

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Deskripsi Teori

1. Indeks Bias

Ketika seberkas cahaya mengenai permukaan suatu benda, maka cahaya tersebut ada yang dipantulkan dan ada yang diteruskan. Jika benda tersebut transparan seperti kaca atau air, maka sebagian cahaya yang diteruskan terlihat dibelokkan, dikenal dengan pembiasan. Cahaya yang melalui batas antar dua medium dengan kerapatan optik yang berbeda, kecepatannya akan berubah. Perubahan kecepatan cahaya akan menyebabkan cahaya mengalami pembiasan.

Perambatan cahaya dalam ruang hampa udara memiliki kelajuan c , kemudian setelah memasuki medium tertentu akan berubah kelajuannya menjadi v dengan $v \ll c$. Ketika cahaya merambat di dalam suatu bahan, kelajuannya akan turun sebesar suatu faktor yang ditentukan oleh karakteristik bahan yang dinamakan indeks bias (n). Indeks bias merupakan perbandingan (rasio) antara kelajuan cahaya di ruang hampa terhadap kelajuan cahaya di dalam bahan seperti dinyatakan oleh:

$$n = \frac{c}{v} \tag{1}$$

dengan, n = indeks bias

c = kelajuan cahaya di ruang hampa (m/s)

v = kelajuan cahaya di dalam bahan (m/s)

a. Indeks Bias Zat Cair

Suatu sinar melewati dua medium yang berbeda, akan terjadi pembiasan. Jika sinar dilewatkan dari udara melewati zat cair, maka sinar di dalam zat cair itu akan dibelokkan. Seperti pada Gambar 1, sinar datang dengan arah tidak tegak lurus sisi kotak yang berisi zat cair. Ketika memasuki zat cair arah sinar dibelokkan, dan ketika keluar dari zat cair pada sisi lainnya arah sinar dibelokkan kembali.

Peristiwa pembiasan pada bidang batas antara dua medium memenuhi hukum Snellius

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (2)$$

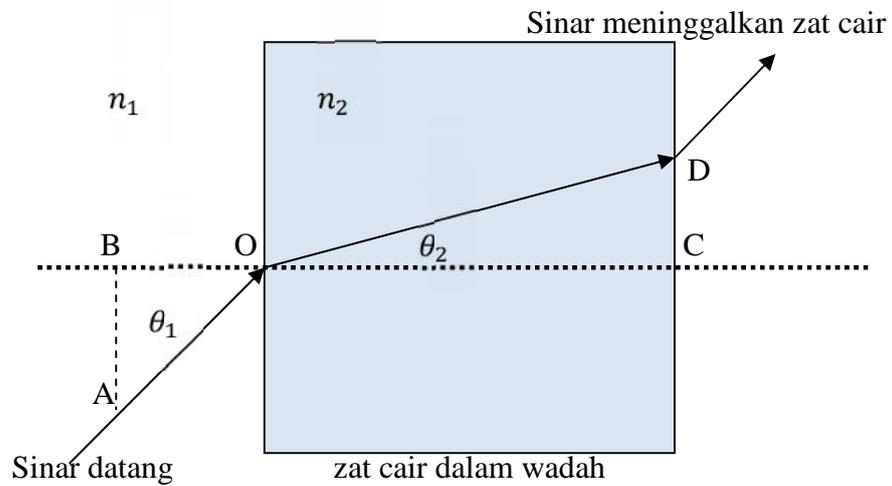
dengan,

n_1 = indeks bias medium tempat cahaya datang

θ_1 = sudut datang

n_2 = indeks bias medium tempat cahaya bias

θ_2 = sudut bias



Gambar 1. Sketsa lintasan sinar datang dan sinar bias

- Titik O adalah titik tempat sinar datang mengenai kotak
- Titik D adalah titik tempat sinar meninggalkan kotak
- Garis BOC adalah garis yang tegak lurus kotak dan melalui titik B
- Garis BA tegak lurus garis BOC

Berdasarkan Gambar 1, tidak perlu mengukur sudut secara langsung. Nilai sinus sudut datang dan sudut bias dapat dihitung berdasarkan pengukuran lokasi jatuhnya sinar datang dan sinar bias. Berdasarkan gambar tersebut didapatkan

$$\sin\theta_1 = \frac{AB}{OA}$$

$$\sin\theta_2 = \frac{CD}{OD} \quad (3)$$

Dengan mengambil indeks bias udara $n_1 = 1$ dan indeks bias zat cair $n_2 = n$ maka indeks bias zat cair dapat ditentukan dari rumus

$$n = \frac{AB \times OD}{CD \times OA} \quad (4)$$

Tabel 1. Nilai indeks bias zat cair (untuk $\lambda = 589 \text{ nm}$)

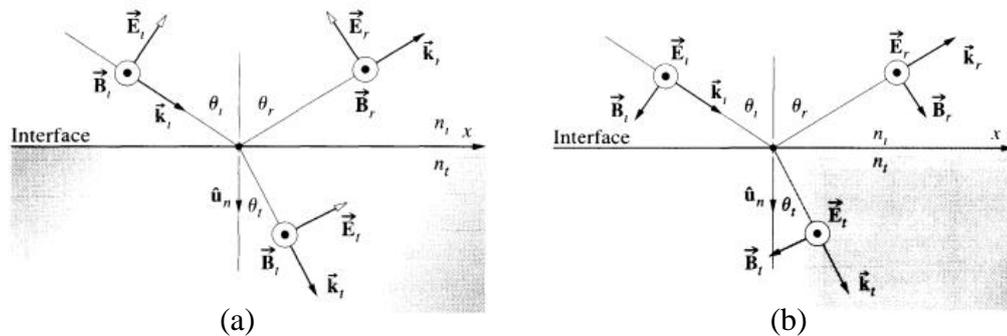
No	Zat Cair	Indeks Bias
1	Air	1,33
2	Gliserin	1,47
3	Etil Alkohol	1,36
4	Bensin	1,50
5	Minyak Goreng	1,47
6	Larutan Gula 30%	1,37
7	Larutan Gula 50%	1,42

Sumber: (Tipler, 1991: 451)

2. Persamaan Fresnel

Persamaan Fresnel adalah deduksi matematis oleh Augustin Jean Fresnel terhadap hasil pengamatan perilaku gelombang cahaya ketika merambat melalui medium yang mempunyai indeks bias berbeda. Persamaan Fresnel berlaku hanya pada indeks bias yang bernilai real, yaitu pada medium yang tidak menyerap cahaya. Persamaan ini juga hanya berlaku pada medium yang bersifat non magnetik dengan asumsi tidak terjadi interferensi. Saat gelombang cahaya merambat dari medium dengan indeks bias n_1 ke medium dengan indeks bias n_2 ,

Fresnel berpendapat bahwa gelombang cahaya mengalami refleksi dan refraksi bersamaan.



