

# 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  $\mu\text{m}$  dan 12  $\mu\text{m}$ .
  - Energi panas → atom-atom bergerak → SiO berkontraksi & meregang/vibrasi

## Absorpsi daerah UV :

Hukum Urbach :

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

**C dan E<sub>0</sub> : konstanta empiris**

**E : energi photon**

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

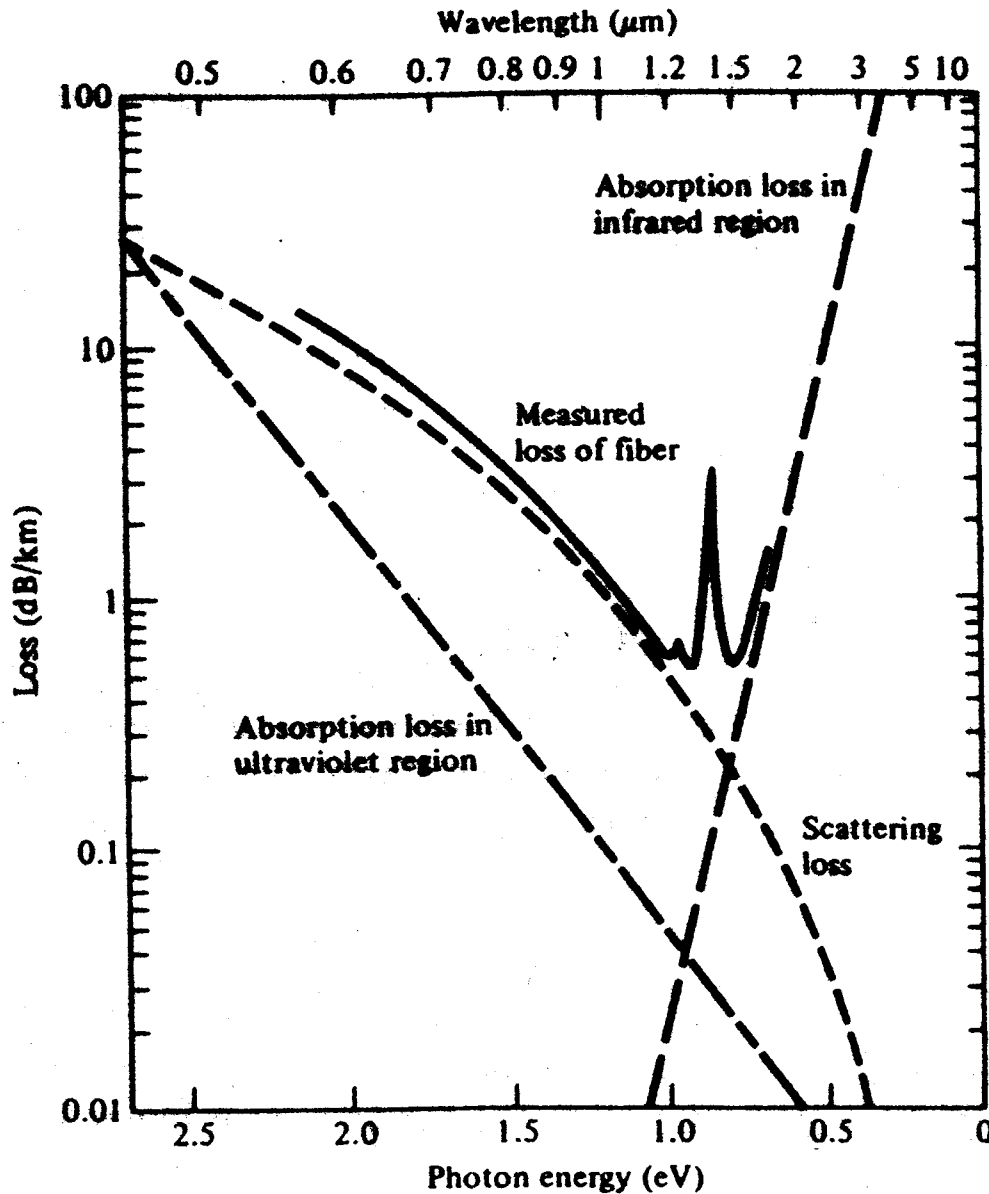
**x : bagian molekul GeO<sub>2</sub>**

## Absorpsi daerah IR :

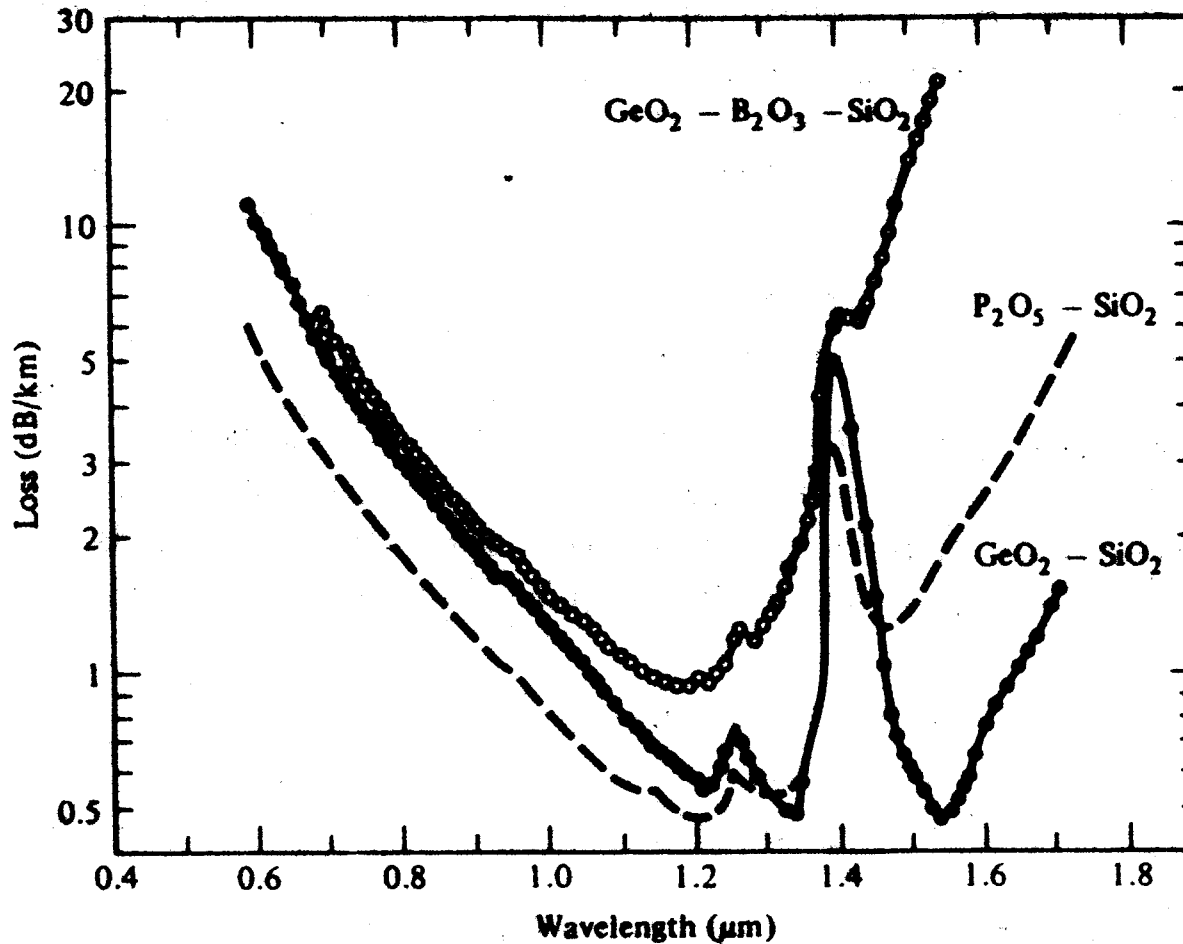
$$\text{Utk GeO}_2\text{-SiO}_2 : \alpha_{IR} = 7,81 \times 10^{11} \times e^{\frac{-48,48}{\lambda}} \quad \text{dB/Km}$$

