



Sensor Serat Optik untuk Pengukuran Beban Bergerak

Fitriana Prihati¹, Pujayanto²

^{1,2} Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Sebelas Maret
Jalan Ir. Sutami Nomor 36A Surakarta
E-mail : pujayanto@staff.uns.ac.id

Abstrak

Telah dilakukan kajian pustaka untuk: (1) Menjelaskan prinsip dasar sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak; (2) Menjelaskan cara membuat sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak; (3) Mengetahui pengaruh variasi beban terhadap redaman (*loss*) pada sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak; dan (4) Mengetahui pengaruh kecepatan massa berjalan terhadap redaman pada sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak. Prinsip dasar sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak yaitu dengan memanfaatkan lekukan yang tajam (*macrobending*) pada sebuah kabel serat optik yang dapat menyebabkan penurunan intensitas atau rugi daya. Sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak dapat dibuat dengan memanfaatkan rugi-rugi daya yang dihasilkan akibat pemberian tekanan yang mengakibatkan lekukan pada serat optik yang telah dilewatkan pada alat *bending*. Semakin besar massa yang melewati sensor, maka kerugian daya yang dialami serat optik semakin besar. Variasi massa pada berbagai posisi menghasilkan *trend* grafik yang hampir sama, sehingga gaya berat total beban berjalan merupakan penjumlahan dari gaya berat pada masing-masing sumbu dan tidak dipengaruhi oleh variasi posisi beban. Benda yang memiliki kecepatan berbeda, akan menghasilkan puncak rugi-rugi yang berbeda pula. Semakin besar kecepatan benda, maka semakin kecil nilai rugi-ruginya. Sebaliknya, semakin kecil kecepatan benda, nilai rugi-rugi yang dihasilkan semakin besar.

Kata kunci : Sensor, serat optik, lekukan

1. Pendahuluan

Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. Bagian-bagian serat optik terdiri dari inti (*core*), kulit (*cladding*), dan mantel (*coating*). - Cahaya yang ada di dalam serat optik sulit keluar karena indeks bias dari kaca lebih besar daripada indeks bias dari kulitnya (Prasetya, 2009: 6). Jika cahaya dirambatkan dengan sudut datang lebih besar dari sudut kritis, maka cahaya akan ditransmisikan melalui inti serat optik dengan cara pemantulan (Crisp, 2005: 18).

Kemampuan serat optik sebagai media transmisi ini dapat membuat gelombang cahaya yang sampai pada ujung serat optik mengalami pelemahan daya, yang dikenal sebagai rugi – rugi. Gangguan dari luar maupun dari dalam serat optik itu bisa menjadi penyebab dari rugi – rugi serat optik. Hal inilah yang harus dihindari dalam sistem komunikasi yaitu rugi-rugi yang besar sehingga tidak banyak data yang hilang ketika ditransmisikan (Freeman, 1999: 35).

Namun dengan adanya rugi-rugi pada transmisi cahaya dengan serat optik ini, banyak peneliti yang

memanfaatkan rugi-rugi tersebut untuk mengembangkan sensor sebagai alternatif dari teknologi yang telah ada (Wulandari, 2013: 1). Sistem sensor ini didasarkan pada rugi-rugi serat optik sebagai sensor beban. Rugi-rugi serat optik disebabkan adanya pengaruh bengkokan pada serat optik (Sururi, 2012: 2). *Macrobending* atau lekukan makro adalah pelekukan serat optik dengan radius yang lebih besar dibandingkan dengan radius serat optik. Untuk sepotong kabel optik yang dibungkus oleh lapisan pelindung luar, maka besarnya jari-jari ‘aman’ adalah sepuluh kali jari-jari kabel. Semakin tajam (dan semakin kecil jari-jari) lengkungan, maka semakin besar rugi-rugi daya yang timbul (Crisp, 2005: 63-64).

Salah satu pemanfaatan rugi-rugi pada transmisi cahaya serat optik ini dilakukan oleh Malla, dkk. (2008: 2552) untuk mengukur beban roda kendaraan bergerak menggunakan prinsip beban bergerak atau disebut *Weigh in Motion* (WIM). WIM merupakan metode untuk menentukan beban kendaraan yang bermuatan seperti truk dengan melakukan pengukuran pada beban roda ketika kendaraan dalam keadaan bergerak (Wulandari; 2013: 178).

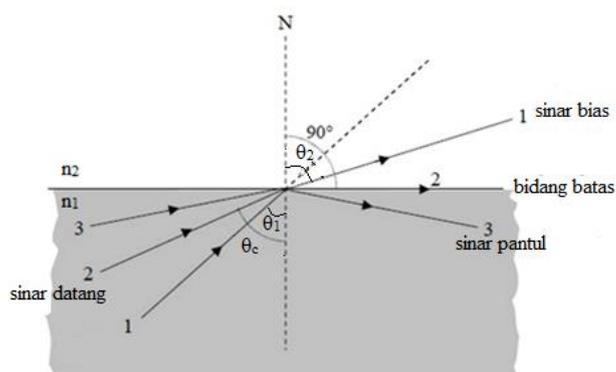
Keuntungan saat kendaraan bergerak dibanding saat diam adalah efisiensi waktu bagi pemilik kendaraan dan lebih aman bagi operator ketika jalanan dalam waktu-waktu sibuk (Malla, dkk.,

2008: 2552). Sistem WIM meliputi sejumlah komponen dasar, dengan konsep sensor massa yang paling pokok dan penting. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi kemampuan sistem WIM dalam pengukuran massa kendaraan ketika bergerak, salah satunya dalam pemilihan komponen sensor massa (Slupek, 2000: i).

Prinsip kerja dari sensor serat optik yang dibahas dalam makalah ini adalah menggunakan perubahan intensitas akibat *macrobending*. *Macro bending* pada sebuah kabel serat optik dapat menyebabkan timbulnya rugi daya yang cukup serius dan lebih jauh kemungkinan terjadinya kerusakan mekanis (pecahnya serat optik). Rugi daya karena lekukan serat optik sebenarnya dapat dimanfaatkan untuk banyak hal melalui dua cara: dengan memanfaatkan peningkatan *loss* yang terjadi di dalam serat optik dan dengan memanfaatkan cahaya yang lolos dari serat optik. Dengan memanfaatkan rugi-rugi daya akibat kenaikan atenuasi didalam serat optik yang dilekukan, salah satunya adalah untuk membuat sensor beban (Crisp, 2005: 64).

2. Pembahasan

Sistem kerja serat optik memanfaatkan sifat-sifat cahaya. Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang dapat merambat tanpa medium sebagai tempat perambatannya. Cahaya juga bisa merambat pada suatu medium, namun kecepatannya tidak sama dengan kecepatan cahaya di ruang hampa. Konsep pembiasan dan pemantulan cahaya dapat dijelaskan mengikuti tingkah laku berkas-berkas cahaya yang merambat di dalam medium. Ketika berkas cahaya melewati batas dua medium yang berbeda, maka sebagian berkas cahaya dipantulkan masuk pada medium pertama dan sebagian lagi dibiarkan masuk pada medium kedua. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 1, di mana indeks bias medium 2 lebih kecil daripada indeks bias medium 1 ($n_2 < n_1$). Pembiasan berkas cahaya pada permukaan medium yang mempunyai indeks bias berbeda. Hubungan tersebut dapat dijelaskan menggunakan hukum Snellius seperti terlihat pada persamaan (1) (Keiser, 2000: 35).



