

DEGRADASI SINYAL PD FIBER OPTIK

Ref : Keiser, Palais

Degradasi sinyal :

- Degradasi sinyal dlm fiber :
 - Redaman
 - Dispersi
- Redaman diklasifikasikan :
 - Absorpsi
 - Hamburan Raleigh
 - Efek geometri
 - Loss inti dan kulit

Absorpsi

- Rugi-rugi absorpsi :
 - Kerusakan atom
 - Intrinsik
 - Ekstrinsik
- Kerusakan atom
 - Ketidak sempurnaan struktur atom spt kehilangan molekul, cluster kerapatan tinggi grup atom, atau kerusakan oksigen dlm struktur gelas.
 - Umumnya rugi-rugi ini dpt diabaikan dibandingkan dgn karena intrinsik dan ekstrinsik.
 - Rugi-rugi ini signifikan jika terjadi radiasi nuklir yg tinggi, misalnya di reaktor nuklir saat terjadi ledakan nuklir.

Absorpsi

- Intrinsik :
 - Sifat alamiah gelas menyerap cahaya
 - Sangat kuat pd daerah ultra violet → tdk berpengaruh pd siskom optik
 - Pd daerah inframerah terjadi puncak pd 7 μm dan 12 μm .
 - Energi panas → atom-atom bergerak → SiO berkontraksi & meregang/vibrasi

Absorpsi daerah UV :

Hukum Urbach :

$$\alpha_{uv} = Ce^{E/E_0}$$

C dan E₀ : konstanta empiris

E : energi photon

$$\alpha_{uv} = \frac{154,2x}{46,6x + 60} \times 10^{-2} e^{\frac{4,63}{\lambda}} \quad \text{dB/Km}$$

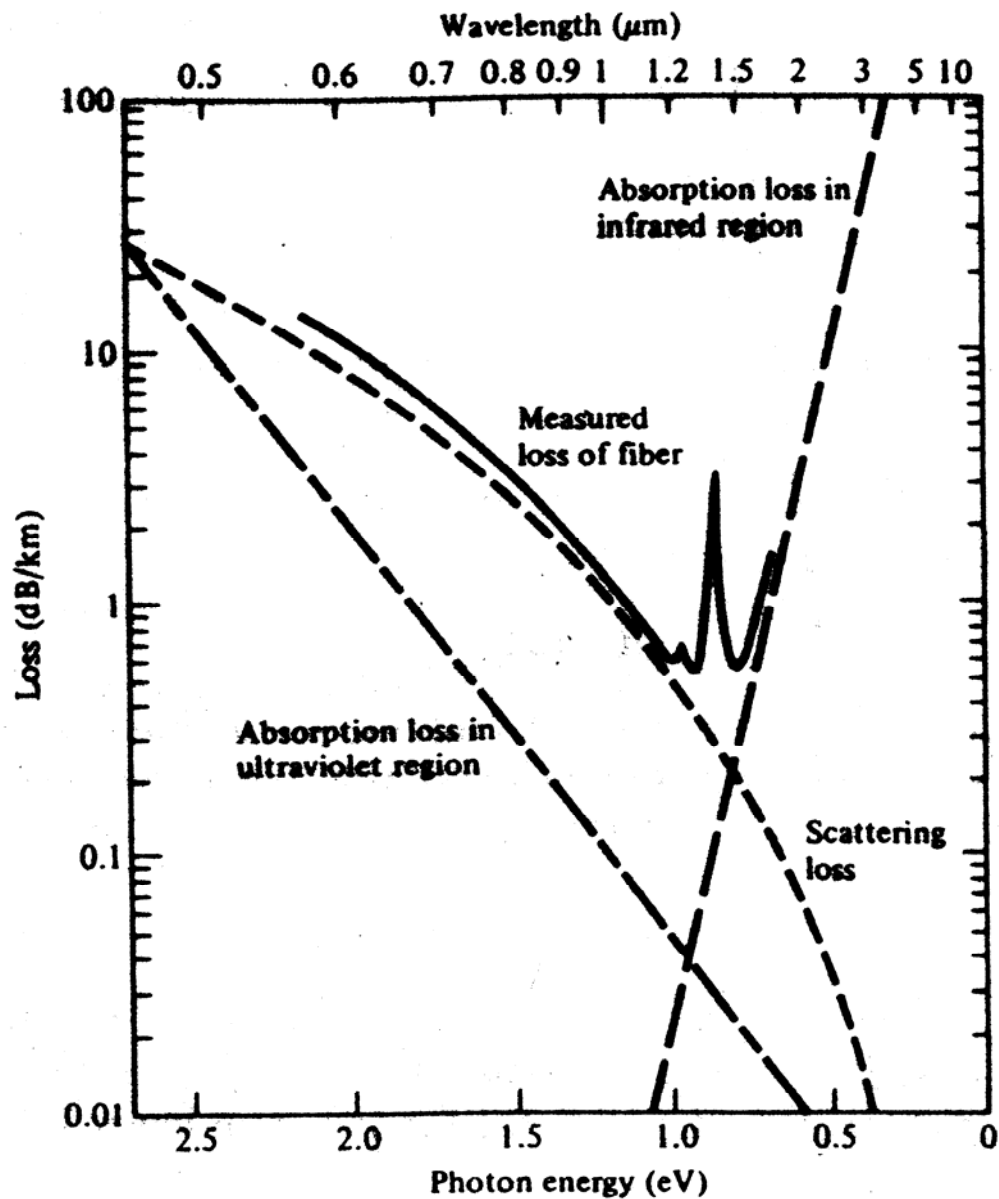
x : bagian molekul GeO₂

Absorpsi daerah IR :

