

Banyaknya Mode yang Dapat Didukung Oleh Fiber

- Parameter yang dipakai untuk menentukan banyaknya mode yang dapat didukung oleh fiber adalah frekuensi cut-off (V)
- Frekuensi cut-off merupakan ukuran terhadap tingkat bimbingan suatu fiber
- $V = \pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \pi \frac{d}{\lambda} NA$
- Jika nilai V yang diperoleh dari persamaan di atas adalah cukup jauh lebih besar dari satu, maka jumlah mode yang dapat didukung oleh fiber dinyatakan dengan persamaan:
$$N \cong \frac{1}{2} V^2$$
- Setiap mode mempunyai nilai V yang berbeda, dimana mode dengan frekuensi cut-off yang lebih kecil dari nilai V fiber saja yang akan merambat
- Tabel berikut menunjukkan nilai V untuk mode orde terendah yang akan didukung oleh sebuah step indeks fiber

Mode	Nilai V
HE ₁₁	0
TE ₀₁ , TM ₀₁	2,405
HE ₂₁	2,42
HE ₁₂ , EH ₁₁	3,83
HE ₃₁	3,86
EH ₂₁	5,14
HE ₄₁	5,16
TE ₀₂ , TM ₀₂	5,52
HE ₂₂	5,53

- Untuk rambatan single mode besarnya nilai cut-off fiber adalah $V \leq 2,405$

Contoh 3

Fiber dengan diameter core sebesar 50 μm memiliki nilai NA sebesar 0,343 dan dipakai pada gelombang cahaya sebesar 0,8 μm . Hitunglah nilai V serta jumlah mode yang dapat didukung oleh fiber tersebut.

Penyelesaian

$$V = \pi \frac{d}{\lambda} NA = 67,3$$

$$N = \frac{1}{2} V^2 = 267 \text{ mode}$$

DEGRADASI SINYAL DALAM FIBER OPTIK

Redaman sinyal (juga dikenal dengan rugi-rugi fiber atau sinyal) adalah salah satu ciri fiber optik yang paling penting, karena kontribusinya yang besar dalam menentukan jarak maksimum antara pemancar dan penerima tanpa penguat atau repeater. Karena penguat dan repeater mahal dalam pembuatannya, pemasangannya dan pemeliharaannya, sehingga tingkat redaman dalam fiber optik memiliki pengaruh yang besar dalam biaya sistem.

Ciri lain fiber optik yang sama pentingnya adalah distorsi sinyal. Mekanisme distorsi dalam fiber optik menyebabkan pulsa-pulsa sinyal optik melebar ketika merambat disepanjang fiber. Jika pulsa-pulsa ini merambat cukup jauh, pulsa-pulsa ini akan tumpang tindih dengan pulsa-pulsa disebelahnya, sehingga akan menghasilkan kesalahan pada keluaran penerima. Jadi mekanisme distorsi sinyal membatasi kapasitas fiber dalam membawa informasi.

Redaman

Mekanisme redaman dalam fiber optik adalah penyerapan (absorption), hamburan (scattering), dan rugi-rugi radiasi (radiative loss) energi optik. Penyerapan berhubungan dengan materi fiber sedangkan hamburan berhubungan dengan materi dan ketidaksempurnaan struktur fiber. Redaman akibat radiasi berasal dari gangguan geometri fiber

Satuan Redaman

Ketika cahaya merambat disepanjang fiber, dayanya menurun secara eksponensial terhadap jarak yang ditempuh. Jika $P(0)$ adalah daya optik di dalam fiber pada titik asal (pada jarak nol km, $z = 0$), maka daya $P(z)$ pada jarak z adalah:

$$P(z) = P(0) e^{-\alpha_p z}$$
$$\alpha_p = \frac{1}{z} \ln \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right]$$

dengan α merupakan koefisien redaman yang memiliki satuan km^{-1} .

Untuk kemudahan dalam menghitung redaman sinyal optik didalam fiber, dipakai prosedur yang umum untuk mengekspresikan koefisien redaman dalam satuan dB/km, yaitu:

$$\alpha \text{ (dB/km)} = \frac{10}{z} \log \left[\frac{P(0)}{P(z)} \right]$$

Parameter ini secara umum direferensikan sebagai redaman fiber atau rugi-rugi fiber.

Contoh 4

Pertimbangkan fiber optik dengan panjang 30 km yang memiliki redaman 0,8 dB/km pada 1300 nm. Tentukan daya keluaran, jika ditransmisikan daya optik sebesar 200 μm .