Gambar 2. Gelombang cahaya (a) sejajar bidang gambar (b) tegak lurus bidang gambar (Hecht, 2002: 113 & 114)

Jika gelombang cahaya tegak lurus dengan bidang gambar, maka koefisien refleksi r dan koefisien transmisi t diberikan oleh persamaan:

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (5)$$

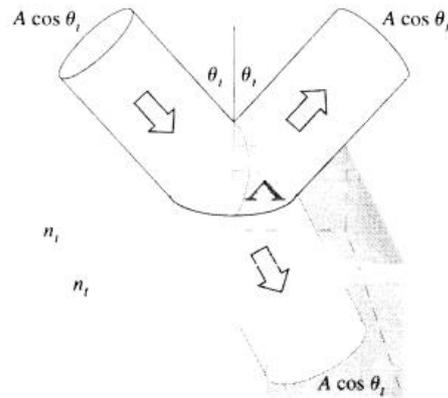
$$t_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t}$$

Sedangkan jika gelombang cahaya sejajar dengan bidang gambar, maka persamaan koefisien refleksi dan koefisien transmisi adalah sebagai berikut:

$$r_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (6)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}$$

Intensitas gelombang cahaya yang mengalami refleksi ditentukan oleh reflektansi R dan gelombang cahaya yang mengalami refraksi ditentukan oleh transmitansi T .



Gambar 3. Reflektansi dan transmitansi (Hecht, 2002: 119)

Reflektansi merupakan rasio antara daya pemantulan dengan daya yang datang, sedangkan transmitansi adalah perbandingan antara daya yang diteruskan dengan daya yang datang.

$$R \equiv \frac{I_r A \cos \theta_r}{I_i A \cos \theta_i} = \frac{I_r}{I_i} \quad (7)$$

$$T \equiv \frac{I_t A \cos \theta_t}{I_i A \cos \theta_i}$$

Jika sinar datang mendekati garis normal ($\theta_i \approx 0$), maka reflektansi R dan transmitansi T dapat dihitung dengan persamaan:

$$R = R_{\parallel} = R_{\perp} = \left(\frac{n_t - n_i}{n_t + n_i} \right)^2 \quad (8)$$

$$T = T_{\parallel} = T_{\perp} = 1 - R = \frac{4n_t n_i}{(n_t + n_i)^2}$$

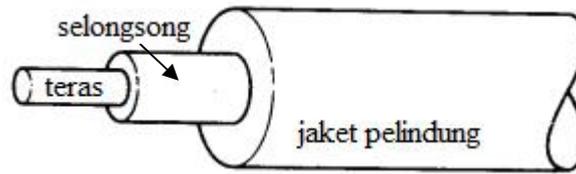
Ketika gelombang cahaya merambat ke medium yang lebih renggang $n_1 > n_2$ dengan sudut datang yang lebih besar dari sudut kritis, semua gelombang cahaya mengalami refleksi dan $R_{\parallel} = R_{\perp} = 1$. Fenomena ini disebut *total internal reflection*.

3. Serat Optik

Serat optik merupakan saluran transmisi atau sejenis kabel yang terbuat dari kaca atau plastik yang sangat halus dan dapat digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. Sumber cahaya yang digunakan biasanya adalah laser atau LED. Kecepatan transmisi serat optik sangat tinggi sehingga sangat bagus digunakan sebagai saluran komunikasi. Pada prinsipnya serat optik memantulkan dan membiaskan sejumlah cahaya yang merambat di dalamnya.

Serat optik terdiri dari dua jenis yaitu serat optik kaca dan serat optik plastik. Serat optik kaca banyak digunakan untuk transmisi jarak jauh, sementara serat optik plastik hanya digunakan untuk komunikasi jarak pendek. Serat optik plastik tidak jauh berbeda dengan serat optik kaca, hanya saja serat optik plastik tidak dilengkapi dengan *kevlar* seperti serat optik kaca. Serat optik plastik adalah jenis serat optik yang terbuat dari jenis plastik tertentu dengan indeks bias tertentu. Serat optik plastik kurang banyak digunakan sebagai media transmisi jarak jauh karena memiliki atenuasi besar. Serat optik plastik banyak dikembangkan sebagai sensor karena mudah diubah-ubah dan diberi perlakuan, sedangkan serat optik kaca terlalu rapuh dan ukurannya kecil, sehingga sulit untuk diberi perlakuan.

a. Struktur Serat Optik



Gambar 4. Struktur serat optik plastik (Gerd Keiser, 1991: 26)

Secara umum, serat optik terdiri dari teras (*inti/core*) dan selongsong (*cladding*). Teras adalah inti serat optik yang berfungsi sebagai pipa cahaya. Cahaya merambat dalam teras dari ujung ke ujung dengan bantuan proses pemantulan yang terjadi pada dinding batas atau batas permukaan teras dengan selongsong (*core* dengan *cladding*). Ukuran *core* mempengaruhi karakteristik dari serat optik.

Selongsong (*cladding*) berfungsi sebagai cermin yaitu memantulkan cahaya agar dapat merambat ke ujung lainnya. Dengan adanya selongsong ini cahaya dapat merambat dalam teras serat optik. Selongsong mempunyai indeks bias yang lebih kecil dari teras. Hubungan indeks bias antara *core* dan *cladding* akan mempengaruhi perambatan cahaya pada *core* (mempengaruhi besarnya sudut kritis). *Cladding* didesain sedemikian rupa sehingga indeks biasnya lebih kecil dari *core*. Hal ini dirancang untuk memudahkan terjadinya “*total internal reflection*” dalam perambatannya dari ujung ke ujung serat optik.