# 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  $\mu\text{m}$ , 1,23  $\mu\text{m}$ , 0,95  $\mu\text{m}$



Karakteristik redaman fiber silika diberikan doping  $\text{GeO}_2$



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



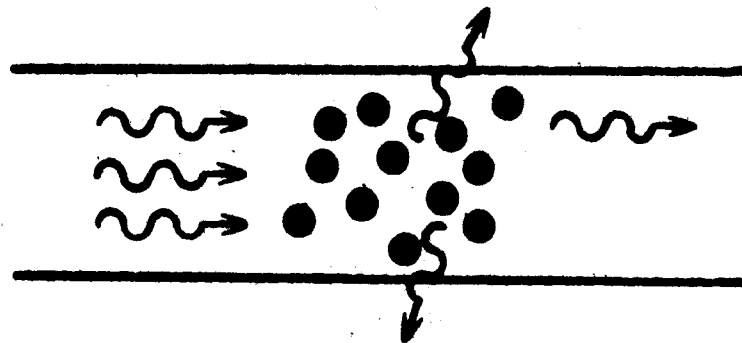
# Hamburan Rayleigh

- Terjadi krn gel bergerak mel media yg terdapat benda hambur yg  $< 1 \lambda$
- Saat pabrikan 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.



**Glory : gejala optik dihasilkan oleh backscattering ke sumber oleh asap/kabut/butir air berukuran seragam.**

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



**Rayleigh scattering**

Redaman krn hamburan sebanding dng  $\lambda^{-4}$ .

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 =  $1,380 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$