Penyelesaian

$$P_{\text{in}} \text{ (dBm)} = 10 \log \left[\frac{P_{\text{in}} \text{ (W)}}{1 \text{ mW}} \right] = 10 \log \left[\frac{200 \times 10^{-6} \text{ W}}{1 \times 10^{-3} \text{ W}} \right] = -7 \text{ dBm}$$

$$P_{\text{out}} \text{ (dBm)} = P_{\text{in}} \text{ (dBm)} - \alpha z = -7 \text{ dBm} - (0,8 \text{ dB/km}) (30 \text{ km}) = -7 - 24 = -31 \text{ dBm.}$$

Dalam satuan watt, daya keluaran adalah:

$$P \text{ (watt)} = 10^{-31/10} (1 \text{ mW}) = 0,79 \times 10^{-3} \text{ mW}$$

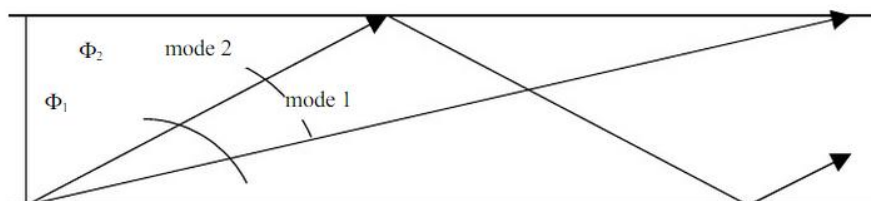
Dispersi

Dispersi dalam fiber optik mengakibatkan menyebarnya pulsa-pulsa cahaya dalam daerah waktu, sehingga pulsa menyatu dengan pulsa-pulsa yang terdahulu dan berikutnya, dan akan menghasilkan kesalahan pada keluaran penerima. Pulsa-pulsa ini dapat dipisahkan dengan menjauhkannya satu dari yang lain pada pemancar, tetapi hal ini akan mengurangi laju bit maksimum (Periode pulsa merupakan kebalikan dari bit rate). Pada beberapa laju bit yang tinggi, panjang maksimum fiber yang semula dibatasi oleh rugi-rugi, kemudian berubah menjadi dibatasi oleh dispersi.

Ada tiga macam dispersi pada fiber, yang disebabkan oleh tiga mekanisme yang berbeda, yaitu dispersi intermodal, dispersi bahan dan dispersi waveguide.

Dispersi Intermodal

- Alur total yang ditempuh oleh suatu sinar pada setiap mode adalah bersifat zigzag, dan mempunyai panjang total yang berbeda dari setiap sinar mode yang lain (Perhatikan Gambar di bawah).



- Jadi, sebuah pulsa yang dipancarkan ke dalam suatu fiber akan merambat melalui beberapa alur yang berbeda dan tiba pada ujung yang jauh pada waktu yang berbeda. Pulsa yang diterima adalah penjumlahan dari pulsa-pulsa mode ini, dimana masing-masing diperlambat dengan waktu yang berbeda-beda.
- Keterlambatan yang terpendek adalah sinar yang merambat lurus pada inti, sedangkan yang terpanjang adalah sinar dengan sudut datang hanya sedikit lebih besar dari sudut kritis atau sama dengan sudut kritis. Selisih propagation delay time Δ_t dapat diturunkan sbb:

Dengan berpedoman pada Gambar di atas, (menunjukkan dua sinar dengan mode yang berbeda dan mengikuti alur-alur zigzag di sepanjang fiber dengan panjang z (1 km)) panjang alur zigzag total diperoleh sebagai,

$$Z_t = \frac{z}{\sin \Phi}$$

dimana Φ adalah sudut masuk dari mode yang bersangkutan dengan garis tegak lurus pada dinding fiber. Dalam mode orde terendah $\Phi = \Phi$ (maks) = 90° dan pada mode orde tertinggi $\Phi = \Phi$ (min) = $\Phi_c = \sin^{-1}(n_2/n_1)$

Pada Φ (maks), alur mode terpendek adalah:

$$Z_t(\text{min}) = \frac{z}{\sin \Phi(\text{maks})} = \frac{z}{\sin 90^\circ} = z$$

dan pada Φ (min), alur mode terpanjang adalah:

$$Z_t(\text{maks}) = \frac{z}{\sin \Phi(\text{min})} = \frac{z}{\sin \Phi_c} = z \frac{n_1}{n_2}$$