Gambar 1. Pembiasan dan Pemantulan Berkas Cahaya pada Batas Medium (Keiser, 2000: 33)

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

di mana,

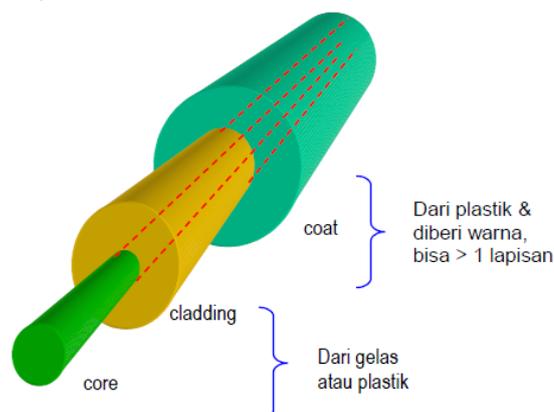
n_1 : Indeks bias medium pertama

n_2 : Indeks bias medium kedua

θ_1 : Sudut datang (sudut antara sinar datang dan garis normal)

θ_2 : Sudut bias (sudut antara sinar bias dan garis normal)

Gambar 2. merupakan gambar struktur serat optik yang terdiri dari inti, kulit, dan mantel. Kulit mempunyai indeks bias yang lebih rendah dibandingkan inti. Karena perbedaan indeks bias antara inti dan kulit, maka akan terjadi perambatan pantulan cahaya yang terdapat dalam inti (Prasetya, 2009: 9). Mantel bersifat elastis dan berfungsi melindungi serat optik dari kerusakan fisik (Endra, 2007: 5).



Gambar 2.2. Struktur Serat Optik (PT Telkom, 2004: 15)

Berdasarkan indeks bias inti, serat optik dibedakan menjadi *step-index* dan *graded-index*. Serat optik *step-index* (SI) memiliki perubahan patah-patah ketika gelombang cahaya yang merambat terpantul dari permukaan kulit ke inti. Hal ini disebabkan indeks bias intinya sama. Sedangkan *graded-index* (GI) memiliki perubahan yang halus dan berlanjut karena indeks bias intinya memiliki perbedaan nilai di mana indeks bias terbesarnya saat

mendekati pusat inti dan indeks bias terkecilnya saat mendekati ke arah kulit (Endra, 2007: 5-6).

Berdasarkan diameter intinya, serat optik dibedakan menjadi *single-mode* dan *multimode*. *Single-mode* hanya dapat merambatkan gelombang cahaya satu mode atau berupa lintasan cahaya lurus. Sedangkan *Multi-mode* mampu merambatkan gelombang cahaya lebih dari satu atau banyak mode sehingga disebut *multi-mode* (Wulandari, 2013: 12-13)

Serat optik memiliki kemampuan mengkap sinar yang masuk ke dalam serat optik untuk dapat merambat di dalam inti hingga mencapai ujung output dengan nilai kisaran sudut tertentu yang disebut kerucut penerimaan (Crisp, 2005: 36). Besarnya sudut datang yang masuk ke dalam inti serat dijelaskan melalui persamaan (2).

$$\theta_a = \arcsin(n_1 \sin \theta_c) = \sin(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2)$$

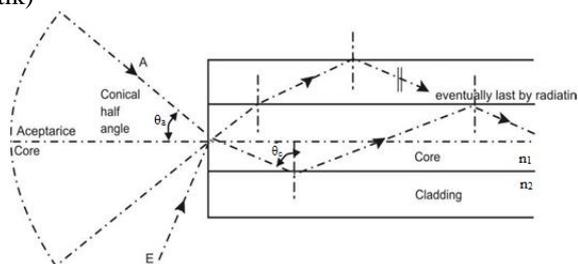
di mana,

θ_a = sudut datang yang masuk ke inti serat

θ_c = sudut kritis

n_1 = indeks bias medium pertama (inti serat optik)

n_2 = indeks bias medium kedua (kulit serat optik)



Gambar 3. Kerucut Penerimaan (Rambe, 2003: 5)

Hubungan antara sudut penerimaan dan indeks bias dinyatakan dengan tingkat numeris atau *Numerical Aperture (NA)*. NA dari sebuah serat optik adalah parameter yang mengukur kemampuan serat optik untuk mengumpulkan atau memerangkap sinar cahaya (Crisp, 2005: 36). Jika medium di mana tempat cahaya memasuki serat umumnya adalah udara maka indeks bias udara adalah 1 sehingga $NA = \sin \theta_a$. Nilai NA biasanya sekitar 0,20 sampai 0,29 untuk serat gelas, serat plastik memiliki NA yang lebih tinggi dapat melebihi 0,5.

$$NA = \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (3)$$

Saat serat optik mentransmisikan cahaya, akan mengalami redaman atau rugi daya yang disebabkan beberapa hal. Redaman atau dikenal dengan rugi-rugi serat optik merupakan pelemahan atau berkurangnya daya optik yang dihasilkan dari sumber cahaya ketika melewati serat optik. Rugi-rugi dinyatakan sebagai perbandingan daya masukan

(P_{in}) dengan daya keluaran (P_{out}) (Al-Bazzaz dan Saedi, 2008: 300).

$$Rugi - rugi = \frac{10}{L} \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \text{ (dB/km)} \quad (4)$$

$$P = V.I \quad (5)$$

Berdasarkan hukum Ohm

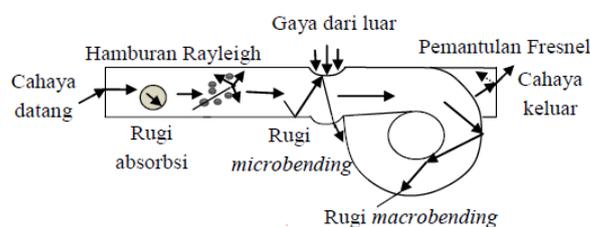
$$V = I.R \quad (6)$$

Persamaan (6) disubstitusikan ke dalam persamaan (5), sehingga menjadi:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

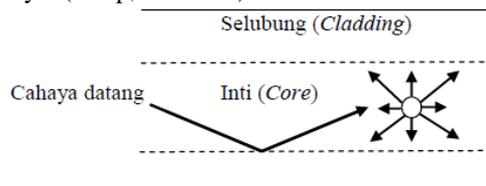
Hambatan merupakan variabel yang konstan sehingga P menjadi V^2 sehingga rugi-rugi sebanding dengan keluaran tegangan dinyatakan pada persamaan (8).

$$Rugi - rugi = \frac{20}{L} \log \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right) \text{ dB/km} \quad (8)$$



Gambar 4. Rugi-Rugi yang Terjadi pada Serat Optik (PT. Telkom, 2004: 16)

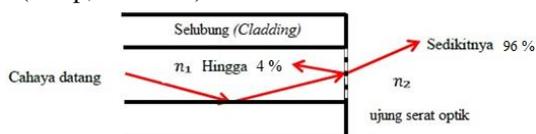
Faktor-faktor yang menyebabkan rugi-rugi pada transmisi serat optik ditunjukkan seperti Gambar 4. Absorpsi terjadi disebabkan oleh zat kotoran yang masih tersisa di bahan inti yang berasal dari proses pembuatan serat optik akan menyerap sebagian cahaya yang merambat di dalamnya sehingga cahaya yang keluar dari serat optik telah berkurang dayanya. (Crisp, 2005: 58).



