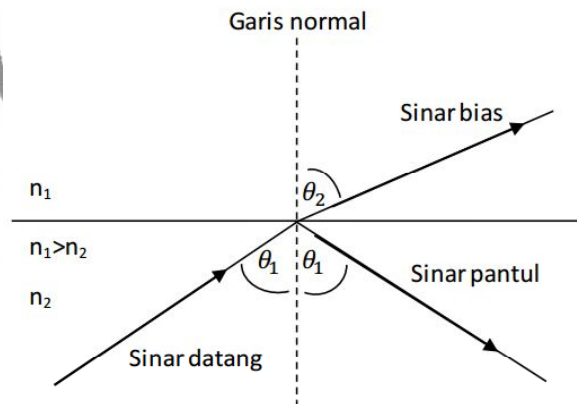


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teori Dasar Optik

Dalam perambatan pada suatu sistem optik, ketika cahaya melewati media yang homogen, maka cahaya akan bergerak dalam satu lintasan lurus. Diskontinuitas pada perambatannya menyebabkan cahaya mengalami pemantulan dan pembiasan (Pedrotti, 1993). Hal tersebut menjelaskan bahwa ketika seberkas cahaya menumbuk bidang batas yang memisahkan antara dua medium transparan yang berbeda, sebagian dari cahaya tersebut dipantulkan kembali ke medium pertama dengan nilai indeks bias (n_1) dan sebagian dibiaskan atau masuk ke dalam material kedua dengan nilai indeks bias (n_2), hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1, dengan indeks bias $n_1 > n_2$ (Keiser, 2000).



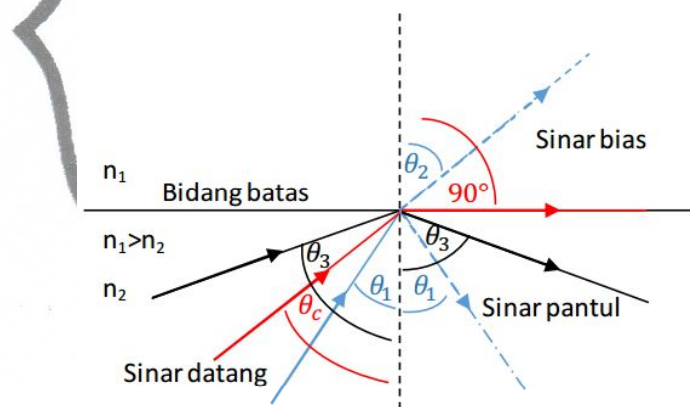
Gambar 2.1. Pemantulan dan pembiasan seberkas cahaya (Griffiths, 1981)

Peristiwa pembiasan menurut Hukum Snellius menunjukkan hubungan antara sudut datang (θ_1) dan sudut bias (θ_2) yang dinyatakan dengan persamaan :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

Dengan θ_1 merupakan sudut antara sinar datang dan garis normal, θ_2 merupakan sudut antara sinar bias dengan garis normal (Pedrotti, 1993).

Pada peristiwa pemantulan, besarnya sudut dari sinar datang yang menumbuk suatu permukaan sama dengan besarnya sudut dari sinar yang dipantulkan, peristiwa ini dapat terjadi apabila sinar datang, garis normal, dan sinar yang dipantulkan berada dalam satu medium seperti yang ditunjukkan Gambar 2.1. Berdasarkan perambatan cahaya pada indeks bias yang berbeda, pemantulan dibagi menjadi dua yakni, pemantulan internal dan pemantulan eksternal. Pemantulan eksternal terjadi ketika cahaya datang dari nilai indeks bias yang lebih kecil, kemudian menumbuk suatu permukaan yang nilai indeks biasnya lebih besar. Pemantulan total internal terjadi sebaliknya (Keiser, 2000). Pada konsep fiber optik pemantulan internal total berperan dalam proses *travelling waveguide* agar cahaya tidak keluar dari fiber optik.