Selisih Δ_z panjang alur maks dan min didapatkan sebagai:

$$\Delta_z = Z_t(\text{maks}) - Z_t(\text{min}) = z \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)$$

dengan memasukkan $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ diperoleh:

$$\Delta_z = z \frac{\Delta}{1 - \Delta}$$

Karena sinar-sinar cahaya dalam fiber lewat melalui suatu medium dielektrik dengan konstanta dielektrik ϵ_r yang lebih besar dari satu, sinar akan bergerak lebih lambat dibandingkan jika sinar bergerak di ruang bebas. Permeabilitas relatif $\mu_r = 1$, sehingga kecepatan fasa sinar di dalam medium gelas adalah:

$$v_p(\text{gelas}) = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

persamaan ini sama dengan persamaan untuk saluran transmisi.

Karena $\epsilon = n^2$ maka di dalam inti gelas dengan indeks bias, n_1 diperoleh:

$$v_p(\text{gelas}) = \frac{c}{n_1}$$

Jadi, selisih keterlambatan waktu antara mode orde terendah dan orde tertinggi diperoleh dengan membagi selisih panjang alur dengan kecepatan fasa, yaitu:

$$\Delta_t = \frac{\Delta z}{v_p(\text{gelas})} = \frac{n_1 z \Delta}{c (1-\Delta)} \quad (\text{ndet/km})$$

- Perlu dicatat bahwa dispersi jenis ini adalah ciri dari fiber dan tidak dipengaruhi oleh panjang gelombang cahaya. Selain itu dispersi tidak terjadi dalam single mode fiber.

Contoh 5

Untuk fiber step indeks dengan $n_1 = 1,55$ dan $\Delta = 0,0258$, tentukanlah dispersi per kilometer dan total dispersi dalam suatu fiber dengan panjang 12,5 km

Penyelesaian

$$(a) \Delta_t = \frac{n_1 z \Delta}{c (1-\Delta)} = \frac{1,55 \times 1000 \times 0,0258}{3 \times 10^8 \times (1-0,0258)} = 136,9 \times 10^{-9} = 136,9 \text{ n det/km}$$

$$(b) \text{ Dispersi total: } \Delta_t = \Delta_t (\text{per km}) \times z = 1369 \times 12,5 = 1,71 \mu\text{det}$$

- Dispersi intramodal untuk multimode graded-index fiber dinyatakan dengan persamaan:

$$\Delta_t = \frac{n_1 z \Delta^2}{8c}$$

Contoh 6

Misalkan fiber dalam contoh di atas merupakan multimode graded-index fiber, maka tentukanlah dispersi maksimumnya !

Penyelesaian

$$\Delta_t = \frac{n_1 z \Delta^2}{8c} = \frac{1,55 \times 1000 \times 0,0258^2}{8 \times 300 \times 10^6} = 0,43 \text{ ndet/km}$$

Untuk fiber sepanjang 12,5 km, $\Delta_t = 0,43 \times 12,5 = 5,38 \text{ ndet}$

Dispersi Bahan

- Indeks bias inti (gelas) adalah tidak sama untuk sinar-sinar dengan panjang gelombang yang berbeda-beda, tetapi berubah disepanjang spectrum. Sebagai akibatnya, jika pulsa cahaya yang dipancarkan mengandung komponen dengan beberapa panjang gelombang yang berbeda, yang terpusat pada suatu panjang gelombang tengah λ_0 seperti yang ditunjukkan dalam gambar dibawah, maka komponen pulsa yang mengandung panjang gelombang yang lebih pendek akan mengalami delay yang lebih besar dari komponen dengan panjang gelombang yang lebih besar.
- Dispersi bahan telah dibuktikan sebanding dengan penurunan kedua dari indeks bias terhadap panjang gelombang, yaitu $d^2n/d\lambda^2$, dan dispersi yang dihasilkan adalah:

$$\Delta_t = \left(-\frac{z}{c} \lambda_0 \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right) \lambda_{3 \text{ dB}}$$

$$\text{dengan } D_m = \left(-\frac{z}{c} \lambda_0 \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right) = \text{Koefisien dispersi bahan}$$

(pdet/nm.km)

