

BAB III

DASAR – DASAR GELOMBANG CAHAYA

Tujuan Instruksional Umum

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perambatan gelombang, yang merupakan hal yang penting dalam sistem komunikasi serat optik. Pembahasan secara matematis dibuat seminimal mungkin, tetapi ditekankan pada aspek-aspek dasar yang berguna bagi sistem komunikasi optik.

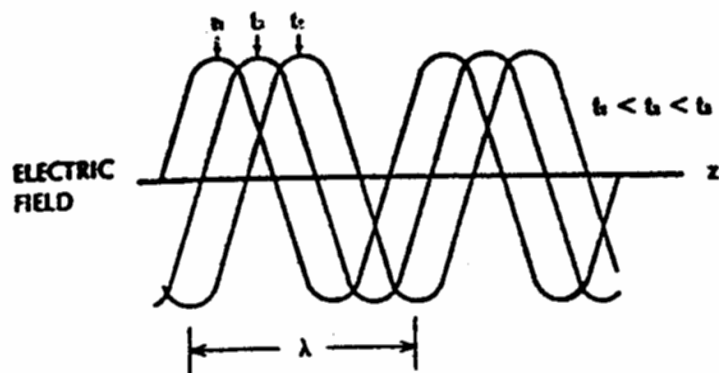
Tujuan Instruksional Khusus

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan mahasiswa dapat :

1. Memahami mengenai perambatan gelombang elektromagnetik.
2. Memahami tentang dispersi dan distorsi pulsa karena pengaruh lebar-spektral sumber optik.
3. Memahami tentang dispersi bahan dan pelebaran pulsa yang diakibatkannya.
4. Memahami tentang pemantulan cahaya atau gelombang dan pengaruhnya pada perambatan gelombang (cahaya) pada sistem komunikasi optik.

3.1 Gelombang Elektromagnetik

Cahaya terdiri atas medan listrik dan medan magnetik yang berosilasi dengan sangat cepat, yaitu pada orde 10^{14} hertz. Kedua medan ini merambat seperti gelombang pada kecepatan yang sangat tinggi. Gelombang elektromagnetik yang merambat pada arah z dapat dilihat pada gambar 3.1. Medan listrik digambar sebanyak tiga kali untuk memperlihatkan bagaimana gelombang tersebut merambat. Pada gambar diperlihatkan bahwa gelombang berulang secara periodik setiap selang waktu tertentu, pada jarak λ (yang disebut panjang gelombang). Besaran yang merupakan kebalikan dari panjang gelombang, yaitu $1/\lambda$, disebut bilangan-gelombang (*wavenumber*).



Gambar 3.1 Medan listrik pada gelombang yang merambat pada arah z

Medan listrik untuk gelombang pada gambar 3.1 dapat dinyatakan dengan rumusan :

$$E = E_0 \sin(\omega t - kz) \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana E_0 adalah amplitudo puncak, $\omega = 2 \pi f$ radian/detik, dan f adalah frekuensi dalam hertz. Faktor ω disebut frekuensi sudut (radian) dan k adalah faktor propagasi,

$$k = \frac{\omega}{v} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

dimana v adalah kecepatan gelombang. Faktor $\omega t - kz$ adalah fase gelombang dan kz adalah pergeseran fase setelah perjalanan sepanjang z . Jika waktu t konstan, persamaan medan listrik menunjukkan variasi sinusoidal spasial. Jika posisi z konstan, persamaan medan listrik menunjukkan variasi sinusoidal menurut waktu.

Faktor propagasi k dapat dinyatakan dengan indeks bias n , kecepatan $v = c / n$, sehingga :

$$k = \frac{\omega n}{c} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

Konstanta propagasi di ruang hampa dinotasikan sebagai k_0 , dan karena $n = 1$, maka

$$k_0 = \frac{\omega}{c} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

Dengan demikian, konstanta propagasi pada suatu medium dapat dinyatakan sebagai

$$k = k_0 n \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

Oleh karena $\lambda = v / f$, maka

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

dan persamaan ini menghubungkan konstanta propagasi dan panjang gelombang dalam suatu medium. Panjang-gelombang dalam ruang hampa $\lambda_0 = c / f$, dan panjang-gelombang dalam suatu medium $\lambda = v / f$, sehingga