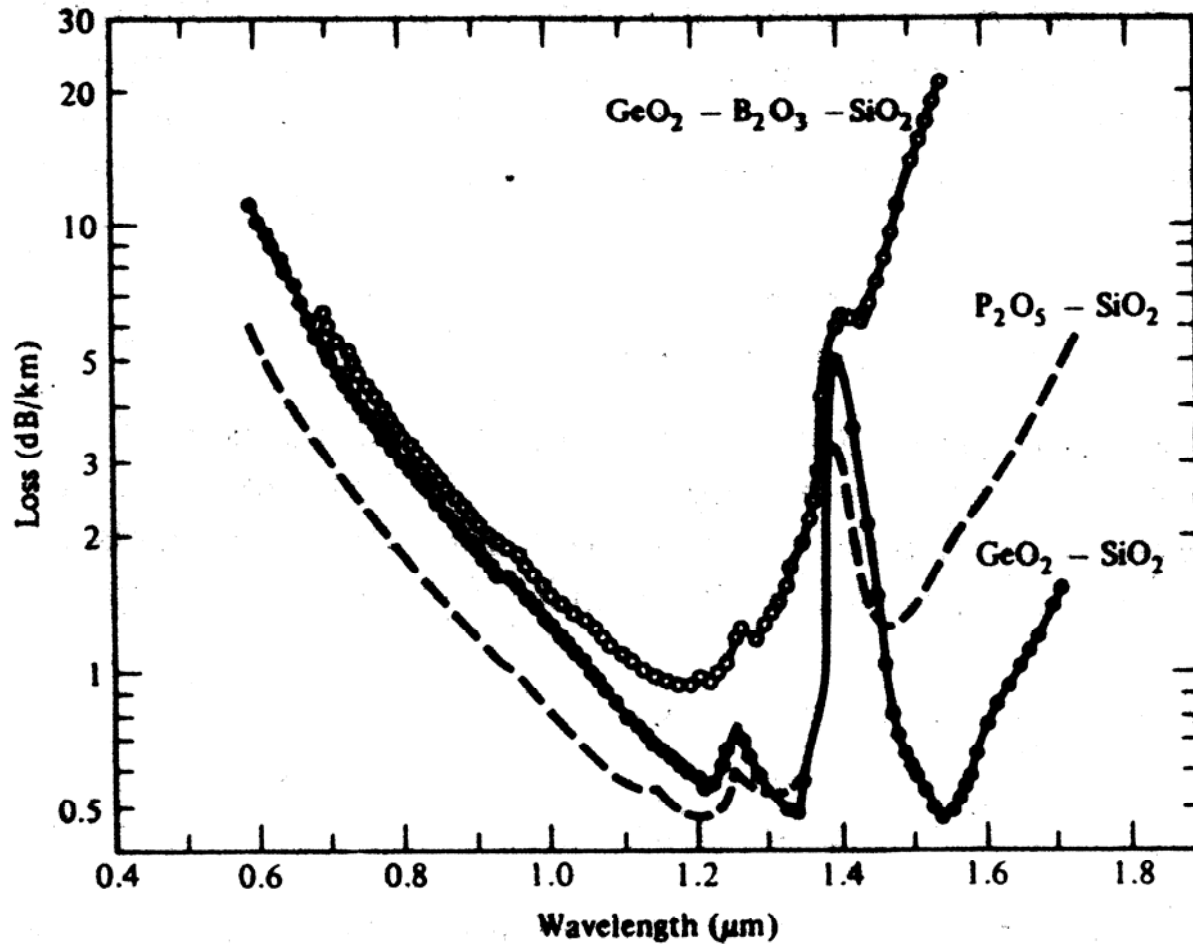
$$\text{Utk GeO}_2\text{-SiO}_2 : \alpha_{IR} = 7,81 \times 10^{11} \times e^{\frac{-48,48}{\lambda}} \quad \text{dB/Km}$$

Absorpsi

- Ekstrinsik
 - Ketidak murnian sumber utama rugi-rugi fiber.
 - Jenis : ion transition metal dan ion OH
 - Fe, Cu, V, Co, Ni, Mn, Cr menyerap secara kuat pd daerah yg diinginkan
 - Ketidak lengkapan pengisian sel elektron dalam, penyerapan cahaya mengakibatkan elektron bergerak dr level energi rendah ke level lebih tinggi.
 - Redaman OH paling signifikan pd 1,37 μm , 1,23 μm , 0,95 μm



Karakteristik redaman fiber silika diberikan doping GeO_2



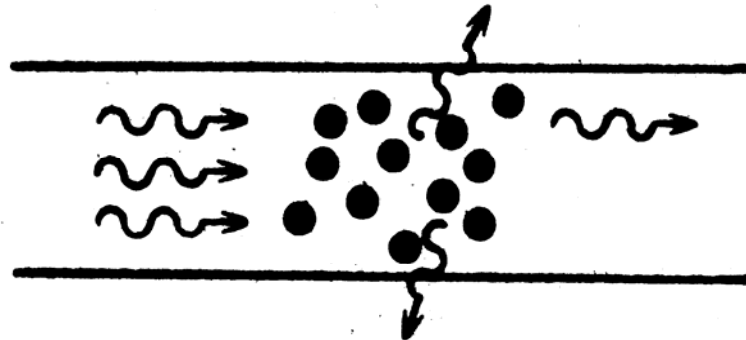
Perbandingan absorpsi inframerah krn bahan doping pd low-loss silica fiber.

Hamburan Rayleigh

- Terjadi krn gel bergerak mel media yg terdapat benda hambur yg $< 1 \lambda$
- Saat pabrikasi gelas cair panas molekul bebas bergerak
- Pd saat cairan dingin gerakan berkurang
- Pd saat padat mol acak membeku \rightarrow variasi kepadatan \rightarrow variasi indeks bias setempat \rightarrow hamburan.

- Penyebab hamburan lain :

- Bahan fiber terdiri dr lebih dr satu oksida → fluktuasi konsentrasi oksida penyusun
- Ketidak homogenan bahan yg dicampurkan dlm gelas selama pabrikan → antar muka inti-kulit kasar, benda hambur $> \lambda$ optik → dpt dikendalikan pd saat pabrikan.



Rayleigh scattering

Redaman krn hamburan sebanding dng λ^{-4} .