Gambar 2.2. Batas sudut dalam pemantulan total (Keiser, 2000)

Gambar 2.2 menjelaskan batas sudut untuk terjadinya pemantulan total, sinar datang dengan sudut sebesar θ_1 menumbuk bidang batas antara dua medium berbeda maka sebagian sinar akan dipantulkan membentuk sudut θ_1 dan sebagian akan dibiaskan membentuk θ_2 . Ketika sudut datang diperbesar membentuk θ_c maka sinar yang dibiaskan akan membentuk sudut 90° terhadap garis normal dan sinar akan merambat pada bidang batas yang berada diantara dua medium (Tricker, 2002). Dengan menggunakan hukum Snellius didapatkan persamaan sudut kritis sebagai berikut:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (2.2)$$

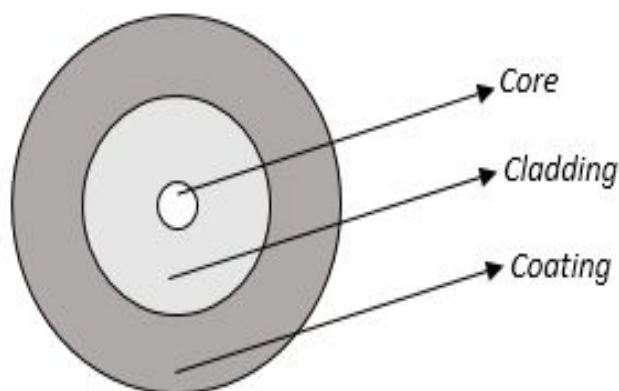
$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

(2.3)

Apabila sudut yang dibentuk oleh sinar datang lebih besar daripada sudut kritis (θ_c) (Gambar 2.2), maka sinar tersebut tidak dapat keluar dari medium rambatnya dan akan terpantul kembali ke medium peristiwa ini disebut pemantulan internal total (DeVeau, 2001).

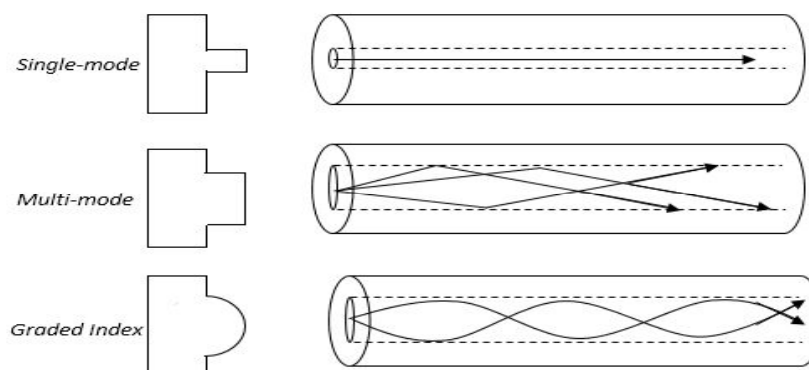
2.2. Fiber Optik

Fiber optik menurut pengertian dari (Decusatis, 2006) adalah untai tipis yang terbuat dari kaca atau palstik dan dapat menghubungkan sumber cahaya sebagai media penyampaian informasi ke tempat tujuan. Struktur bagian sebuah fiber optik terdiri dari inti (*core*), *cladding*, dan *coating* seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4. Bagian inti (*core*) merupakan daerah perambatan cahaya dengan nilai indeks bias lebih besar daripada *cladding*, bagian ini berbentuk silinder dan berbahan dielektrik yang terbuat dari kaca. *Cladding* adalah lapisan yang mengelilingi *core*. Lapisan ini terbuat dari kaca atau plastik. Pada fiber optik, *cladding* berfungsi untuk meneruskan *loss* cahaya dari inti ke lingkungan, dan menambah kekuatan mekanik dari fiber optik. Bagian *coating* merupakan lapisan pelindung yang terbuat dari plastic dan bersifat elastis (Jones, 1998).



Gambar 2.3. Struktur fiber optik (DeCusatis, 2006)

Fiber optik dibagi menjadi dua jenis yakni *mode waveguide* dan indeks bias yang ada pada *core*. Jenis fiber optik *mode wave guide* adalah jenis fiber optik dengan banyaknya cara (*mode*) sinar untuk ditransmisikan ke dalam *core*. Jenis fiber ini dibagi menjadi dua bagian yakni *single-mode* dan *multi-mode*. Fiber optik *single-mode*, memiliki karakteristik yakni diameter *core* yang kecil antara 8 -12 μm dan hanya dapat mentransmisikan cahaya hanya 1 mode saja seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4. Sedangkan fiber optik *multi-mode* dapat mentransmisikan cahaya ke dalam *core* dengan banyak cara dan banyak sudut, fiber optik *multi-mode* memiliki ukuran diameter *core* yang lebih besar dibandingkan *single-mode* yang berkisar antara 50 – 200 μm (Keiser, 2000). Jenis kedua adalah fiber optik berdasarkan perbedaan indeks bias pada *core*. jenis ini dibagi menjadi dua yakni step indeks dan graded indeks. Fiber optik *single-mode* dan *multi-mode* termasuk ke dalam jenis step indeks, karena *core* pada fiber optik ini hanya memiliki satu nilai indeks bias. Sedangkan graded indeks, bagian *core* memiliki lebih dari satu indeks bias (Senior, 2009).