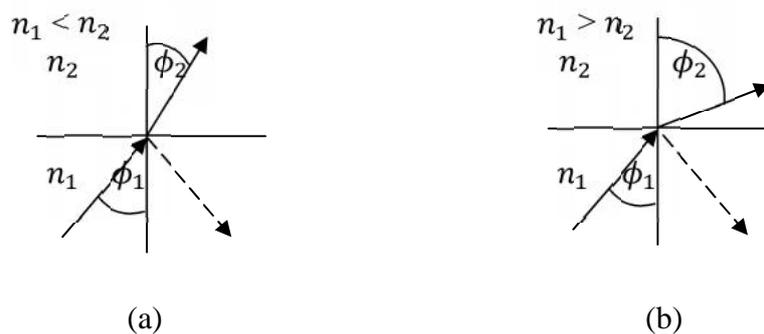
Jaket pelindung adalah pelindung lapisan teras dan selongsong. Serat optik diberi jaket pelindung yang kegunaannya untuk menghindari terjadinya kerusakan yang disebabkan oleh pengaruh luar baik pada saat penggunaan atau akibat

pengaruh lain, bagian ini terlibat dalam memandu cahaya (Ahmad Mulia Rambe, 2003: 4).

b. Prinsip Dasar Serat Optik

Serat optik berfungsi untuk membawa cahaya dari satu tempat ke tempat lain. Serat optik didasarkan pada prinsip pembiasan. Prinsip ini menentukan perilaku cahaya ketika melewati satu medium transparan ke medium lain, dan diuraikan dalam hukum Snellius.

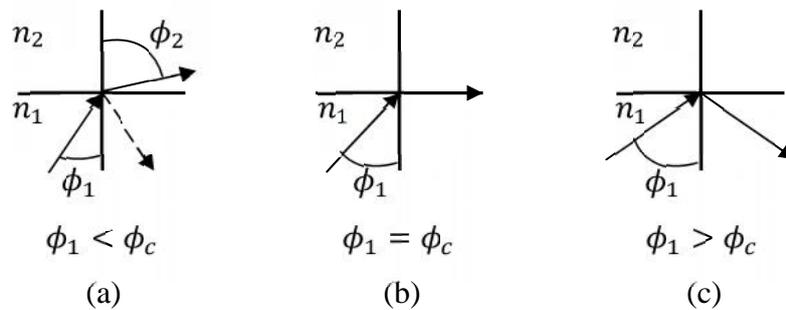
Ketika cahaya melewati dua medium yang berbeda kerapatan optiknya, arah perambatan cahaya pada medium kedua akan dibelokkan. Jika n_1 dan n_2 adalah indeks bias dari medium pertama dan kedua, akan ada dua situasi yang terjadi. Jika medium pertama lebih renggang kerapatan optiknya dibanding medium kedua ($n_1 < n_2$), maka sinar dibiaskan mendekati garis normal seperti Gambar 5(a). Pada sisi lain, ketika sinar menuju medium yang kurang rapat (untuk $n_1 > n_2$), akan menjauhi normal.



Gambar 5. Pembiasan cahaya

- (a) Sinar dari cahaya melewati medium yang kurang rapat menuju medium yang lebih rapat
- (b) Sinar dari cahaya melewati medium yang lebih rapat menuju medium yang kurang rapat

Jika sinar datang dari medium n_1 lebih rapat menuju medium n_2 kurang rapat, maka akan menghasilkan tiga bentukan sinar yang diteruskan seperti gambar berikut.



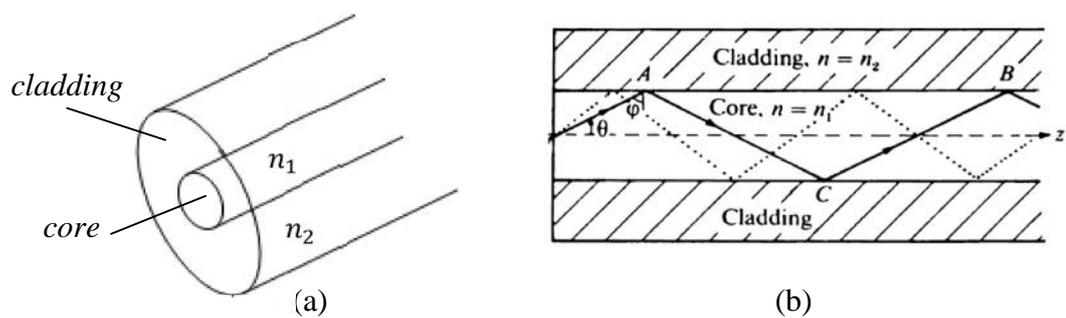
Gambar 6. Sinar datang dari medium lebih rapat menuju medium kurang rapat

- (a) Sudut datang lebih kecil dari sudut kritis, maka sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal
- (b) Sinar datang sama dengan sudut kritis, maka sinar akan dibiaskan sejajar bidang batas
- (c) Sinar datang lebih besar dari sudut kritis, maka sinar akan dipantulkan sempurna

Pada Gambar 6 dapat dilihat adanya dua medium dengan indeks bias n_1 dan n_2 dimana $n_1 > n_2$ (indeks bias medium pertama lebih besar dari indeks bias medium kedua). Sinar datang dari medium pertama berindeks bias n_1 menuju medium kedua dengan indeks bias n_2 . Sebagian sinar yang mengenai bidang batas akan mengalami pemantulan dan sebagian yang lain mengalami pembiasan. Sinar datang dipantulkan dengan sudut yang sama besar dengan sudut sinar datang dan sinar bias dibiaskan dengan sudut ϕ_2 . Pemantulan internal sudut kritis terjadi ketika sinar bias sejajar dengan bidang batas medium ($\phi_2 = 90^\circ$), maka sudut ϕ_1 tersebut dinamakan sudut kritis (ϕ_c). Pernyataan tersebut dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

Sudut kritis diberi nama demikian karena sudut ini memang berperan sangat penting (kritis) di dalam prinsip kerja serat optik. Jika cahaya merambat dengan sudut datang yang kurang dari sudut kritis, maka cahaya akan dibiarkan keluar dari bahan pertama. Akan tetapi, jika cahaya merambat menuju bidang perbatasan dengan sudut datang yang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya tersebut akan dipantulkan kembali (oleh bidang perbatasan) ke dalam bahan pertama. Dalam kasus ini, bidang perbatasan berperan sebagai sebuah bidang pantul “cermin”.