$\beta_T$  : Isothermal compressibility bahan

$T_f$  : Suhu fictive/lebur

$p$  : koefisien photoelastic

**Utk gelas multi komponen :**

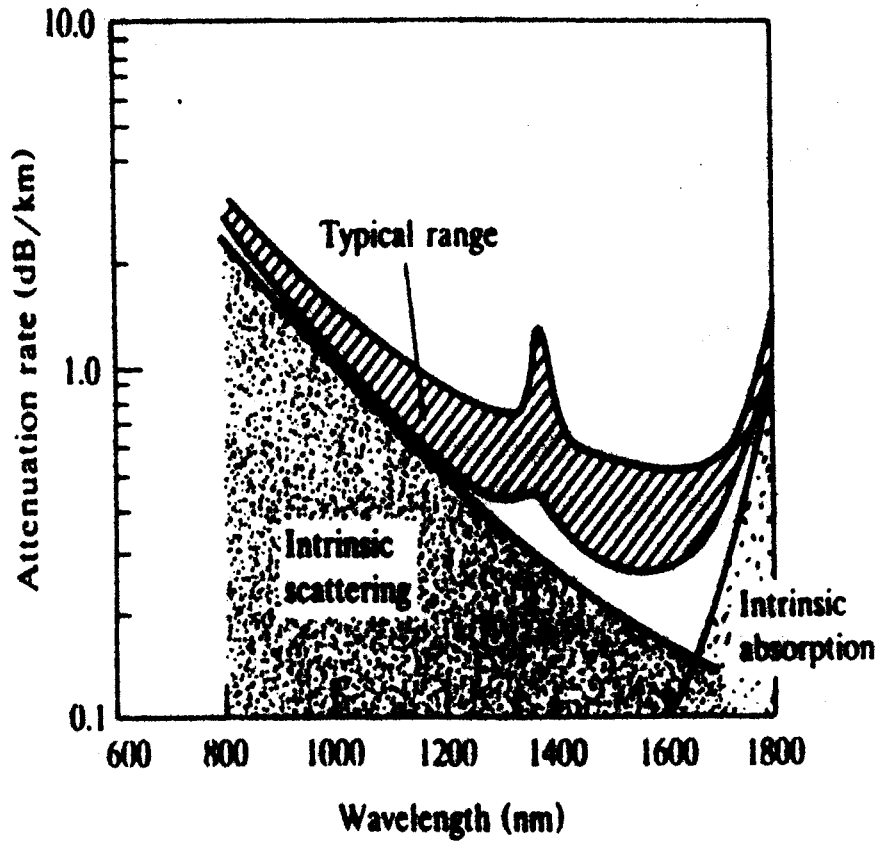
$$\alpha = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} (\delta n^2)^2 \delta V \quad \text{Neper/Km}$$

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

**$\delta \rho$  : fluktuasi kepadatan**

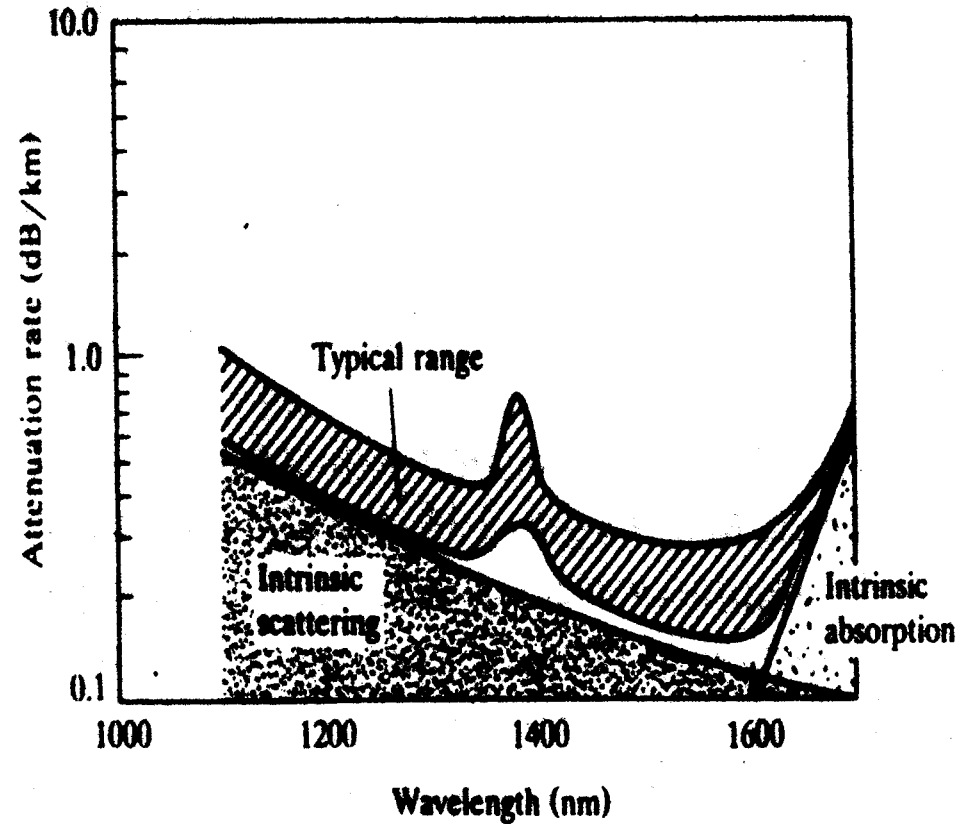
**$\delta C_i$  : fluktuasi konsentrasi komponen gelas**