Gambar 2.4. Jenis fiber optik dan cara rambat

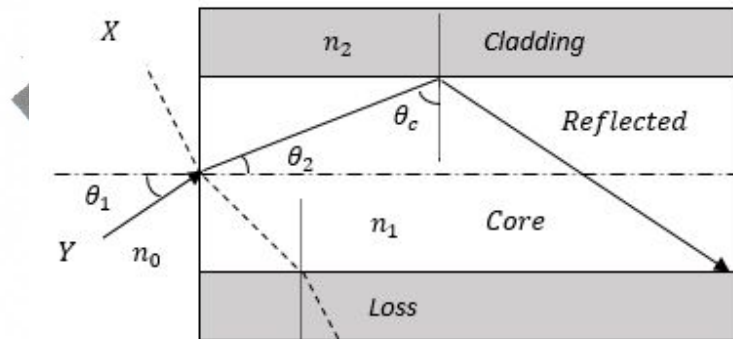
Perambatan cahaya dalam serat optik mengikuti prinsip pemantulan internal total. Jika sudut datang pada bidang batas lebih besar dari sudut kritis, maka sinar akan ditransmisikan dengan konsep pemantulan internal total. Hal ini menyatakan bahwa sinar akan terus merambat dan tidak akan keluar dari fiber optik (Gathak & Thyagarajan, 1997). Besar sudut kritis dinyatakan dengan persamaan :

commit to user

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

(2.5)

Keterangan :

 θ_c : sudut kritis n_2 : indeks bias *cladding* n_1 : indeks bias *core*

Gambar 2.5. Perambatan cahaya dalam fiber optik (Keiser, 2000)

Gambar 2.5 merupakan lintasan cahaya dalam serat optik dan θ_1 adalah batas maksimum agar terjadi pemantulan internal total. Ketika sinar datang X datang dengan sudut lebih besar daripada θ_1 maka sinar akan masuk ke dalam fiber optik dan membentuk sudut dengan nilai yang kurang dari sudut kritis (θ_c) sehingga akan terjadi *loss*. Sedangkan sinar datang Y yang masuk ke dalam serat optik dirambatkan secara *zig-zag* karena memenuhi syarat terjadinya pemantulan sempurna.

Menurut Saleh (1991) Ketika seberkas cahaya datang dari udara dengan indeks bias n_0 menuju fiber optik, dan sudut datang θ_1 lebih kecil atau sama dengan sudut kritis (θ_c), maka akan terjadi pemantulan total. Dengan menerapkan hukum Snellius, pada kesebandingan antara sudut θ_1 di udara dengan θ_2 yang dinyatakan dalam persamaan :

commit to user

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2 \quad (2.6)$$

Dari Gambar 2.5 diketahui bahwa $\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_c$. Maka persamaan 2.6 menjadi

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c \right) \quad (2.7)$$

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \cos \theta_c \quad (2.8)$$

Dengan menggunakan prinsip trigonometri $\sin^2 \theta_c + \cos^2 \theta_c = 1$, maka diperoleh

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 (1 - \sin^2 \theta_c)^{1/2} \quad (2.9)$$

Di mana nilai $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$, maka persamaan 2.8 akan menjadi :

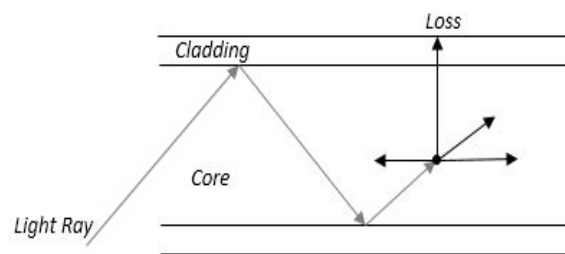
$$n_0 \sin \theta_1 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.10)$$

Persamaan 2.8 Menyatakan adanya hubungan antara sudut datang dengan indeks bias yang merupakan parameter penting dalam fiber optik yang disebut sebagai *Numerical Apertur (NA)* (Senior, 2009).