Gambar 5. Hamburan Rayleigh (Crisp, 2005: 59)

Hamburan Rayleigh terjadi karena perubahan kecil pada kerapatan bahan yang hanya ada di lokasi-lokasi tertentu saja pada indeks bias bahan inti dan bahan kulit, sehingga ketika cahaya melewatinya akan membuat cahaya menjadi terpecah. Hamburan Rayleigh ini disebabkan oleh ketidakmerataan komposisi bahan-bahan pembuat serat optik dalam jumlah yang sangat kecil dan acak sehingga tidak mungkin untuk menghilangkan seluruhnya. Selain itu, karena pergeseran-pergeseran kecil pada kerapatan bahan yang biasanya terjadi saat kaca silika memulai membeku dan menjadi padat. Salah satu lokasi cacat ini dan Hamburan Rayleigh yang ditimbulkannya ditunjukkan dalam

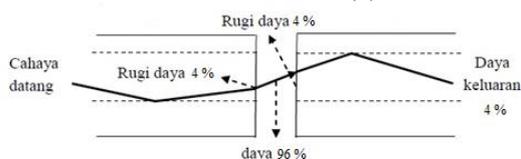
Gambar 5, cahaya terpecah dan terpecah ke segala arah (Crisp, 2005: 59).



Gambar 5. Pemantulan Fresnell (Crisp, 2005: 61)

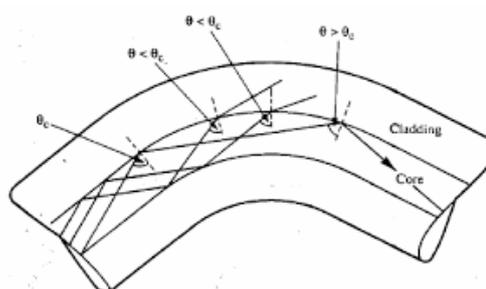
Pemantulan Fresnell terjadi ketika cahaya menumbuk daerah perubahan indeks bias hingga tersebar ke segala arah. Komponen pancaran tersebut yang merambat dengan sudut datang mendekati garis normal sebagian besar akan langsung menembus garis perbatasan pada ujung serat optik. Tetapi, tidak semua cahaya yang datang dengan sudut mendekati garis normal akan menembus garis perbatasan. Sebagian yang sangat kecil dari cahaya tersebut akan terpantul balik pada garis perbatasan maupun pada sambungan, seperti Gambar 5 dan Gambar 6. Besarnya daya yang terpantul balik dinyatakan pada persamaan (9) (Crisp, 2005: 60-61).

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (9)$$



Gambar 6. Pemantulan Fresnel di Setiap Bidang Batas (Crisp, 2005: 61)

Hilangnya energi cahaya di dalam serat optik juga dapat disebabkan oleh lekukan (*bending*). *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 dengan ukuran diameter semula, sehingga mempengaruhi sifat transmisi cahaya di dalamnya. Ada dua jenis pembengkokan yang menyebabkan rugi-rugi dalam serat optik, yaitu pembengkokan mikro (*microbending*) dan pembengkokan makro (*macrobending*) (Sururi, 2012: 15).



Gambar 7. Mekanisme Jalannya Cahaya pada Peristiwa *Macrobending* (Crisp, 2005: 63)

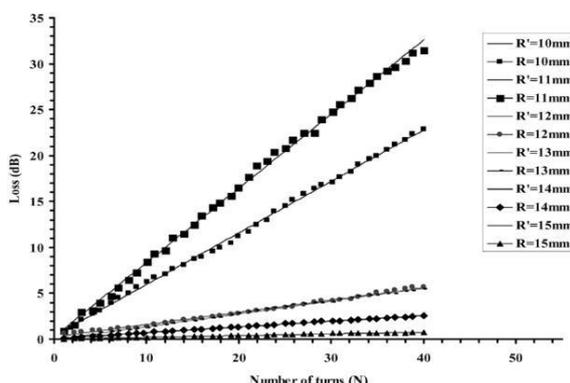
Macrobending adalah pembengkokan serat optik dimana jari-jari bengkokannya lebih besar dari pada diameter serat optik. Karena terjadi kelengkungan pada serat optik, menyebabkan cahaya yang melewati serat optik akan mengalami pelemahan pada bagian inti serat optik, seperti terlihat pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7 dapat dijelaskan prinsip pemantulan dan pembiasan cahaya, sudut sinar datang yang lebih kecil daripada sudut kritis ($\theta < \theta_c$), maka sinar yang masuk tidak dipantulkan secara sempurna melainkan lebih banyak dibiarkan keluar dari inti serat optik. Sedangkan untuk sinar yang membentuk sudut datang lebih besar dari sudut kritis ($\theta > \theta_c$), maka sebagian besar mode cahaya akan dipantulkan kembali masuk ke dalam selubung seperti halnya prinsip pemantulan total. Kondisi ini mengakibatkan perubahan nilai intensitas. Jumlah radiasi optik dari kelengkungan serat optik tergantung kekuatan medan dan jari-jari kelengkungan.

Rugi-rugi pada serat optik yang melengkung akan semakin meningkat jika jari-jari kelengkungannya semakin kecil. Hal ini dikarenakan adanya jari-jari kritis (R_c). Jari-jari kritis merupakan jari-jari lengkungan pada serat optik yang mendekati pertambahan nilai *loss* yang cepat (Hidayat, 2015: 20).

$$R_c = \frac{3 n_1^2 \lambda}{4 \pi [n_1^2 - n_2^2]} \quad (10)$$

Persamaan (10) menjelaskan bahwa besarnya jari-jari kritis dapat dipengaruhi oleh selisih dari nilai indeks bias. NA yang besar akan menghasilkan nilai jari – jari kritis (R_c) dan nilai rugi-rugi yang kecil. *Loss* cahaya juga akan meningkat ketika serat optik dililitkan dengan jari-jari tertentu sebanyak N lilitan (Gambar 8).



Gambar 8. Loss Karena Lengkungan dengan Variasi Jari-Jari dan Jumlah Lilitan (Zendeenam dkk, 2010: 297)

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara rugi-rugi serat optik dengan penambahan jumlah lilitan. Selain itu dapat diketahui bahwa rugi-rugi pada serat optik bertambah karena nilai intensitas cahaya berkurang. Berkurangnya nilai intensitas disebabkan oleh adanya penambahan jumlah lilitan.