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



Redaman pd fiber fiber SM tertentu

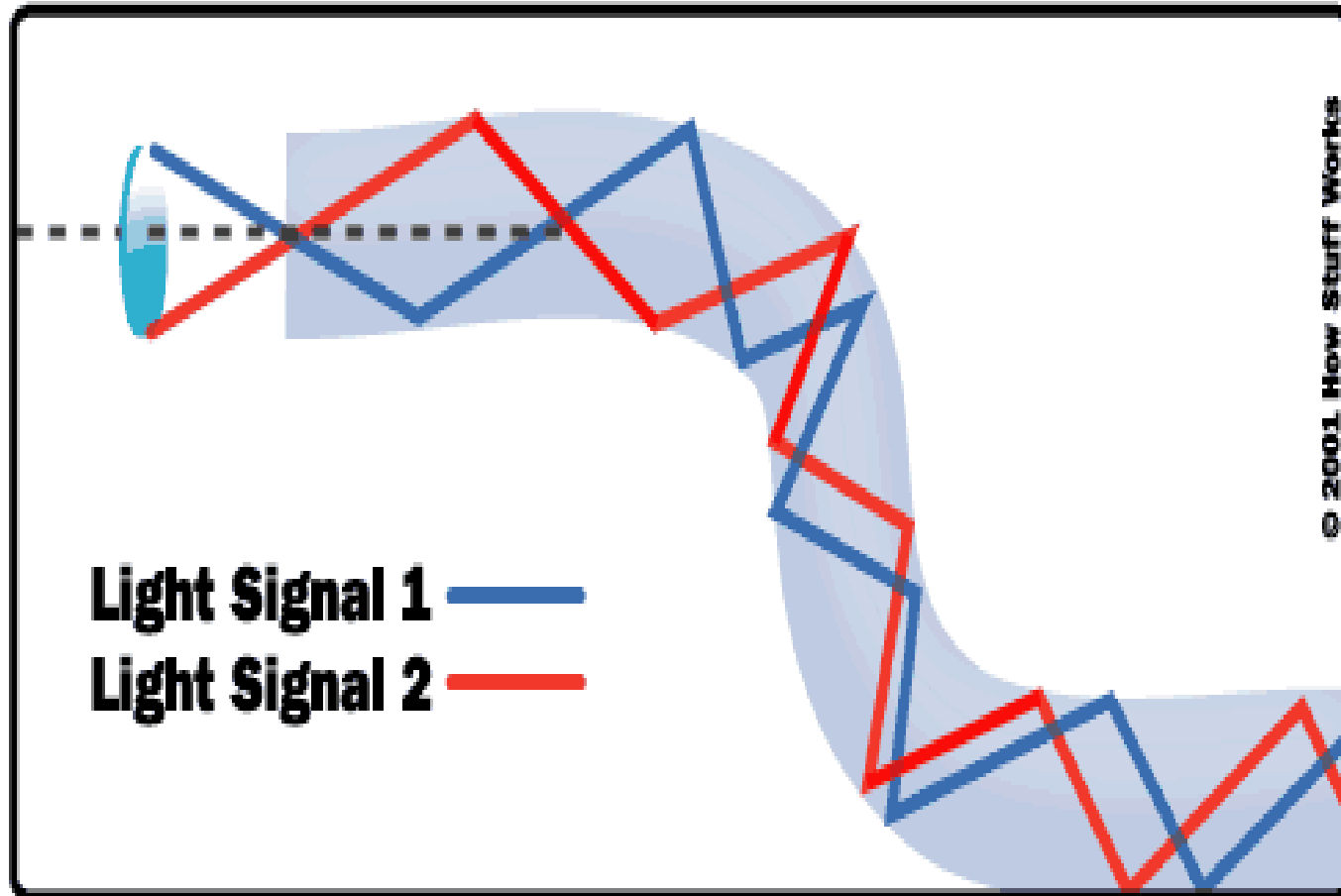
← Redaman pd fiber GI-MM tertentu



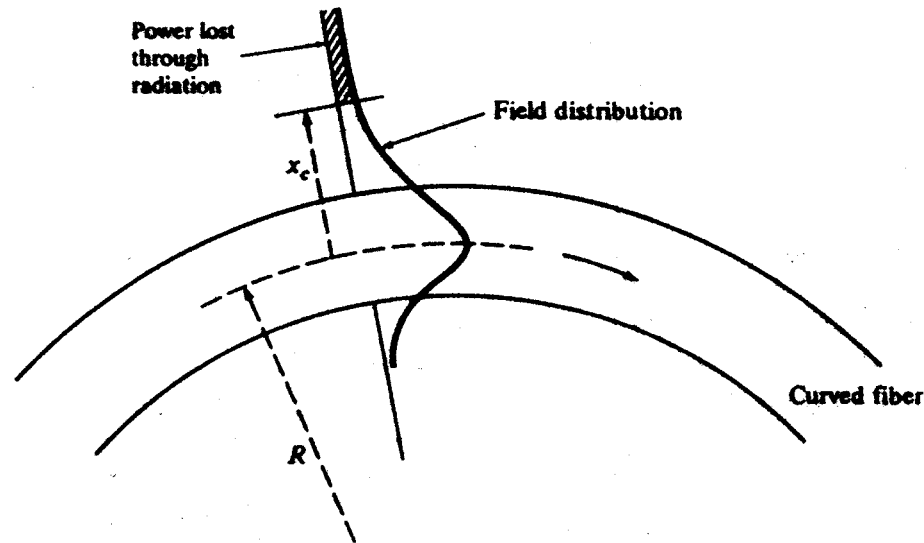
# Efek Geometri

- **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**

# Efek Geometri







### 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 :

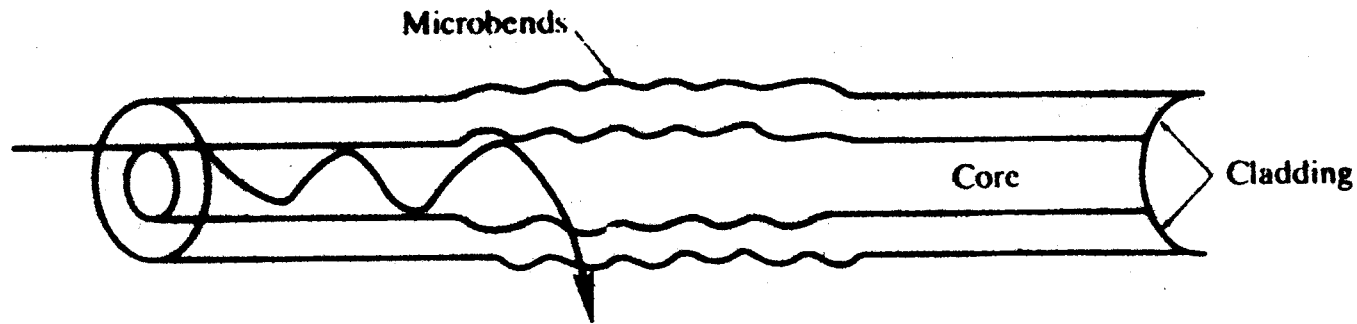
$$R_C = \frac{3n_1\lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