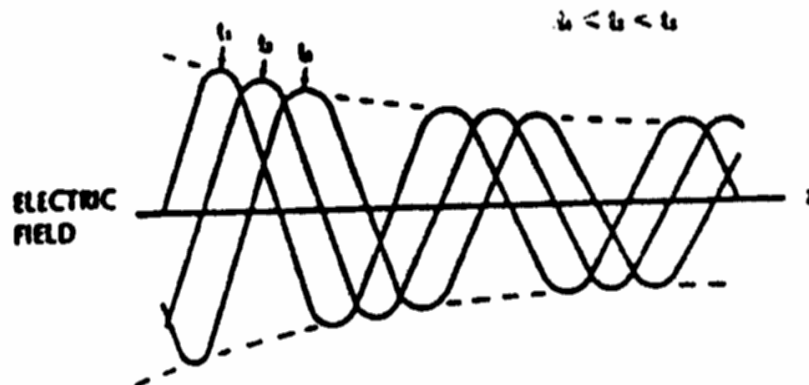
$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v} = n \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

Jika gelombang tidak kehilangan energi saat merambat, persamaan gelombang dapat dinyatakan dengan persamaan (3.1). Namun jika gelombang mengalami penyusutan (atenuasi), maka persamaan (3.1) harus dimodifikasi untuk memasukkan faktor penyusutan dalam persamaan, yaitu sebagai berikut :

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \sin (\omega t - kz) \quad (3.8)$$

dengan α adalah koefisien penyusutan. Harga koefisien ini menunjukkan kecepatan peluruhan medan listrik saat gelombang merambat dalam medium yang merugi. Untuk serat optik yang berkualitas, penyusutan ini mungkin hanya beberapa decibel saja (bahkan untuk jalur yang cukup panjang). Dalam medium yang merugi, medan listrik dapat

diperlihatkan pada gambar 3.2 berikut ini. Garis putus-putus pada gambar adalah kurva faktor $\exp(-\alpha z)$ yang menunjukkan rugi-rugi penyusutan pada persamaan (3.8).



Gambar 3.2 Penyusutan gelombang berjalan

3.2 Dispersi, Cacat Pulsa, dan Laju Informasi

Pada pembahasan sebelumnya, dianggap bahwa sumber optik dalam sistem komunikasi optik memancarkan panjang-gelombang tunggal (atau frekuensi tunggal). Dalam kenyataannya hal ini tidaklah benar. Sumber optik biasanya meradiasikan cahaya dalam suatu jangkauan panjang-gelombang tertentu yang disebut lebar-jalur (*linewidth*) atau lebar-spektral (*spectral width*). Makin kecil lebar-jalur maka sumber tersebut semakin koheren. Sumber yang koheren sempurna hanya meradiasikan panjang-gelombang tunggal, sehingga lebar-jalurnya nol

dan disebut monokromatis sempurna. Beberapa lebar-jalur tipikal dapat dilihat pada tabel 3.1. Konversi antara lebar-spektral dalam panjang-gelombang $\Delta\lambda$ dan lebar-bidang dalam frekuensi Δf adalah sebagai berikut :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

dimana f adalah frekuensi tengah, λ adalah panjang-gelombang tengah, dan Δf adalah jangkauan frekuensi yang diradiasikan.

Tabel 3.1 Lebar-spektral tipikal sumber cahaya

Sumber Cahaya	Lebar-jalur ($\Delta\lambda$)
Dioda Pancar Cahaya (LED)	20 – 100 nm
Dioda Laser (LD)	1 – 5 nm
Nd : Laser YAG	0,1 nm
Laser HeNe	0,002 nm

Gambar 3.3 menunjukkan distribusi panjang-gelombang sebuah LED. Panjang-gelombang, atau frekuensi yang terkandung dalam sinyal disebut spektrum. Pada gambar 3.3, panjang-gelombang tengahnya adalah 820 nm (0,82 μm). Lebar-jalur biasanya diukur dari titik setengah-daya, sehingga dalam kasus ini :

