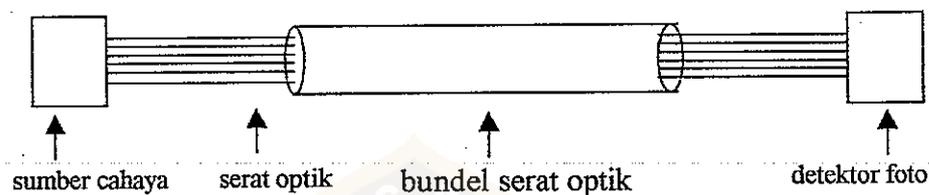


BAB II

DASAR TEORI

Sistem Komunikasi Serat Optik (SKSO) terdiri atas sumber cahaya sistem komunikasi, kabel serat optik yang memandu sinyal cahaya, dan detektor cahaya yang merubah sinyal cahaya yang diterima menjadi sinyal listrik, seperti terlihat pada Gambar 2-2-1.



Gambar 2-1. Sistem transmisi serat optik (Keiser, 1991).

II. 1. Serat Optik

Serat optik adalah pemandu gelombang berbentuk silinder, panjang, dan transparan, terdiri atas 3 lapis, yaitu inti (*core*) sebagai tempat perambatan cahaya, berindek bias n_1 , dan kulit (*cladding*) yang menyelimuti inti, berindek bias n_2 dan menjaga cahaya supaya tetap di dalam inti, serta lapisan pelindung (*coating*) yang berfungsi melindungi kulit dari gangguan lingkungan (Kao, 1986). Inti dan kulit terbuat dari silika dengan indek bias $n_2 < n_1$. Serat optik digunakan sebagai media transmisi informasi yang dipancarkan sumber cahaya kepadanya (Keiser, 1991).

II.1.1. Bahan dan Struktur Serat Optik

Bahan penyusun serat optik harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Harus bisa dibuat silinder, panjang, kecil dan tipis, lentur, dan transparan.
2. Harus bisa menghantarkan panjang gelombang cahaya tertentu dan dapat memandu gelombang secara efisien.
3. Memiliki kemampuan untuk dibuat dengan indeks bias berbeda pada inti dan kulit (Keiser, 1991).

Bahan yang memenuhi persyaratan ini adalah gelas dan plastik. Pada penelitian ini digunakan serat optik dari bahan gelas. Serat optik dari bahan gelas tersusun atas oksida gelas yaitu silikat (SiO_2) (Kao, 1986), dengan ikatan gelas silikon tetrahedral, memiliki jarak interatomik $1,62 \text{ \AA}$, serta berindek bias $1,4585$.

Silikat akan mengalami perubahan indeks bias jika ditambahkan oksida lain sebagai pengotor, seperti B_2O_3 , GeO_2 atau P_2O . Jika pada silikat ditambahkan GeO_2 atau P_2O , indeks biasnya akan meningkat, sedangkan penambahan B_2O_3 , akan menurunkan indeks bias silikat. Karena kulit serat optik harus memiliki indeks bias lebih kecil daripada inti, maka inti serat optik dibuat dari campuran silikat dan GeO_2 atau campuran silikat dan P_2O , dengan kulitnya silikat. Sedangkan campuran silikat dan B_2O_3 dijadikan kulit, dan intinya silikat (Keiser, 1991).

Berdasarkan variasi indeks bias dari inti ke kulit, serat optik dibagi menjadi 2 kelompok, yaitu serat optik *step indeks (SI)* dan serat optik *graded indeks (GI)*. Pada serat optik *step indeks*, indeks bias inti seragam dan akan berubah pada bidang batas inti-kulit. Sedangkan serat optik *graded indeks*, indeks bias inti akan berubah sebagai fungsi jari-jari inti (Keiser, 1991).

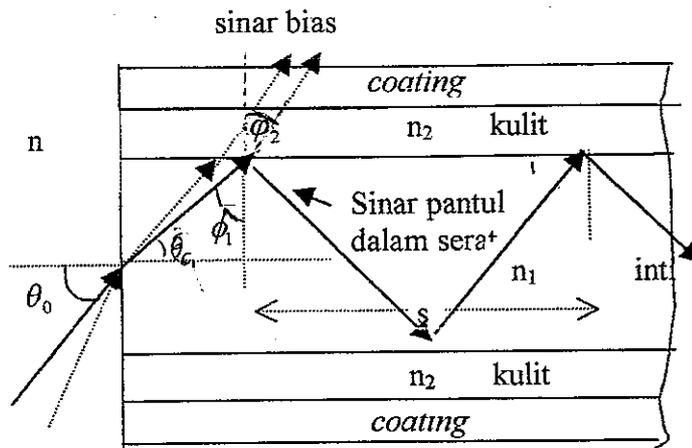
Berdasarkan jumlah moda yang merambat dalam inti, serat optik dibagi menjadi 2, yaitu serat optik moda tunggal (*single mode fiber*) dan serat optik moda banyak (*multimode fiber*) (Keiser, 1991). Serat optik moda banyak mempunyai jari-jari inti lebih besar daripada serat optik moda tunggal, sehingga lebih mudah untuk menggandengkan cahaya ke serat optik daripada serat optik moda tunggal. Namun, serat optik moda banyak memiliki *dispersi intermodal* yang lebih besar daripada moda tunggal. Serat optik SI dan GI dapat dibagi dalam kelompok *single mode* dan *multi mode*. Pada penelitian ini digunakan serat optik *step indek - single moda*.

II.1.2. Prinsip Pemanduan Cahaya Dalam Serat Optik

Struktur serat optik terdiri atas lapisan inti berindek bias n_1 dan kulit berindek bias n_2 , sehingga jika suatu berkas cahaya mengenai bidang batas inti - kulit, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2-2, akan terjadi pembiasan yang dinyatakan oleh Hukum Snellius, yaitu: (Keiser, 1991)

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \dots \dots \dots (1)$$

dengan ϕ_1 adalah sudut datang cahaya di bidang batas dan ϕ_2 adalah sudut bias cahaya. Ketika cahaya tersebut merambat dari suatu bahan lalu dipantulkan oleh bahan optis yang kerapatannya lebih renggang, akan terjadi pemantulan *internal*. Jika cahaya merambat dari suatu bahan berindek bias n_1 menuju bahan berindek bias n_2 dengan $n_2 > n_1$, maka sudut kritisnya adalah : (Keiser, 1991)



Gambar 2-2. Pembiasan dan pemantulan dalam serat optik (Keiser, 1991)

$$\phi_{1 \min} = \arcsin \left[\frac{n_2}{n_1} \right] \dots \dots \dots (2)$$

Jika sudut datang ϕ_1 media optik lebih rapat sama dengan sudut kritisnya, maka cahaya akan dibiaskan pada bidang batas kedua bahan tersebut, namun jika lebih besar dari sudut kritisnya, maka akan dipantulkan seluruhnya dalam bahan berindek bias n_1 , hal ini disebut dengan pemantulan *internal total* (Keiser, 1991).

Tidak semua gelombang yang mempunyai sudut datang antara sudut kritis dan 90° akan akan mengalami pemantulan *internal total* dalam serat, karena gelombang tersebut dalam penjalarnya akan mengalami perubahan fase (Widodo, 1995). Perubahan fase terjadi karena perambatan gelombang dan pemantulan oleh bidang batas inti – kulit. Fase gelombang pantul kedua, harus sama dengan gelombang datang, agar terjadi *interferensi konstruktif*, bila tidak sama akan terjadi *interferensi destruktif*, dan cahaya akan hilang. Besarnya perubahan fase yang terjadi pada saat pemantulan internal total berdasarkan Gambar 2-2 adalah: (Keiser, 1991).

$$\delta = k_1 s = n_1 k s = \frac{n_1 2\pi s}{\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

dengan δ adalah perubahan fase, k_1 adalah bilangan gelombang, dan s adalah jarak 2 pantulan berturut-turut yang mengenai bidang yang sama, serta λ adalah panjang gelombang.

Cahaya dalam perambatannya di serat optik juga mengalami polarisasi. Jika cahaya merambat arah sumbu z , maka dalam sumbu x , vektor medan listriknya E , dipolarisasikan linier sesuai persamaan (Keiser, 1991)

$$\vec{E}_x(z,t) = \vec{E}_{ox} \cos(\omega t - kz + \delta) \dots\dots\dots (4a)$$

sedangkan pada sumbu y , vektor medan listriknya dinyatakan oleh

$$\vec{E}_y(z,t) = \vec{E}_{oy} \cos(\omega t - kz + \delta) \dots\dots\dots (4b)$$

dengan x adalah posisi vektor dan k adalah vektor perambatan gelombang yang besarnya $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, E_{ox} adalah amplitudo maksimum gelombang, $\omega = 2\pi\nu$ dengan ν adalah frekuensi cahaya dan δ adalah beda fase relatif antargelombang, maka resultan vektor medan listriknya adalah:

$$\vec{E}(z,t) = \vec{E}_x(z,t) + \vec{E}_y(z,t) \dots\dots\dots (4c)$$

Bila cahaya terpolarisasi melingkar, ujung vektor medan listrik menunjukkan spiral melingkar mengelilingi arah rambat dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi cahaya. Besar vektor medan listrik tetap tidak berubah. Jika cahaya tersebut merambat dalam arah z , dapat dinyatakan dengan : (Keiser, 1991)

$$\vec{E}_x^2 + \vec{E}_y^2 = \vec{E}_0^2 \dots\dots\dots (5)$$

Bila cahaya terpolarisasi *elips*, vektor medan listrik berputar mengelilingi arah rambatan tetapi amplitudonya berubah, sedangkan vektor medan listriknya jika merambat menurut arah z dapat dinyatakan sebagai: (Keiser, 1991)

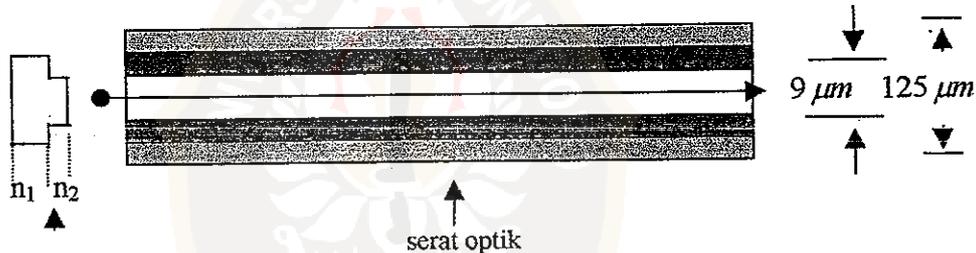
$$\left[\frac{\vec{E}_x}{\vec{E}_{0x}} \right]^2 + \left[\frac{\vec{E}_y}{\vec{E}_{0y}} \right]^2 - 2 \left[\frac{\vec{E}_x}{\vec{E}_{0x}} \right] \left[\frac{\vec{E}_y}{\vec{E}_{0y}} \right] \cos \delta = \sin^2 \delta \dots\dots\dots(6)$$