**Gloge : jumlah modus efektif**

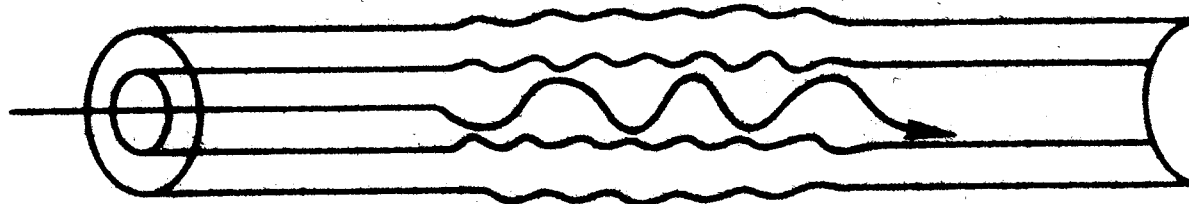
$$M_{eff} = M_{\infty} \left\{ 1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[ \frac{2a}{R} + \left( \frac{3}{2n_2kR} \right)^{2/3} \right] \right\}$$

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

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

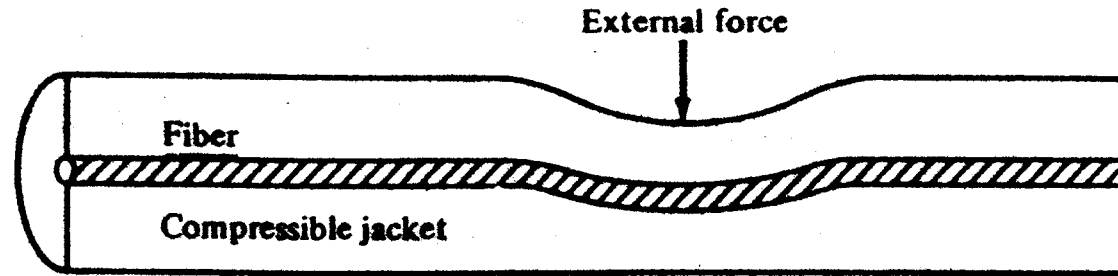


Power loss from higher-order modes



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

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 modus 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

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

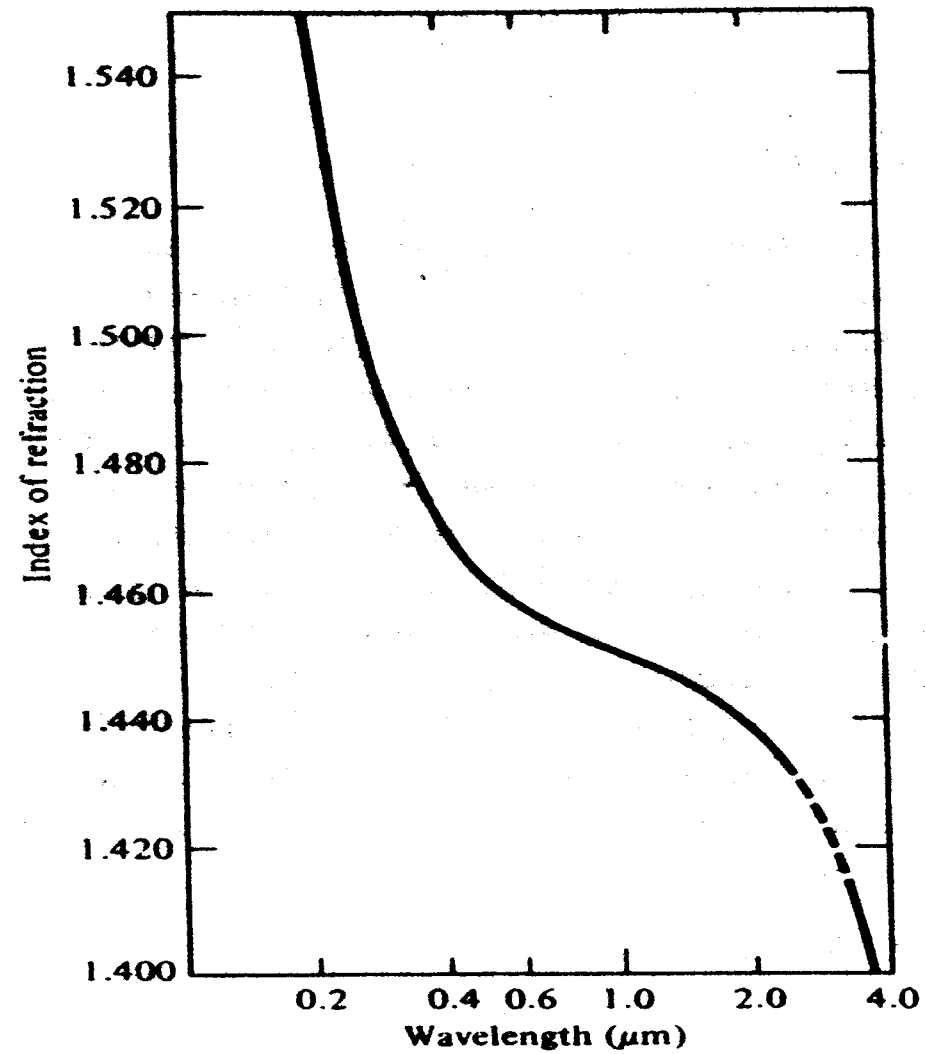
dan 
$$\beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda}$$