Gelas komponen tunggal :

$$\alpha_{scat} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (n^2 - 1)^2 k_B T_f \beta_T \quad \text{Neper/Km}$$

atau

$$\alpha_{scat} = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^8 p^2 k_B T_f \beta_T \quad \text{Neper/Km}$$

k_B : Konstanta Boltzman = $1,380 \times 10^{-23}$ J/°K

β_T : Isothermal compressibility bahan

T_f : Suhu fictive/lebur

p : koefisien photoelastic

Utk gelas multi komponen :

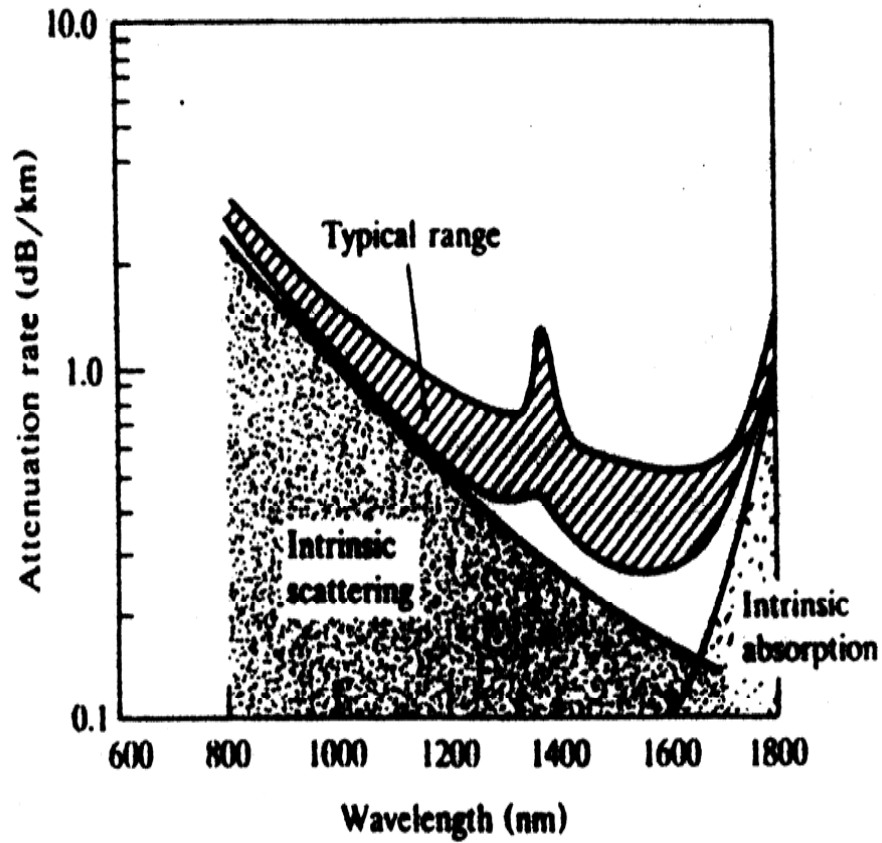
$$\alpha = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (\delta n^2)^2 \delta V \quad \text{Neper/Km}$$

$$(\delta n^2)^2 = \left(\frac{\partial n}{\partial \rho} \right)^2 (\delta \rho)^2 + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial n}{\partial C_i} \right)^2 (\delta C_i)^2$$

$\delta \rho$: fluktuasi kepadatan

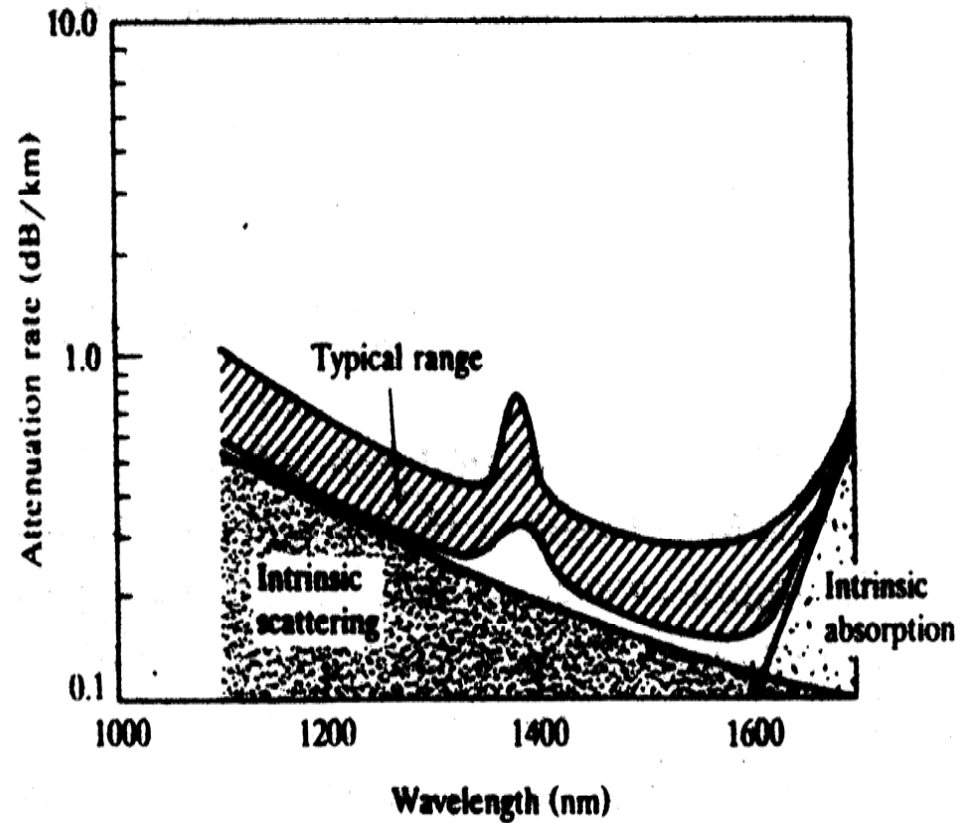
δC_i : fluktuasi konsentrasi komponen gelas

Nilai fluktuasi komposisi dan kepadatan umumnya tidak diketahui dan ditetapkan dr data hamburan percobaan