II.1.3 Serat Optik *Step indek*

Inti serat SI berjari - jari a , berindek bias n_1 dan dikelilingi oleh kulit berindek bias n_2 , dengan besar n_2 adalah: (Keiser, 1991)

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \dots\dots\dots(7)$$

dengan Δ adalah perbedaan indek bias inti kulit.



profil indek bias

Gambar 2-3. Serat optik step indek moda tunggal (Keiser, 1991)

Supaya terjadi sudut kritis pada pemantulan pertama di serat, maka sudut masuk maksimum cahaya ke serat $\theta_{0,max}$, harus diatur sedemikian rupa sehingga terjadi sudut bias θ_c yang besarnya $90^\circ - \phi_{1min}$, melalui hukum Snellius: (Keiser, 1991)

$$n \sin \theta_{0,max} = n_1 \sin \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(8)$$

dengan n adalah indek bias udara dan $\theta_c = 90^\circ - \phi_{1,\min}$. Persamaan (8) menyatakan tingkap numerik (TN atau *Numerical Aperture [NA]*) *step indek*, yaitu

$$TN = n \sin \theta_{0,\max} = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = n_1 \sqrt{2\Delta} \dots\dots\dots(9)$$

Cahaya dalam serat optik akan merambat sebagai gelombang elektromagnetik dan akan membentuk moda yang menyatakan garis medan listrik dan magnetik. Jumlah total moda M yang terjadi dalam serat adalah: (Keiser, 1991)

$$M = \frac{2A}{\lambda} \Omega = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} (n_1^2 - n_2^2) \dots\dots\dots(10)$$

dengan A adalah luasan tampang lintang serat optik, Ω adalah sudut ruang penerimaan (*solid acceptance angle*), dan λ adalah panjang gelombang.

Pada bidang batas inti-kulit, medan elektromagnetik tidak langsung menghilang, namun meluruh secara eksponensial. Pada saat tepat kondisi *cut-off*, yaitu kondisi pada saat moda tepat akan meninggalkan inti menuju kulit, konsentrasi energi berada di inti, dan jika kondisi *cut-off* sudah terlampaui, sejumlah energi akan menuju kulit untuk kemudian menghilang.

Jumlah aliran daya dalam inti dan kulit dinyatakan oleh vektor *poynting*: (Keiser, 1991)

$$S_z = \frac{1}{2} \text{Re} (\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot \vec{e}_z \dots\dots\dots(11).$$

Sehingga daya dalam inti dan kulit adalah: (Keiser, 1991)

$$P_{inti} = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{2\pi} (\vec{E}_x \vec{H}_y^* - \vec{E}_y \vec{H}_x^*) r \phi dr \dots\dots\dots(12)$$

$$P_{kulit} = \frac{1}{2} \int_a^\infty \int_0^{2\pi} r (E_x H_y^* - E_y H_x^*) d\phi dr \dots\dots\dots (13)$$

dengan

P_{inti} : daya moda di inti

P_{kulit} : daya moda di kulit

r : jarak dari pusat sumbu

ϕ : sudut antara sumbu x dan vektor jari-jari

E_x : komponen sumbu x medan listrik

E_y : komponen sumbu y medan listrik

H_x^* : komponen sumbu x medan magnetik

H_y^* : komponen sumbu y medan magnetik

II.2. Sumber Cahaya

II.2.1. Fungsi Dan Persyaratan Sumber Cahaya

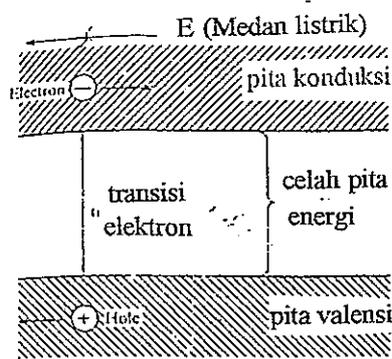
Sumber cahaya bekerja sebagai pemancar cahaya ke serat optik, sehingga harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut, yaitu keluaran cahayanya harus sedekat mungkin bersifat monokromatis (berfrekuensi hampir tunggal), memiliki efisiensi kuantum yang tinggi (Kao, 1986), dan berintensitas tinggi sehingga dapat memancarkan energi yang cukup untuk mengatasi rugi-rugi yang dijumpai selama transmisi (Keiser, 1991), mampu dimodulasi dengan mudah oleh isyarat informasi, berukuran kecil, dan mudah digandengkan dengan serat, sehingga tidak terjadi rugi-rugi penggandengan yang berlebihan (Roddy, 1997), serta pembuatannya harus mudah dan biayanya murah (Widodo, 1997),

Sumber cahaya yang biasa digunakan pada SKSO sampai saat ini terbuat dari bahan semikonduktor, yaitu dioda pemancar cahaya (*Light Emitting Diode[LED]*) dan dioda laser Injeksi (*Injection Laser Diode[ILD]*). Pada penelitian ini digunakan ILD sebagai sumber cahaya.

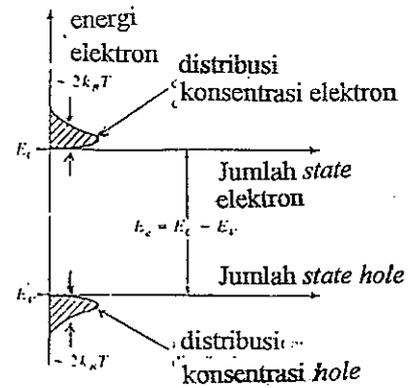
II.2.2 Sifat Bahan Semikonduktor

Bahan semikonduktor mempunyai sifat konduksi antara logam dan isolator. Sifat konduksi dapat dijelaskan dengan menggunakan diagram pita energi (Gambar 2-4). Pada bahan murni di suhu rendah, pita konduksi tidak berisi elektron, sedangkan pita valensi penuh elektron. Dua pita ini dipisahkan oleh celah pita energi. Ketika suhu dinaikkan, elektron dieksitasikan melintasi celah pita energi, sehingga meningkatkan konsentrasi n elektron bebas di pita konduksi, dan meninggalkan konsentrasi lubang (*hole*), p , di pita valensi. Konsentrasi elektron dan *hole* disebut konsentrasi pembawa intrinsik (*intrinsic carrier*).

Konduktivitas dapat ditingkatkan dengan menambahkan impuritas dari unsur golongan V (seperti P, As, Sb) dari Tabel Sistem Berkala Unsur. Proses ini disebut *dopping*. Unsur tersebut mempunyai 5 elektron di kulit terluar yang akan berikatan kovalen dengan atom Si, dengan sisa 1 elektron digunakan untuk konduksi. Seperti diperlihatkan di Gambar 2-5, terdapat pita di bawah pita konduksi yang disebut level donor. Impuritas disebut donor, karena memberikan kenaikan elektron ke pita konduksi. Dalam hal ini, arus dibawa oleh elektron, sehingga disebut material tipe - n . Konduktivitas dapat juga ditingkatkan dengan menambahkan unsur golongan III, yang mempunyai 3 elektron di kulit terluar, sehingga akan berikatan kovalen dengan Si melalui 3 elektron tersebut. Konduksi



(a)

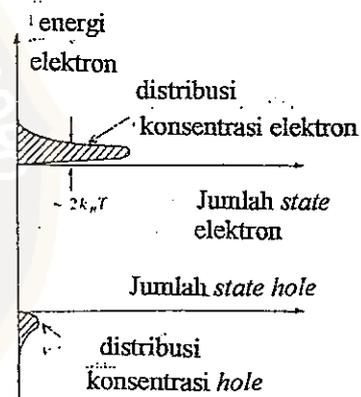


(b)

Gambar 2-4. (a) Diagram pita energi yang menunjukkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi; (b) terjadinya konsentrasi elektron di pita konduksi dan konsentrasi hole di pita valensi akibat eksitasi (Keiser, 1991)



(a)

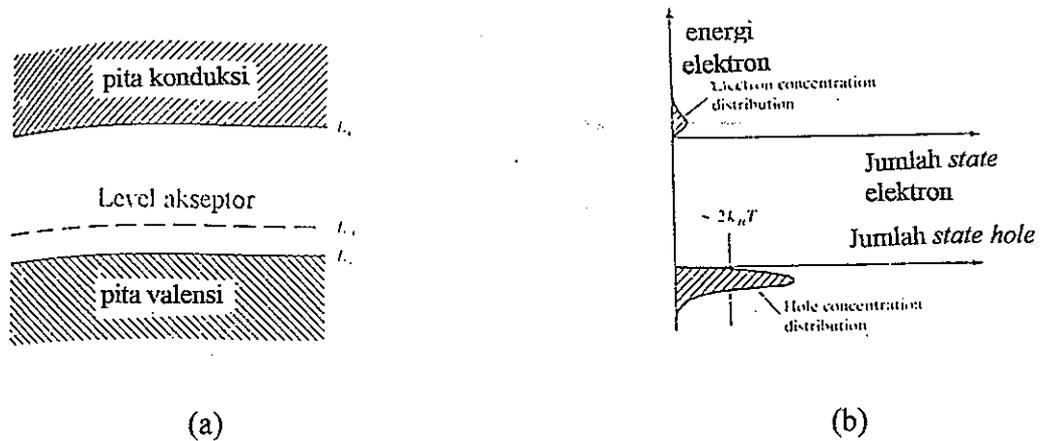


(b)

Gambar 2-5. (a). Level donor di material tipe-n, (b). Pada material tipe - n, konsentrasi elektron di pita konduksi mengalami peningkatan akibat peristiwa impuritas (Keiser, 1991)

terjadi ketika elektron dieksitasikan dari pita valensi ke level akseptor. Material jenis ini disebut material tipe - *p* karena konduksi adalah aliran *hole*. Konduktivitas listrik sebanding dengan konsentrasi pembawa. Dua tipe pembawa

muatan untuk material ini adalah pembawa mayoritas, yaitu elektron di material tipe n atau *hole* di material tipe p , dan pembawa minoritas, yaitu *hole* di material