Sensor serat optik dapat diklasifikasikan dalam tiga kategori yaitu lokasi penginderaan, prinsip operasi dan aplikasi. Berdasarkan lokasi penginderaan sensor serat optik dapat dibagi menjadi 2 yaitu instrinsik dan ekstrinsik. Serat optik sebagai sensor instrinsik terjadi ketika satu atau lebih sifat fisik dari yang dialami serat berubah. Gangguan yang terjadi menyebabkan perubahan karakteristik cahaya yang telah terjadi di dalam serat optik. Sedangkan sensor ekstrinsik biasa digunakan untuk membawa cahaya menuju alat optik eksternal dimana pengukuran diambil. Dalam hal ini, serat optik bekerja jika mendapatkan cahaya pada daerah pengukuran. Sensor serat optik dapat menjadi ekstrinsik bila modulasi cahaya dilakukan oleh transduser eksternal atau dapat menjadi sensor instrinsik bila modulasi terjadi dalam serat optik.

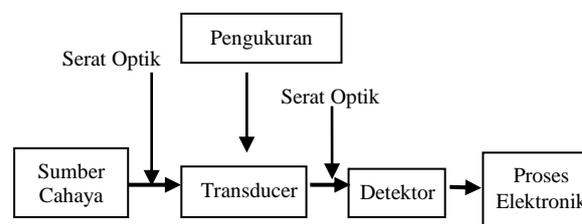
Berdasarkan prinsip operasi atau modulasi dan proses demodulasi, sensor serat optik dapat diklasifikasikan menjadi intensitas, modulasi fase, dan modulasi panjang gelombang. Semua parameter tersebut dapat menjadi subjek yang menyebabkan perubahan dikarenakan gangguan eksternal. Sehingga, dengan mendeteksi parameter tersebut dan perubahan yang terjadi, maka gangguan dari luar dapat diukur (Fidanboylu, 2009: 2-3).

Sensor serat optik modulasi intensitas menggunakan perubahan intensitas atau *attenuasi* (pelemahan) sebagai dasar utama kerja sensor serat optik. Cara untuk melakukan *attenuasi* yaitu dengan menggunakan *bending* pada serat optik sehingga terjadi rugi daya di dalam serat optik yang menyebabkan *attenuasi* pada sinyal keluaran di ujung serat optik. Beberapa konsep sensor berbasis modulasi intensitas adalah *macrobending*, transmisi, dan refleksi. Sensor modulasi intensitas lebih

sederhana dan tidak banyak memerlukan *interface*. Salah satu yang dikembangkan dari sensor serat optik adalah sensor *macrobending*. Sistem *macrobending* memanfaatkan daya yang hilang dalam serat optik yang dibengkokkan sebagai sinyal dimana besarnya dipengaruhi oleh jari-jari pembengkokan. Ketika *loop* menyentuh permukaan uji maka akan terjadi kecacatan serat optik dan merubah diameter pembengkokan.

Sensor serat optik modulasi panjang gelombang menggunakan perubahan panjang gelombang cahaya untuk dideteksi. Contoh sensor ini antara lain sensor *Fluorescens* dan *bragg grating*.

Sensor serat optik modulasi fase menggunakan perubahan modulasi fase untuk dideteksi. Dalam sensor ini digunakan dua buah serat optik, serat optik yang pertama sebagai referensi sedangkan serat optik yang kedua mengalami gangguan (Fidanboylu, 2009: 3)

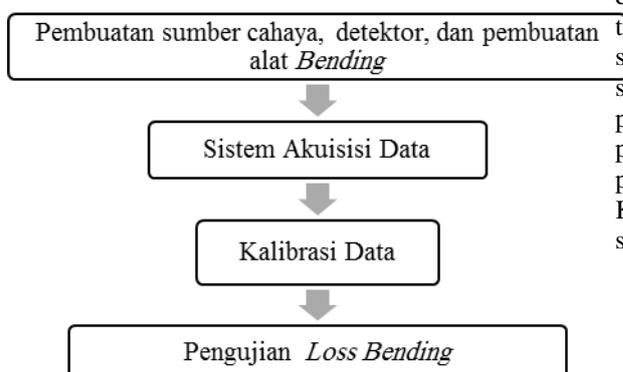


Gambar 9. Struktur Umum Sebuah Sistem Sensor Serat Optik (Fidanboylu, 2009: 2).

Struktur umum sistem sensor serat optik terdiri dari sumber cahaya atau sinar, contohnya: *LED (Light Emitting Dioda)* yang dapat memancarkan cahaya pada saat mendapat arus bias maju dan *LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)* merupakan alat yang memancarkan radiasi elektromagnetik, umumnya dalam bentuk cahaya dan dapat dilihat menggunakan mata normal maupun tidak normal. Serat optik untuk jalan cahaya. Transduser merupakan proses perlakuan yang dikenai pada serat optik, perlakuan dapat berupa tekanan dan modulasi. Penginderaan atau elemen modulator yang akan diukur untuk sebuah sinyal optik. Sebuah detektor optik dan proses elektronik untuk mengolah data biasanya menggunakan osiloskop, *optical spectrum analyzer* (Fidanboylu, 2009: 3).

Prinsip kerja fiber sensor adalah saat fiber sensor diberi tekanan oleh beban kendaraan maka terjadi deformasi atau perubahan bentuk berupa bengkokan. Hal ini menyebabkan perubahan jari-jari kelengkungan serat optik yang mengakibatkan terjadinya penurunan intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh serat optik. Penyebab turunnya nilai transmisi ini adalah terjadinya *bending* pada serat optik sehingga mengakibatkan *loss* cahaya (Yohanes, 2016: 35). Transmisi merupakan

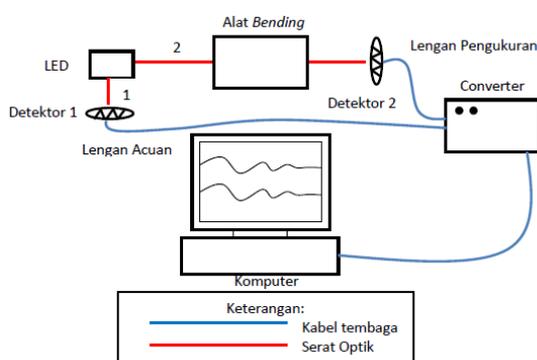
perbandingan intensitas cahaya output modulasi dengan intensitas cahaya referensi.