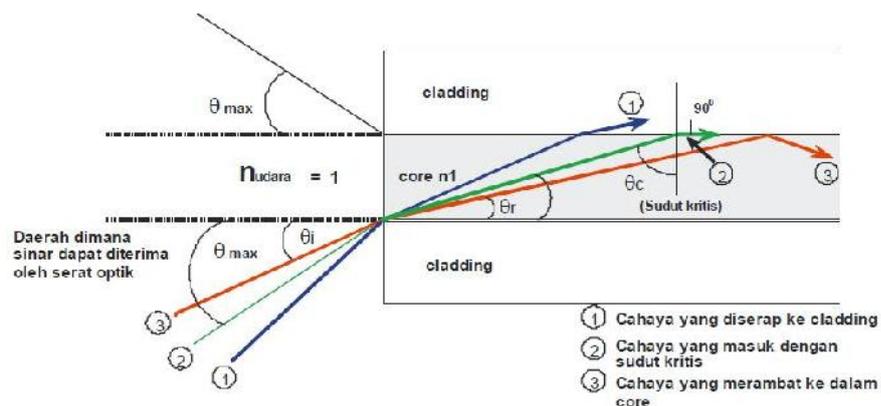
Gambar 7. (a) Serat optik dengan indeks bias selongsong kurang rapat dan teras lebih rapat ($n_2 < n_1$); (b) Perambatan cahaya pada serat optik (pemantulan internal total); (Ajoy Ghatak & K. Thyagarajan, 1989: 366)

Pada serat optik, teras mempunyai indeks bias n_1 yang lebih besar dari indeks bias selongsong n_2 . Gambar 7(a) mengilustrasikan serat optik dengan $n_2 < n_1$ dan Gambar 7(b) menunjukkan perambatan cahaya pada serat optik. Untuk sinar yang masuk ke serat optik, jika sudut datang (antara permukaan *core* dan *cladding*) lebih besar dari sudut kritis, maka sinar akan mengalami *total internal reflection*. Karena peristiwa *total internal reflection* ini, berkas cahaya dapat terus merambat sepanjang serat optik. Dengan begitu serat optik bertindak sebagai

“pemandu cahaya” dan itulah mengapa diketahui sebagai *optical waveguide* atau pembimbing gelombang cahaya (Anuradha De, 2005: 23).

c. Numerical Aperture

Sinar cahaya yang masuk ke dalam inti serat optik membentuk sudut datang tertentu terhadap poros serat optik. Sudut yang menuju ke arah permukaan serat optik (indeks bias udara = 1), tidak semua akan diteruskan. Tetapi ada syarat tertentu agar sinar yang datang tersebut dapat diteruskan. Gambar 8. menunjukkan adanya sudut sinar diterima oleh serat optik yang disebut sebagai *Numerical Aperture*.



Gambar 8. Sudut sinar dapat diterima oleh serat optik (Harsono, 2010: 16)

Sinar tidak dapat diterima jika melebihi wilayah θ_{max} . Karena sinar yang masuk memiliki sudut datang lebih besar dari θ_{max} sehingga sinar tersebut masuk namun tidak dapat berlanjut dan keluar. Sedangkan semua sinar yang berada di wilayah θ_{max} dapat masuk ke dalam serat optik dengan batas kritis sejauh θ_{max} .

Sudut kritis (θ_c) sinar yang melalui bagian teras terhadap selongsong dinyatakan dengan:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (10)$$

Selanjutnya persamaan sinar masuk dari udara menuju ke serat optik sesuai dengan hukum Snellius:

$$n \sin \theta_{max} = n_1 \sin \theta_r, \quad (11)$$

n adalah indeks bias udara = 1, n_1 adalah indeks bias teras, n_2 adalah indeks bias selongsong.

$$\begin{aligned} \sin \theta_{max} &= n_1 \sin \theta_r = n_1 (1 - \sin^2 \theta_c)^{\frac{1}{2}} \\ &= n_1 \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = n_1 \left(\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \right)^{\frac{1}{2}} = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (12)$$

$\sin \theta_{max}$ pada serat optik disebut celah numeris atau *numerical aperture (NA)*, maka $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$.

Perbedaan indeks bias teras dengan selongsong ($n_{teras} - n_{selongsong}$) = $(\Delta n) = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. Sehingga $n_1 \Delta n \approx n_1 - n_2$, maka $n_2 = n_1(1 - \Delta n)$

$$\begin{aligned} NA &= \{n_1^2 - [n_1(1 - \Delta n)]^2\}^{\frac{1}{2}} = (n_1^2 - n_1^2 + n_1^2 2\Delta n - n_1^2 \Delta n^2)^{\frac{1}{2}} \\ &= (n_1^2 2\Delta n - n_1^2 \Delta n^2)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (13)$$

Karena $\Delta n \ll 1$, sehingga nilai Δn^2 semakin kecil, maka dapat diabaikan, sehingga:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta n} \quad (14)$$

Dengan Δn merupakan perbedaan indeks bias refraksi relatif yang dipengaruhi oleh jenis serat optik. Nilai *numerical aperture* adalah suatu ukuran kemampuan serat optik untuk menangkap sinar yang berasal dari sumber optik.

Semakin besar nilai NA menandai semakin tinggi efisiensi dari suatu sumber optik dalam memasukkan sinar-sinar ke dalam serat optik.

Tabel 2. Nilai indeks bias dan tingkat Numeris atau NA

Tipe Serat Optik	n_1	n_2	NA
Kaca	1,48	1,46	0,24
Plastik	1,49	1,41	0,48

Sumber: (Anuradha De, 2005: 34)

4. Rugi – rugi Daya pada Serat Optik

Energi atau daya yang dibawa oleh cahaya akan mengalami pelemahan (rugi-rugi/*loss*) akibat terjadinya kebocoran atau karena kurangnya kejernihan bahan serat optik. Besaran pelemahan energi sinyal informasi dari serat optik yang biasa dinyatakan perbandingan antara daya pancaran awal terhadap daya yang diterima dinyatakan dalam *deci-Bell* (dB) disebabkan oleh 3 faktor utama yaitu absorpsi, hamburan (*scattering*) dan lekukan (*bending losses*). Gelas yang merupakan bahan pembuat serat optik biasanya terbentuk dari *silicon-dioksida* (SiO_2). Variasi indeks bias diperoleh dengan menambahkan bahan lain seperti *oksida titanium, thallium, germanium* atau *boron*. Dengan susunan bahan yang tepat maka akan didapatkan atenuasi yang kecil. Atenuasi adalah pelemahan energi sehingga amplitudo gelombang yang sampai pada penerima menjadi lebih kecil dari pada amplitudo yang dikirimkan oleh pemancar.

