}(i\gamma r')} H_v^{(1)}(i\gamma r') \cos v \theta e^{-i\beta g R \theta} \right] \mathcal{E}_{z\mu_j}^* dz \quad (A-21)$$

dimana

$$\mathcal{E}_{z\mu_j}^* dz = \frac{w \epsilon_0 n_z^2}{\beta} \mathcal{E}_{z\mu_j}$$

$$\mathcal{E}_{z\mu_j}^* dz = \frac{w \epsilon_0 n_z^2}{\beta} B_j^* H_\mu^{(2)*}(\rho r) e^{i\mu\theta} e^{i\beta z} \quad (A-22)$$

dengan memasukkan persamaan (A-22) kedalam persamaan (A-21) maka akan kita peroleh

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z \mathcal{E}_{z\mu_1}^* dz = \frac{J_v(Ka)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{A}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{w \epsilon_0 n_z^2}{\beta} B_j^* \int_{-\infty}^{\infty} H_\mu^{(2)*}(\rho(R+a)) \times H_v^{(1)}[i\gamma(a^2+z^2)^{1/2}] \cos v\theta e^{i\mu\theta} e^{i\beta z} e^{-i\beta g R \theta}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z \mathcal{E}_{z\mu_1}^* dz = \frac{J_v(Ka)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{A}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{w \epsilon_0 n_z^2}{\beta} B_j^* H_\mu^{(2)*}(\rho(R+a)) \times \int_{-\infty}^{\infty} H_v^{(1)}[i\gamma(a^2+z^2)^{1/2}] \cos v\theta e^{i\mu\theta} e^{i\beta z} e^{-i\beta g R \theta} dz \quad (A-23)$$

karena $\mu = \beta g R$ maka persamaan (A-23) menjadi

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z \mathcal{E}_{z\mu_1}^* dz = \frac{A B_j}{\beta} \frac{J_v(Ka)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{A}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} w \epsilon_0 n_z^2 B_j^* H_\mu^{(2)*}(\rho(R+a)) \times \int_{-\infty}^{\infty} H_v^{(1)}[i\gamma(a^2+z^2)^{1/2}] \cos [v \arctan z/a] e^{\beta z} dz$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z \mathcal{E}_{z\mu_1}^* dz = \frac{A B_j}{\beta} \frac{J_v(Ka)}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} \frac{A}{H_v^{(1)}(i\gamma a)} w \epsilon_0 n_z^2 B_j^* H_\mu^{(2)*}(\rho(R+a)) I_v \beta \quad (A-24)$$

sehingga

$$C_j = \frac{-A B_j}{2\pi N \mu \beta_j} \frac{J'_\nu(Ka)}{H^{(1)}_\nu(i\gamma a)} \frac{i\omega \epsilon_0 n_2^2}{\beta} H^{(2)\prime}_\mu[\rho(R+a)] I_\nu \beta \quad (\text{A-25})$$