Gambar 10 . Alur Pembuatan Sensor Serat Optik (Hidayat, 2015: 35)

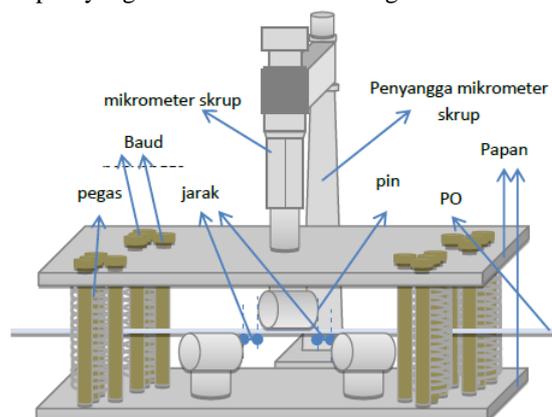
Secara umum proses pembuatan sensor serat optik ditunjukkan oleh Gambar 10. Tahapan persiapan alat dan bahan dimulai dengan pembuatan sumber cahaya, detektor cahaya, piranti untuk menampilkan sinyal output dan menyiapkan piranti sensor serat optik. Sensor serat optik ini dibuat berdasarkan metode *makrobending* dengan memberikan pin pada sistem yang akan mempengaruhi redaman serat optik akibat bengkokan ketika serat optik mengalami penekanan.

Gambar 11 merupakan rancangan alat sensor serat optik. Cahaya dari LED dipecah menjadi 2. Cahaya yang pertama masuk ke serat optik yang telah dimodulasi, kemudian cahaya keluarannya ditangkap oleh detektor 2. Hasil yang diperoleh pada detektor 2 adalah intensitas modulasi. Cahaya yang kedua masuk ke serat optik tanpa modulasi. Cahaya yang ditangkap detektor 1 adalah intensitas referensi. Fotodetektor melakukan *scanning* pada masing-masing lengan detektor guna mengamati perubahan intensitas yang terjadi. Intensitas cahaya akan dikonversi menjadi tegangan oleh alat *interface* yang akan ditampilkan pada *personal computer*. Software yang dapat digunakan adalah *labview* dengan alat *interface Arduino Uno* (Hidayat,2015: 32).



Gambar 11. Rancangan Alat Sensor Serat Optik (Hidayat, 2015: 31)

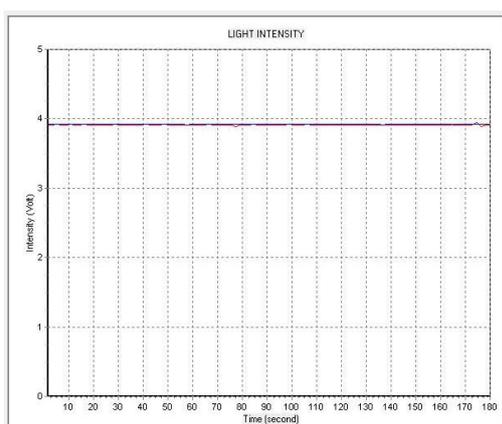
Gambar 12 merupakan skema alat *bending* dengan pin sejumlah 3. Dengan alat tersebut akan diperoleh *trend* grafik yang linier dengan intensitas tinggi dan memiliki korespondensi satu-satu sebagai syarat bahwa alat yang dibuat dapat digunakan sebagai sensor WIM. Serat optik dilewatkan lurus pada sebuah alat *bending* kemudian diberi perlakuan penekanan dari atas. Cahaya dari LED dilewatkan pada serat optik yang dilewatkan pada alat *bending*. Kemudian detektor menangkap sinyal output dari serat optik yang dilewatkan alat bending.



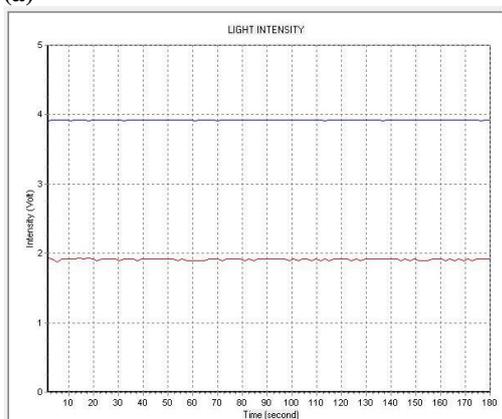
Gambar 12. Skema Alat Bending (Ghozali, 2012: 4)

Penggunaan pegas memegang beberapa peranan penting. Pertama, saat pemberian beban, pegas tertekan menyebabkan pin bagian atas terdorong ke bawah pada serat optik dan menciptakan lekukan pada serat optik. Kedua, setelah beban ditiadakan, pegas akan kembali ke posisi semula dan membuat serat optik berada pada posisinya. Yang ketiga, dengan memilih pegas dengan konstanta pegas yang tepat, pegas dapat didesain untuk menopang kelebihan beban dan mencegah serat optik dari kerusakan (Malla, dkk., 2008: 2559).

Pengujian terhadap serat optik diperoleh keadaan awal ketika fiber optik belum mengalami perlakuan *bending* maka intensitas referensi (garis biru) dan *receiver* (garis merah) akan berhimpit, hal tersebut menandakan tidak ada *loss bending*. Ketika serat optik diberi penekanan secara vertikal dari atas, maka terlihat kedua intensitas akan merenggang dengan intensitas *receiver* tercatat menurun, hal ini menandakan adanya *loss bending*. Grafik kedua keadaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 13.



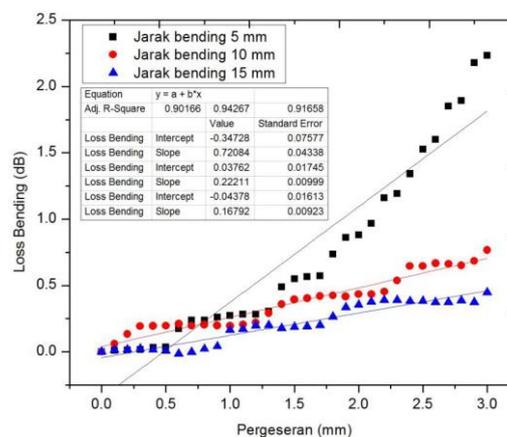
(a)



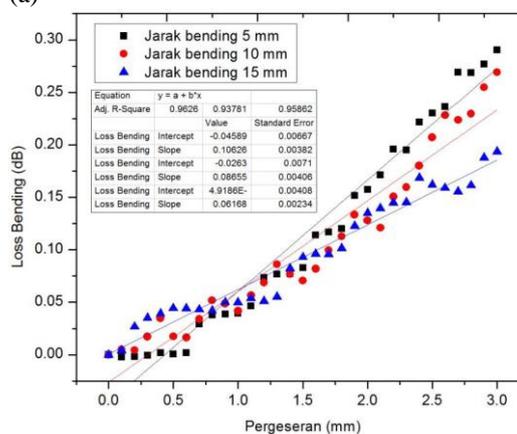
(b)

Gambar 13. Intensitas Referensi (Biru) dan Receiver (Merah); (a) Sebelum Bending; (b) Setelah Bending (Ghozali, 2013: 5)

Ghozali (2013) melakukan penelitian terhadap sensor serat optik dengan tiga lekukan menghasilkan rugi-rugi seperti pada Gambar 14. Dari model tiga lekukan didapatkan hasil semakin kecil diameter POF (*Plastic Optical Fiber*) menghasilkan rugi-rugi yang semakin besar. Semakin besar pergeseran yang menandakan semakin besar penekanan yang diberikan kepada serat POF maka intensitas cahaya yang diterima detektor semakin berkurang yang menunjukkan rugi-rugi semakin besar.