2.3. Rugi – Rugi Dalam Fiber Optik

2.3.1. *Scattering Loss*

Scattering merupakan hasil dari ketidaksempurnaan dalam fiber optik karena tidak homogenya struktur ketika proses pembuatan fiber. Fiber optik yang mengalami *scattering* secara struktur nilai densitas molekulnya tidak merata, sehingga pada titik tertentu di dalam fiber optik terdapat suatu molekul yang nilai densitasnya lebih tinggi atau lebih rendah dan molekul disebut sebagai molekul atau atom pengotor. Ketika cahaya di dalam fiber optik menabrak molekul pengotor, maka cahaya tersebut akan ter-*scattering* (terhamburkan) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.6.

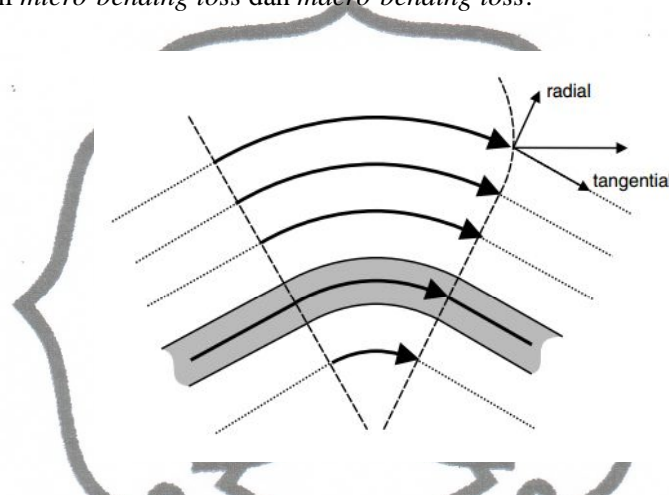


commit to user

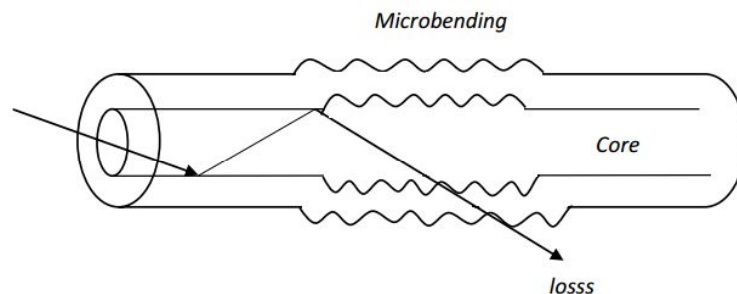
Gambar 2.6. *Scattering* (Ticker, 2002)

2.3.2. *Bending Loss*

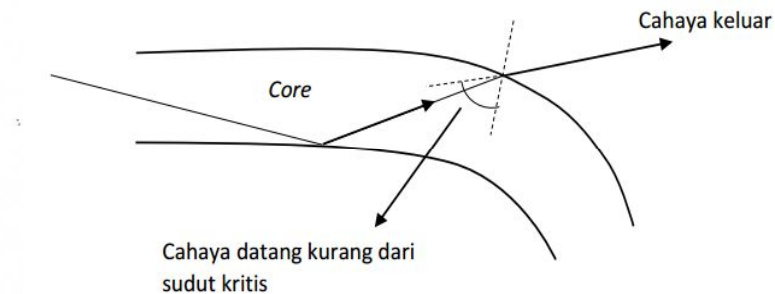
Dalam fiber optik, cahaya akan mengalami *loss* (rugi-rugi) apabila fiber optik dalam keadaan menyimpang mendekati radius lekukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. *Bending loss* di dalam fiber optik dibagi menjadi dua yakni *micro-bending loss* dan *macro-bending loss*.

Gambar. 2.7. Pembengkokan (*Bending*) dalam fiber optik

Micro-bending loss merupakan jenis pembengkokan pada fiber optik dalam skala kecil, dan tidak dapat kelihatan oleh mata. Hal ini dapat terjadi disebabkan perubahan temperatur yang tidak seragam pada proses pembuatan atau tekanan yang tidak merata sehingga struktur *core* pada fiber optik berubah dan menimbulkan lekukan pada fiber (Setiono *et al*, 2012).

Gambar 2.8. *Micro-bending* (Keiser, 2000)

Macro-bending loss terjadi apabila fiber optik mengalami pembengkokan, di mana titik pembengkokannya melebihi dari batas untuk terjadinya sudut kritis. sehingga cahaya dari *core* akan keluar menuju *cladding* yang menyebabkan terjadinya *loss*.