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

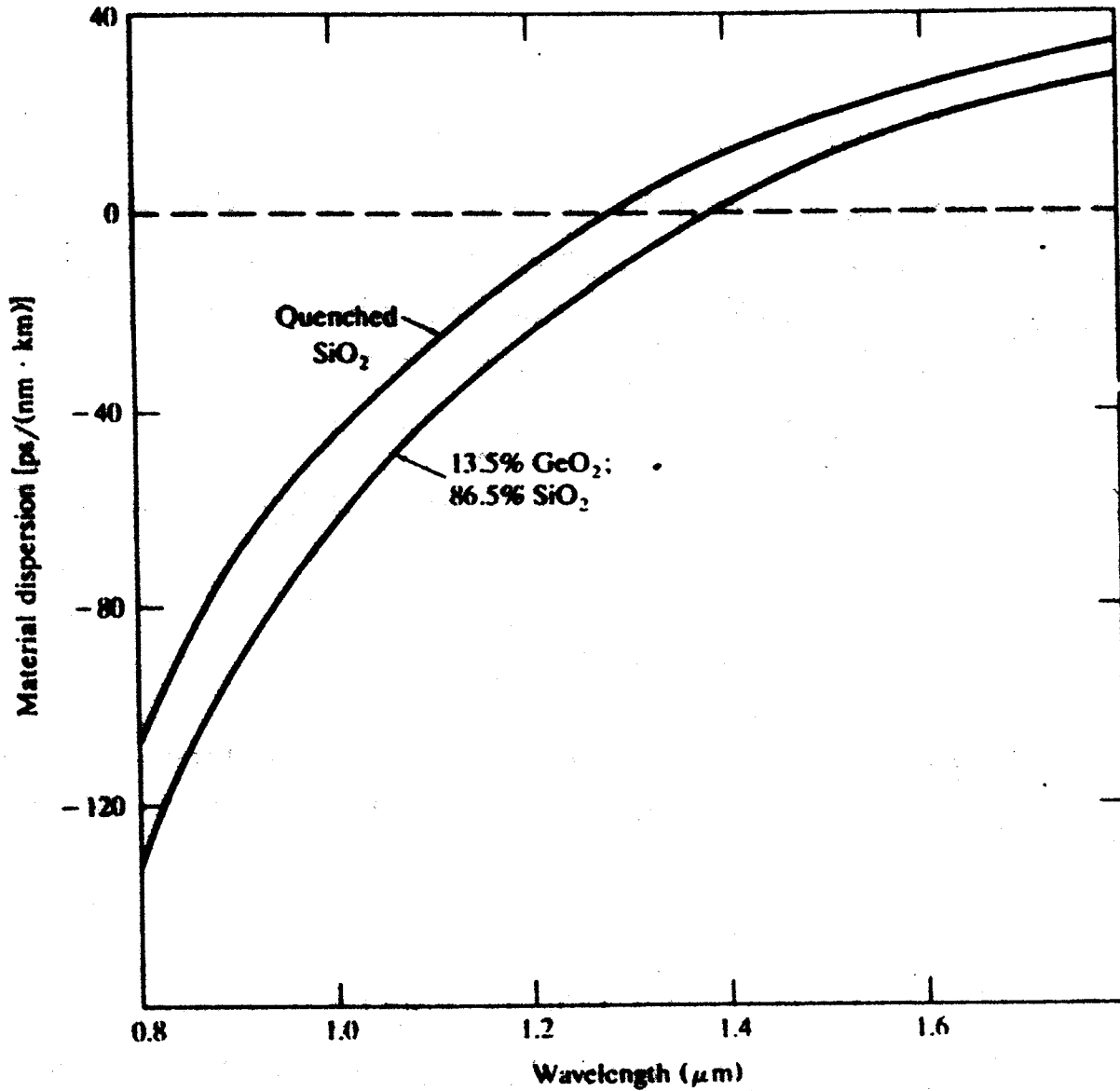
**Pelebaran pulsa dr suatu sumber yg memiliki lebar spektral  $\sigma_\lambda$  karena dispersi material :**

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

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



## Variasi indeks bias silika sbg fungsi panjang gelombang



**Dispersi material silika murni dan GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 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  $\beta$  merupakan fungsi  $1/\lambda$ .
- 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 :**