Beberapa hal yang menyebabkan terjadinya atenuasi dalam serat optik adalah absorpsi, pancaran Rayleigh, pemantulan Fresnel, dan rugi-rugi karena pembengkokan. Penjabaran dari masing-masing adalah sebagai berikut:

a. Absorpsi

Zat pengotor (*impurity*) apapun yang masih tersisa di dalam bahan inti akan menyerap sebagian dari energi cahaya yang merambat di dalam serat optik. Zat yang menimbulkan efek paling serius adalah ion-ion hidroksil (OH) dan zat-zat logam. Ion-ion hidroksil yang merupakan wujud lain dari air akan menyerap energi gelombang dengan panjang gelombang 1380 nm, sedangkan zat-zat logam akan menyerap energi gelombang dengan berbagai nilai panjang gelombang tertentu.

b. Hamburan Rayleigh

Hamburan Rayleigh (*Rayleigh scatter*) adalah efek terpecahnya cahaya akibat terjadinya perubahan kecil yang bersifat lokal pada indeks bias bahan inti dan selongsong. Dikatakan bersifat lokal karena perubahan hanya terjadi di lokasi-lokasi tertentu saja di dalam bahan, dan ukuran daerah yang terkena pengaruh perubahan ini sangat kecil, yaitu kurang dari satu panjang gelombang cahaya.

Terdapat dua hal yang menyebabkan terjadinya fenomena ini, dan keduanya timbul di dalam proses manufaktur. Sebab pertama adalah terdapatnya ketidakmerataan di dalam adonan bahan-bahan pembuat serat optik. Ketidakteraturan dalam jumlah yang sangat kecil dan bersifat acak mustahil untuk sepenuhnya dihilangkan. Penyebab kedua adalah pergeseran-

pergeseran kecil pada kerapatan bahan yang biasanya terjadi saat kaca silika mulai membeku menjadi padat.

c. Pemantulan Fresnel

Ketika sinar cahaya menumbuk sebuah bintik perubahan indeks bias dan terpecah ke segala arah, komponen pemantulan yang merambat dengan sudut datang mendekati garis normal (90°) akan lewat begitu saja menembus bidang perbatasan. Akan tetapi tidak semua bagian dari cahaya yang datang dengan sudut mendekati garis normal akan menembus bidang perbatasan. Sebagian kecil dari cahaya itu akan terpantul balik di bidang perbatasan.

Efek ini dapat menjadi masalah bagi cahaya yang meninggalkan ujung output serat optik. Di titik ini, terjadi perubahan seketika dari indeks bias inti ke indeks bias yang ada di luar serat optik. Efek yang sama juga terjadi pada arah yang berlawanan. Sebagian kecil dari cahaya yang datang dan hendak memasuki serat optik terpantul balik oleh bidang perbatasan udara-inti (John Crisp, 2005: 53-54).

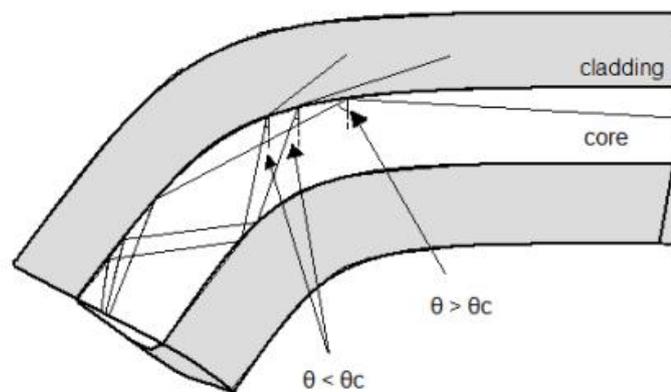
d. Rugi-rugi Pembengkokan

Bending yaitu pembengkokan serat optik yang menyebabkan cahaya yang merambat pada serat optik berbelok dari arah transmisi dan hilang. Sebagai contoh, pada serat optik yang mendapat tekanan cukup keras dapat menyebabkan ukuran diameter serat optik menjadi berbeda dari diameter semula, sehingga mempengaruhi sifat transmisi cahaya di dalamnya.

Rugi-rugi akibat pelengkungan serat optik dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1) *Macro bending*/pembengkokan makro

Rugi-rugi *macro bending* terjadi ketika sinar atau cahaya melalui serat optik yang dilengkungkan dengan jari-jari lebih lebar dibandingkan dengan diameter serat optik, sehingga menyebabkan rugi-rugi seperti pada Gambar 9.

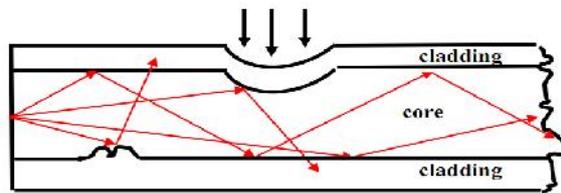


Gambar 9. Pembengkokan sinar di dalam inti serat optik dengan variasi sudut datang (Andre, 2006)

Berdasarkan prinsip pemantulan dan pembiasan cahaya, jika sudut datang lebih kecil dari sudut kritis, maka mode cahaya tidak dipantulkan secara sempurna melainkan lebih banyak dibiaskan keluar dari inti serat optik. Sedangkan untuk sinar yang membentuk sudut datang lebih besar dari sudut kritis, sebagian besar mode cahaya akan dipantulkan kembali masuk ke dalam selubung seperti halnya prinsip pemantulan total. Kondisi ini mengakibatkan perubahan mode. Jumlah radiasi optik dari lengkungan serat tergantung kekuatan medan dan kelengkungan jari-jari.