Gambar 2.9. Proses terjadinya *macro-bending* (Crisp & Elliot, 2005)

Ketika radius pembengkokan fiber optik semakin kecil, maka *loss* yang terjadi akan semakin besar. Hal ini akan membuat cahaya yang merambat dalam fiber optik semakin melemah, karena jumlah mode cahaya ketika melewati fiber optik dalam keadaan *bending* lebih kecil jika dibandingkan dengan keadaan ketika fiber optik berada dalam kondisi lurus (tidak bengkok). Berikut ini merupakan persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung jumlah mode ketika fiber optik dalam keadaan bengkok dengan radius kelengkungan sebesar a :

$$N_{eff} = N_{\infty} \left\{ 1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2kR} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (2.11)$$

Di mana α didefinisikan sebagai profil *graded index*, Δ merupakan perbedaan indeks bias antara *core* dan *cladding*, n_2 adalah indeks bias *cladding*, $k = 2\pi/\lambda$ adalah bilangan gelombang, dan

$$N_{\infty} = \frac{\alpha}{2+\alpha} (n_1ka)^2 \Delta \quad (2.12)$$

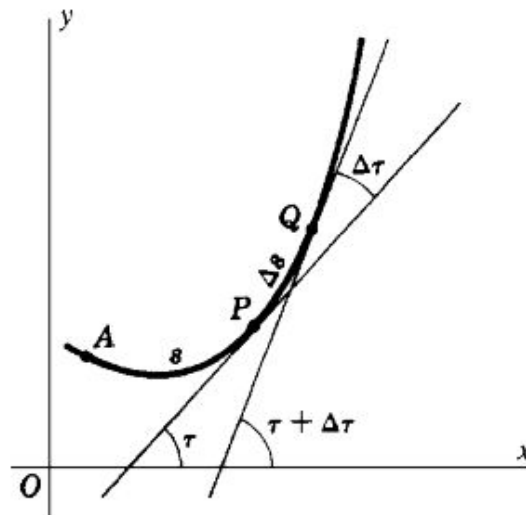
Adalah jumlah dari total mode ketika fiber optik dalam keadaan lurus (Keiser, 2000).

2.3.3. Jari – jari Kelengkungan

Fiber optik akan mengalami *loss* ketika fiber optik dalam kondisi melengkung dan lengkungannya melewati batas jari-jari kritis (R_c). Jari jari kritis merupakan batas kelengkungan pada fiber optik yang mendekati nilai *loss* (Farrel, 2002). Besarnya nilai jari jari kritisi fiber optik dapat ditentukan dengan persamaan :

$$R_c = \frac{3n_1^2\lambda}{4\pi[n_1^2 - n_2^2]^{3/2}} \quad (2.13)$$

Pembengkokan secara *macrobending* pada fiber optik mengindikasikan adanya kelengkungan pada fiber optik. Hal ini memungkinkan terjadinya perubahan arah rambat cahaya dalam fiber. Kelengkungan (K) pada suatu kurva $y = f(x)$ dapat dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 2.10. Kelengkungan pada kurva $y = f(x)$ (Ayres *et al.*, 2009)

Peningkatan *loss* dalam fiber optik sebanding dengan perubahan kelengkungan fiber. Semakin kecil jari-jari kelengkungan fiber (R), maka akan semakin besar *loss* yang akan terjadi. Kelengkungan dalam fiber optik dinyatakan dengan (K) pada persamaan berikut

$$K = \pm \frac{y''}{(1+(y')^2)^{3/2}} \quad (2.14)$$

Kelengkungan pada kurva $y = f(x)$ sebanding dengan semakin besarnya sudut antara garis singgung pada kedua titik, yaitu titik P dan titik Q. Nilai kelengkungan suatu kurva berbanding terbalik dengan jari-jari kelengkungan (R). sehingga semakin besar nilai kelengkungan kurva, maka akan semakin kecil jari-jari kelengkungannya. Nilai jari jari kelengkungan dinyatakan dalam persamaan :

$$R = \left| \frac{1}{K} \right| \quad (2.15)$$

$$R = \left| \frac{(1+(y')^2)^{3/2}}{y''} \right| \quad (2.16)$$

dengan y' adalah turunan pertama dan y'' merupakan turunan kedua (Ayres *et al.*, 2009).