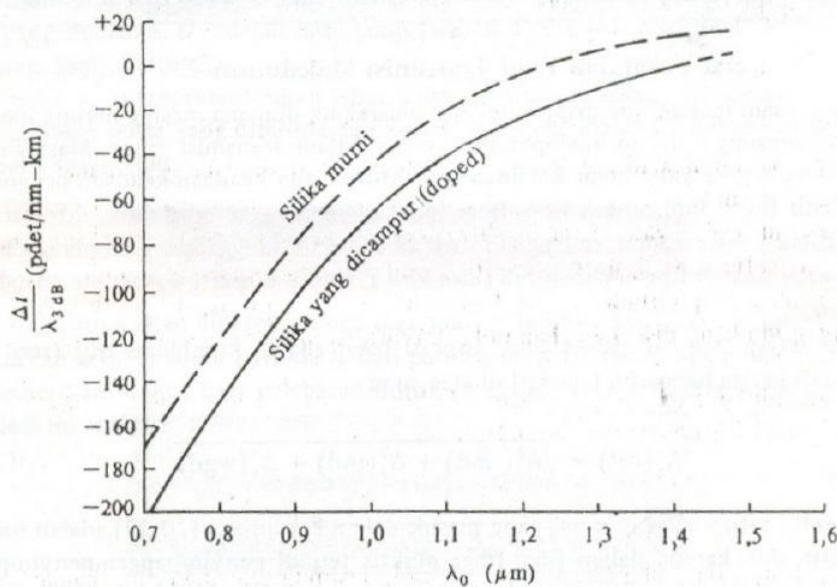
λ_0 = panjang gelombang tengah dari spektrum cahaya

$\lambda_{3 \text{ dB}}$ = lebar spektrum (analog dengan lebar jalur 3 dB)

Sehingga untuk fiber sepanjang 1 km ($z = 1 \text{ km}$):

$$\Delta_t = D_m z \lambda_{3 \text{ dB}} \text{ (ndet/km)}$$

- Nilai-nilai koefisien dispersi bahan untuk fiber silica murni dan yang dicampur (doping) ditunjukkan gambar berikut



Nilai Koefisien Dispersi Bahan untuk Fiber Silica Murni dan yang dicampur

Berdasarkan gambar di atas lengkung dispersi bahan ini menyilang nol dekat panjang gelombang sebesar $1,3 \mu\text{m}$. Karena itu, jika dipakai sebuah fiber single mode pada panjang gelombang dekat $1,3 \mu\text{m}$, dispersi akan hampir dihilangkan asalkan dipakai sumber cahaya monokromatis (lebar spektralnya sangat sempit).

Contoh 7

Fiber dalam contoh 5 akan digunakan dengan sebuah sumber cahaya $0,8 \mu\text{m}$ dengan lebar spectral $1,5 \text{ nm}$. Berapakah dispersi bahan yang dihasilkan ?

Penyelesaian

Berdasarkan grafik koefisien dispersi bahan, pada $0,8 \mu\text{m}$ $D_m = -0,15 \text{ ns/nm.km}$ untuk fiber yang didoping. Untuk fiber dengan panjang 1 km :

$$\Delta_t = D_m \cdot z \cdot \lambda_{\text{dB}} = -0,15 \text{ ndet/nm.km} \times 1 \text{ km} \times 1,5 \text{ nm} \\ = 0,225 \text{ nm/km (delay)}$$

Untuk fiber dengan panjang $12,5 \text{ km}$

$$\Delta_t = 12,5 \times 0,225 = 2,81 \text{ ndet}$$

Dispersi Waveguide

Karena sumber cahaya monokromatis tidak dapat dibuat, maka cahaya yang dipancarkan akan mengandung komponen dengan panjang gelombang yang berbeda. Sebagai akibatnya, mekanisme fiber dalam membimbing cahaya akan mengakibatkan pelebaran pulsa yang diterima, yaitu cahaya dengan panjang gelombang yang berbeda akan memiliki sudut datang yang berbeda sehingga sampai di ujung penerima dalam waktu yang berbeda. Efek ini adalah akibat dari sifat membimbing (guiding) dari fiber, sehingga timbul istilah dispersi waveguide.

Contoh 8

Suatu fiber single mode dengan panjang $12,5 \text{ km}$ digunakan dengan sumber cahaya $1,3 \mu\text{m}$ yang mempunyai lebar spectrum 6 nm . Hitunglah dispersi waveguide yang ditimbulkan jika koefisien dispersi waveguide adalah $D_w = 6,6 \text{ pdet/nm.km}$!