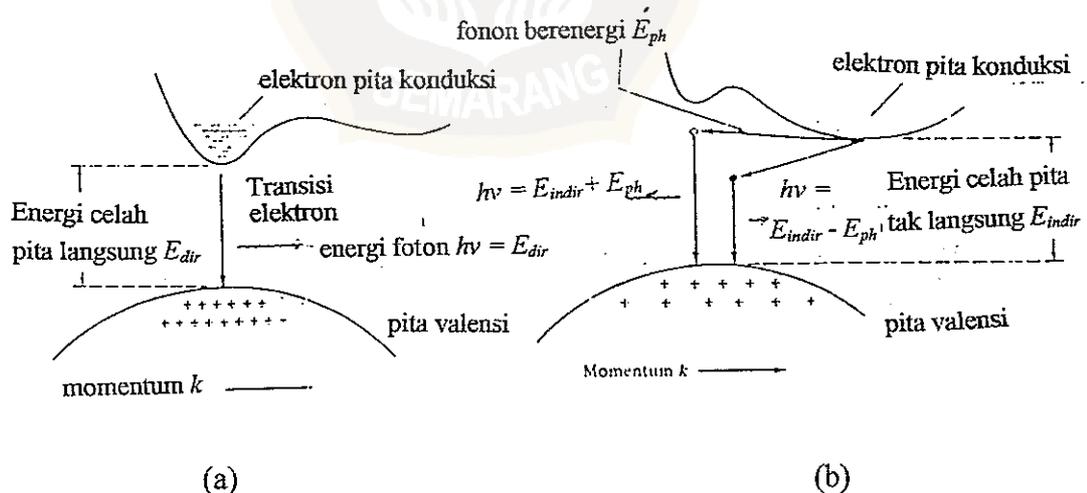


Gambar 2-6. (a) Level akseptor di material tipe- p , (b) Pada material tipe - p , konsentrasi *hole* di pita valensi mengalami peningkatan akibat peristiwa impuritas (Keiser, 1991)

tipe- n atau elektron di material tipe- p . Semikonduktor tipe- p dan tipe- n dapat digabungkan dengan membentuk persambungan pn . Ketika persambungan pn dihasilkan, pembawa mayoritas melewati sambungan tersebut. Hal ini menyebabkan elektron mengisi *hole* di sisi p sambungan dan menyebabkan *hole* terjadi di sisi n . Hal ini menimbulkan potensial penghalang (*barrier potential*) atau medan listrik terjadi di sambungan yang mencegah pergerakan muatan pada saat terjadi kesetimbangan, sehingga daerah persambungan tidak mempunyai pergerakan pembawa, karena elektron dan *hole* terkunci di struktur ikatan kovalen. Daerah ini disebut wilayah pengosongan (*depletion region*). Ketika persambungan pn dibias mundur, lebar wilayah pengosongan akan meningkat di sisi p dan n , sehingga meningkatkan potensial penghalang dan mencegah pembawa mayoritas mengalir melintasi persambungan. Ketika persambungan di

bias maju, potensial pengosongan akan berkurang. Elektron pita konduksi di sisi n dan $hole$ pita valensi di sisi p , ikut berdifusi melintasi persambungan. Pada saat terjadi pelintasan, terjadi peningkatan konsentrasi pembawa minoritas dan menyebabkan pembawa bergabung kembali (*recombinasi*) dengan pembawa mayoritas muatan sebaliknya (Keiser, 1991). Material tanpa pengotor disebut material intrinsik. Karena getaran termal atom-atom kristal, elektron dalam pita valensi mendapat energi cukup untuk dieksitasi ke pita konduksi. Dalam proses bergabung kembali, elektron melepaskan sebuah foton cahaya berenergi $E = h\nu$, yang merupakan hasil dari perubahan energi potensial elektron, ketika elektron tersebut berada di pita konduksi (Roddy, 1997).

Dalam transisi elektron dari pita konduksi dengan serapan atau emisi foton, energi dan momentum harus kekal, yaitu bermomentum $\frac{h\nu}{c}$. Bahan semikonduktor digolongkan dalam celah pita langsung (*direct band gap*) dan celah pita tak langsung (*indirect band gap*) tergantung kepada permukaan celah

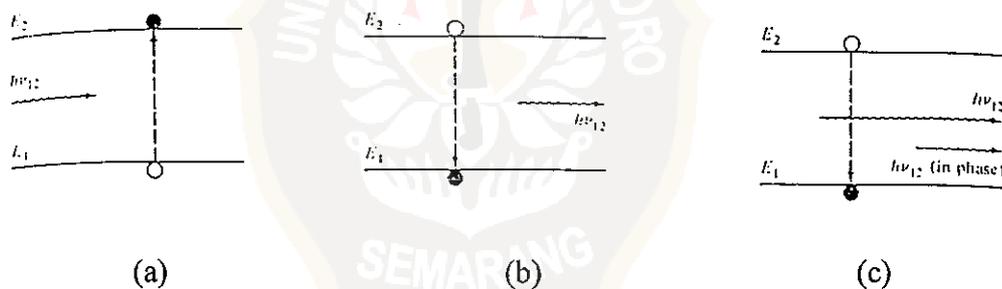


Gambar 2-7. (a) Bahan semikonduktor tipe celah langsung, (b) bahan semikonduktor tipe celah tak langsung (Keiser, 1991)

pita sebagai fungsi momentum k seperti dijelaskan oleh Gambar 2-7. Material celah langsung terjadi karena elektron dan *hole* mempunyai momentum yang sama, sementara celah pita tak langsung, materialnya memiliki level energi minimum pita konduksi dan level energi maksimum pita valensi terjadi pada momentum yang berbeda, sehingga agar momentum kekal, diperlukan partikel lain, yaitu *fonon* (Keiser, 1991).

II. 2. 3 Dioda Laser Injeksi (*Injection Laser Diode*[ILD])

Laser yang digunakan untuk SKSO adalah ILD semikonduktor, walaupun laser-laser jenis lain seperti laser zat padat, dan laser gas dapat digunakan, karena masing-masing radiasi emisinya koheren dan cahaya keluarannya monokromatik, namun mempunyai kendala dalam ukuran dan harga.



Gambar 2-8. Proses yang terjadi di laser: (a) Serapan; (b) emisi spontan; (c) emisi terstimulasi (Keiser, 1991)

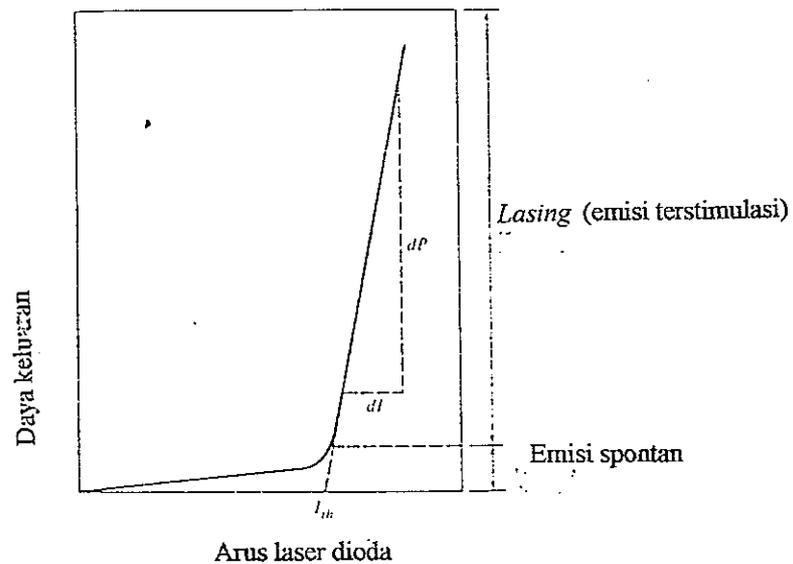
Kerja laser didasari pada 3 proses, yaitu serapan (*absorpsi*), emisi spontan, dan emisi terstimulasi, seperti digambarkan dalam Gambar 2-8. E_1 adalah energi keadaan dasar dan E_2 adalah energi keadaan tereksitasi. Menurut Planck, transisi energi antara dua keadaan, pada proses serapan dan emisi spontan adalah $h\nu_{12} = E_2 - E_1$. Ketika *foton* berenergi $h\nu_{12}$, elektron di E_2 dapat menyerap energi

foton dan bereksitasi ke E_2 . Jika pada keadaan tak stabil, elektron akan kembali ke keadaan dasar dengan mengemisikan *foton* berenergi $h\nu_{12}$, hal ini disebut emisi spontan. Jika *foton* datang dan elektron tetap berada pada E_2 , maka elektron harus dirangsang untuk menuju keadaan dasar dan memberikan *foton* dengan energi $h\nu_{12}$, hal ini disebut emisi terstimulasi. Emisi terstimulasi dapat menyebabkan serapan, jika populasi keadaan tereksitasi lebih besar keadaan dasar, hal ini disebut *populasi inversi* (Keiser, 1991).

Emisi terangsang di ILD berasal dari transisi optis antara tingkat energi di pita valensi dan konduksi. Radiasi di ILD dibangkitkan dalam ruang resonator (*resonator cavity*) Fabry Perot dengan ukuran panjang 250 – 500 μm , lebar 5-15 μm tebal 0,1-1,2 μm , dan memiliki sepasang cermin yang menimbulkan pemantulan sebagian yang diarahkan masing-masing ke pembatas ruang. Cermin tersebut memperkuat umpan balik sinyal optis yang diarahkan longitudinal. Radiasi optis dalam ruang resonator ILD membentuk garis-garis moda.

Lasing adalah kondisi saat penguatan cahaya menjadi mungkin di ILD. Persyaratan untuk *lasing* adalah terpenuhinya inversi populasi. Kecepatan emisi terstimulasi dalam suatu moda sebanding dengan intensitas radiasi dalam moda tersebut. Penguatan optis suatu moda ditentukan oleh mekanisme umpan balik ruang optis. *Lasing* terjadi ketika gain dari satu atau beberapa moda yang terbentuk cukup untuk mengatasi rugi-rugi optis selama perambatan bolak-balik di ruang (Keiser, 1991).

Hubungan antara daya keluaran optis dan arus dioda digambarkan di Gambar 2-9. Pada arus dioda rendah, hanya radiasi spontan yang diemisikan.