$$\rho = [n_2^2 k^2 - \beta^2]^{1/2}$$

untuk $k = 0$ maka $\rho = i\beta$

$$\beta = \rho/i$$

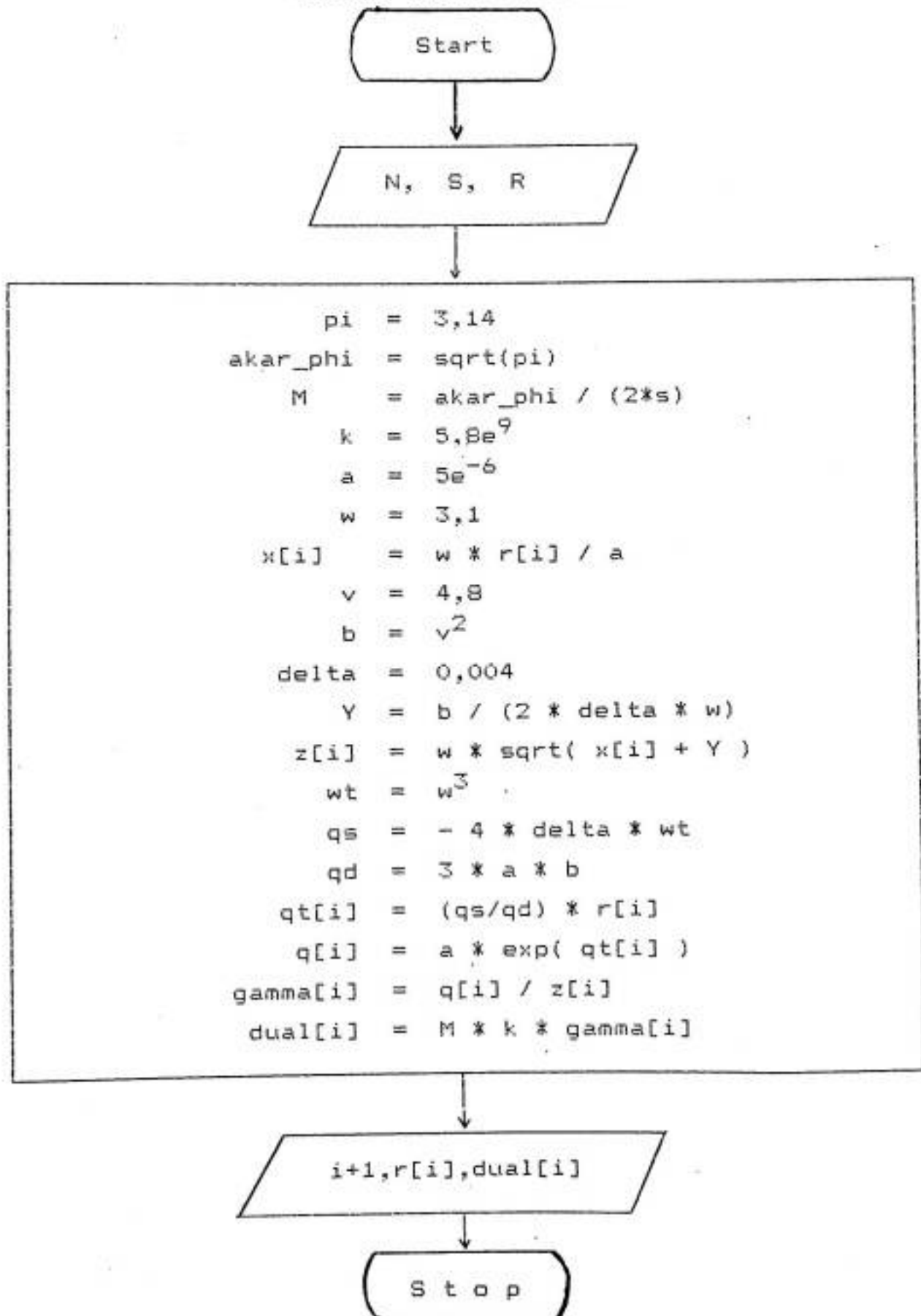
$$C_j = \frac{-A B_j}{2\pi N \mu \beta_j} \frac{J'_\nu(Ka)}{H^{(1)}_\nu(i\gamma a)} \frac{i\omega \epsilon_0 n_2^2}{\rho} H^{(2)\prime}_\mu[\rho(R+a)] I_\nu \beta \quad (\text{A-26})$$

Daya radiasi dari serat optik yang dibengkokkan diberikan oleh persamaan

$$P_r = \frac{\pi r}{R} \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} |C_j|^2 \left[\mathcal{E}_{\theta\mu_j} \mathcal{E}_{z\mu_j} - \mathcal{E}_{z\mu_j} \mathcal{E}_{\theta\mu_j} \right] d\beta \quad (\text{A-27})$$

LAMPIRAN B

BAGAN ALIR PROGRAM



LAMPIRAN C

PROGRAM KOMPUTER UNTUK MENGHITUNG KERUGIAN DAYA

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

main( )
{
    float pi,M,k,a,w,r[150],x[150],v,R;
    float b,delta,Y,s,qs,qd,qt[150],wt,z[150],akar_phi;
    long float dual[30],q[150],gamma[150];
    char nama_file[12],nomor[15];
    int i,N;

    clrscr();
    printf("Input jumlah nomor      : ");scanf("%d",&N);
    printf("Masukkan Nilai s      : ");scanf("%f",&s);
    printf("Masukkan Nilai awal R : ");scanf("%f",&R);
    r[0] = R;
    for(i=1;i<N;i++)
        r[i] = r[i-1] + 0.005;
    for(i=0;i<N;i++)
    {
        pi = 3.14;
        akar_phi = sqrt(pi);
        M = akar_phi/(2*s);          /*M=sqrt(3.14)/(2*s)*/
        k = 5.8e9;
        a = 5e-6;
        w = 3.1;
        x[i] = w * r[i]/a;          /*x[i] = 3,1 * r[i]/5e-6*/
        v = 4.8;
        b = pow (v,2);
        delta = 0.004;
        Y = b/(2*delta*w);          /*Y = pow(4,8,2)/(0,004*3,1)*/
        z[i] = w * sqrt(x[i] + Y);
        wt = pow (w,3);
        qs = -4*delta*wt;
        qd = 3*a*b;
        qt[i] = (qs/qd)*r[i];
        q[i] = a* exp (qt[i]);
        gamma[i] = q[i]/z[i];
        dual[i] = M*k*gamma[i];
    }
    printf("-----\n");
    printf("      nomor      R[i]      dua alpha      \n");
    printf("===== \n");
    for (i=0;i<N;i++)
    {
        printf("   %.2d      %5.5f      %8.63\n",i+1,r[i],dual[i];
    }
    printf("-----\n");
}
}
```