2) *Micro bending*/pembengkokan mikro

Pembengkokan mikro terjadi karena ketidakrataan pada permukaan batas antara teras dan selongsong secara acak atau *random* pada serat optik karena proses pengkabelan ataupun ketika proses penarikan saat instalasi seperti terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Peristiwa rugi-rugi akibat pembengkokan mikro

5. Prinsip dan Tipe Sensor Optik

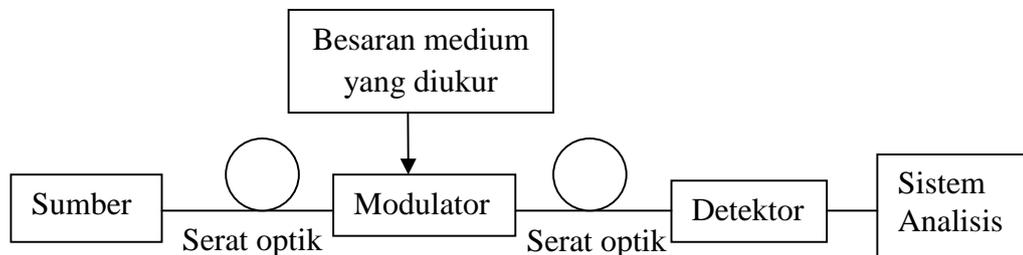
Sensor serat optik adalah jenis sensor optik yang menggunakan serat optik dalam mekanisme penginderaan atau pendeteksian, baik sebagai komponen aktif sensor maupun sekedar sebagai pemandu gelombang (optik) saja. Sistem sensor optik dilengkapi dengan paling tidak tiga komponen utama, yaitu komponen optoelektronik, *link* optik dan *probe*. Komponen optoelektronika meliputi sumber cahaya, detektor optik dan pengolah sinyal. *Link* optik berupa gelombang serat optik yang berfungsi memandu cahaya ke atau dari bagian penginderaan (*sensing region*). Sedangkan *probe* adalah bagian *sensing* atau *transducing*, baik pada bagian dalam maupun luar serat optik, yang bertindak sebagai transduser dan berinteraksi langsung dengan obyek atau besaran yang diukur.

Sensor serat optik didasarkan pada mekanisme modulasi gelombang optik (cahaya) dari suatu sumber seperti LED, diode laser, atau yang lainnya. Kuantitas

optik yang dimodulasi dapat berupa intensitas atau amplitudo, panjang gelombang, fase gelombang dan polarisasi gelombang optik tersebut. Modulasi ini dapat terjadi di luar maupun di dalam serat optik (Akhiruddin Maddu, 2007: 38).

Konfigurasi sistem serat optik digambarkan dengan skema pada Gambar 11. Sumber cahaya dilewatkan melalui salah satu ujung serat optik menuju daerah modulasi cahaya, modulator atau transduser, selanjutnya diteruskan ke ujung lain serat optik dimana terdapat detektor cahaya, atau dapat juga setelah termodulasi, cahaya tersebut dikembalikan melalui serat optik yang sama menuju detektor. Cahaya tersebut dimodulasi oleh besaran-besaran medium yang diukur (*measurand*), yaitu besaran kimia, biologi atau fisika, sebagai besaran (parameter) yang akan dideteksi. Besaran-besaran kimia yang dapat dideteksi seperti pH, konsentrasi larutan atau jenis ion maupun konsentrasi gas atau uap kimia. Besaran-besaran biologi seperti jenis dan populasi bakteri atau mikroorganisme lainnya ataupun komponen – komponen biokimia seperti glukosa hingga DNA. Sedangkan besaran-besaran fisika yang dapat dideteksi meliputi suhu, tekanan, strain, perpindahan, percepatan, arus listrik dan sebagainya.

Berdasarkan disertasi Akhiruddin Maddu (2007: 39) tentang sensor serat optik, skema sistem sensor serat optik dapat digambarkan sebagai berikut:

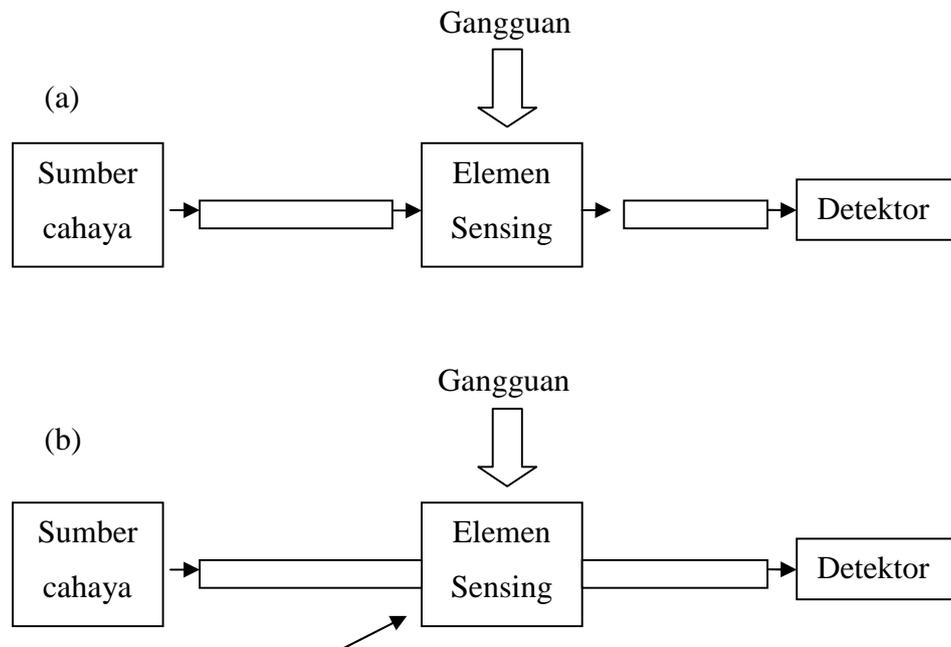


Gambar 11. Skema sistem sensor serat optik (Akhiruddin Maddu, 2007: 39)

Modulasi dalam sensor serat optik dapat dirancang dengan konfigurasi yang berbeda, bergantung pada besaran optik yang dimodulasi (intensitas, panjang gelombang, fasa atau polarisasi gelombang). Misalnya, untuk sensor serat optik berdasarkan modulasi fasa dapat dilakukan dengan konfigurasi interferometrik, sedangkan untuk modulasi panjang gelombang dapat dilakukan melalui pelapisan material sensitif di ujung serat optik. Modulasi intensitas yang paling banyak dikembangkan dapat dilakukan melalui mekanisme *cladding*. Sensor serat optik termodulasi intensitas dengan mengukur intensitas transmisi atau absorpsi yang terjadi baik di luar maupun di dalam serat optik, sedangkan sensor serat optik termodulasi panjang gelombang atau fasa didasarkan pada pergeseran fasa gelombang optik di dalam atau di luar serat optik ketika mendapat gangguan dari luar (Akhiruddin Maddu, 2007: 39-40).

Berdasarkan lokasi proses modulasi, di luar atau di dalam bagian serat optik, sensor serat optik diklasifikasikan menjadi sensor ekstrinsik dan intrinsik. Konfigurasi kedua tipe sensor serat optik ditunjukkan pada Gambar 12, masing-masing dilengkapi dengan komponen – komponen optik dan elektrik yaitu sumber

cahaya, serat optik detektor cahaya dan piranti pengolah sinyal serta elemen pengindera (*sensing element*).