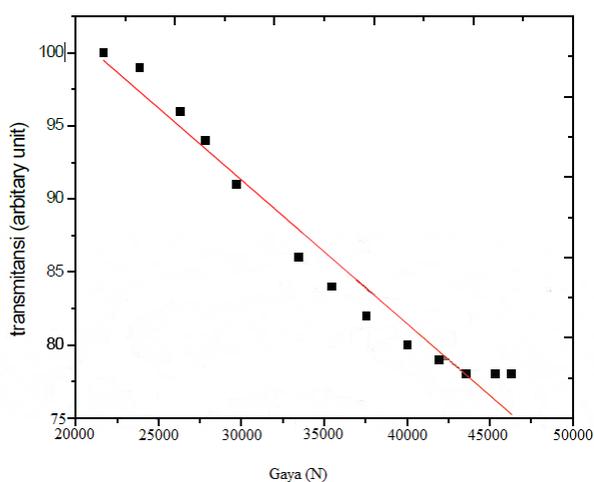
(a)



(b)

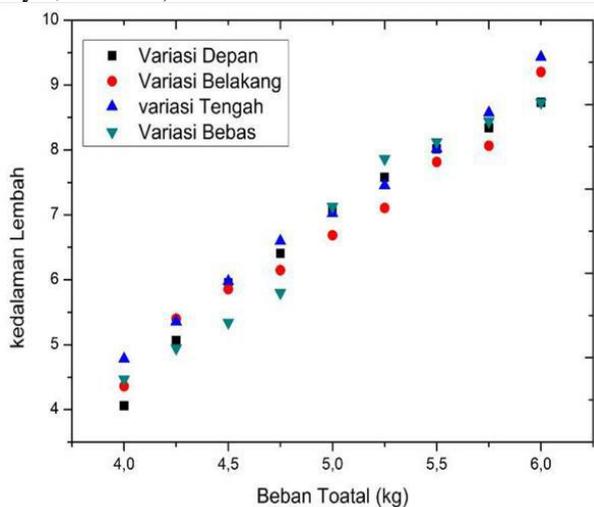
Gambar 14. Grafik Pengaruh Pergeseran terhadap Rugi-rugi pada Model Tiga Lekukan Menggunakan POF, a. Diameter 0,5 mm, b. Diameter 3 mm (Wulandari, 2015: 48)

Gambar 15. menunjukkan hasil uji tekan sampel fiber sensor menggunakan MTM (*Material Test Machine*). Dari Gambar 15 dapat dilihat penurunan transmisi dimulai dari gaya 23.871 N. Hal ini menunjukkan fiber sensor mulai dapat mendeteksi adanya tekanan pada gaya 25.000 N. Semakin besar gaya yang diberikan pada fiber sensor maka tekanan yang diterima oleh fiber sensor juga semakin besar. Hal ini mengakibatkan peristiwa *macrobending* pada fiber sensor. Nilai kelinieritas dari hasil uji tekan sensor skala lapangan diperoleh 0.96216 artinya data yang diperoleh hampir mendekati 1 atau dapat disebut juga data yang diperoleh cukup baik dan sensor serat optik layak digunakan sebagai sensor beban bergerak (Yohanes, 2016: 40).



Gambar 15. Hasil Uji Tekan Sensor Fiber Optik (Yohanes, 2016: 40)

Hasil pengujian terhadap variasi posisi beban ditunjukkan oleh Gambar 16 yang merupakan gabungan data antara berbagai variasi posisi penambahan massa beban berjalan berdasarkan posisi letak beban. Dari hasil pengujian, menunjukkan diperoleh hasil bahwa variasi massa pada berbagai posisi menghasilkan *trend* grafik yang hampir sama. Hal ini membuktikan bahwa gaya berat total beban berjalan adalah penjumlahan dari gaya berat pada masing-masing sumbu dan tidak dipengaruhi posisi beban pada beban berjalan (Hidayat, 2015: 79).

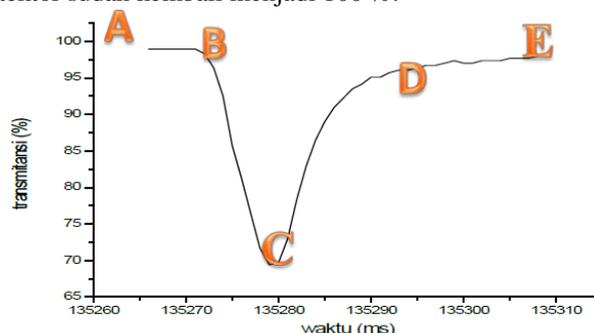


Gambar 16. Grafik Gabungan Variasi Beban Depan, Tengah, Belakang, dan Acak/bebas (Hidayat, 2015: 79)

Kecepatan kendaraan saat melewati fiber sensor berhubungan dengan waktu sentuh kendaraan mengenai fiber sensor. semakin besar kecepatan kendaraan maka nilai waktu sentuhnya semakin kecil. Waktu sentuh kendaraan mengenai sensor serat optik juga berpengaruh terhadap *signal loss* keluaran yang dihasilkan. Semakin lama waktu kontak kendaraan terhadap fiber sensor maka

semakin besar pula nilai deformasi dari sensor, sehingga menimbulkan *signal loss* keluaran yang semakin besar pula (Yohanes, 2016: 42).

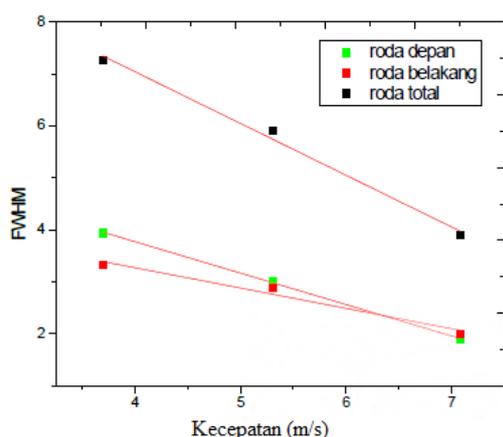
Gambar 17 menunjukkan *signal loss* keluaran dari sensor serat optik. Daerah A-B menunjukkan sensor serat optik belum mengalami kontak dengan beban sehingga belum menimbulkan rugi-rugi. Daerah B-C menunjukkan adanya penurunan transmitansi. Hal ini muncul karena adanya deformasi pada serat optic. Lebar puncak pada daerah B-C menunjukkan waktu beban melakukan kontak dengan sensor atau sering disebut FWHM (*Full Width Half Maximum*). FWHM digunakan untuk menggambarkan pengukuran dari lebar sebuah objek yang tidak mempunyai bentuk ujung. Objek pada penelitian ini adalah ban kendaraan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa lebar puncak ini adalah analogi dari ban kendaraan melintasi fiber sensor. Sedangkan pada daerah C-D, beban sudah melewati fiber sensor artinya sinyal optic yang diterima detektor sudah kembali menjadi 100 %.