Gambar 2-9. Hubungan antara daya keluaran optis dan arus laser dioda (Keiser, 1991)

Lebar spektral dan lebar berkas dari emisi tersebut sangat lebar. Pada batas *lasing*, terjadi peningkatan tajam daya keluaran. Pada titik ini, lebar spektral dan lebar berkas menipis sesuai kenaikan arus. Arus ambang merupakan *ekstrapolasi* dari wilayah *lasing* dari kurva daya vs. arus. Pada keluaran daya tinggi, *slope* kurva menurun karena pemanasan persambungan. Efisiensi kuantum didefinisikan sebagai jumlah foton teremisi dalam setiap *rekombinasi* pasangan elektron-hole pada saat kondisi ambang.

II.3 Pemancaran Cahaya Dan Penggandengan Sumber Cahaya-Serat Optik

Pemancaran daya cahaya dari sumber ke serat optik dipengaruhi oleh NA, ukuran inti, profil indeks bias, beda indeks bias inti – kulit, tingkat kecerahan, dan distribusi daya dari sumber.

Permukaan pengemisi ILD dicirikan dengan bentuk keluaran optis lambertian. Daya cahaya maksimum dari sumber yang tergandengan ke serat adalah: (Keiser, 1991)

$$P = \int_0^{r_m} \int_0^{2\pi} \left[\int_0^{2\pi\theta_{0,max}} \int_0^{\theta_s} B(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right] d\theta_s r dr \dots\dots\dots(14)$$

dengan

P : daya cahaya maksimum yang terdangungkan di serat optik

θ dan ϕ : sumbu dalam koordinat bola dari bentuk emisi cahaya sumber cahaya

B : tingkat kecerahan cahaya dari sumber cahaya

r : jari-jari pusat permukaan emisi sumber cahaya

θ_s : sudut emisi cahaya dari luasan permukaan sumber cahaya

Dari persamaan (14) terlihat bahwa integrasi pertama menyatakan tingkat kecerahan dari suatu titik di permukaan emisi pada sudut penerimaan ruang serat, hal ini terlihat dari dalam kurung, yaitu $\theta_{0,max}$, yang merupakan sudut penerimaan maksimum serat yang merupakan TN. Daya total terdangung adalah jumlah kontribusi dari masing-masing bagian titik emisi pada luasan $d\theta_s r dr$. Jika jari-jari permukaan emisi r_s lebih kecil daripada jari-jari inti a , maka daya cahaya yang terdangung adalah: (Keiser, 1991)

$$P = \pi B_0 \int_0^{r_s} \int_0^{2\pi} NA^2 d\theta_s r dr \dots\dots\dots(15)$$

dengan B_0 : Tingkat kecerahan cahaya yang tegak lurus permukaan emisi.

Untuk serat step indeks, NA tidak tergantung posisi θ_s dan r di ujung serat, sehingga (Keiser, 1991)

$$P_{LD,step} = \pi^2 r_s^2 B_0 (NA)^2 = 2\pi^2 r_s^2 B_0 n_1^2 \Delta \text{ untuk } r_s < a \dots\dots\dots(16)$$

dengan r_s adalah jari-jari permukaan emisi sumber cahaya

Persamaan (16) dapat dinyatakan dengan (Keiser, 1991)

$$P_{ILD, step} = P_s(NA)^2 \quad \text{untuk } r_s \leq a \dots \dots \dots (17)$$

Jika jari-jari luasan pengemisi lebih besar daripada jari-jari luasan inti serat maka

$$P_{ILD, step} = \left[\frac{a}{r_s} \right]^2 P_s(NA)^2 \quad \text{untuk } r_s > a \dots \dots \dots (18)$$

Daya terganggu akan berkurang jika terjadi pemantulan material di luar serat berindek bias n , yaitu oleh faktor (Keiser, 1991)

$$R = \left[\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right]^2 \dots \dots \dots (19)$$

dengan R adalah koefisien reflektansi.

Pada setiap SKSO, transmisi informasi dapat mencapai jangkauan sistem yang panjang, lebih panjang daripada panjang maksimum serat yang tersedia, oleh karenanya serat harus disambung beberapa kali di sepanjang *rutenya*. Juga bila selama masa kerjanya, serat mungkin mengalami patah dan harus diperbaiki maka kerusakan ini diatasi dengan membuat sambungan permanen (*splice*), bukan dengan sambungan yang tak permanen (*conektor*) (Widodo, 1995). Persyaratan yang harus dipenuhi dalam membuat sambungan permanen antara lain adalah sambungan harus mudah dibuat, memberikan rugi-rugi sekecil mungkin (kira-kira 0,1 dB/sambungan) dan waktu penyambungan yang sesingkat mungkin. Sedangkan persyaratan untuk konektor adalah rugi penggantian rendah, mudah dalam penggunaan, pengaruh kondisi lingkungan terhadapnya rendah dan biaya konstruksinya rendah (Roddy, 1997). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya rugi yang ditambahkan oleh sambungan pada suatu kabel, yaitu:

a. Ketidaksesuaian ukuran inti

Yaitu bila ukuran inti serat pertama lebih besar daripada inti serat kedua, sehingga hanya sebagian saja dari cahaya inti pertama yang akan masuk ke inti kedua (Roddy, 1997).

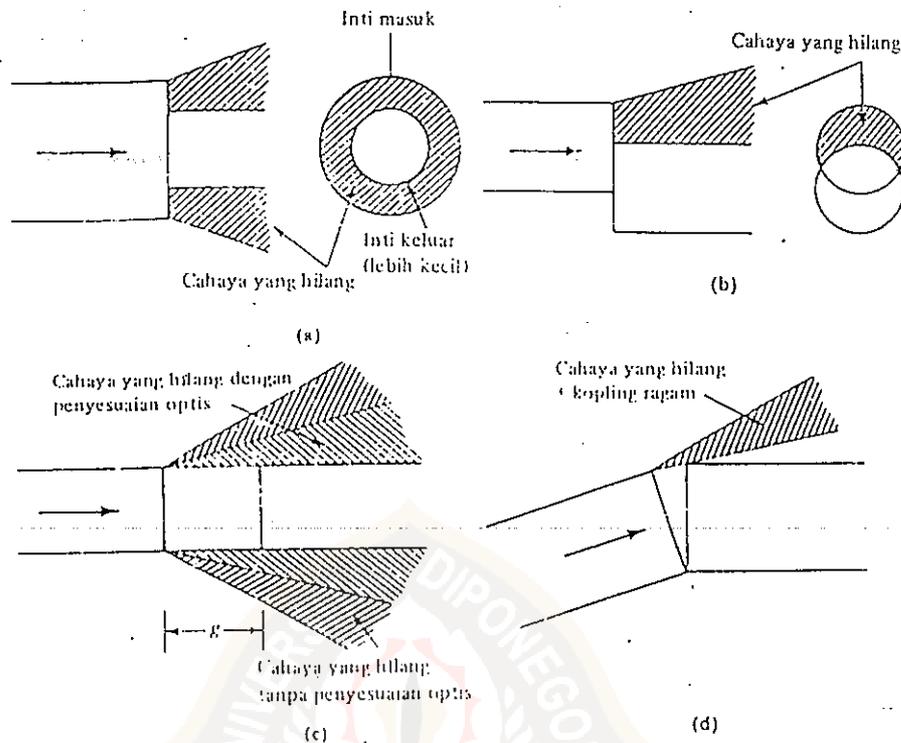
b. Kesalahan mekanis penyambungan

Rugi-rugi pancaran akibat kesalahan mekanis penyambungan, timbul karena kerucut radiasi cahaya serat pertama tidak tepat pada kerucut penerimaan serat kedua. Besar rugi-rugi radiasi tergantung tingkat kesalahan. Terdapat 3 tipe kesalahan ini, yaitu kesalahan letak inti melintang (*lateral displacement*), yaitu jika konektor yang dipergunakan tidak menempatkan kedua diameter inti dengan tepat, atau karena inti dari salah satu atau kedua serat tidak tepat berada di tengah-tengah kulit (inti tidak konsentris), yang kedua adalah kesalahan celah memanjang (*longitudinal-gap separation*), yaitu jika serat-serat mempunyai sumbu yang sama, namun terpisah oleh suatu jarak, hal ini menyebabkan rugi, karena cahaya meninggalkan serat pertama dengan menyebarkan (*diverge*) cahaya dalam sebuah kerucut, yang ditentukan oleh sudut penerimaan serat, sehingga jika terdapat jarak antarserat, maka cahaya akan hilang karena *divergensi* ini (Roddy, 1997). Yang ketiga adalah kesalahan letak sudut (*angular misalignment*), yaitu bila kedua inti salah letaknya sedemikian rupa sehingga keduanya bertemu dengan sudut θ , sebagian cahaya akan keluar melalui celah yang terbuka tersebut (Keiser, 1991).

c. Penyiapan ujung serat yang tidak sempurna

Yaitu jika salah satu serat mempunyai ujung yang dipotong tidak sempurna, sehingga bila cahaya datang mengenainya, akan hilang karena

pemantulan dan sebagian lagi akan hilang karena rugi-rugi penggantian moda yang bocor (Widodo, 1995).



Gambar 2-10. Faktor-faktor rugi konektor: (a) ketidak sesuaian ukuran inti; (b)kesalahan inti melintang; (c) ketidaksesuaian optis dan celah memanjang; (d) kesalahan letak sudut (Roddy, 1997).

d. Kotoran

Setiap kotoran/benda asing yang masuk ke dalam *conektor* atau sambungan, selama atau setelah proses penyambungan dapat memperbesar rugi-rugi bahkan dapat menutup sama sekali sambungan (Widodo, 1995).

II.4. Detektor Cahaya (*Photodetektor*)

II.4.1. Fungsi Dan Persyaratan Detektor Cahaya

Pada ujung SKSO harus terdapat peralatan penerima berkas cahaya yang datang dan mengubahnya menjadi isyarat listrik berupa arus listrik yang berisi isyarat informasi yang dikirim. Arus listrik tersebut kemudian diperkuat untuk selanjutnya diolah sehingga diperoleh kembali isyarat informasi yang dikirimkan (Widodo, 1995).