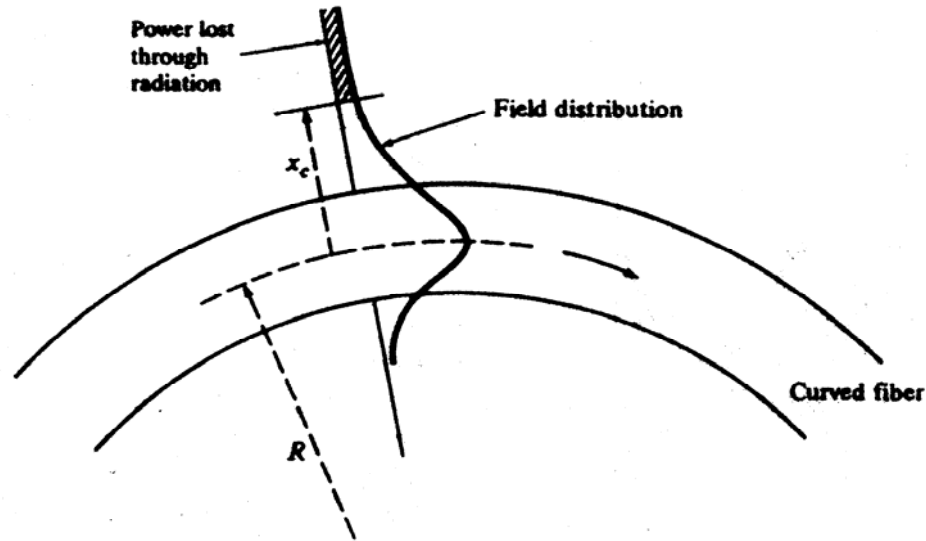
Redaman pd fiber fiber SM tertentu

← Redaman pd fiber GI-MM tertentu



Efek Geometri

- **Bengkokan/lengkungan → redaman :**
 - **Makroskopi**
 - **berukuran besar dibanding diameter fiber**
 - **Misalnya fiber dibelokan pojok**
 - **Mikroskopi**
 - **fluktuasi jari-jari ukuran kecil berulang**
 - **berukuran kecil dibanding diameter fiber**
 - **Terjadi secara random**
 - **Dpt bertambah saat pengkabelan**



Mode fundamental dlm fiber lengkung

Jari-jari kritis single mode :

$$R_C = \frac{20\lambda}{(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \left(2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-3}$$

Jari-jari kritis multi mode :

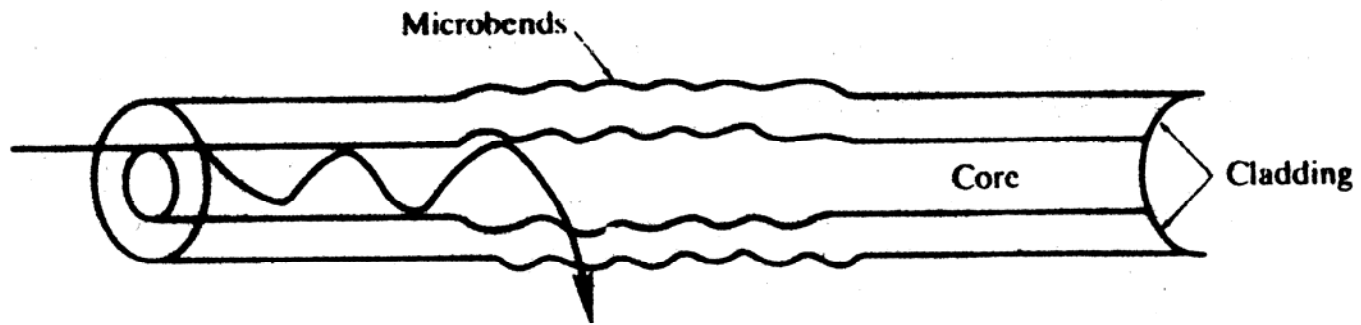
$$R_C = \frac{3n_1\lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Gloge : jumlah modus efektif

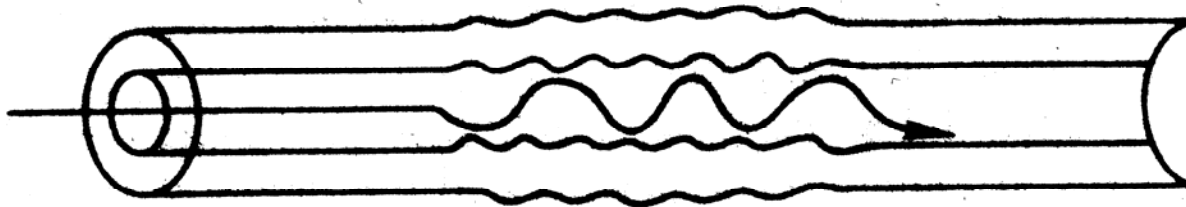
$$M_{eff} = M_{\infty} \left\{ 1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2kR} \right)^{2/3} \right] \right\}$$

$$M_{\infty} = \frac{\alpha}{\alpha + 2} (n_1ka)^2 \Delta \quad : \text{ Jml total mode dlm fiber lurus}$$

$k = 2\pi/\lambda$: konstanta propagasi gelombang

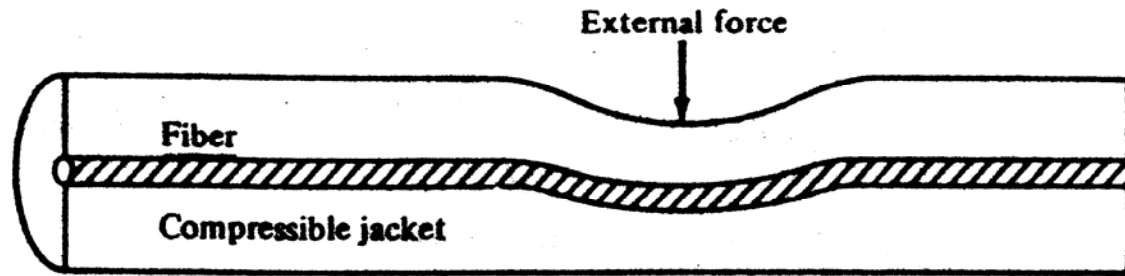


Power loss from higher-order modes



Power coupling to higher-order modes

**Microbending : fluktuasi jari-jari ukurankecil berulang
dr lengkungan sumbu fiber**



Compressible jacket mengurangi microbending krn tekanan dr luar

Loss Inti dan Kulit

Inti dan kulit terbuat dr bahan yang berbeda komposisinya → memiliki koefisien redaman berbeda (α_1 utk inti dan α_2 utk kulit).