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

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

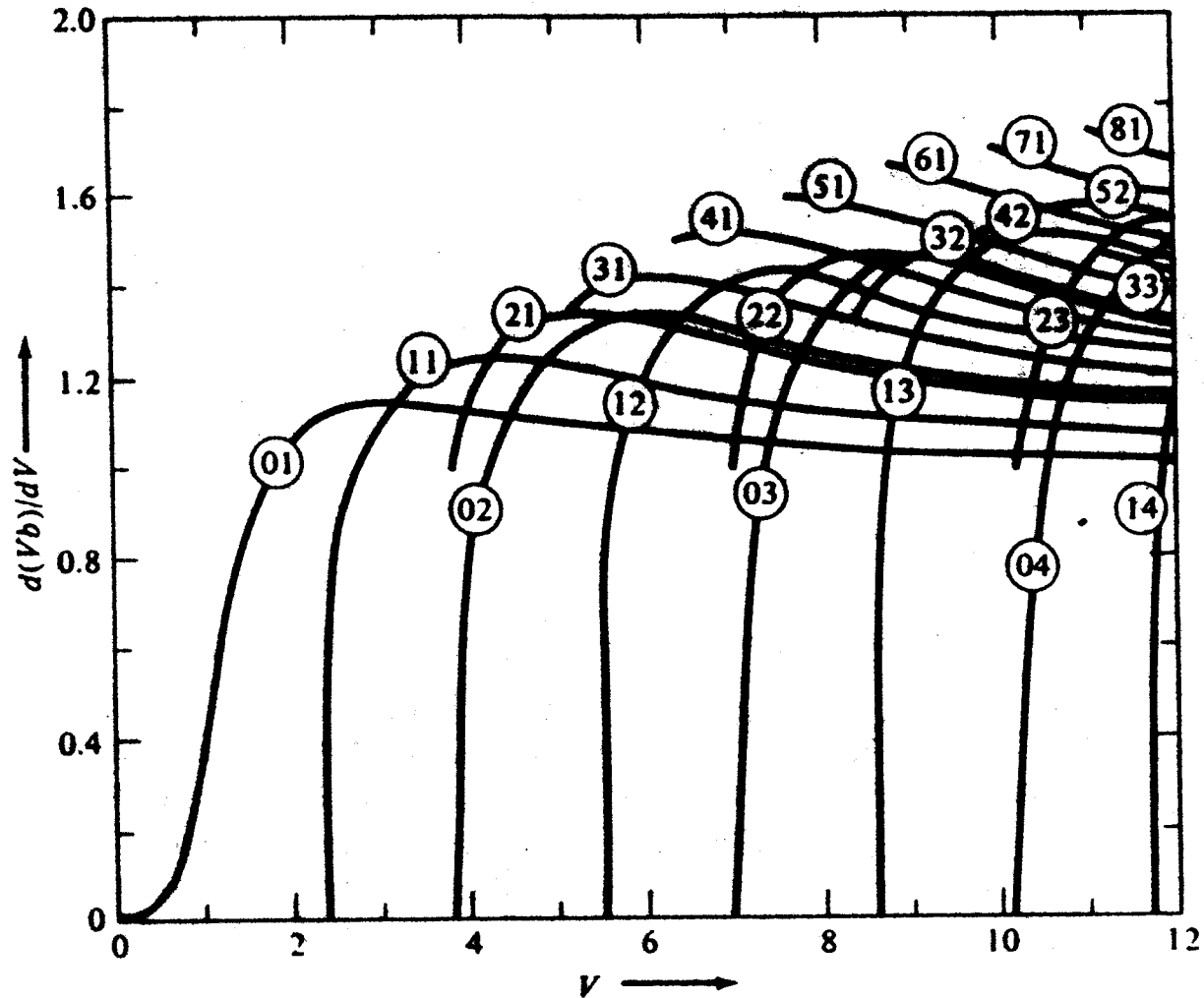
$D_{wg}(\lambda)$  : **Dispersi pandu gelombang**

**Pelebaran pulsa karena dispersi intramodus :**

$$\sigma_{i\text{mod}} = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_{wg}^2}$$

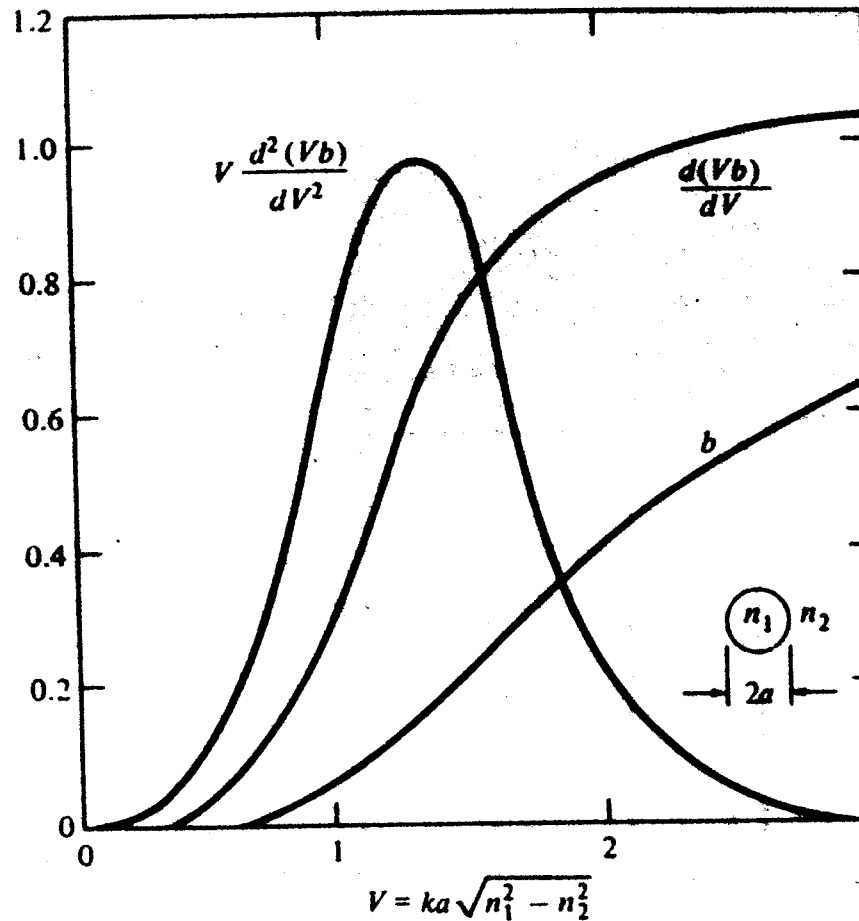
$\sigma_m$  : **Pelebaran pulsa krn dispersi material**