Persyaratan yang harus dimiliki oleh detektor cahaya adalah memiliki sensitifitas tinggi terhadap rentang panjang gelombang emisi sumber cahaya, memberikan sedikit *noise* ke sistem, memiliki kecepatan respon tinggi untuk menerima data yang dikirim, tidak sensitif terhadap perubahan suhu, bentuknya ringkas dan sesuai dengan dimensi serat, harganya murah dan waktu kerja yang lama (Keiser, 1991). Jenis-jenis detektor cahaya yang ada sekarang adalah pengalifoto (*photomultiplier*), transistor foto, dan dioda foto. Kebanyakan dari peralatan ini tidak memiliki respon yang cepat dan sensitifitas tinggi serta memiliki dimensi yang tidak praktis. Yang biasa digunakan dalam SKSO adalah fotodetektor PIN dan APD (*Avalanche Photo Diode*) (Roddy, 1997). Dalam penelitian ini digunakan fotodetektor APD.

II.4.2 Dioda Foto Guguruntun (*Avalanche Photo Diode [APD]*)

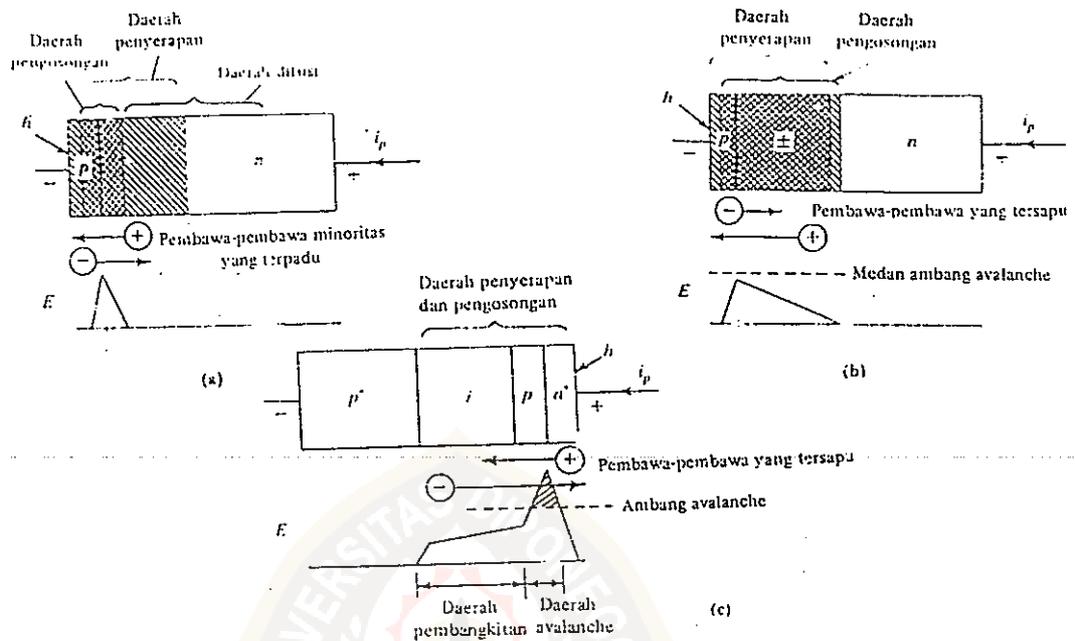
APD adalah detektor cahaya yang melakukan pelipatan arus foto sinyal primer sebelum memasuki rangkaian penguatan, sehingga mampu meningkatkan *sensitifitas* penerima (Keiser, 1991). Bila tegangan bias mundur pada dioda *p - i - n* ditingkatkan, akan terjadi medan listrik tinggi, sehingga elektron-elektron

yang sedang dipercepat lewat daerah tersebut, dan menyebabkan dibangkitkannya pasangan elektron – *hole* sekunder akibat tumbukan-tumbukan di dalam daerah bermedan tinggi ini. Jumlah pembawa yang dibangkitkan dengan cara ini akan membanyak secara *eksponensial* sebanding dengan intensitas medan, sehingga menyebabkan suatu efek guguruntun (*avalanche effect*) (Roddy, 1997). Namun, struktur $p - i - n$ tidak ideal untuk operasi guguruntun, karena medan listrik didistribusikan ke seluruh daerah pengosongan yang relatif tebal, ini berarti tegangan–tegangan luar yang diperlukan untuk memperoleh batas terjadinya guguruntun dari intensitas medan listrik terlalu tinggi untuk pengoperasian praktis, sehingga dikembangkan diode APD terobosan (*reach-through APD [RAPD]*) seperti Gambar 2-12 (Keiser, 1991). Lapisan p^+ dan n^+ merupakan lapisan yang mempunyai konsentrasi *doping* tinggi, sedangkan lapisan π mempunyai konsentrasi *doping* rendah (Widodo, 1995). Konfigurasi ini dikenal dengan $p^+ \pi n^+$.

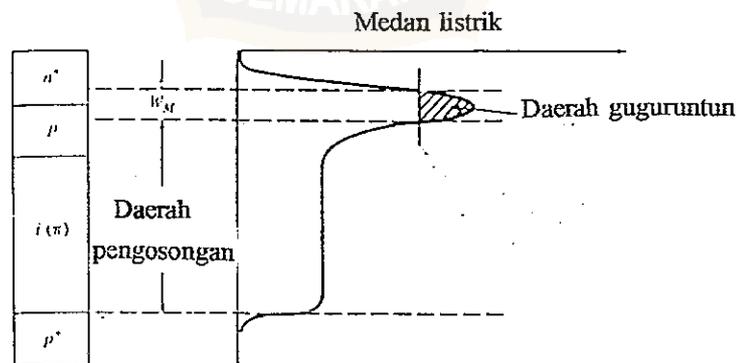
Pada saat tegangan bias mundur dikenakan melintasi sambungan pn^+ , lapisan pengosongan melebar sesuai kenaikan tegangan, hingga didapat tegangan tertentu, sekitar 5-10% di bawah tegangan yang dibutuhkan untuk menyebabkan guguruntun. Pada saat ini, lapisan pengosongan menerobos lapisan intrinsik π .

Dalam operasi normal RAPD, cahaya memasuki peralatan melalui p^+ dan diserap di material π , yang bekerja sebagai wilayah pengumpulan *photocarrier*. Penyerapan *foton* menyebabkan timbulnya energi, sehingga menghasilkan pasangan elektron-*hole*, yang kemudian dipisahkan oleh medan listrik di

wilayah π . *Photocarrier* melintasi π menuju sambungan pn^+ pada saat masih terdapat medan listrik tinggi, di mana terjadi pelipatan pembawa (Keiser, 1991).



Gambar 2-11. Struktur dioda foto dan pola-pola distribusi medan; (a) dioda foto pn tanpa pembanyakan (*multiplication*); (b) dioda foto pin tanpa pembanyakan; (c) dioda foto guguruntun dengan pembanyakan (Roddy, 1997)



Gambar 2-12. Struktur RAPD dan medan listrik di wilayah pengosongan dan pelipatan (Roddy, 1997)

APD memiliki *sensitifitas* yang lebih tinggi daripada detektor PIN, namun peralatan ini memiliki dua kekurangan. Pertama, pembawa-pembawa memiliki waktu *transit* relatif lama sebelum keluar dari daerah pengosongan yang lebar, sehingga kecepatan kerjanya adalah setara dengan dioda *p i n*. Kedua, karena faktor pembanyakan guguruntun cenderung untuk *berfluktuasi* secara acak, sehingga terdapat cukup banyak *noise* yang diberikan pada sinyal keluaran yang dihasilkan (Roddy, 1997).

Sebuah dioda guguruntun memerlukan tegangan bias sebesar 100 V hingga 400 V untuk menghasilkan faktor pembanyakan 100 hingga 300. Besar arus bias adalah hanya beberapa mikroampere (Roddy, 1997)

II.5. Redaman Dalam Serat Optik

Menurut Braglia, redaman adalah perubahan *fluks* energi elektromagnetik pada suatu panjang gelombang tertentu, yang melewati 2 luasan berbeda, dan besarnya negatif (CSELT, 1990). Redaman dalam serat optik merupakan hal yang penting dalam instalasi jaringan kabel serat optik, karena menentukan jarak maksimum penguatan daya (*power repeater*) antara pengirim (sumber cahaya) dan penerima (detektor foto) (Keiser, 1991). Redaman dalam serat optik meliputi rugi-rugi serapan (*absorption losses*), rugi-rugi hamburan (*scattering losses*), rugi-rugi pembengkokan (*bending losses*), rugi-rugi kebocoran moda, dan rugi penggantian moda (*mode coupling losses*) (Roddy, 1997).

a. Rugi-rugi Serapan (*Absorption losses*)

Menurut Cocito, serapan adalah perubahan sebagian energi dalam berkas cahaya menjadi panas atau elektron tereksitasi dalam material yang dilalui oleh cahaya (CSELT, 1990). Serapan disebabkan oleh:

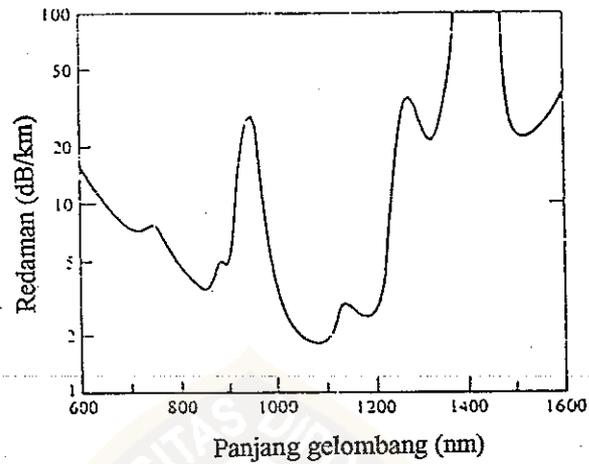
1. Serapan oleh cacat atom (*atomic defect*) dalam susunan serat.
2. Serapan ekstrinsik atom pengotor (impuritas) dalam material serat.
3. Serapan intrinsik oleh atom penyusun dasar material serat (Keiser, 1991)

Cacat atomik merupakan kekurangan struktur atom penyusun serat, seperti adanya molekul-molekul yang hilang (*missing molekul*) dan kerapatan molekul-molekul yang berbeda. Hal ini menyebabkan perubahan panjang gelombang berkas cahaya yang digunakan, sehingga akan menyebabkan perubahan pada energi cahaya (Keiser, 1991).