Jika pengaruh kopling moda diabaikan, loss SI fiber mode (v,m) :

$$\alpha_{vm} = \alpha_1 \frac{P_{core}}{P} + \alpha_2 \frac{P_{clad}}{P}$$

karena
$$\frac{P_{clad}}{P} = 1 - \frac{P_{core}}{P}$$

maka
$$\alpha_{vm} = \alpha_1 + (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{P_{clad}}{P}$$

Loss total dr fiber diperoleh dr penjumlahan semua moda dr tiap bagian daya setiap moda

Pd fiber GI, koef redaman pd jarak r dr sumbu

$$\alpha(r) = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{n^2(0) - n^2(r)}{n^2(0) - n_2^2}$$

Dispersi

- Group velocity : kecepatan energi suatu moda tertentu bergerak sepanjang fiber.
- Perbedaan kec grup mengakibatkan perbedaan waktu tiba energi di tujuan shg mengakibatkan terjadinya pelebaran pulsa.
- Gejala yg mengakibatkan terjadinya pelebaran pulsa disebut dispersi.
- Jenis dispersi :
 - Intramodal
 - **Material**
 - **waveguide**
 - Intermodal, hanya terjadi pd MM fiber

Group delay

Time delay atau Group delay per satuan panjang :

$$\frac{\tau_g}{L} = \frac{1}{V_g} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk} = \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda}$$

$$V_g = c \left(\frac{d\beta}{dk} \right)^{-1} \quad : \text{kec energi dlm pulsa yg merambat sepanjang fiber}$$

Dimana :

$$k = 2\pi / \lambda$$

L : jarak yg dicapai oleh pulsa

β : konstanta propagasi sepanjang sumbu fiber

Selisih Total delay sepanjang fiber L :

$$\delta\tau = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \delta\lambda$$

Pelebaran pulsa dpt didekati dgn lebar pulsa rms :

$$\sigma_g = \frac{d\tau_g}{d\lambda} \sigma_\lambda = \frac{L\sigma_\lambda}{2\pi c} \left(2\lambda \frac{d\beta}{d\lambda} + \lambda^2 \frac{d^2\beta}{d\lambda^2} \right)$$

Dispersi :

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau_g}{d\lambda}$$

Satuan : picosecond per kilometer per nanometer

Dispersi material

- Dikenal juga sbg dispersi kromatis atau spektral.
- Terjadi karena variasi indeks bias bahan inti yg merupakan fungsi panjang gelombang, serupa dng efek prisma menguraikan spektrum, akibatnya terjadi kec grup berbeda setiap moda yg tergantung pd panjang gelombang, selanjutnya mengakibatkan terjadinya pelebaran pulsa .

Karena
$$\frac{\tau_g}{L} = \frac{1}{c} \frac{d\beta}{dk}$$

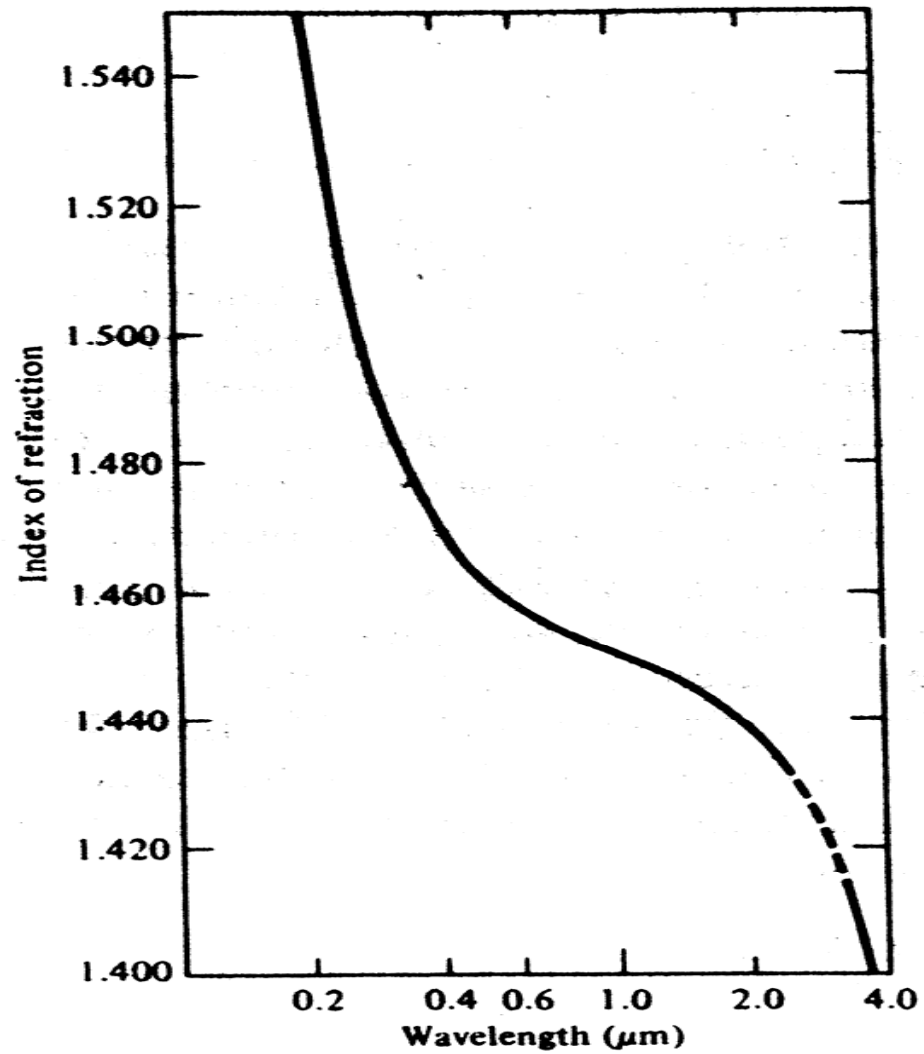
dan
$$\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda}$$

Maka :
$$\tau_{mat} = \frac{L}{c} \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