$\sigma_{wg}$  : **Pelebaran pulsa krn dispersi pandugelombang**



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

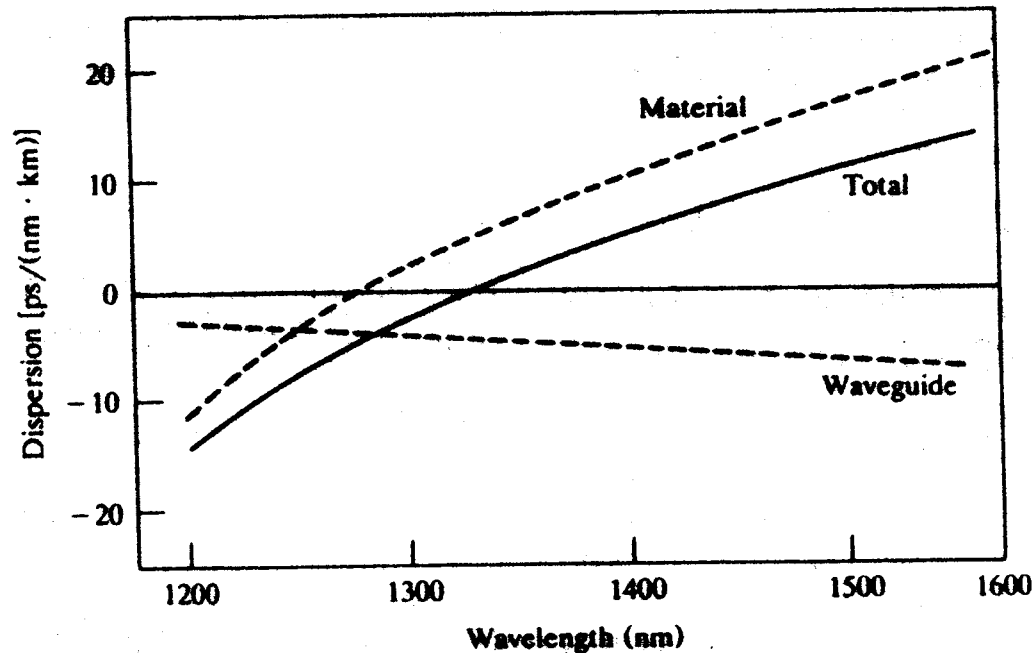




Parameter  $b$  dan turunanannya thd  $V$  modus  $LP_{01}$  sbg fungsi  $V$

# Distorsi sinyal pd fiber SM

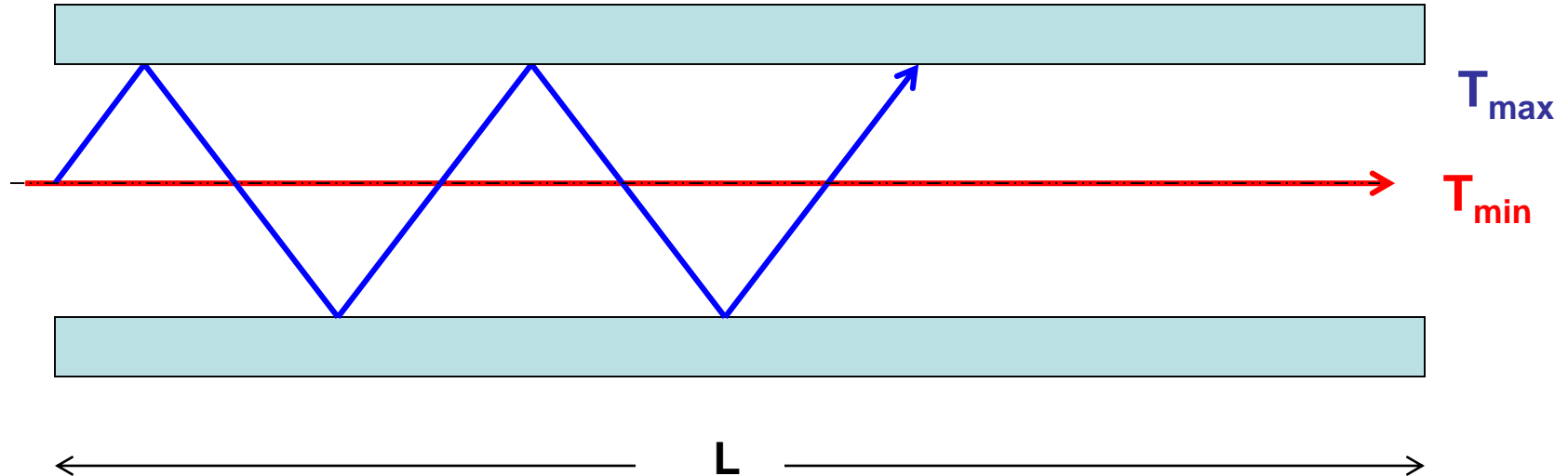
Dispersi pandu gelombang dan dispersi material pd SM memiliki nilai dlm orde yg hampir sama.



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**

# CONTOH

Diketahui :

Serat optik Multimode Step index,  $n_1 = 1,48$ ,  
 $n_2 = 1,475$ ,  $L = 75$  Km,  $D_{\text{mat}} = 60$  ps/Km-nm,  
 $D_{\text{wg}} = 1$  ps/Km-nm

Sumber optik ,  $\sigma_\lambda = 50$  nm

Hitung :  $\sigma_{\text{mat}} = ?$ ,  $\sigma_{\text{wg}} = ?$ ,  $\sigma_{\text{imod}} = ?$ ,  $\sigma_{\text{amod}} = ?$ ,  
 $\sigma_{\text{tot}} = ?$ .