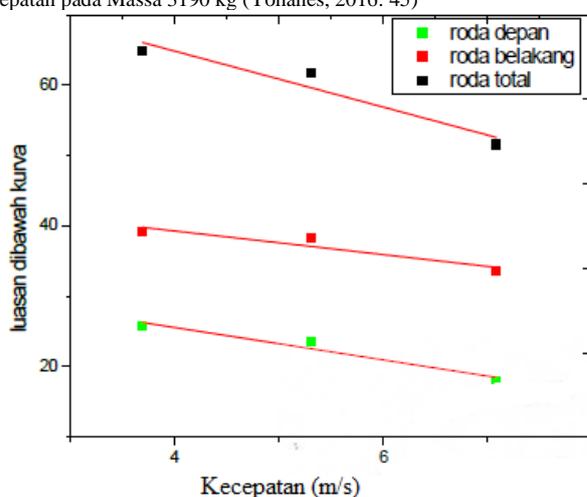
Gambar 17. *Signal Loss* Keluaran Hasil Tekanan Ban Kendaraan (Yohanes, 2016: 43)

Dari puncak rugi-rugi transmitansi pada signal loss keluaran sensor fiber optic dapat diperoleh variabel FWHM (*Full Width Half Maximum*) yang menunjukkan waktu beban melakukan kontak dengan sensor serta luasan dibawah kurva (A) yang menunjukkan impuls lalu hubungannya terhadap fungsi kecepatan. Semakin besar kecepatan kendaraan yang melintasi *fiber sensor* maka Kurva FWHM dan luasan di bawah kurva (A) nya akan semakin kecil sehingga didapatkan grafik pada Gambar 18. dan Gambar 19.

Gambar 18 menunjukkan grafik hubungan antara FWHM dengan kecepatan pada massa bervariasi. Dari tiap-tiap grafik terlihat *trend* grafik menurun. Semakin besar kecepatan kendaraan maka nilai FWHM nya semakin kecil. Sedangkan pada Gambar 19 merupakan grafik hubungan antara luasan di bawah kurva dengan kecepatan pada massa. Dari grafik dapat dibuat kesimpulan bahwa semakin besar kecepatan kendaraan maka nilai luasan di bawah kurva nya semakin kecil. Sehingga kecepatan mempengaruhi rugi-rugi serat optik yang dihasilkan.

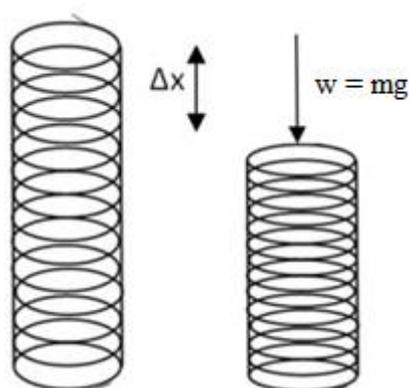


Gambar 18. Grafik Hubungan antara FWHM dengan Kecepatan pada Massa 3190 kg (Yohanes, 2016: 45)



Gambar 19. Grafik Hubungan antara Luasan di Bawah Kurva Dengan Kecepatan pada Massa 3190 kg (Yohanes, 2016: 45)

Nilai penurunan transmitansi akibat adanya pengaruh kecepatan dapat dijelaskan dengan menggunakan prinsip pegas. Penekanan diakibatkan oleh adanya gaya berat yang mengenai pegas dalam hal ini pada sensor serat optik. Pegas yang terkena perlakuan penekanan akan mengalami pergeseran sejauh Δx . Selain mengubah pegas sejauh Δx pegas akan menerima energi senilai E_k pada selang waktu Δt tepat saat selang waktu mobil menekan sensor serat optik. Pegas menerima gaya sebesar $F = m \cdot g$. Ketika mobil melakukan penekanan dengan kecepatan tertentu melewati sensor maka gaya berat akan diberikan pada sensor pada waktu sesaat Δt atau lamanya waktu mobil mengenai sensor. Pada saat mobil mengenai sensor muncul adanya energi (E_k), sehingga muncul impuls (I) yang juga bekerja pada sensor. Sensor terdiri dari pegas yang elastis. Pada saat terkena mobil, maka pegas tersebut akan mengalami penurunan sejauh Δx . Deretan pegas mengalami penurunan sesuai dengan gaya yang diterimanya.



Gambar 21. Pegas yang Terkena Gaya Akibat Penekanan Massa (Philbertanto, 2015: 40)

Jika ditinjau dari satu pegas yang homogen seperti Gambar 21, apabila pegas dikenai gaya sebesar F maka pegas akan mengalami pergeseran sejauh x . Besarnya nilai pergeseran tergantung dari gaya yang bekerja pada pegas dan konstanta pegas itu sendiri. Proses ini memenuhi persamaan:

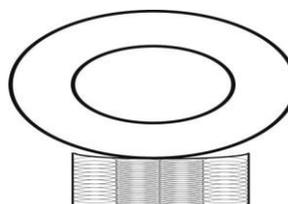
$$F = k \Delta x \tag{11}$$

Energi yang diterima oleh pegas sebesar :

$$E_k = \frac{1}{2} k \Delta x^2 \tag{12}$$

Jika sensor serat optik diasumsikan seperti pegas maka ketika beban melewati sensor, mobil akan memberikan gaya selama waktu tertentu. Gaya ini dikaji sebagai gaya impuls yang diberikan kepada sensor dalam selang waktu t . Gaya impuls sebesar :

$$I = w \Delta t \tag{13}$$



Gambar 22. Ilustrasi Sensor Serat Optik (Pilbertanto, 2015: 41)

Gambar 22 merupakan ilustrasi keadaan di dalam serat optik yang dianalogikan seperti barisan pegas. Ketika mobil di atas sensor serat optik, energi kinetik dari mobil akan diterima sensor seperti pegas. Dan memenuhi persamaan :

$$E_k = \frac{1}{2} k v^2 \tag{14}$$

Dikaji lagi dalam kasus ini terdapat momentum antara ban dengan sensor dengan waktu sesaat maka persamaan (12) dapat diubah menjadi:

$$\frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2} k x^2 \tag{15}$$

Karena nilai impuls sama dengan momentum $I = P$ dan berdasarkan persamaan (14), persamaan (15) menjadi :

$$\frac{(w \Delta t)^2}{2m} = \frac{1}{2} k x^2 \tag{16}$$

Pada persamaan (16) nilai w merupakan gaya berat yang timbul dari massa mobil akibat adanya gravitasi. Dan w memenuhi persamaan:

$$w = mg \tag{17}$$

Persamaan (17) menunjukkan bahwa m bisa diubah menjadi $\frac{g}{w}$ sehingga persamaan (16) bisa diubah menjadi :