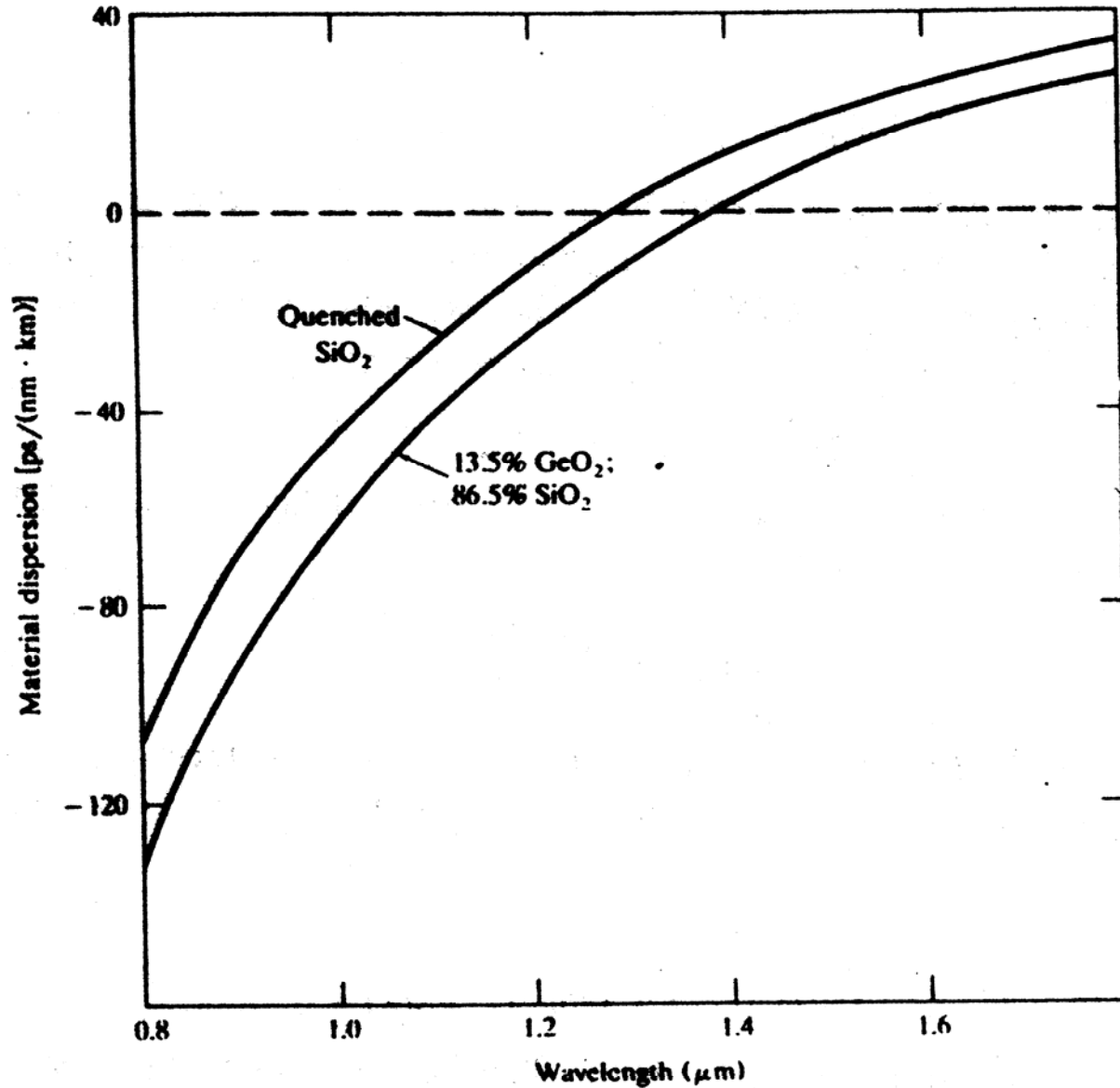
Pelebaran pulsa dr suatu sumber yg memiliki lebar spektral σ_λ karena dispersi material :

$$\sigma_{mat} = \frac{d\tau_{mat}}{d\lambda} \sigma_\lambda = -\frac{L}{c} \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \sigma_\lambda = D_{mat}(\lambda) L \sigma_\lambda$$

$$D_{mat}(\lambda) = -\frac{1}{c} \lambda \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad : \text{ Dispersi material}$$



Variasi indeks bias silika sbg fungsi panjang gelombang



Dispersi material silika murni dan GeO₂-SiO₂ sbg fungsi panjang gelombang

Dispersi pandu gelombang

- Terjadi karena tidak semua cahaya yang diterima detektor melalui inti, tetapi sebagian cahaya merambat melalui kulit.
- Besarnya dispersi pandu gelombang tergantung pada rancangan fiber, karena konstanta propagasi β merupakan fungsi a/λ .
- Utk penyederhanaan dlm perhitungan diasumsikan bhw indeks bias material tidak tergantung pada panjang gelombang.

Konstanta propagasi normalisasi :

$$b = \frac{(\beta / k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}$$

Utk $\Delta \ll \ll \rightarrow$

$$b = \frac{(\beta / k) - n_2}{n_1 - n_2}$$

atau

$$\beta = n_2 k (b \Delta + 1)$$

Group delay krn dispersi pandu gelombang :

$$\tau_{wg} = \frac{L}{c} \frac{d\beta}{dk} = \frac{L}{c} \left[n_2 + n_2 \Delta \frac{d(kb)}{dk} \right]$$

Utk $\Delta \ll \rightarrow$

$$V = ka \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong kan_2 \sqrt{2\Delta}$$

maka

$$\tau_{wg} = \frac{L}{c} \left[n_2 + n_2 \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

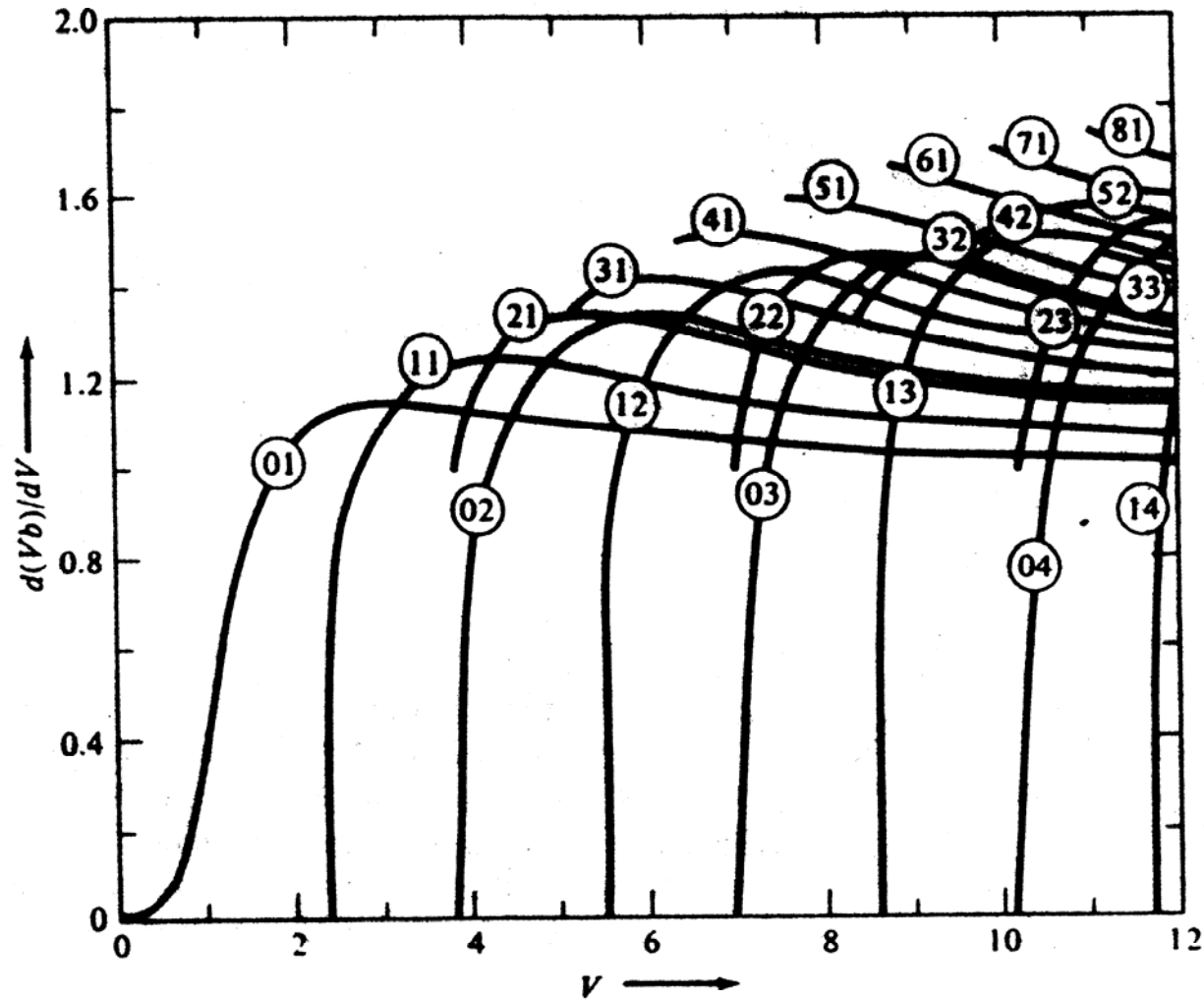
Utk fiber MM dispersi PG \ll dispersi material \rightarrow dispersi PG dpt diabaikan

Pelebaran pulsa karena dispersi pandu gelombang :

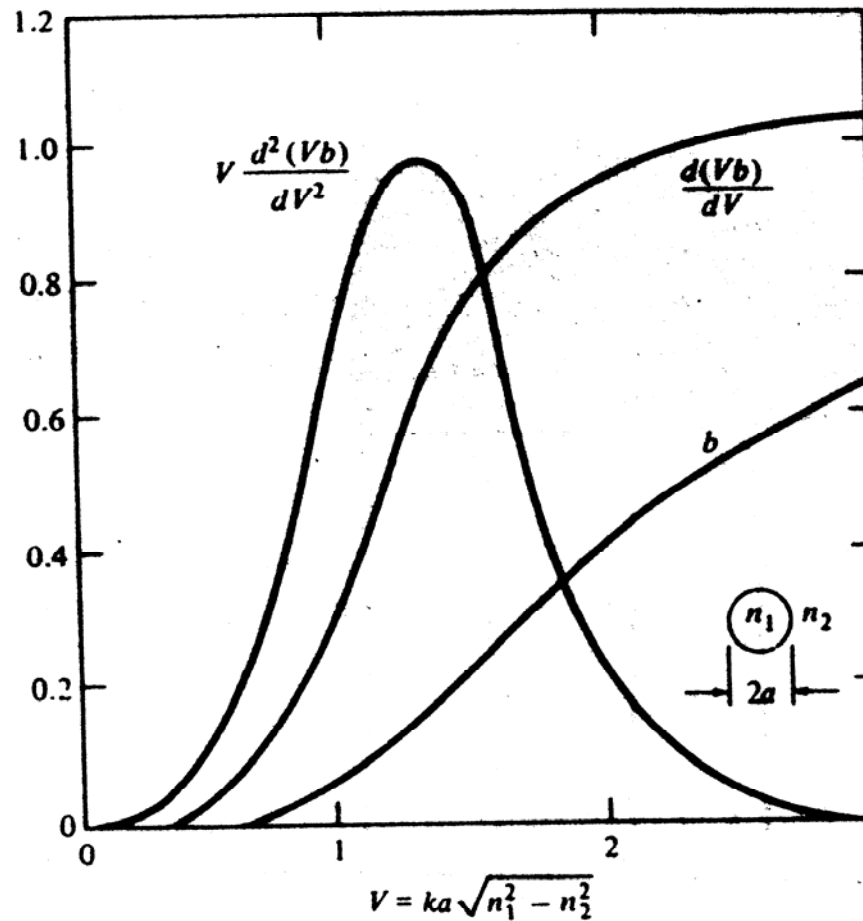
$$\sigma_{wg} = \sigma_{\lambda} \frac{d\tau_{wg}}{d\lambda} = \sigma_{\lambda} LD_{wg}(\lambda)$$

$$\sigma_{wg} = -\frac{V}{\lambda} \sigma_{\lambda} \frac{d\tau_{wg}}{dV} = -\frac{n_2 L \Delta \sigma_{\lambda}}{c \lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2}$$

$D_{wg}(\lambda)$: **Dispersi pandu gelombang**



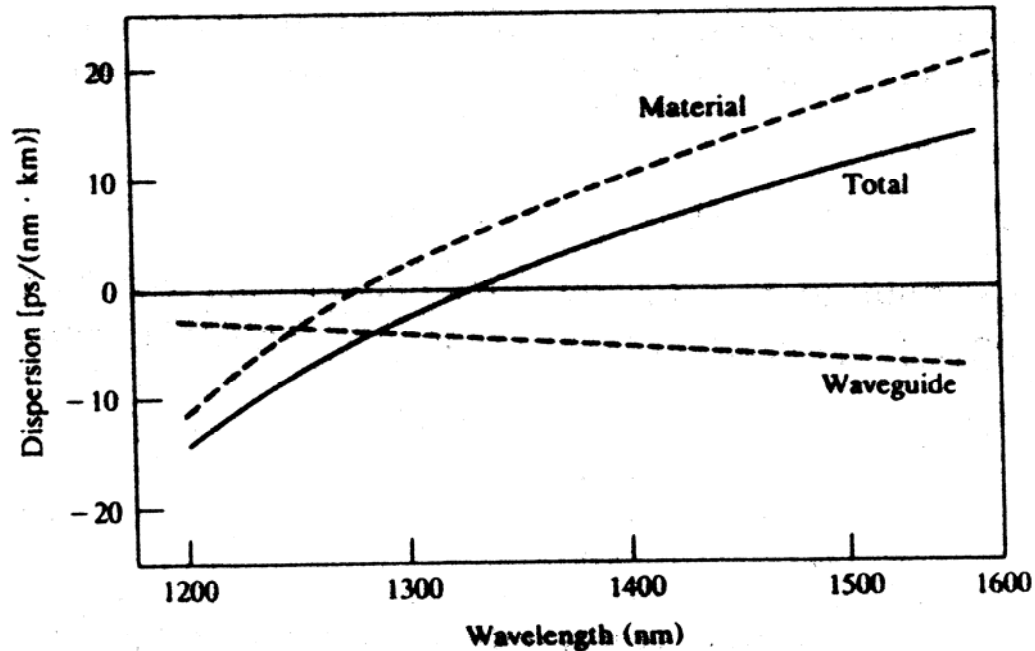
Grafik $d(Vb)/dV$ sbg fungsi V fiber SI utk berbagai LP moda



Parameter b dan turunanannya thd V modus LP_{01} sbg fungsi V

Distorsi sinyal pd fiber SM

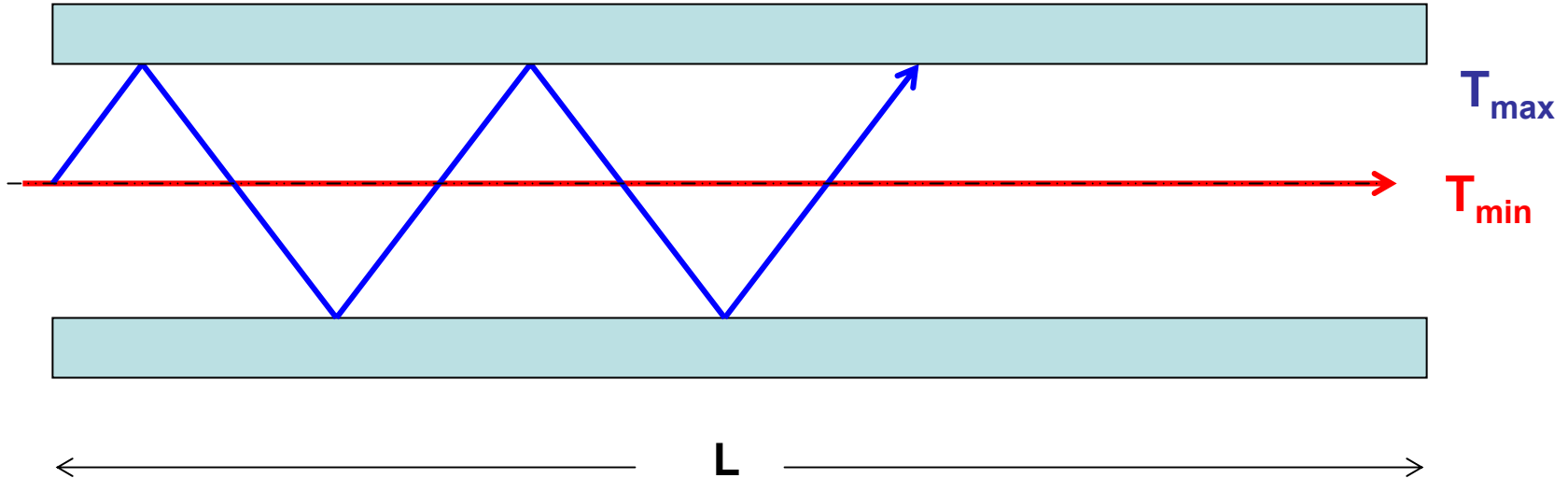
Dispersi pandu gelombang dan dispersi material pd SM memiliki nilai dlm orde yg hampir sama.



Contoh besarnya dispersi material dan PG sbg fungsi panjang gelombang pd fiber SM silika

Dispersi antar modus

- Merupakan hasil dr perbedaan nilai group delay (kec group axial) dr setiap modus individual pd satu frekuensi.



Pelebaran pulsa krn dispersi antar modus :

$$\sigma_{\text{mod-si}} = T_{\max} - T_{\min} = \frac{n_1 \Delta L}{c}$$

Pelebaran Pulsa pd Fiber GI

- Keuntungan profil indeks bias gradual adalah menawarkan propagasi MM pd inti yg relatif besar dan kemungkinan distorsi delay antar modus yg rendah.
- Karena indeks bias dibagian luar inti lebih rendah dr pd di pusat inti maka cahaya akan merambat lebih cepat di bagian luar inti dr pd di pusat inti. $V = c/n$

Pelebaran pulsa krn dispersi antar modus (untuk $\alpha = 2$) :

$$\sigma_{\text{mod-gi}} = \frac{n_1 \Delta^2 L}{8c}$$

atau

$$\sigma_{\text{mod-gi}} = \frac{\Delta}{8} \sigma_{\text{mod-si}}$$

Pelebaran pulsa pd fiber MM :

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{i\text{mod}}^2 + \sigma_{a\text{mod}}^2}$$

$\sigma_{i\text{mod}}$: **Pelebaran pulsa krn dispersi intramodus**

$\sigma_{a\text{mod}}$: **Pelebaran pulsa krn dispersi antarmodus**