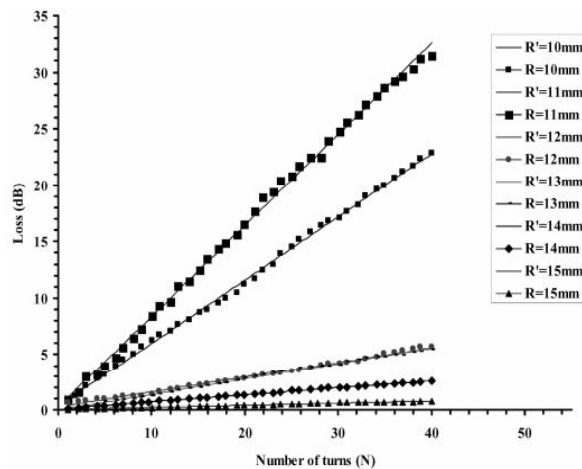
Selain *loss* akibat dari jari jari kelengkungan, jumlah lilitan dengan jari jari tertentu juga mempengaruhi nilai *loss* dari fiber optik itu sendiri. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Gambar 2.11 memperlihatkan bahwa adanya hubungan antara Intensitas yang keluar (I_{out}) dari fiber terhadap kelengkungan jari jari (R) dan jumlah lilitan (N). Ketika jumlah lilitan diperbanyak dan kelengkungan fiber semakin diperkecil, maka *loss* yang akan terjadi semakin besar, yang artinya terjadi pelemahan pada Intensitas keluaran (Marzuki *et al*, 2014). Hubungan antara Intensitas keluaran (I_{out}) terhadap jari jari kelengkungan (R) dan jumlah lilitan (N) dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$I_{out} = I_{in} e^{-N\alpha R} \quad (2.17)$$

Pada persamaan diatas terdapat nilai koefisien *loss* cahaya akibat *bending* yang dilambangkan dengan simbol α yang nilainya dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\alpha = C_1 \exp(-C_2 R) \quad (2.18)$$



Gambar 2.10. Hubungan *Loss* Terhadap Jari Jari Kelengkungan dan Jumlah Lilitan (Zendehname *et al*, 2010)

2.4. Sifat Mekanik Material

Suatu material biasanya memiliki sifat mekanik. Sifat mekanik material terdiri *stress*, *strain*, elastisitas. *Stress* merupakan tingkat ketahanan suatu benda ketika diberi tekanan, biasanya sifat ini digunakan untuk menentukan batas maksimum bahan dalam menerima tekanan. *Strain* adalah ukuran dari suatu material untuk mengalami perubahan bentuk. Sedangkan Elastisitas adalah kemampuan dari suatu material untuk kembali ke bentuk semula, dengan kata lain suatu material tidak mengalami kerusakan (Callister, 2007).

Nilai *strain* akan sebanding dengan *stress* ketika material berada dalam daerah elastis. Perbandingan antara *stress* dan *strain* disebut sebagai modulus young, yang merupakan ukuran untuk suatu material dan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$E = \frac{\text{Stress}(\sigma)}{\text{Strain}(e)} = \frac{F/A}{\Delta l/l} \quad (2.19)$$

Di mana F adalah gaya yang diberikan pada suatu material, A merupakan luasan material yang dikenai gaya, sedangkan Δl merupakan pertambahan panjang ketika material mengalami regangan (Hayden *et al*, 1965).

2.5. Fiber Optik Sensor

Sensor fiber optik dibagi menjadi dua antara lain ekstrinsik dan intrinsik. Pembagian tersebut berdasarkan tempat terjadinya perubahan karakteristik cahaya baik itu di dalam atau pun diluar fiber optik (Yin, 2002).

2.5.1. Modulasi cahaya

Modulasi pada fiber optik adalah proses pemuatan informasi dalam bentuk sinyal optik atau cahaya untuk ditransmisikan oleh fiber optik (Setiawan, 2010). Parameter pengukuran terhadap besaran fisis seperti intensitas cahaya, suhu, tekanan, dan yang lainnya dapat dikonversi ke bentuk sinyal listrik yang kemudian dimodulasi dan diinterpretasikan. Sehingga dimungkinkan terdapat banyak jenis sensor yang digunakan dalam pengukuran besaran fisis (Yeh, 1990).