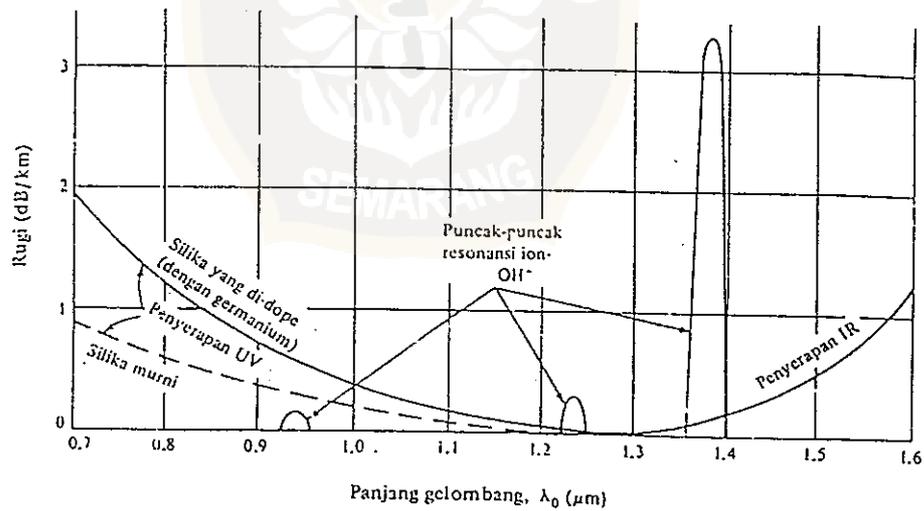
Serapan impuritas berasal dari transisi ion logam seperti besi, khrom, kobalt, dan tembaga serta dari ion OH^- , yang merupakan pengotor dalam material serat. Jumlah pengotor dari ion logam tersebut adalah antara 1 – 20 ppm dan menyebabkan redaman 1 – 10 dB/km. Serapan ini terjadi karena adanya transisi elektron antartingkat energi pada subkulit ion-ion atom tidak penuh (elektron valensi) yang dieksitasikan menjadi elektron-elektron konduksi oleh berkas cahaya atau karena transisi muatan dari satu ion ke ion lain (Keiser, 1991). Kuantitas yang sangat kecil dari molekul-molekul air yang terjebak dalam serat memberikan ion-ion OH^- ke bahan (Roddy, 1995). Kandungan air dalam gelas harus dijaga di bawah 0,01 ppm (Roddy, 1995). Gambar 2-13 menunjukkan puncak-puncak penyerapan oleh ion-ion OH^- pada panjang gelombang 1400, 950,

dan 725 nm yang menunjukkan penyerapan maksimum pada panjang gelombang tersebut.

Serapan intrinsik dilakukan oleh atom penyusun dasar (*basic constituent atom*) material serat, yaitu SiO_2 , pada saat tidak terdapat variasi kerapatan,



Gambar 2-13. Puncak-puncak penyerapan oleh ion OH⁻ (Keiser, 1991)



Gambar 2-14. Pengaruh-pengaruh rugi penyerapan pada serat gelas silika yang dilebur

(Roddy, 1997)

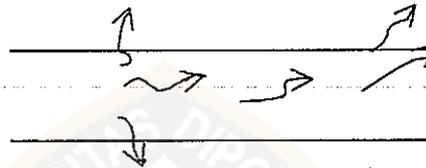
pengotor, dan ketidakhomogenan material, sehingga serapan intrinsik merupakan batas terendah serapan dalam serat optik (Keiser, 1991). Serapan intrinsik berasal dari pita serapan elektron dengan puncaknya dalam wilayah sekitar ultraviolet dan pita vibrasi atomik yang puncaknya dalam wilayah sekitar inframerah ($1,2 \mu\text{m}$). Penyerapan ultraviolet terjadi ketika foton berinteraksi dengan elektron dalam pita valensi dan mengeksitasinya ke level yang lebih tinggi (Keiser, 1991). Elektron-elektron valensi dapat dieksitasi menjadi elektron-elektron konduksi oleh cahaya dengan panjang gelombang kira-kira $0,14 \mu\text{m}$, yang setara dengan energi 8,9 eV (Roddy, 1997).

Penyerapan inframerah terjadi karena foton-foton dari energi cahaya diserap oleh atom-atom di dalam molekul gelas dan diubah menjadi getaran mekanis yang acak (Roddy, 1997). Penyerapan inframerah ini juga memperlihatkan sebuah puncak spektral utama, yang untuk silika terjadi pada $8 \mu\text{m}$, dan puncak *minor* (kecil) pada $3,2 \mu\text{m}$, $3,8 \mu\text{m}$, dan $4,4 \mu\text{m}$. Puncak-puncak ini melebar dan mengekor sampai ke bagian spektrum yang dapat dilihat, hingga rugi-rugi yang kurang dari 0,5 dB/km pada $1,5 \mu\text{m}$. Ekor inframerah ditunjukkan pada Gambar 2-14 (Roddy, 1997)

b. Rugi-rugi Hamburan (*Scattering Losses*)

Gelas penyusun serat optik adalah suatu benda padat *amorp* (tidak berbentuk kristal). Serat optik dibentuk dengan cara membiarkan gelas mendingin dari keadaan cairnya pada suhu tinggi hingga dia membeku. Sementara masih dalam keadaan lunak, gelas itu ditarik membentuk serat yang panjang (Roddy,

1997). Akibatnya timbul variasi *submikroskopis* dalam kerapatan gelas dan campuran-campuran di dalamnya ikut dibekukan di dalam gelas, sehingga menimbulkan *fluktuasi* komposisi dan ketidakhomogenan struktur (Keiser, 1991). Hal ini menyebabkan peningkatan variasi indek bias yang terjadi pada rentang jarak yang sangat kecil dibanding panjang gelombang (Widodo, 1995). Variasi indek ini menyebabkan hamburan Rayleigh (*Rayleigh scattering*) yaitu hamburan yang rugi-rugi hamburannya berubah menurut perbandingan terbalik dengan pangkat empat dari panjang gelombang (Gambar 2-15).



Gambar 2-15. Hamburan Rayleigh (Widodo, 1995)

c. Rugi-rugi Pembengkokan (*Bending Losses*)

Rugi-rugi pembengkokan dalam serat disebabkan oleh 2 jenis berdasarkan penyebabnya, yaitu pembengkokan *mikro* (*microbending*) dan pembengkokan jari-jari konstan atau pembengkokan *makro* (*macrobending*). Pembengkokan mikro adalah suatu pembengkokan mikroskopis inti serat yang disebabkan oleh laju penyusutan (*kontraksi*) termal yang sedikit berbeda antara bahan inti dan bahan kulit. Pembengkokan *mikro* juga dapat timbul bila serat berulang kali digulung menjadi suatu kabel serat majemuk (*multifiber cabel*), atau bila digulung pada kelos untuk memudahkan pengangkutan (Roddy, 1997). Rugi-rugi karena pembengkokan *mikro* terjadi karena bengkokan-bengkokan tersebut bekerja sebagai butir-butir penyebar (*scattering facets*) yang menyebabkan terjadinya

penggandengan moda. Energi dari moda-moda yang dipandu akan digandeng silang ke dalam moda-moda bocor lalu hilang lewat kulit (Keiser, 1991).

Bila serat optik diinstalasikan di dalam saluran-saluran kabel atau pada tiang-tiang untuk saluran transmisi, sering diperlukan adanya belokan-belokan pada serat untuk mengikuti sudut-sudut atau tikungan tersebut, hal ini akan menyebabkan pembengkokan jari-jari konstan atau *macrobending*. Belokan-belokan dengan jari-jari besar ini, akan menimbulkan rugi cahaya dalam serat. Rugi yang terjadi adalah karena moda-moda yang sepenuhnya terbimbing di bagian-bagian lurus dari serat, hanya akan terbimbing sebagian atau sama sekali tidak terbimbing pada bagian serat yang melengkung, hal ini terjadi jika sudut datang moda yang terpandu di dalam serat, mengenai bidang batas inti – kulit lebih kecil daripada sudut kritisnya, sehingga moda dibiaskan keluar dari inti, akibatnya energi yang dikandung moda akan hilang (Roddy, 1997)

d. Moda-moda Yang Bocor

Bila pada setiap pantulan dari suatu moda, sudut datang lebih besar dari pada sudut kritis, moda tersebut akan merambat dalam serat. Tetapi pada beberapa moda, sudut masuk bisa lebih kecil dari sudut kritis, sehingga sebagian moda akan keluar dari inti karena pembiasan, dan meninggalkan sisanya untuk dipantulkan. Jika ini terjadi berturut-turut, menyebabkan moda tersebut akan mengecil intensitasnya dengan cepat ketika ia merambat, sehingga pada suatu jarak tertentu pada kabel, moda-moda yang sepenuhnya terbimbing saja yang masih tersisa.

Moda-moda bocor yang ditimbulkan pada ujung pemancar dari serat biasanya hanya mengandung beberapa persen dari daya terbimbing total, dan ini

dengan cepat diredam dekat pemancar, tetapi, bila pada kabel terdapat sambungan-sambungan (*splice*), moda yang terkandung dan merambat di bagian pertama mungkin tidak digandengkan dengan tepat ke bagian berikutnya, ini mengakibatkan dipindahkannya daya ke moda bocor pada sambungan tersebut (Roddy, 1997).

e. Rugi-rugi Penggandengan Moda (*Mode Coupling Losses*)

Daya yang sudah dilepaskan dengan baik ke dalam suatu moda yang merambat, mungkin kemudian digandengkan ke dalam suatu moda bocor pada sebuah titik yang agak jauh pada serat. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal, yaitu cacat-cacat kecil pada inti atau pada bidang batas inti-kulit, seperti variasi-variasi *mikroskopis* diameter inti, bentuk penampang, atau gelembung-gelembung dalam gelas, yang dapat menyebabkan digandengkannya energi ke dalam suatu moda bocor. Penyebab lain adalah sambungan-sambungan yang dibentuk dengan kurang sempurna atau konektor-konektor yang penyatelannya juga kurang sempurna (Roddy, 1997). Pada umumnya, rugi ini ditekan hingga kira-kira 0,5 dB per-gandengan atau kira-kira 0,2 dB per-sambungan (CSELT, 1990).

II.5.1. Pengukuran Redaman

Redaman merupakan parameter dasar serat optik, yang membatasi jarak tempuh maksimum sinyal cahaya yang merambat dalam serat. Redaman memiliki satuan dB/satuan panjang, dan dinotasikan dengan (CSELT, 1990)

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{z_2 - z_1} 10 \log_{10} \frac{p(z_1, \lambda)}{p(z_2, \lambda)} \dots\dots\dots (20)$$

dengan $\alpha(\lambda)$ adalah besar redaman terukur, $p(z_1, \lambda)$ dan $p(z_2, \lambda)$ masing-masing adalah daya cahaya pada posisi z_1 dan z_2 dari pangkal serat. Jika dilakukan pengukuran redaman pada ujung serat yang memiliki panjang L , maka besarnya redaman adalah:

$$\alpha_L(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{p(0, \lambda)}{p(L, \lambda)} \dots \dots \dots (21)$$

yaitu dengan menganggap $z_1 = 0$ dan $z_2 = L$.

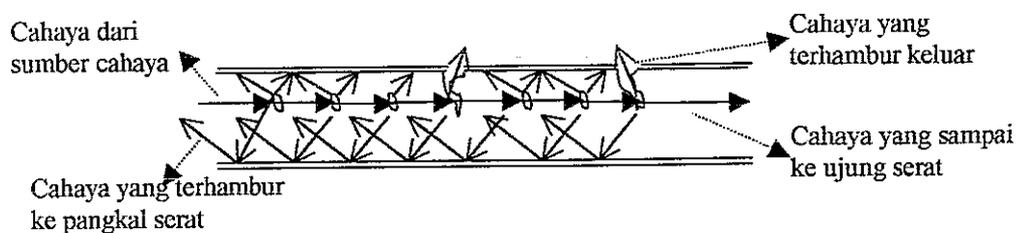
Pengukuran redaman didasarkan pada persamaan (20) dan (21) namun secara praktek, menentukan redaman tergantung kepada jumlah dan distribusi moda yang diluncurkan, sehingga untuk mengetahui redaman serat *multi moda* lebih sulit daripada *single moda*, karena masing-masing moda dalam *multi moda* merambat dengan koefisien redaman rata-rata yang berbeda. Selain hal tersebut, redaman tetap berubah sebagai fungsi jarak dari sumber. Untuk memudahkan analisa, pada saat pengukuran, cahaya merambat di dalam serat, dianggap dalam kondisi tunak (*steady state*), yaitu kondisi dengan daya relatif dari berbagai moda menjadi konstan, sehingga pada situasi ini semua moda mempunyai koefisien rugi yang sama. Hal ini dapat terjadi pada serat dengan panjang tertentu, rugi-rugi moda dianggap nol, dan daya terkirim dari satu moda ke moda lain digantikan dengan jumlah yang diterima dari arah yang berlawanan.

Metoda-metoda yang digunakan untuk melakukan pengukuran redaman adalah *cut-back*, *insertion loss*, dan hamburan balik (*backscattering*) (CSELT, 1990). Pengukuran redaman dengan metode *cut-back* merupakan metode standar dalam pengukuran redaman ini. Walaupun demikian, karena adanya keterbatasan alat yang digunakan, dalam penelitian ini, penulis melakukan pengukuran

redaman dengan menggunakan metoda hamburan balik (*backscattering*), walaupun ketepatan hasil pengukurannya tidak sebaik jika dibandingkan dengan hasil pengukuran dengan menggunakan metode *cut-back*. Pengukuran dengan metode hamburan balik (*backscattering*) merupakan salah satu cara untuk mengukur rugi-rugi serat, distribusi dan lokasi rugi-rugi, rugi sambungan, dan panjang serat.

II.5.2. Prinsip Dasar Hamburan Balik

Peristiwa hamburan terjadi karena adanya interaksi antara cahaya dengan material penyusun serat optik, yang mengakibatkan terjadinya penghamburan cahaya ke segala arah. Sebagian cahaya terhambur ini ada yang ditangkap (*recaptured*) dan dirambatkan kembali dalam arah balik (*backward direction*), keluar dari ujung masukan cahaya di pangkal serat optik, seperti digambarkan dalam Gambar 2-16. Proses-proses hamburan balik tersebut akan berulang, yang mengakibatkan masing-masing bagian serat optik menghasilkan radiasi hamburan balik. Jika pada ujung masukan di pangkal serat optik diberi detektor cahaya, sinyal dari hamburan balik dapat disusun kembali seperti semula. Distribusi sinyal hamburan balik memberikan karakteristik rugi serat (CSELT, 1990).



Gambar 2-16. Peristiwa hamburan yang terjadi dalam perambatan cahaya di serat optik

Suatu cahaya dengan energi E , dimasukkan ke serat pada waktu $t = 0$ dan pada jarak $z = 0$. Pada jarak z dari ujung masukan energi cahaya diberikan oleh: (CSELT, 1990)

$$E(z) = E_0 \exp(-ikz) \dots \dots \dots (22)$$

dengan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ adalah bilangan gelombang, z adalah jarak dari ujung masukan, dan E_0 adalah energi pada pangkal serat optik. Jika $z = v_g t$ dengan v_g adalah kecepatan grup gelombang cahaya masukan, maka daya yang dikandung cahaya

masukan tersebut adalah $p = \frac{dE(z)}{dt}$, sehingga

$$p(t) = -ikv_g E_0 \exp(-ikv_g t) \dots \dots \dots (23)$$

$$p(t) = p_0 \exp(-ikv_g t) \dots \dots \dots (24)$$

dengan $p_0 = -ikv_g E_0$ adalah daya masukan di pangkal serat optik.

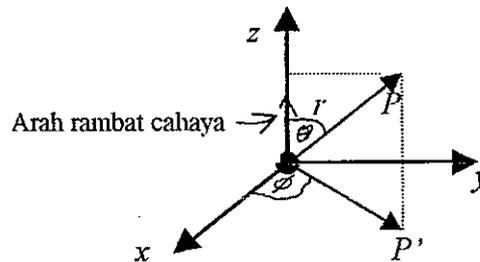
Akibat perambatannya di dalam serat, maka cahaya tersebut akan berinteraksi dengan material penyusun di setiap bagian serat, terutama di inti serat optik, yang mengakibatkan cahaya tersebut terhambur membentuk sudut ruang 4π steradian (terhambur ke segala arah) dengan energi cahaya terhambur (Born, 1987)

$$F_h = F_{oh} \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n}^2 + 2} \sqrt{\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + r^2 (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta)} \frac{e^{-ikr}}{r} \cos \theta \dots (25)$$

dengan $\hat{n} = \frac{n^{(II)^2}}{n^{(I)^2}}$ yang menunjukkan perbandingan kuadrat indek bias di medium

penghambur (yang ditandai *superscrip* II) dengan kuadrat indek bias medium

sebelum medium penghambur (yang ditandai *superscrip* I).



Gambar 2-17. Pola hamburan cahaya di serat dalam koordinat bola

jika $z = r \cos\theta$, maka daya pada cahaya terhambur adalah:

$$P_h(t) = E_{oh} \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n} + 2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \theta \sin^2 \phi) \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. \frac{2v_g^2 t}{\cos^2 \theta} (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}} - \frac{\left(\frac{v_g^2 t i k}{\cos^2 \theta} e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}} + \frac{v_g}{\cos \theta} e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}} \right)}{\left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2} \right. \\ \left. \sqrt{\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) \cos \theta} \right\} \dots\dots\dots(26)$$

jika $p_o = -ikv_g E_o$, maka

$$P_h(t) = p_o E_{oh} \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n} + 2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \theta \sin^2 \phi) \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{2itv_g}{E_o k \cos^2 \theta} (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}} + \left(\frac{\frac{v_g t}{\cos \theta} e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}} - e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}}}{iE_o \cos^2 \theta} - \frac{e^{-ik \frac{v_g t}{\cos \theta}}}{ikE_o \cos \theta} \right) \frac{v_g t}{\cos \theta} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2$$

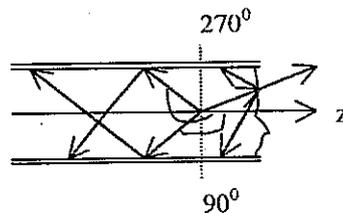
$$\sqrt{\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) \cos \theta} \dots \dots \dots (27)$$

sedangkan jika $p(t) = p_o \exp(-ikv_g t)$, yang menunjukkan pada cahaya terhambur tersebut terdapat sejumlah cahaya yang diteruskan menuju ujung serat optik, maka besar daya cahayanya adalah:

$$p_h(t) = p(t) E_{oh} \frac{\hat{n}^2 - 1}{\hat{n}^2 + 2} \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \theta \sin^2 \phi) \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{2v_g it}{E_o k \cos^2 \theta} (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) e^{-ikv_g t \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)} + \left(\frac{v_g t e^{-ikv_g t \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)}}{iE_o \cos \theta} - \frac{v_g e^{-ikv_g t \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right)}}{ikE_o \cos \theta} \right) \frac{v_g t}{\cos \theta} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2$$

$$\sqrt{\frac{\cos^2 \phi \sin^2 \theta}{k^2} + \left(\frac{v_g t}{\cos \theta} \right)^2 (\cos^2 \phi \cos^2 \theta + \sin^2 \phi \sin^2 \theta) \cos \theta} \dots \dots \dots (28)$$



Gambar 2-18. Arah perambatan cahaya terhambur balik di serat optik

Cahaya terhambur tersebut membentuk sudut ruang 4π steradian, namun yang dapat dipandu ke pangkal serat optik hanya yang mengenai bidang batas *core-cladding* pada sudut $90^\circ < \theta < 270^\circ$ dan mengenai bidang batas *core-cladding* lebih besar dari sudut kritis θ_c , yaitu θ_{h1} dengan $\theta_{h1} = 90^\circ + \theta_c$ (untuk bidang batas bawah) dan $\theta_{h2} = 270^\circ - \theta_c$ seperti yang digambarkan di Gambar 2-18. Untuk peristiwa hamburan di bagian serat optik yang rusak, maka cahaya terhambur yang dirambatbalikan adalah yang mengenai bidang batas *core-udara* (jika benar-benar rusak) dengan sudut datang melebihi sudut bidang batas tersebut.

Akibat hamburan tersebut, cahaya terhambur yang mengenai bidang batas *core-cladding* dengan sudut datang lebih kecil sudut kritis akan dihamburkan keluar dari serat optik sebagai moda-moda bocor, yang memberikan redaman terhadap daya cahaya masukan. Besarnya redaman daya akibat moda-moda bocor di bagian serat optik yang rusak adalah:

$$\alpha(t) = 10 \log \frac{P_h(t)_{\theta_{h1} < \theta < \theta_{h2}}}{P_o} \dots \dots \dots (29)$$

Selama perambatannya, cahaya merambat di serat optik yang berbentuk silinder, sehingga cahaya yang terhambur akan terdistribusi pada setiap bagian serat optik yang berbentuk silinder tersebut, terutama di bagian *core*, sehingga energi yang terdapat dalam cahaya tersebut akan terdistribusi silindris, maka daya yang mengalir dalam serat optik tersebut adalah

$$P_{hs}(t) = \int_V p_h(t) dV$$

$$P_{hs}(t) = \int_{r=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{z=0}^z p_h(t) r dr d\phi dz \dots \dots \dots (30)$$

dengan V adalah volume silinder.

Akibat perambatannya tersebut, cahaya akan mengalami redaman daya akibat serapan oleh material penyusun serat optik dengan besar redaman:

$$\alpha_1(t) = \frac{1}{z} 10 \log \frac{P(t)}{P_o} \dots\dots\dots(31)$$

Di samping itu, terdapat sejumlah cahaya terhambur keluar dari serat yang besarnya adalah :

$$\alpha_2(t) = \frac{1}{z} 10 \log \frac{P_h(t)_{\theta_{h1} < \theta < \theta_{h2}}}{P_o} \dots\dots\dots(32)$$

sehingga besar redaman seluruhnya, $\alpha(\lambda)$, adalah

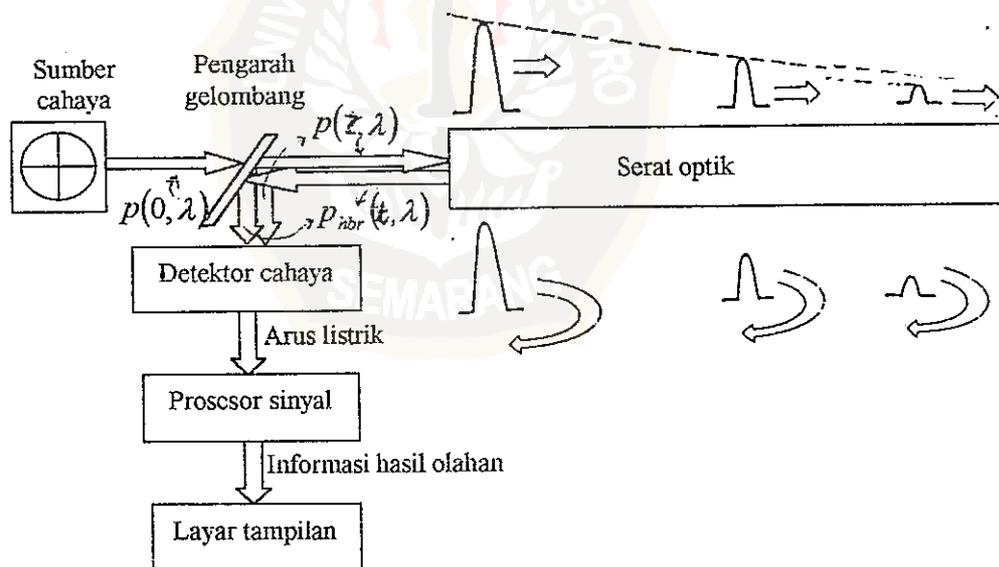
$$\alpha_t(t) = \alpha_1(t) + \alpha_2(t) \dots\dots\dots(33)$$

sedangkan jarak yang ditempuh oleh cahaya tersebut adalah jarak bolak-balik sehingga jarak yang ditempuh untuk arah maju yang menunjukkan panjang serat optik adalah:

$$z' = \frac{v_g t}{2} \dots\dots\dots(34)$$

Jika cahaya terus merambat sampai ujung serat optik, maka cahaya tersebut akan mengenai luasan permukaan ujung serat optik yang merupakan bidang batas serat dan udara. Jika cahaya mengenai luasan tersebut dengan sudut datang lebih besar sudut kritis bidang batas tersebut, maka cahaya tersebut akan dipantulkan balik, dan menjadi cahaya yang terhamburbalikan menuju pangkal serat optik, sedangkan jika cahaya mengenai bidang batas dengan sudut datang lebih kecil sudut kritis, maka cahaya tersebut akan dibiaskan keluar serat optik.

Skema rangkaian pengukuran redaman dengan metode hamburan balik digambarkan di Gambar 2-19. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa cahaya masukan dari sumber cahaya dengan daya yang dikandungnya $p(0, \lambda)$, sebelum mengenai ujung masukan cahaya di pangkal serat, dan cahaya terhambur balik yang berhasil mencapai pangkal serat, dengan daya yang dikandungnya $p_r(t)$, sebelum mengenai detektor cahaya harus mengenai peralatan pengarah gelombang (*directional coupler*), yang berfungsi untuk meneruskan semua berkas cahaya masukan dari sumber cahaya ke serat optik dan memantulkan semua berkas cahaya terhambur balik yang berhasil keluar dari pangkal serat, ke arah detektor cahaya. Peralatan pengarah gelombang ini dapat berupa:



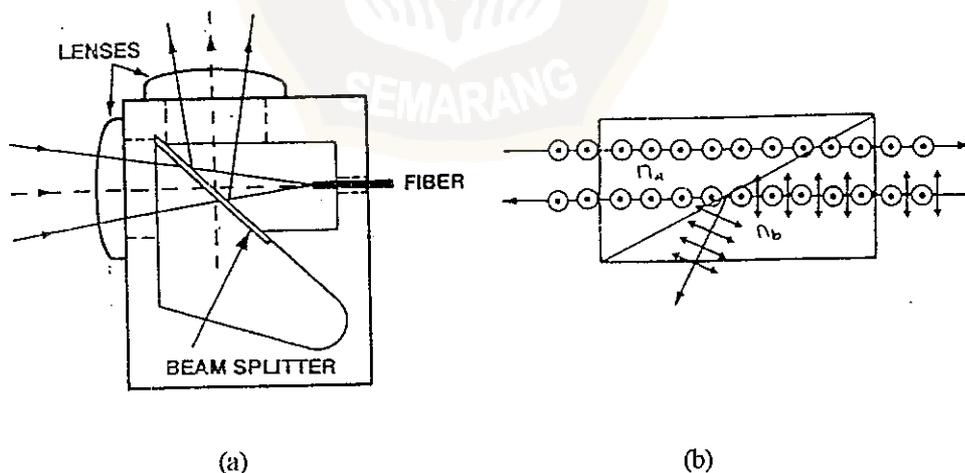
Gambar 2-19. Skema rangkaian pengukuran redaman dengan metode hamburan balik

(CSELT, 1990)

a. *Beam splitter*

Yaitu peralatan yang memiliki variasi indeks bias antarsisi permukaannya dan bekerja berdasarkan prinsip pembiasan dan pemantulan cahaya. Dalam penggunaan peralatan ini, posisi sumber cahaya, *beam splitter*, serat optik dan detektor cahaya diatur sedemikian rupa sehingga berkas cahaya yang dihasilkan sumber cahaya ada yang dibiaskan oleh *beam splitter* menuju pangkal serat optik, dan ada juga yang dipantulkan menuju detektor cahaya, serta berkas cahaya hamburan dari serat optik dipantulkan seluruhnya menuju detektor cahaya.

Lensa yang terdapat dalam peralatan ini terdiri atas lensa cembung dan lensa cekung. Lensa cembung digunakan untuk mengumpulkan (*converge*) berkas cahaya dari sumber cahaya untuk difokuskan ke pangkal serat optik, sedangkan lensa cekung digunakan untuk menyebarkan (*diverge*) berkas cahaya terhamburbalikkan dari pangkal serat optik menuju detektor cahaya. Peralatan *beam splitter* ini digambarkan di Gambar 2-20(a).



Gambar 2-20. Beberapa jenis peralatan pengarah gelombang: (a). *beam splitter*; (b). *polarizing beam splitter* (CSELT, 1990).

b. *Polarizing beam splitter*

Yaitu peralatan yang dapat menimbulkan cahaya terpolarisasi linier, berupa prisma yang tersusun dari 2 bagian yang memiliki indeks bias yang berbeda, n_a dan n_b dengan $n_a < n_b$, seperti yang terlihat dalam Gambar 2-20(b). Jika alat ini dikenai cahaya dari luar yang berarah getar tegak lurus dengan halaman kertas (atau sejajar dengan bidang batas medium), yang ditandai dengan bulatan, kemudian cahaya tersebut merambat dalam bagian prisma yang berindek bias n_a , dan terus merambat sehingga mengenai bidang batas medium, maka cahaya tersebut cenderung untuk diteruskan melintasi medium yang berindek bias n_b dan keluar dari prisma sebagai cahaya yang terpolarisasi linier seluruhnya dengan arah getar tegak lurus dengan halaman kertas. Jika alat ini dikenai cahaya dari luar di daerah prisma yang berindek bias n_b dan cahaya tersebut mengandung komponen gelombang yang bergetar dalam arah tegak lurus dan sejajar halaman kertas (atau tegak lurus dengan bidang batas) yang ditandai dengan garis-garis pendek sejajar, kemudian cahaya tersebut mengenai bidang batas medium, maka komponen gelombang yang sejajar dengan bidang batas medium, akan diteruskan menuju medium berindek bias n_a . Sedangkan komponen gelombang yang bergetar tegak lurus bidang batas akan dipantulkan oleh bidang batas medium. Hal ini terjadi jika sudut datang* cahaya di bidang batas medium sama dengan sudut polarisasi ϕ_p , yang besarnya $\phi_p = \arctan \frac{n_a}{n_b}$. Dalam kondisi ini hanya cahaya datang yang bergetar tegak lurus dengan bidang batas yang dipantulkan dengan sudut pantul sama dengan ϕ_p . Pada cahaya yang bersudut datang berbeda dengan sudut

polarisasi, beberapa komponen gelombang yang sejajar bidang batas akan terpantul. Sehingga, kecuali pada sudut polarisasi, cahaya pantulan tidak seluruhnya terpolarisasi linier (Sears, 1987).

Setelah dipantulkan peralatan pengarah gelombang (*directional coupler*), cahaya terhambur-balikkan mengenai detektor cahaya untuk kemudian diubah menjadi arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan, yang merupakan hasil *konversi* dari sejumlah foton yang mengenai detektor cahaya, diteruskan menuju prosesor sinyal (*signal processor*) yang berfungsi untuk mengolah informasi yang dikandung arus listrik yang dihasilkan oleh detektor cahaya. Pengolahan-pengolahan tersebut adalah penyusunan dan analisis gelombang yang dihasilkan dan perhitungan terhadap parameter-parameter pengukuran. Hasil pengolahan prosesor sinyal ditampilkan dalam bentuk gelombang atau grafik dan *event table*.