Penyelesaian

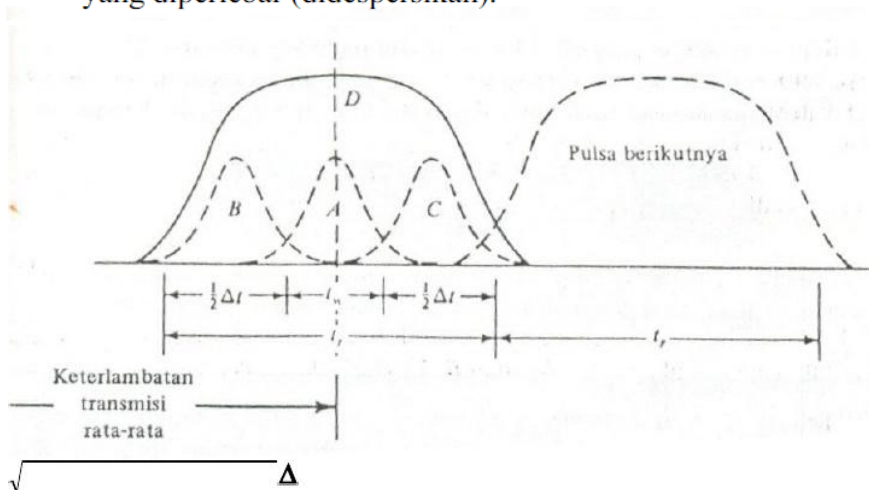
$$\Delta_t = D_w \cdot z \cdot \lambda_{\text{dB}} = 6,6 \text{ pdet/nm.km} \times 12,5 \text{ km} \times 6 \text{ nm} = 495 \text{ pdet}$$

Dispersi Total dan Laju Transmisi

- Dispersi total adalah kombinasi rms (root mean square) dari ketiga pengaruh dispersi, yaitu:

$$\Delta_t (\text{tot}) = \sqrt{\Delta_t^2(\text{imd}) + \Delta_t^2(\text{md}) + \Delta_t^2(\text{wgd})}$$

- Untuk melihat bagaimana dispersi mempengaruhi laju informasi, tinjau gambar berikut yang menunjukkan bagaimana pulsa-pulsa yang tiba dengan delay yang berbeda pada penerima ditambahkan untuk membentuk suatu pulsa yang diperlebar (didespersikan).



Bagaimana Dispersi Menyebabkan Saling Bertindihnya Pulsa

- Pulsa A mewakili pulsa yang mengalami delay rata-rata, pulsa B mengalami delay minimum dan pulsa C mengalami delay maksimum. Pulsa Keseluruhan yang diterima D adalah hasil penjumlahan dari semua komponen pulsa diantara limit B dan C.
- Lebar pulsa t_w mewakili lebar pulsa yang dipancarkan, sedangkan t_r mewakili lebar pulsa yang diterima (diperlebar), yang adalah lebih lebar sebanyak waktu dispersi total, yaitu:

$$t_r = t_w + \Delta_t (\text{tot})$$

- Jika pulsa berikutnya akan dideteksi tanpa mendua arti, maka pulsa ini (berikutnya) harus dipancarkan setelah suatu periode t_r dari permulaan pulsa yang sedang dipancarkan. Laju informasi yang sesuai dengan kondisi ideal ini adalah:

$$B = \frac{1}{t_r} = \frac{1}{t_w + \Delta_t}$$

- Karena dalam praktek faktor dispersi cenderung menjadi lebih besar dari keadaan ideal, dan karena ekor pulsa cenderung memanjang melampaui limit pulsa rata-rata maka perlu untuk memberikan suatu faktor keamanan skira-kira lima kali lebar pulsa yang diterima, yaitu:

$$B = \frac{1}{5t_r} = \frac{1}{5(t_w + \Delta_t)}$$

Contoh 9

Sebuah fiber single mode bekerja pada 1,3 μm memiliki dispersi bahan sebesar 2,81 ndet dan dispersi waveguide sebesar 0,495 ndet. Tentukanlah lebar pulsa yang diterima dan laju informasi maksimum jika lebar pulsa yang dipancarkan memiliki lebar 0,5 ndet. Dispersi intermodal tidak terjadi pada single mode fiber.

Penyelesaian

$$\Delta_t \text{ (tot)} = \sqrt{\Delta_t^2(\text{imd}) + \Delta_t^2(\text{md}) + \Delta_t^2(\text{wgd})} = \sqrt{0^2 + 2,81^2 + 0,495^2} = 2,85 \text{ ndet}$$

$$t_r = t_w + \Delta_t \text{ (tot)} = 0,5 + 2,85 = 3,35 \text{ ns}$$

$$B = \frac{1}{5t_r} = \frac{1}{5 \times 3,35 \times 10^{-9}} = 59,6 \text{ Mbit / det}$$