2.5.2. Modulasi Intensitas

Ada beberapa macam konsep dasar yang diterapkan dalam sensor berbasis modulasi intensitas antara lain pemantulan, transmisi, dan *macrobending* (Yeh, 1990). Prinsip sensor yang berdasarkan modulasi intensitas adalah dengan merubah nilai intensitas yang di transmisikan oleh fiber optik ke dalam bentuk arus dengan bantuan dari *photodiode*.

2.5.2.1. Modulasi Intensitas Langsung

Modulasi ini bergantung pada sinyal optik dan sinyal listrik yang berubah menjadi proporsional, dengan ketentuan bahwa karakteristik dari *transmitter* dan *recivier* sama. Sehingga dapat dilakukan pengukuran dengan linieritas yang tinggi. Namun kekurangan dari tipe ini adalah penggunaannya terbatas untuk transmisi analog dan biasanya melakukan transmisi sinyal dalam jarak dekat (Yin, 2002).

2.5.3. Modulasi Fase (Interferensi)

Sensor yang bermodulasi fase banyak dikembangkan karena performa yang ditampilkan baik. Di mana sensitifitas dan resolusi dalam setiap pengukuran dari sensor ini tinggi (Yin, 2002).

Sensor bermodulasi fase menggunakan sumber cahaya yang koheren seperti laser diode. Sensor ini menggunakan konfigurasi *interferometer* dengan merambatkan cahaya dalam fiber optik yang kemudian dipisahkan kedalam dua lengan serat menggunakan *splitter*. Sensor modulasi fase lebih presisi dalam pengukurannya dibandingkan dengan sensor intensitas, namun diperlukan biaya yang cukup mahal untuk membuat atau menggunakan sensor ini (Krohn, 1992).

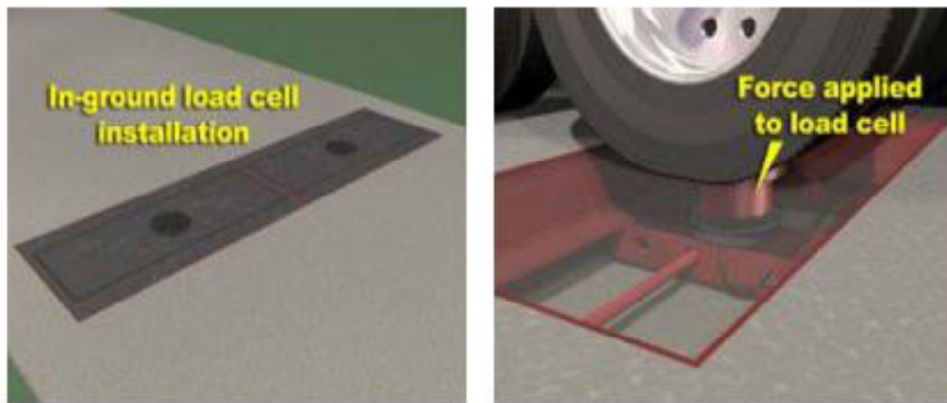
2.6. WIM

Weigh In Motion (WIM) merupakan sistem pengukuran beban suatu kendaraan dalam keadaan berjalan dengan menggunakan sensor yang di desain khusus untuk melakukan pengukuran beban berjalan dengan kecepatan tertentu (dinamis). Sistem ini diterapkan untuk menghindari kemacetan yang sering terjadi ketika melakukan pengukuran beban kendaraan dalam keadaan statis.

Pada saat ini sensor WIM yang sering digunakan antara lain adalah *piezoelectric*, *load cell*, WIM berbasis fiber optik. Di mana ketiga sensor ini memiliki keunggulan dan kelemahan tersendiri dalam setiap pengukuran.

2.6.1. Load cell WIM

Load cell WIM adalah jenis WIM yang dikembangkan pertama kali sebagai sistem permanen. Sistem ini bisa digunakan untuk memonitoring lalu lintas dengan kecepatan tinggi ataupun kecepatan rendah.. Prinsip kerja dari *load cell* adalah ketika bagian *sensing area* di beri tekanan maka elemen logam yang bersifat elastis di dalam *load cell* mengalami perubahan regangan yang mengakibatkan nilai resistansi pada bagian *sensing area* juga ikut berubah, sehingga perubahan nilai resistansi ini dijadikan parameter untuk pengukuran berat suatu kendaraan. Semakin besar perubahan resistansi, maka semakin berat pula bobot suatu kendaraan yang terukur. *Load cell* memiliki dua *detector* yang diletakkan sejajar dalam satu sumbu (di kiri dan di kanan). Bobot dari suatu kendaraan akan dijumlahkan secara otomatis dan ditampilkan di layar ketika kendaraan sudah menginjak kedua *detector* tersebut. Selain itu pada *load cell* WIM juga dapat mengukur kecepatan kendaraan dari perubahan induksi loop (Kollipara, 2013).