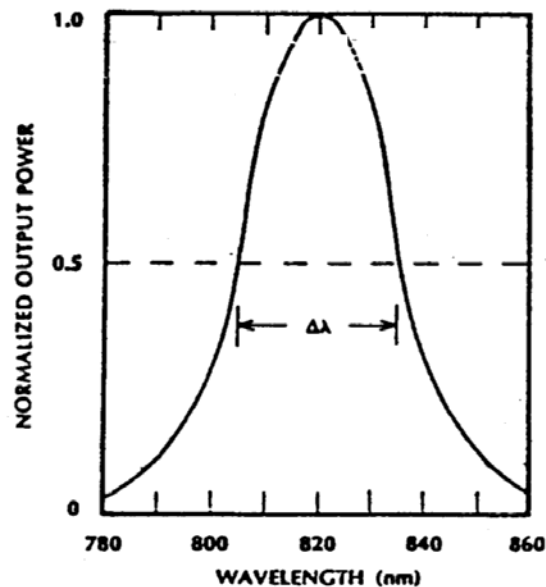
$\Delta\lambda = 30 \text{ nm}$ yaitu dari 805 nm sampai dengan 835 nm dan lebar-bidang fraksional adalah $30 \text{ nm} / 820 \text{ nm}$ ($= 0,037$ atau 3,7 %).

Menurut tabel 3.1, dioda laser lebih koheren daripada LED. Laser zat padat Neodymium Yttrium-aluminium-garnet (Nd : YAG) dan laser gas helium-neon bahkan lebih koheren daripada LED dan LD. Meskipun demikian, ukuran yang kecil serta kebutuhan daya yang rendah pada LED dan LD membuat kedua sumber cahaya ini banyak digunakan dalam sistem komunikasi optis. Lebar-spektral membatasi kapasitas informasi sebuah sistem optis, namun jika batas kapasitas informasi ini masih lebih tinggi daripada kapasitas yang dibutuhkan, maka sifat non-koheren sumber dapat diabaikan.

Dispersi Bahan dan Cacat Pulsa

Pada bahan gelas yang digunakan dalam serat optik, indeks bias n berubah sesuai dengan panjang gelombang. Demikian juga kecepatan gelombang juga berubah sesuai panjang-gelombang. Dispersi merupakan istilah yang dipakai untuk menyatakan sifat perubahan kecepatan sesuai dengan panjang-gelombang. Jika perubahan kecepatan disebabkan oleh sifat bahan, maka efek ini disebut dispersi bahan (*material dispersion*). Untuk serat dan pemandu-gelombang lain, dispersi juga disebabkan

oleh struktur sehingga disebut dispersi pemandu-gelombang (*waveguide dispersion*).

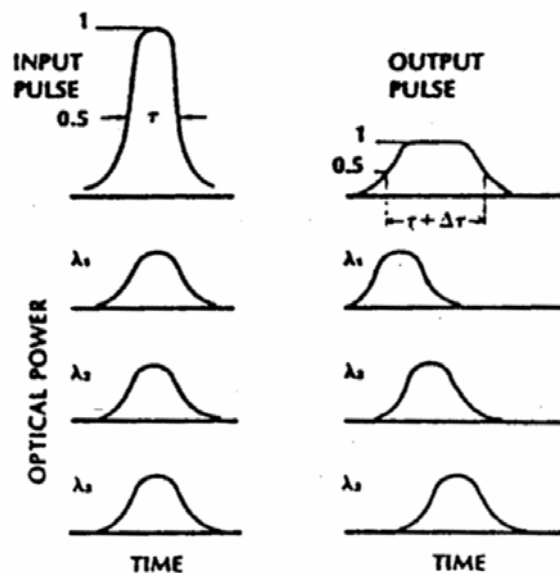


Gambar 3.3 Spektrum sebuah dioda pancar cahaya (LED)

Gambar 3.4 menunjukkan pengaruh yang terjadi jika digunakan sumber cahaya yang mempunyai lebar-jalur tidak sama dengan nol. Pulsa yang dihasilkan akan terdiri atas jumlahan pulsa-pulsa yang identik dengan panjang-gelombang yang berbeda (pada gambar diilustrasikan ada 3 panjang-gelombang). Pulsa-pulsa ini akan merambat dengan kecepatan yang berbeda dan mencapai ujung serat pada waktu yang berbeda pula. Hal ini akan mengakibatkan pulsa yang diterima mengalami pelebaran, karena pulsa yang diterima adalah jumlahan dari pulsa-

pulsa yang membentuk pulsa input. Makin jauh pulsa berjalan, semakin lebar pula pelebaran pulsa yang terjadi.