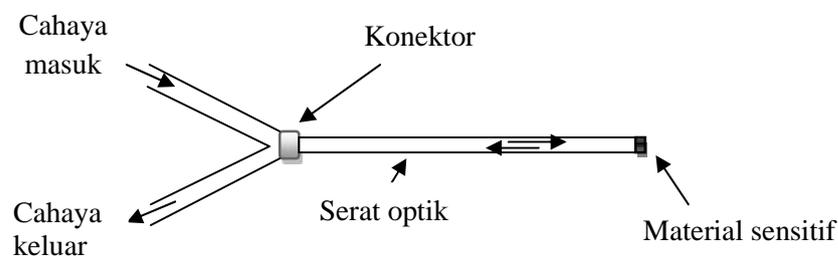
Bagian termodifikasi (modifikasi *cladding*, kisi Bragg, micro-bends, dsb)

Gambar 12. Skema sensor serat optik (a) ekstrinsik dan (b) intrinsik
(Akhirudin Maddu, 2007: 40)

a. Sensor Serat Optik Ekstrinsik

Pada tipe sensor serat optik ekstrinsik, serat optik hanya berfungsi sebagai pandu gelombang saja atau penghubung (*link*) cahaya ke sistem sensing eksternal, dengan demikian tidak ada modifikasi pada struktur serat optik untuk fungsi sensing (penginderaan). Proses sensing terjadi di luar serat optik, seperti pada Gambar 12(a), jadi bagian penginderaan (*sensing element*) berada di luar serat optik. Dalam proses sensing, cahaya sempat keluar dari serat optik kemudian termodulasi oleh besaran yang diukur pada bagian penginderaan yang selanjutnya diteruskan menuju detektor cahaya, tahap akhir adalah dimodulasi untuk mendapatkan informasi kuantitas yang diukur.

Contoh sensor serat optik ekstrinsik adalah optode, dimana lapisan sensing (*sensing coating*) berada di luar serat optik, seperti ditunjukkan Gambar 13. Pada konfigurasi ini digunakan serat optik bifurkasi, salah satu lengan serat bifurkasi menjadi jalan masuk cahaya dan lengan lainnya merupakan jalan keluar cahaya menuju detektor setelah berinteraksi dengan bagian sensing berupa lapisan material sensitif. Mekanisme sensing didasarkan atas perubahan sifat serat optik material sensitif pada ujung serat saat berinteraksi dengan besaran atau obyek yang dideteksi yang menyebabkan cahaya yang dikirim akan berubah intensitas, panjang gelombang, fasa atau polarisasi, atau juga dapat dibangkitkan emisi fluoresens. Perubahan intensitas, panjang gelombang, fasa atau polarisasi atau intensitas fluoresens merupakan ukuran kuantitas eksternal yang mempengaruhinya, yaitu kuantitas yang diukur atau dideteksi.



Gambar 13. Skema sensor ekstrinsik optode (Akhiruddin Maddu, 2007: 42)

Konfigurasi sensor serat optik ekstrinsik dapat juga dengan menggunakan dua serat optik terpisah, salah satunya sebagai serat transmisi dan yang lainnya sebagai serat penerima, sementara material sensitifnya diletakkan diantara dua ujung serat optik yang saling berhadapan (Gambar 12.a). Dengan demikian, serat optik hanya bertindak sebagai pipa cahaya yang menyalurkan cahaya ke atau dari bagian sensing di luar serat optik. Konfigurasi ini dapat juga direalisasikan dengan

memanfaatkan prinsip interferometer Fabry-Perot, membentuk sistem sensor serat optik interferometer Fabry-Perot.

b. Sensor Serat Optik Intrinsik

Pada sensor serat optik intrinsik, serat optik disamping sebagai pemandu cahaya juga sekaligus berperan dalam proses penginderaan, dimana terdapat bagian serat optik yang berfungsi sebagai komponen pengindra (*sensing element*), baik *cladding* atau intinya, seperti ditunjukkan pada Gambar 12(b). Pada sensor tipe ini cahaya tidak pernah meninggalkan serat optik dalam proses penginderaan, jadi proses modulasi terjadi di dalam serat optik, dengan demikian ada bagian serat optik berperan aktif sebagai fungsi sensing (*sensing function*).

Menurut Akhiruddin Maddu (2007: 43) ada beberapa hal yang dapat dilakukan untuk merealisasikan tipe sensor serat optik intrinsik, yaitu dengan atau tanpa memodifikasi struktur serat optik (*core* atau *cladding*). Sebagai contoh dengan memodifikasi inti serat optik membentuk kisi Bragg (*Fiber Bragg Grating*/FBG) atau memodifikasi *cladding* dengan material sensitif untuk membangkitkan fenomena optik yang diinginkan seperti medan *evanescent* atau resonansi plasmon permukaan. Sensor serat optik intrinsik juga dapat dilakukan melalui prinsip *microbending* dan *macrobending* pada serat optik, biasanya diaplikasikan sebagai sensor fisis seperti sensor strain, tekanan, dan sebagainya. Selain itu sensor intrinsik juga dapat memanfaatkan sifat aktif inti serat optik.

6. LED (*Light Emitting Diode*)

Dalam transmisi serat optik, digunakan sumber cahaya monokromatis. Sumber cahaya monokromatis yang digunakan untuk transmisi cahaya serat optik dapat menggunakan laser, diode laser, atau LED. Penggunaan laser sebagai sumber cahaya cukup rumit karena menggunakan sumber tegangan yang cukup tinggi dan pemasangannya harus hati-hati, sehingga digunakan sumber cahaya lain yang menggunakan sumber tegangan kecil dan pemasangannya mudah yaitu LED atau diode cahaya.

Dioda adalah komponen aktif bersaluran dua (dioda termionik mungkin memiliki saluran ketiga sebagai pemanas). Dioda mempunyai dua elektroda aktif dimana isyarat dapat mengalir, dan kebanyakan dioda digunakan karena karakteristik satu arah yang dimilikinya. Kesearahan yang dimiliki sebagian besar jenis dioda seringkali disebut karakteristik menyearahkan. Fungsi paling umum dari dioda adalah untuk memperbolehkan aliran arus listrik dalam suatu arah disebut kondisi panjar maju dan untuk menahan arus dari arah sebaliknya disebut kondisi panjar mundur. Saat ini dioda yang paling umum dibuat dari bahan semikonduktor seperti silikon atau germanium.

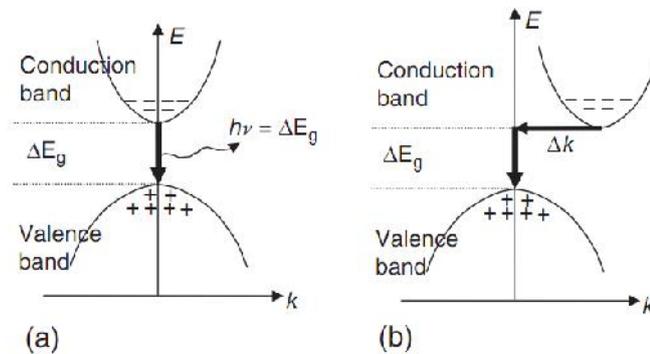
LED (*Light Emitting Diode*) atau kadang disebut juga diode cahaya adalah suatu semikonduktor yang memancarkan cahaya monokromatik yang tidak koheren ketika diberi tegangan maju. Gejala ini termasuk bentuk elektroluminesensi yang diketahui bahwa elektron yang menerjang sambungan P-N juga melepaskan energi berupa energi panas dan energi cahaya. LED dibuat agar lebih efisien jika mengeluarkan cahaya. Untuk mendapatkan emisi cahaya

pada semikonduktor, doping yang digunakan adalah galium, arsenic dan fosfor. Jenis doping yang berbeda menghasilkan warna cahaya yang berbeda pula. Warna yang dihasilkan bergantung pada bahan semikonduktor yang dipakai, dan bisa juga ultraviolet dekat atau inframerah dekat.

Semikonduktor adalah material dengan konduktivitas diantara konduktor dan isolator, susunan atom-atomnya membentuk struktur kristal. Akibat larangan Pauli, yaitu larangan adanya 2 buah elektron yang berada dalam *state* yang sama dalam waktu yang sama, sehingga elektron-elektron dari atom-atom kristal semikonduktor pada tingkat energi yang hampir sama akan membentuk tingkat-tingkat energi yang sangat berdekatan yang disebut pita energi. Pita energi yang berhubungan dengan pemancaran cahaya adalah pita energi valensi dan pita energi konduksi. Jika elektron dari pita valensi karena mendapatkan energi maka tereksitasi ke pita konduksi sehingga tempat kosong yang ditinggalkan oleh elektron tersebut disebut *hole* yang dipandang bermuatan positif. Elektron pada pita konduksi tersebut dapat turun kembali ke pita valensi mengisi *hole*, peristiwa ini disebut rekombinasi. Pada peristiwa rekombinasi akan dipancarkan cahaya bersesuaian dengan selisih kedua pita energi tersebut.

Kondisi untuk transisi tersebut adalah momentum dari elektron secara ideal harus konstan. Pada Gambar 14(a) elektron mengalami transisi secara langsung dan mudah dari level energi tinggi ke rendah dan cahaya secara mudah diradiasikan. Pada Gambar 14(b) momentum juga harus berubah, transisi elektron menjadi sulit dan probabilitas dari cahaya yang diemisikan lebih kecil. Proses

pada Gambar 14(a) dan 14(b) disebut semi-konduktor transisi langsung dan transisi tidak langsung.



Gambar 14. (a) Transisi langsung dan (b) tidak langsung dari semikonduktor (Rongqing Hui and Maurice O'Sullivan, 2009: 6)

Panjang gelombang yang dipancarkan (λ) bergantung dengan gap energi antara pita konduksi dan pita valensi :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \cong \frac{1.2398}{E_g(\text{eV})} \mu\text{m} \quad (15)$$

c adalah kecepatan cahaya, h adalah tetapan Planck dan E_g adalah gap energi antara pita konduksi dan valensi yang merupakan karakteristik dari material semikonduktor. Berbagai jenis material semi-konduktor tersedia sehingga panjang gelombang yang dihasilkan hampir memuat semua spektrum dari daerah tampak sampai dekat infra-merah. Pada LED (*Light Emitting Diode*), cahaya langsung dipancarkan, sedangkan pada diode laser lapisan tengah elemen semikonduktor dirancang sebagai zona aktif. Ujung-ujung zona aktif ini memantulkan dan memperkuat intensitas laser sebelum memancar keluar.

B. Kerangka Berfikir

Penelitian ini didasari untuk mengetahui pengaruh indeks bias terhadap perubahan intensitas keluaran pada serat optik. Sebagaimana kita ketahui bahwa serat optik selain banyak digunakan dalam sistem komunikasi juga dapat digunakan sebagai sensor besaran fisis. Sebagai contoh, sensor kelembaban, temperatur, konsentrasi dan lain sebagainya. Sebagai sumber cahaya digunakan LED yang dilewatkan pada serat optik. Prinsip kerja serat optik menggunakan prinsip pembiasan dan pemantulan yang berhubungan dengan indeks bias bahan.

Pada penelitian ini, indeks bias bahan yang digunakan adalah indeks bias zat cair. Pada bagian tengah jaket pelindung serat optik dikelupas dan dicelupkan pada berbagai jenis zat cair dengan indeks bias berbeda-beda. Serat optik mengalami pembengkokan pada bagian yang dicelupkan zat cair. Dengan adanya pembengkokan, akan ada cahaya yang keluar dari serat optik. Zat cair dengan indeks bias n_3 akan berfungsi untuk membiaskan atau memantulkan cahaya yang keluar dari serat optik. Indeks bias zat cair akan mempengaruhi intensitas cahaya keluaran karena perbedaan cahaya yang dibiaskan dan dipantulkan pada serat optik. Panjang pengelupasan jaket pelindung juga divariasikan untuk mengetahui pengaruh panjang pengelupasan jaket pelindung terhadap intensitas cahaya keluaran serat optik. Dari hasil penelitian ini diharapkan diketahui pengaruh indeks bias zat cair terhadap perubahan intensitas cahaya keluaran serat optik pada berbagai jenis zat cair. Selain itu, juga dapat diketahui pengaruh panjang pengelupasan jaket pelindung terhadap intensitas cahaya keluaran serat optik.

Adanya perlakuan ini, dapat dikembangkan sebagai sensor untuk mengetahui indeks bias zat cair.