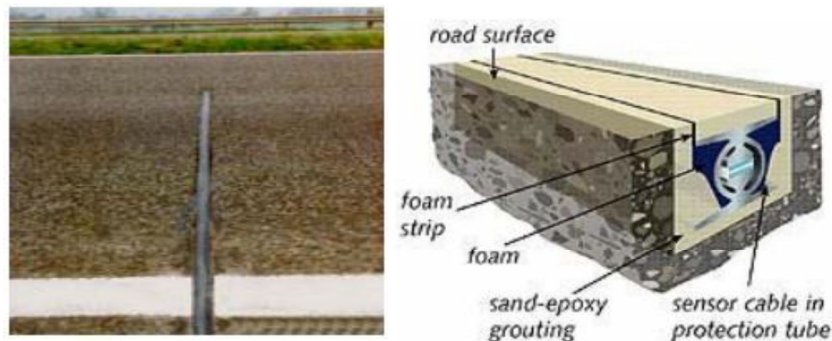


Gambar 2.11. *Load cell* WIM (Liu, 2005)

Keunggulan dari *load cell* adalah sensor ini tahan lama sekitar 5 tahun, dan tingkat akurasi sebesar 6%, tahan terhadap perubahan cuaca, teknologi yang termutakhir. Kekurangan dari *load cell* adalah harga serta biaya perawatan yang mahal dan instalasi yang cukup rumit (Qi *et al*, 2013).

2.6.2. *Piezoelectric* WIM

Jenis sensor WIM yang paling banyak digunakan untuk pengambilan data adalah sensor *piezoelectric*. Konstruksi dasar dari sensor ini terdiri dari tembaga yang dikelilingi oleh bahan *piezoelectric* dan dibungkus dengan selubung tembaga. Prinsip kerja dari sensor ini adalah menghitung perubahan tegangan yang timbul dikarenakan bahan material *piezoelectric* dalam keadaan tertekan. Kemudian perubahan voltase tersebut di konversi ke bentuk satuan berat. Sensor ini di klasifikasikan sebagai *high speed sensor* karena dapat mengukur kecepatan lebih dari 60 mph (Kollipara *et al*, 2013). Keunggulan dari sensor ini adalah dapat mengklasifikasikan kendaraan dengan akurat, biaya yang murah dan instalasi yang mudah. Kekurangan dari sensor ini adalah nilai akurasi yang rendah, karena dipengaruhi oleh perubahan suhu (Qi *et al*, 2013).



Gambar 2.12. *Piezoelectric WIM* (Kollipara *et al*, 2013)

2.6.3. WIM Berbasis Fiber Optik.

WIM berbasis fiber optik masih jarang digunakan, dalam pengambilan data beban suatu kendaraan. Riset WIM berbasis fiber optik mulai dikembangkan. Prinsip dasar dari WIM berbasis fiber optik ini dalam mengukur beban kendaraan adalah, melihat perubahan nilai transmitansi cahaya ketika kendaraan tersebut menyentuh bagian *sensing area*, sehingga akan timbul puncak-puncak yang berupa *loss* cahaya akibat tekanan yang diberikan oleh suatu kendaraan ketika menyentuh bagian *sensing area*.

WIM berbasis fiber optik ini memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan sensor WIM yang sudah ada, dari segi ekonomis sensor ini lebih murah, biaya perawatannya tidak begitu mahal, dari segi ketahanan terhadap suhu dan perubahan cuaca, sensor ini tidak terpengaruh oleh kondisi tersebut, sehingga WIM berbasis fiber optik memiliki nilai akurasi pengukuran yang tinggi. Selain itu instalasi atau pemasangan sensor ini sangatlah mudah dan sensor ini bisa bersifat portable ataupun permanen, dan dapat dijadikan sebagai sensor *high speed* maupun *low speed system*. Namun kekurangan dari sensor ini adalah fiber optik yang berbentuk serat ini sangat riskan dan mudah sekali mengalami *bending* yang membuat sensor ini tidak dapat digunakan, sehingga diperlukan pelindung atau *coating* untuk mencegah fiber optik dari *bending* serta tingkat kehati-hatian yang tinggi dalam pemasangan *fiber sensor WIM*.