Dispersi juga mengakibatkan sinyal analog mengalami cacat (distorsi). Setelah merambat melalui bahan dispersif, sinyal yang diterima di ujung penerima telah mengalami perubahan bentuk. Variasi sinyal yang berupa perbedaan amplitudo akan menjadi lebih kecil daripada variasi sinyal inputnya. Dispersi semacam ini diilustrasikan pada gambar 3.5.



Gambar 3.4 Pelebaran pulsa akibat perambatan melalui bahan dispersif. Pulsa input terdiri atas 3 panjang-gelombang yang masing-masing merambat dengan kecepatan yang berbeda

Pelebaran pulsa membatasi kapasitas informasi sistem. Jika frekuensi modulasi adalah f , periode $T = 1 / f$, dan sumber cahaya memancarkan panjang-gelombang antara λ_1 dan λ_2 . Dari data ini dapat dipertanyakan berapa tunda waktu antara kedatangan panjang-gelombang tercepat dan yang paling lambat. Jika tunda waktu ini sama dengan setengah periode modulasi, maka

$$\Delta\tau = \frac{T}{2} \quad \text{.....(3.10)}$$

dan modulasi akan menghapus secara total. Jika tunda waktu lebih kecil daripada $T / 2$, maka modulasi akan saling menghapus secara sebagian dan menghasilkan variasi sinyal pada penerima. Dengan mengambil persamaan (3.10) sebagai pelebaran pulsa maksimum yang diijinkan, maka frekuensi modulasi dibatasi oleh persamaan

$$f = \frac{1}{T} \leq \frac{1}{2\Delta\tau} \quad \text{.....(3.11)}$$

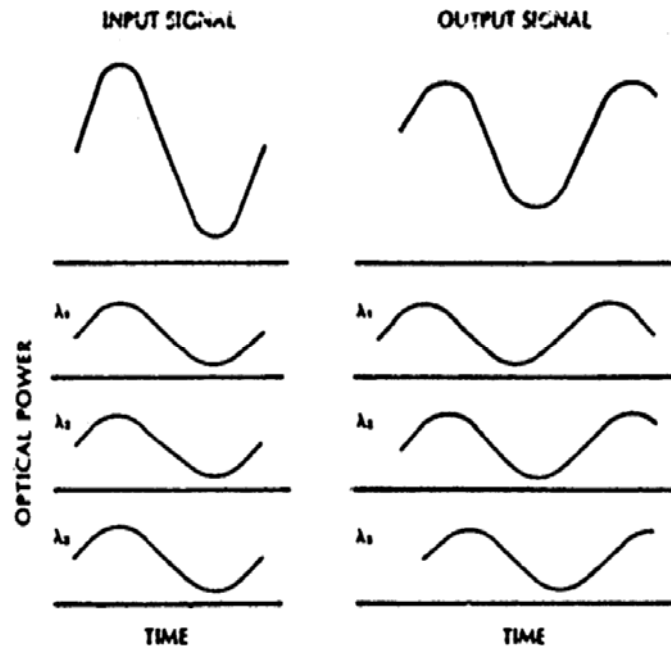
3.3 Pemantulan Pada Bidang Batas

Fenomena pemantulan cahaya menjadi penting pada perancangan sistem komunikasi serat optik. Dalam sistem ini terdapat tiga bidang batas dimana pemantulan dapat terjadi, yaitu :

1. Batas udara-gelas saat cahaya dikopel dari sumber ke dalam serat,

2. Batas teras serat dengan kulit,
3. Batas udara-gelas saat dua serat akan disambung.

Ketiga bidang batas pemantulan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.5 Dispersi yang mengakibatkan penurunan amplitudo sinyal analog



Gambar 3.6 Bidang batas pemantulan dalam sistem komunikasi optis

Pada saat pengkopelan cahaya dari sumber ke serat dan pada tempat penyambungan serat, pematulan cahaya harus dapat diminimalkan, karena proses pemantulan ini akan mengurangi atau memperkecil daya yang ditransmisikan (diteruskan ke medium kedua). Sebaliknya, pemantulan di dalam serat harus tinggi agar cahaya dapat terjebak dan terus merambat sampai ke ujung penerima.

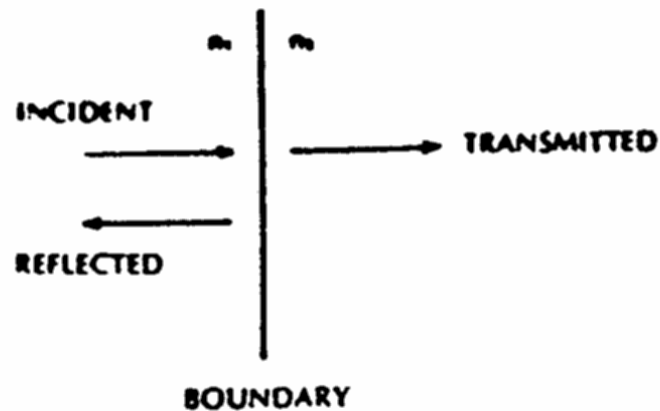
Penghitungan rugi-rugi pemantulan paling sederhana adalah pada pemantulan cahaya yang datang sejajar garis normal (gambar 3.7). Koefisien pemantulan ρ adalah perbandingan besarnya medan listrik yang datang dengan medan listrik terpantul, yaitu :

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

dengan n_1 adalah indeks bias medium pertama (tempat cahaya datang) dan n_2 adalah indeks bias medium kedua. Jika $n_1 > n_2$, koefisien pemantulan menjadi negatif, yang menandakan pergeseran fase sebesar 180° .

Reflektans R adalah perbandingan intensitas berkas cahaya terpantul dan intensitas berkas cahaya yang datang, yaitu :

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(3.13)$$



Gambar 3.7 Gelombang datang pada bidang batas; sebagian dipantulkan, sebagian diteruskan

3.4 Pemantulan Sudut Kritis

Jika sudut datang lebih besar dari suatu nilai tertentu (yang disebut sudut kritis, θ_c), maka akan terjadi pemantulan total. Besarnya sudut kritis dapat diketahui dari persamaan,

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

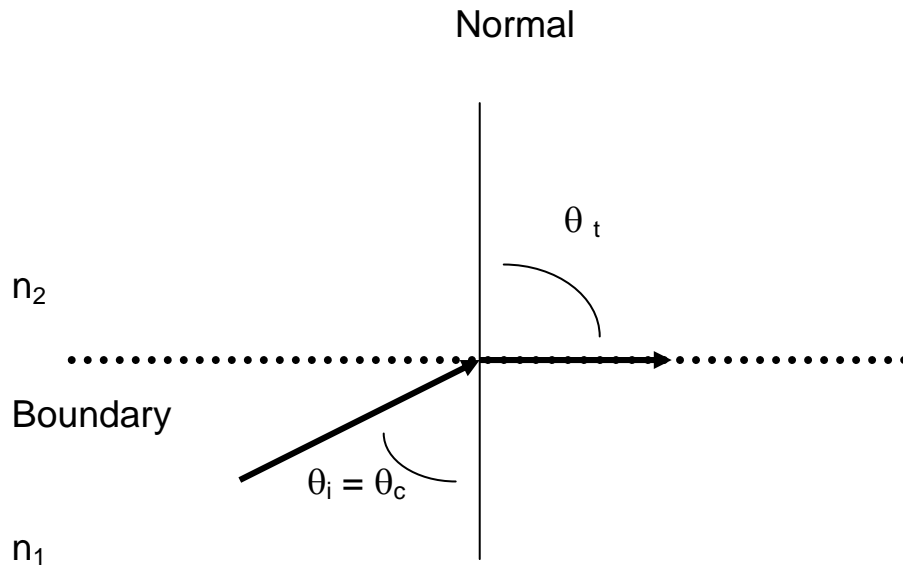
Karena nilai sinus tidak pernah lebih besar daripada satu, maka dari persamaan (3.14) dapat diambil kesimpulan bahwa sudut kritis hanya dapat terjadi jika $n_1 > n_2$, yaitu saat cahaya merambat dari medium dengan indeks bias

yang lebih tinggi ke medium dengan indeks bias yang lebih rendah.

Pada gambar 3.8 diperlihatkan sudut datang sama dengan sudut kritis dimana cahaya dibiaskan menyusur bidang batas kedua medium. Jika sudut datang diperbesar, maka cahaya tidak akan dibiaskan menuju medium kedua tetapi akan dipantulkan kembali ke medium pertama. Pemantulan sempurna pada bidang batas antara dua dielektrik disebut pemantulan internal total. Pemantulan seperti inilah yang sangat bermanfaat untuk menjelaskan perambatan cahaya pada serat optik. Berikut diperlihatkan tabel yang memuat beberapa sudut kritis untuk berbagai bidang batas antara dua dielektrik.

Tabel 3.2 Sudut kritis untuk berbagai bidang batas antara dua dielektrik

Bidang Batas	n_1	n_2	θ_c
Gelas-udara	1.5	1.0	41,8°
Plastik-plastik	1,49	1,39	68,9°
Gelas-plastik	1,46	1,4	73,5°
Gelas-gelas	1,48	1,46	80,6°



Gambar 3.8 Pembiasan dengan sudut datang sama dengan sudut kritis

3.4 Ringkasan

Bab ini membangun dasar-dasar tentang gelombang cahaya yang diterapkan pada serat optik. Besaran-besaran yang berguna antara lain cepat rambat gelombang, faktor propagasi, amplitudo, fase, dan panjang-gelombang. Perambatan gelombang cahaya juga dipengaruhi oleh koefisien penyusutan, yang pada akhirnya akan menimbulkan adanya rugi-rugi.

Dispersi dan distorsi pulsa dipengaruhi oleh lebar-spektral sumber optik yang digunakan pada sistem komunikasi. Pada tingkatan selanjutnya, hal ini akan mempengaruhi laju informasi yang dapat didukung oleh sistem tersebut. Selain itu, dispersi pulsa juga dipengaruhi oleh bahan atau materi sehingga disebut dispersi bahan.

Pemantulan pada bidang batas mempunyai peranan penting dalam sistem komunikasi optik. Pemantulan

internal total memungkinkan gelombang cahaya tetap terpandu dalam serat optik.

3.6 Contoh Soal dan Penyelesaiannya

1. Untuk bidang batas udara-gelas, hitung berapa bagian daya yang terpantul dan berapa bagian daya yang diteruskan. Hitung juga rugi-rugi transmisi dalam decibel, jika indeks bias gelas adalah 1,5.

Penyelesaian

$$R = \left(\frac{1 - 1,5}{1 + 1,5} \right)^2 = 0,04 = 4\%$$

Dari perhitungan di atas, maka 4 % cahaya dipantulkan, dan sisanya diteruskan yaitu sebesar 96 %. Rugi-rugi transmisi dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Rugi - rugi transmisi} &= -10 \log \frac{\text{cahaya diteruskan}}{\text{cahaya datang}} \\ &= -10 \log \frac{96\%}{100\%} \\ &= 0,177 \text{ dB} \end{aligned}$$

3.7 Soal-soal Latihan

1. Hitunglah konstanta atau faktor propagasi di udara dan dalam gelas, jika panjang-gelombang di ruang-hampa adalah $0,82 \mu\text{m}$?
2. Untuk bidang batas udara-gelas, hitung berapa bagian daya yang terpantul dan berapa bagian daya yang

diteruskan. Hitung juga rugi-rugi transmisi dalam decibel, jika indeks bias gelas adalah 1,55.

3. Jelaskan bagaimana lebar-spektral sumber optik dapat membatasi laju informasi yang dapat didukung oleh sistem komunikasi serat optik ?
4. Bagaimanakah caranya agar di dalam serat optik selalu terjadi pemantulan internal total ? Sebutkan beberapa persyaratan yang harus dipenuhi ?
5. Hitunglah sudut kritis untuk bidang batas udara-gelas, jika indeks bias gelas adalah 1,55 ?