$$\frac{w^2 \Delta t^2 g}{2} = \frac{1}{2} k \Delta x^2$$

$$w \Delta t^2 g = k \Delta x^2 \tag{18}$$

Persamaan (18) juga bisa ditulis menjadi

$$\Delta x = \Delta t \sqrt{\frac{wg}{k}} \tag{19}$$

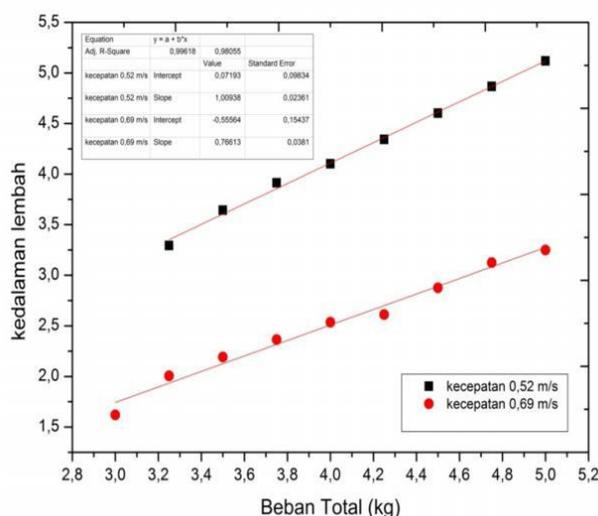
Berdasar persamaan (19) proses beban berjalan diatas menunjukkan nilai deformasi dari sensor bergantung dari lamanya beban tersebut melakukan kontak dengan sensor. Semakin lama terjadinya kontak antara beban dengan sensor semakin besar pula nilai deformasi (Δx) dari sensor. Proses juga akan menimbulkan rugi-rugi transmisi yang semakin besar pula. Hal tersebut sesuai dengan persamaan:

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \tag{20}$$

Nilai Δx dalam hal ini diasumsikan pada pergeseran Δd . Kecepatan akan berbanding terbalik terhadap waktu. Sehingga jika kecepatan divariasikan maka akan terjadi perubahan waktu sentuh terhadap sensor serat optik yang terlihat dari perubahan nilai transmisi (Hidayat, 2015: 83).

Karena bertujuan untuk menghitung waktu sentuh beban berjalan yang mengenai sensor serat, maka Δd dalam persamaan diatas adalah lebar sensor serat optik dan Δt adalah waktu sentuh atau waktu beban berjalan mengenai sensor serat optik. Dari persamaan (20) terlihat bahwa kelajuan beban berjalan berbanding terbalik dengan waktu sentuh. Hal ini yang menyebabkan terjadinya perbedaan penurunan transmisi cahaya pada serat optik ketika kelajuannya bervariasi seperti yang ditunjukkan Gambar 23. Kecepatan yang besar akan menyebabkan kedalaman yang kecil dan berlaku sebaliknya.

Adanya hasil pengukuran yang berbeda ketika beban berjalan mempunyai kelajuan yang berbeda dapat menimbulkan *error* pengukuran. Salah satu upaya meminimalisir *error* yaitu dengan membuat *database* berdasarkan kecepatan untuk mengelompokkan beban berdasarkan kecepatan sehingga pengukuran menjadi lebih akurat (Hidayat, 2015: 84).



Gambar 23. Grafik Hubungan antara Beban Total dengan Kedalaman Lembah pada Dua Kecepatan Berbeda (Hidayat, 2015: 84)

3. Kesimpulan dan Saran

Prinsip dasar sensor serat optik model untuk pengukuran beban bergerak yaitu dengan memanfaatkan lekukan yang tajam (*macrobending*) pada sebuah kabel serat optik yang dapat menyebabkan penurunan intensitas atau rugi daya. Sensor serat optik untuk pengukuran beban bergerak dapat dibuat dengan memanfaatkan rugi-rugi daya yang dihasilkan akibat pemberian tekanan dari lekukan pada serat optik yang telah dilewatkan pada alat *bending*, ataupun serat optik yang dililitkan pada *rubber*. Semakin besar massa yang melewati sensor, maka kerugian daya yang dialami serat optik semakin besar. Variasi massa pada berbagai posisi menghasilkan *trend* grafik yang hampir sama, sehingga gaya berat total beban berjalan merupakan penjumlahan dari gaya berat per sumbu dan tidak dipengaruhi posisi beban pada beban berjalan namun mempengaruhi presentase berat yang terdistribusi pada masing-masing sumbu kendaraan. Benda yang memiliki kecepatan berbeda, akan menghasilkan puncak rugi-rugi yang berbeda pula. Semakin besar kecepatan benda, maka semakin kecil nilai rugi-ruginya, dan semakin kecil kecepatan benda, nilai rugi-rugi yang dihasilkan semakin besar.

Daftar Pustaka

Al-Bazzaz, Sabah H. S. (2008). Simulation of Single Mode Fiber Optics and Optical Communication Components Using VC++. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, University of Science and Technology, Sana'a, YEMEN.

- Crisp, John., dan Barry Elliot. (2005). *Serat Optik Sebuah Pengantar* (Terjemahan: Soni Astranto). Jakarta: Erlangga.
- Endra. (2007). *pengenalan Sistem Komunikasi Serat Optik*.
<http://lab.binus.ac.id/pk/download/artikel/16/16.pdf>. Diakses 24 Juli 2016 19.35.
- Fidanboyulu, K. dan Efendioğlu, H. S.. (2009). Fiber Optic Sensors and Their Applications. *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, May 13-15, 2009, Karabuk, Turkey, Hal 1-6.
- Ghozali, E.F., dkk. (2012). *Kajian Rugi-Rugi Akibat Makrobending pada Serat Optik Plastik Berbasis PC*. Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret.
- Hidayat, Wahyu. (2015). *Analisis Serat Optik Multimode Inficore 300 Terbengkokkan Untuk Aplikasi Penimbangan Beban Kendaraan Berjalan (Weigh In Motion)*. Tesis Tidak Diterbitkan. Surakarta: Program Pascasarjana Universitas Sebelas Maret.
- Keiser, Gred. (2000). *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill, Inc. Singapore.
- Malla, R. B., Sen A., and Garrick, N. M. (2008). A Special Fiber Optic Sensor for Measuring Wheel Loads of Vehicles on Highways. *Sensors*, Vol 8, hal 2551-2568, ISSN 1424-8220.
- Philbertanto, G.C. (2015). *Analisis Perubahan Sinyal pada Sensor Beban Berbasis Serat Optik dengan Model Beban Bergerak*. Skripsi Tidak Diterbitkan. Surakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret.
- Prasetya, D. (2009). *Serat Optik*. Fakultas Ilmu Komputer Universitas Sriwijaya.
- PT. Telkom. (2004). *Dasar Sistem Komunikasi Optik, Optical Access Network versi 1.0*. PL-1.1. Bandung: PT Telekeomunikasi Indonesia, tbk.
- Slupek, Rose. (2000). *Weigh In Motion Technology*: Austroads Inc. Australia
- Wulandari, Deajeng. (2013). *Analisis Rugi-rugi Serat Optik Akibat Makrobending Sebagai Potensi Aplikasi Sensor Beban Bergerak (Weigh In Motion)*. Sekripsi Tidak Diterbitkan. Surakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret