



**PEMANFAATAN SENSOR FIBER OPTIK
UNTUK PEMANTAUAN BOBOT KENDARAAN BERJALAN**

**Tedi Santo Sofyan
Arry Setyawan**



NASKAH ILMIAH

**PEMANFAATAN SENSOR FIBER OPTIK
UNTUK PEMANTAUAN BOBOT KENDARAAN BERJALAN**

Pemanfaatan Sensor Fiber Optik Untuk Pemantauan Bobot Kendaraan Berjalan

Desember 2015

Cetakan Ke-1, 2015

© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

No. ISBN :
Kode Kegiatan : PPK1-029-005-107-A15
Kode Publikasi : -
Kata kunci : Fiber optik, sensor, bobot kendaraan berjalan

Penulis:

Tedi Santo Sofyan
Arry Setyawan

Editor:

-

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2015, pada paket pekerjaan pengembangan sistem penimbangan beban kendaraan.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan dan Perumahan Rakyat. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Badan Penelitian dan Pengembangan
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan
info@pusjatan.pu.go.id

TENTANG PUSLITBANG JALAN DAN JEMBATAN

Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PUPR dalam menyelenggarakan jalan dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi dan nilai – nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

KEANGGOTAAN TIM TEKNIK DAN SUB TIM TEKNIK

TIM TEKNIK :

1. Prof (R) Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
2. Ir. Agus Bari Sailendra, MT
3. Prof (R) Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc
4. Prof (R) Ir. Lanneke Tristanto, APU
5. Ir. GJW Fernandez
6. DR. Djoko Widayat, MSc

SUB TIM TEKNIK :

1. Dr. Ir. Nyoman Suaryana, M.Sc
2. Prof (R) Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
3. Prof (R) Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc
4. Dr. Djoko Widayat, M.Sc.
5. Ir. Kurniadji, MT.
6. Dr. Ir. Siegfried, M.Sc.

KATA PENGANTAR

Isu utama yang dibahas pada kegiatan ini adalah mengenai pemanfaatan fiber optik sebagai sensor penimbangan kendaraan yang sedang berjalan. Dengan memanfaatkan fiber optik diharapkan akan dapat menghasilkan sensor penimbangan bobot kendaraan yang sedang berjalan secara akurat, murah dan sederhana sehingga dapat terpasang langsung di jalan tanpa mengurangi kenyamanan berkendara pengguna jalan.

Kajian ini diharapkan dapat menjadi masukan umumnya bagi pembaca dan khususnya bagi para praktisi sebagai pendukung pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia. Akhir kata kami mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian naskah ilmiah ini.



Bandung, Desember 2015

Tim Penelitian

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	1
DAFTAR ISI.....	2
DAFTAR TABEL.....	4
DAFTAR GAMBAR	5
1. PENDAHULUAN	8
2. PRINSIP DAN TEORI DASAR FIBER OPTIK SEBAGAI SENSOR.....	11
2.1 Pembiasan dan Pemantulan Cahaya.....	13
2.2 Sudut Penerimaan dan Tingkat Numeris.....	16
2.3 Teori Mode	17
2.4 Tipe Serat Optik.....	19
2.4.1 Serat optik single mode	19
2.4.2 Multi mode serat optik	20
2.5 Sumber Optik.....	20
2.6 Rugi-Rugi Serat Optik.....	21
2.6.1 Absorbsi	22
2.6.2 Hamburan	23
2.6.3 Rugi-rugi Pembengkokan (Bending Losses)	23
2.6.4 Rugi-rugi Penyambungan.....	28
2.6.5 Dispersi	29
2.7 Sensor Serat Optik.....	30
2.7.1 Sensor Serat optik Berdasarkan lokasi sensor	31
2.7.2 Sensor Serat optik Berdasarkan prinsip operasi sensor.....	32
2.8 Karakteristik Sensor Serat Optik Untuk Performansi Sensor	33
2.9 Perubahan Nilai Intensitas Cahaya Menjadi Tegangan	34
2.10 Hukum Hooke	34
2.11 Jenis Sensor yang telah dikembangkan untuk WIM.....	35
2.11.1 WIM Dengan Menggunakan Piezoelectric.....	35
2.11.2 WIM Dengan Menggunakan Bending Plate.....	36
2.11.3 WIM dengan menggunakan fiber berjenis khusus.....	37

2.12 Sistem Akuisisi Data	38
2.13 Fabrikasi sensor	40
2.13.1 Pencetakan silinder tube berulir	41
2.13.2 Pembuatan Rubber Pad Fiber Sensor	42
3. DESAIN FIBER SENSOR BOBOT KENDARAAN BERJALAN BERKONFIGURASI BENDING.....	45
3.1 Fiber Sensor dengan Sistem Bending	47
3.2 Detektor Cahaya.....	53
3.3 Analog Digital Converter (ADC)	56
3.4 Perangkat lunak.....	59
3.4.1 Weigh In Motion Data Acquisition	59
3.4.2 Photogate Velocitymeter	61
3.5 Pengujian sensor.....	62
3.5.1 Variasi Beban Bagian Depan.....	64
3.5.2 Variasi Beban Bagian Tengah	66
3.5.3 Variasi Beban Bagian Belakang.....	67
3.5.4 Variasi Beban Posisi Tidak Menentu	68
3.5.5 Analisa sinyal optik fiber sensor terhadap variasi massa Beban ..	69
3.5.6 Hasil Data dan Pembahasan Variasi Kelajuan Beban berjalan.....	72
4. PENUTUP	78
DAFTAR PUSTAKA.....	79

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Persamaan garis berbagai variasi posisi penambahan massa beban.....	70
---	----



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Bagian-bagian serat optik (Rambe, 2003).	11
Gambar 2	Grafik <i>Step indeks</i> (kiri) dan Grafik <i>Graded indeks</i> (kanan) (Endra, 2007).	12
Gambar 3	Pembiasan dan pemantulan berkas cahaya pada batas mediu (Keiser, 2000).	13
Gambar 4	(a) Pemantulan dan pembiasan, (b) Sudut kritis, (c) Pemantulan internal total (Keiser, 2000).	15
Gambar 5	Kerucut penerimaan yang diperoleh dengan memutar sudut penerimaan terhadap sumbu serat optik (Rambe, 2003).	17
Gambar 6	Serat Optik <i>Single Mode</i> (Saleh, B.E.A, 2007)	19
Gambar 7	Serat Optik <i>Single Mode</i> (Saleh, B.E.A, 2007)	20
Gambar 8	Proses terjadinya mikrobending (Bailey, 2003)	25
Gambar 9	Proses penelitian mikrobending (Efendioglu, 2009).	25
Gambar 10	Proses terjadinya makrobending (Martins, 2006)	27
Gambar 11	Komponen dasar dari sistem sensor serat optik.	31
Gambar 12	Jenis sensor serat optik ekstrinsik dan intrinsik.	31
Gambar 13	Skema kerja <i>piezoelectric</i>	36
Gambar 14	Proses Kerja <i>Bending plate</i> (Mathew, 2014)	37
Gambar 15	Fiber sensor (a) dengan double core dan (b) fiber bragg grating.	38
Gambar 16	Lilitan fiber sensor pada silinder	40
Gambar 17	Contoh cetakan resin dengan besi berulir yang telah dibuat	41
Gambar 18	(a) Pompa udara dan tabung (b) Proses memasukkan <i>rubber silicone</i> dengan pompa udara	42
Gambar 19	Konfigurasi lilitan fiber optic dalam rubber pad	44

Gambar 20	Cetakan untuk menanam silinder berulir dengan <i>rubber silicone</i>	44
Gambar 21	Grafik transmitansi <i>fiber sensor</i> ketika diberi beban statis	46
Gambar 22	Set up simulasi weigh in motion	47
Gambar 23	Cetakan resin dan besi berulir	48
Gambar 24	Cetakan silinder berulir	48
Gambar 25	Silinder berulir	49
Gambar 26	<i>Fiber sensor</i>	49
Gambar 27	Tempat <i>fiber sensor</i>	50
Gambar 28	(a) <i>Fiber sensor</i> sebelum dilakukan tekanan, (b) <i>Fiber sensor</i> setelah dilakukan tekanan	50
Gambar 29	Pergeseran <i>fiber sensor</i>	51
Gambar 30	Grafik pergeseran <i>fiber sensor</i> terhadap transmitansi	51
Gambar 31	Loss cahaya pada lekukan serat optic	52
Gambar 32	Daerah normal dan kritis pada lilitan serat optik saat ada penekanan	53
Gambar 33	Penjalaran cahaya di dalam serat optik terlilit (a) Sebelum ditekan, (b) saat ditekan	53
Gambar 34	Rangkaian Detektor Cahaya	54
Gambar 35	Hasil Pengujian LDR	55
Gambar 36	Rangkaian ADC arduino	56
Gambar 37	Hasil Pengujian ADC Arduino	59
Gambar 38	Tampilan Program <i>Weigh In Motion Data Acquisition</i>	60
Gambar 39	Tampilan Program <i>photogate velocitometer</i>	61
Gambar 40	Mobil mainan sebagai beban berjalan	63
Gambar 41	Grafik waktu dengan transmitansi ketika <i>fiber sensor</i> dilewati beban berjalan	63
Gambar 42	Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian depan	65
Gambar 43	Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian tengah	66

Gambar 44	Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian belakang	67
Gambar 45	Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban tidak menentu.....	68
Gambar 46	Grafik gabungan posisi variasi beban.....	70
Gambar 47	Ilustrasi distribusi gaya pada beban berjalan.....	71
Gambar 48	Grafik <i>fiber sensor</i> ketika dilewati beban berjalan (a) kelajuan 0,24 m/s (b) kelajuan 0,6 m/s	72
Gambar 49	Contoh grafik sensor WIM ketika dilewati beban berjalan (Batenko <i>et al</i> , 2011).....	73
Gambar 50	Grafik tinjauan roda belakang transmitansi <i>fiber sensor</i> yang dilewati beban berjalan dengan kelajuan bervariasi.....	73
Gambar 51	Grafik tinjauan roda depan transmitansi <i>fiber sensor</i> yang dilewati beban berjalan dengan kelajuan bervariasi	74
Gambar 52	Grafik Beban vs kedalaman lembah dengan dua kelajuan berbeda.....	75
Gambar 53	<i>Rubber silicone</i> yang dipandang sebagai deretan pegas	76
Gambar 54	Pegas pada saat diberi gaya.....	76

1. PENDAHULUAN

Kerusakan prematur jalan di Indonesia merupakan masalah yang hingga kini belum bisa diselesaikan. Mengingat arti pentingnya infrastruktur jalan bagi pengembangan ekonomi nasional, kerusakan jalan yang terus menerus akan mempunyai dampak yang sangat tidak baik bagi pengembangan perekonomian nasional. Distribusi produk dan jasa antar daerah menjadi sangat terganggu. Beberapa produk mungkin akan rusak di jalan, tak terkirim, atau terkirim namun komponen biaya transportasi menjadi naik. Hal demikian merupakan salah satu alasan menurunkannya daya saing Indonesia di mata internasional. *World Economic Forum (WEF)* bahkan menempatkan Indonesia di urutan ke 97 dari 131 negara dalam penyediaan infrastruktur transportasi.

Menyadari akan sangat pentingnya faktor infrastruktur dalam pengembangan ekonomi nasional, setiap tahun pemerintah selalu menggelontorkan dana yang sangat besar ke Kementerian Pekerjaan Umum (PU). Total proyek di Kementerian PU pada tahun 2014 tercatat ada 13.869 paket pekerjaan dengan nilai Rp.63,67 triliun. Dari jumlah ini, porsi anggaran untuk pemeliharaan jalan sangatlah besar. Sebagai gambaran, kementerian PU pada tahun 2014 telah mengalokasikan dana sebesar Rp1,2 triliun untuk pemeliharaan jalan nasional di Jawa Timur sepanjang 2.000 km, Rp 2,1 triliun untuk jalan nasional di Jawa Tengah sepanjang 1.200 km dan RP 400 miliar untuk jalan nasional di Yogyakarta sepanjang 369 km. Dana pemeliharaan jalan ini tentunya akan lebih besar bila belanja Pemda untuk pemeliharaan jalan provinsi dan kelas di bawahnya dimasukkan dalam hitungan. Hal yang menyedihkan adalah jalan-jalan kita setiap tahun selalu rusak dan karenanya pemerintah harus selalu mengalokasikan dana pemeliharaan jalan tahunan yang sangat besar.

Ada banyak faktor yang menyebabkan mengapa jalan-jalan di Indonesia cepat rusak. Dari faktor-faktor ini, kelebihan beban kendaraan dan kurang baiknya konstruksi jalan merupakan faktor terpenting penyebab terjadinya

kerusakan jalan. Seperti yang disampaikan oleh Menteri PU (Dr. Ir Joko Kirmanto, Dipl.HE), jalan nasional yang kekuatannya didesain hanya untuk dilewati kendaraan dengan bobot sekitar 10 -12 ton ternyata banyak dilewati oleh kendaraan dengan bobot 20 – 30 ton.

Kontrol terhadap beban kendaraan sebenarnya telah lama dilakukan oleh pemerintah yaitu dengan telah dibangunnya beberapa jembatan timbang. Masalahnya adalah jembatan timbang yang seperti yang telah dibangun pemerintah berharga sangat mahal, membutuhkan lahan khusus sebagai stasiun timbang, menambah waktu perjalanan dan rawan KKN. Masalah harga dan kebutuhan lahan ini menyebabkan pengadaan jembatan timbang mempunyai jumlah yang terbatas dan hanya untuk jalan-jalan besar dimana lahan untuk penempatan jembatan timbang tersedia. Data hasil penimbangan yang hanya dapat dilihat di stasiun timbangan menjadikan tempat ini rawan terhadap KKN. Awak kendaraan dengan beban berlebih akan membayar sejumlah uang petugas jaga agar tetap bisa kembali lewat di jalan dan akibatnya jalan menjadi cepat rusak.

Terbongkarnya praktek KKN di jembatan timbang oleh Gubernur Jawa Tengah Drs Ganjar Pranowo di awal tahun 2014 ini telah menyadarkan kita bahwa jembatan timbang yang sekarang telah ada ternyata belum dimanfaatkan dengan baik. Karena posisinya yang biasanya sedikit terpencil, pengawasan terhadap kegiatan di jembatan timbang menjadi sulit dilakukan. Kelemahan jembatan timbang konvensional seperti pada contoh di atas telah lama menjadi dorongan bagi para peneliti untuk membuat alat penimbang kendaraan dengan cost rendah yang tidak mengharuskan kendaraan yang ditimbang berbelok dan berhenti di stasiun penimbangan. Ini merupakan konsep dari penimbangan dalam keadaan bergerak (*weigh in motion/WIM*).

Penimbangan bobot kendaraan selain untuk kepentingan *law enforcement* terhadap pelanggar juga sangat diperlukan sebagai input dalam perencanaan perkerasan jalan. Dengan data bobot kendaraan yang akurat akan menghasilkan perencanaan perkerasan jalan yang lebih baik.

Konsep tentang WIM dalam bentuknya yang sederhana pertama kali diperkenalkan pada tahun 1982 di Canada. Sejak saat itu berbagai penelitian pengembangan terus dilakukan. Ada empat jenis pokok sensor WIM yang hingga kini telah dikembangkan, yaitu load cell [Rajamani, 2013; Montellano, 2014; US Patent No. 8,736,458 B2; US Patent Number: 5,090,493], bending plate [Jacob and Beaumelle, 2010; Patent NO.: US 8,080,742 B2], piezoelectric sensor [Hang, dkk, 2013; Patent Publication No. WO2012038955 A1], dan fiber optic [Xu, dkk, 2013; US Patent Publication No: US2011/0127090 A1; Pub No. WO2006004419 A1].

Dari empat jenis sensor di atas, fiber sensor merupakan jenis sensor WIM termuda. Namun demikian, sensor ini paling banyak menarik perhatian, salah satu alasannya adalah sensor jenis ini bekerja atas dasar adanya perubahan sifat cahaya (bukan arus listrik) yang merambat dalam bahan dielectric ketika adanya perubahan beban padanya. Akibat dari cara kerja ini adalah sensor fiber optik tahan terhadap interferensi gelombang elektromagnetik, memiliki sensitivitas tinggi, dan tahan terhadap lingkungan yang berair maupun korosif.

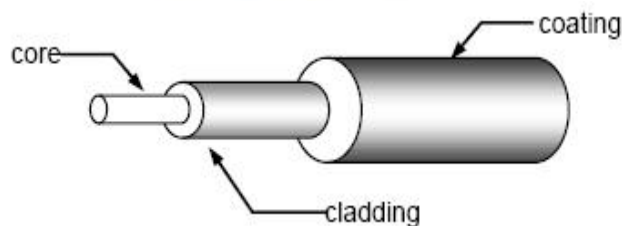
Kelebihan sensor optic untuk WIM dibandingkan dengan sensor jenis lain telah mendorong pengembangan sensor optic ini berjalan dengan sangat cepat. Berdasarkan prinsip kerjanya, sensor serat optik dapat diklasifikasikan berdasarkan modulasi intensitas, panjang gelombang, polaritas dan fase [Yuan, dkk., 2005; Malla, dkk., 2008]. Dari sensor-sensor di atas, sensor fiber optic untuk WIM yang bekerja atas dasar perubahan fase merupakan sensor yang paling banyak dipakai. Termasuk dalam kelompok sensor fiber optik jenis ini adalah *interferometric fibre* [Peters and Inaudi, 2014] dan *fibre bragg gratin* [Li, dkk, 2009]. Yang menjadi masalah dengan sensor ini adalah sensor-sensor jenis ini dibuat dengan bahan fiber optic berjenis khusus (dengan *grating*) dan piranti pengolahan data yang complicated. Harga dari sensor jenis ini karenanya sangat mahal.

Dalam penelitian ini, *fiber sensor* yang diharapkan dapat dibuat dengan harga murah akan difabrikasi. Fiber sensor akan dibuat dengan prinsip kerja

modulasi intensitas cahaya. Fiber optik dililitkan pada silinder berulir dan kemudian disandwich dalam hard rubber. Intensitas cahaya akan berubah ketika beban diberikan pada sensor [Marzuki, dkk., 2014].

2. PRINSIP DAN TEORI DASAR FIBER OPTIK SEBAGAI SENSOR

Serat optik adalah saluran transmisi yang terbuat dari kaca atau plastik yang digunakan untuk mentransmisikan sinyal cahaya dari suatu tempat ke tempat lain. Cahaya yang ada di dalam serat optik sulit keluar karena cahaya dalam serat optik terpancang-pancang secara sempurna dalam material inti serat optik yang biasa disebut *core*. Sumber cahaya yang digunakan adalah laser karena laser mempunyai spektrum pancar yang sangat sempit. Serat optik tersusun atas dua bagian utama: *cladding* dan *core*. *Cladding* adalah selubung dari *core*. *Cladding* yang mempunyai indeks bias lebih rendah dari *core* akan memantulkan kembali cahaya yang mengarah keluar (dalam batas-batas sudut pantul tertentu). Efisiensi dari penyaluran cahaya dalam serat optik ditentukan oleh kemurnian dari bahan penyusun gelas. Semakin murni bahan gelas, semakin sedikit cahaya yang bocor.



Gambar 1 Bagian-bagian serat optik (Rambe, 2003).

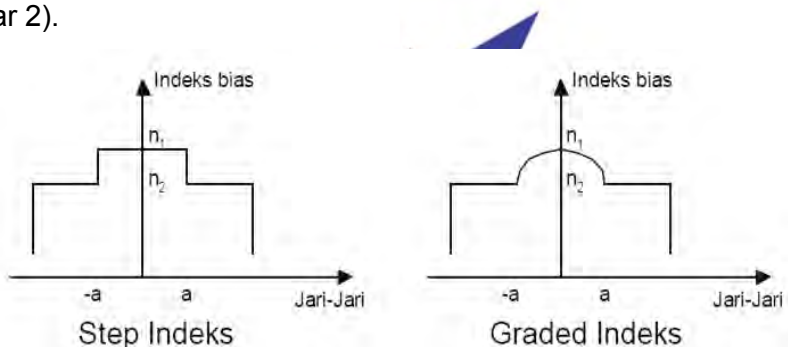
Berbeda dengan kawat tembaga yang menyalurkan arus listrik, serat optik bekerja untuk mentransmisikan cahaya dalam lingkup medium berbentuk silinder kecil dari satu tempat ke tempat yang lain. Cahaya dalam serat optik berjalan melalui inti (*core*) dengan cara memantul dari kulit (*cladding*), karena kulit sama sekali tidak menyerap cahaya dari inti, maka proses

pemantulan ini disebut pemantulan sempurna. Pada peristiwa pemantulan sempurna tidak ada cahaya yang dibiaskan.

Ada dua jenis pokok fiber optik. Jika perbedaan indeks bias inti (n_1) dan kulit (n_2) dibuat drastis, maka serat optik demikian disebut serat optik *step indeks* (SI). Selisih antara indeks bias kulit dan inti, (disimbolkan dengan Δ), untuk serat optik demikian besarnya adalah:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

dimana, n_1 : indeks bias inti (*core*) dan n_2 : indeks bias kulit (*cladding*). Pada jenis yang kedua, perbedaan indeks bias antara inti dan kulit terjadi secara gradual. Serat optik yang demikian disebut serat optik *Graded indeks* (GI) (Gambar 2).



Gambar 2 Grafik *Step indeks* (kiri) dan Grafik *Graded indeks* (kanan)
(Endra, 2007).

Untuk perlindungan tambahan, kulit dibungkus oleh lapisan tambahan (terbuat dari plastik jenis tertentu) yaitu mantel atau *coating* untuk melindungi serat optik dari kerusakan fisik. *Coating* bersifat elastis, mencegah abrasi dan mencegah *loss* hamburan akibat *microbends* (Endra, 2007).

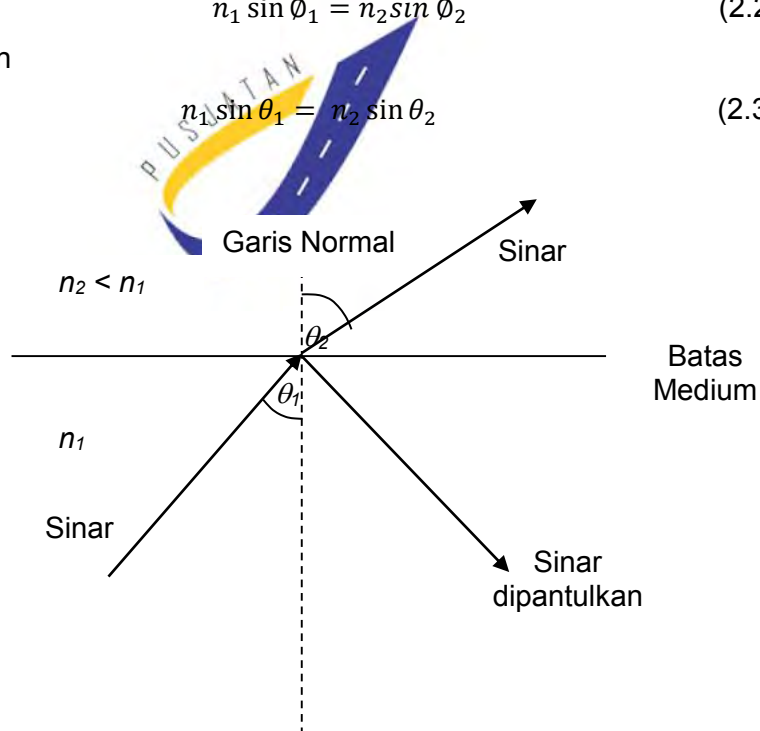
2.1 Pembiasan dan Pemantulan Cahaya

Konsep pembiasan dan pemantulan cahaya dapat dijelaskan mengikuti tingkah laku berkas-berkas cahaya yang merambat di dalam medium dielektrik. Ketika berkas cahaya melewati batas dua medium yang berbeda, maka sebagian berkas cahaya dipantulkan masuk pada medium pertama dan sebagian lagi dibiaskan masuk pada material kedua. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, di mana $n_2 < n_1$. Pembiasan berkas cahaya pada permukaan medium yang sama merupakan akibat dari perbedaan laju kecepatan cahaya pada dua medium yang mempunyai indeks bias berbeda. Hubungan tersebut dapat dijelaskan menggunakan hukum Snellius seperti terlihat pada persamaan 2.2 dan 2.3 (Kaiser, 2000).

ekuivalen dengan

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.2)$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$



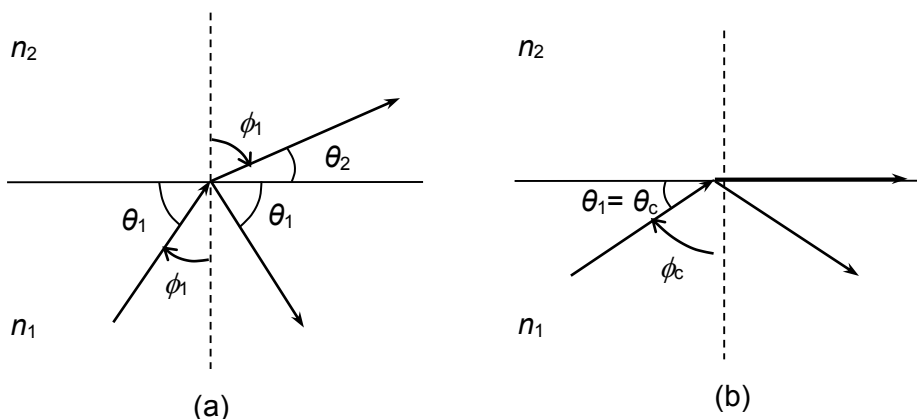
Gambar 3 Pembiasan dan pemantulan berkas cahaya pada batas mediu
(Keiser, 2000)

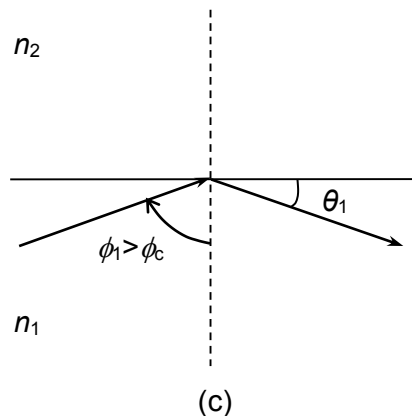
dimana, n_1 adalah Indeks bias medium pertama, n_2 adalah Indeks bias medium kedua, ϕ adalah Sudut datang (sudut antara sinar datang dan garis normal), ϕ_2 adalah Sudut bias (sudut antara sinar bias dan garis normal), θ_1 adalah sudut antara sinar datang dan batas medium, θ_2 adalah Sudut antara sinar bias dan batas medium, dan θ_3 adalah sudut antara sinar pantul dan batas medium.

Gambar 3 menunjukkan dua medium berindek bias n_1 dan n_2 di mana $n_2 < n_1$ yang dilewati oleh seberkas cahaya. Sinar datang dari medium pertama berindek bias n_1 menuju medium kedua dengan indek bias n_2 . Tampak dalam gambar bahwa sinar datang sebagian dipantulkan kembali dengan sudut yang sama besar dengan sudut sinar datang ($\theta_3 = \theta_1$) dan sebagian dibiaskan menjauhi garis normal menuju medium kedua dengan sudut ϕ_2 .

Pemantulan cahaya dari medium dengan kerapatan tinggi ke medium dengan kerapatan rendah ada kemungkinan cahaya akan dipantulkan secara optis ke dalam medium berindek bias tinggi tersebut, meskipun sebagian ada yang dibiaskan menuju medium berindek bias rendah. Proses ini dinamakan pemantulan internal. Pada proses ini semua cahaya dipantulkan kembali ke dalam core (n_1) dan tidak ada cahaya yang dibiaskan ke cladding (n_2).

Proses pemantulan internal pada dua medium yang berbeda terlihat pada Gambar 4





Gambar 4 (a) Pemantulan dan pembiasan, (b) Sudut kritis, (c) Pemantulan internal total (Keiser, 2000).

Gambar 4(a) menunjukkan peristiwa pemantulan dan pembiasan cahaya, terjadi jika sudut datang ϕ_1 diperbesar, maka sinar bias akan semakin menjauhi normal. Pada Gambar 4(b) menunjukkan terbentuknya sudut kritis, terjadi ketika sinar bias sejajar dengan bidang batas medium (sudut ϕ_2 mencapai 90°), maka sudut ϕ_1 tersebut dinamakan sudut kritis. Sudut kritis adalah sudut sinar datang ϕ_1 terhadap garis normal dimana sinar datang tersebut akan merambat dengan sudut $\phi_2 = 90^\circ$ (sejajar bidang batas medium). Sehingga berdasarkan persamaan 2.2 diperoleh persamaan 2.4

$$\begin{aligned}
 n_1 \sin \phi_1 &= n_2 \sin \phi_2 \\
 n_1 \sin \phi_c &= n_2 \sin \phi_2 \\
 n_1 \sin \phi_c &= n_2 \sin 90^\circ \\
 n_1 \sin \phi_c &= n_2 \cdot 1 \\
 \sin \phi_c &= \frac{n_2}{n_1}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Gambar 4(c) dinamakan pemantulan internal total. Apabila sudut sinar datang terus diperbesar melampaui besarnya sudut kritis ($\phi_1 > \phi_c$), maka sinar datang akan dipantulkan seluruhnya. Peristiwa pemantulan internal

total inilah yang diterapkan sebagai pemandu gelombang optik yang bertujuan untuk mentransmisikan gelombang cahaya melalui medium optik (Keiser, 2000).

2.2 Sudut Penerimaan dan Tingkat Numeris

Geometri transmisi cahaya ke dalam serat optik terlihat pada Gambar 5 yang menunjukkan sinar meridional dengan sudut kritis θ_c pada bidang batas inti kulit di dalam serat. Sinar masuk inti dengan sudut ϕ_m terhadap sumbu serat optik dan dibiaskan ke bidang batas udara-inti sebelum ditransmisikan ke bidang batas inti-kulit pada sudut kritis, sehingga setiap sinar yang masuk inti dengan sudut lebih besar dari sudut ϕ_m akan ditransmisikan ke bidang batas inti-kulit dengan sudut lebih kecil dari sudut θ_c dan tidak mengalami pantulan internal total. Agar sinar yang ditransmisikan mengalami pemantulan internal total di dalam inti, maka sinar yang datang pada inti harus berada di dalam kerucut penerimaan yang ditentukan oleh sudut separuh konis:

$$\phi_m = \arcsin (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

dimana, ϕ_m : sudut datang yang masuk ke inti serat

θ_c : sudut kritis

n_1 : indeks bias medium pertama

n_2 : indeks bias medium kedua

Hubungan antara sudut penerimaan dan indeks bias ketiga media (inti, kulit, udara) dinyatakan dengan tingkat numeris (*numerical aperture*, NA). Tingkat numeris 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 mengkopling sinar-sinar ke dalam serat (Pedrotti, 1993).

$$NA = n \sin \phi_m = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

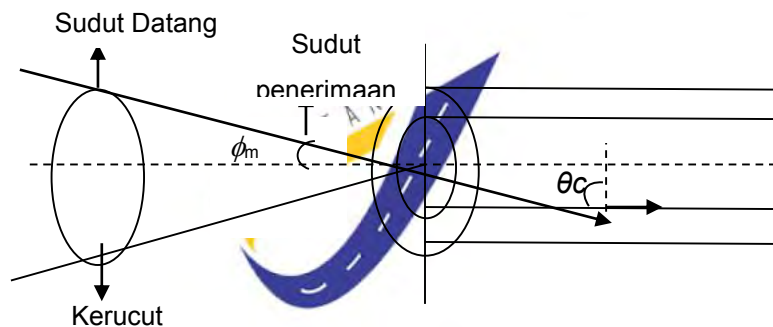
dimana, ϕ_m : sudut datang yang masuk ke inti serat

θ_c : sudut kritis

NA : tingkat numeris

n_1 : indeks bias medium pertama

n_2 : indeks bias medium kedua



Gambar 5 Kerucut penerimaan yang diperoleh dengan memutar sudut penerimaan terhadap sumbu serat optik (Rambe, 2003).

2.3 Teori Mode

Mode adalah konfigurasi perambatan cahaya di dalam serat optik yang memberikan distribusi medan listrik dalam *transverse* yang stabil (tidak berubah sepanjang perambatan cahaya dalam arah sumbu) sehingga cahaya dapat dipandu di dalam serat optik. Kumpulan gelombang-elektromagnetik yang terpandu di dalam serat optik disebut mode-mode.

Teori mode memandang cahaya sebagai sebuah gelombang datar yang dinyatakan dalam arah, amplitudo dan panjang gelombang dari perambatannya. Gelombang datar adalah sebuah gelombang yang permukaannya (dimana pada permukaan ini fase-nya konstan, disebut muka gelombang) adalah bidang datar tak berhingga tegak lurus dengan arah perambatan. Hubungan panjang gelombang, kecepatan rambat dan frekuensi gelombang dalam suatu medium :

$$\lambda = \frac{c_o}{nf} \quad (2.7)$$

Dengan :

λ = panjang gelombang

c_o = kecepatan cahaya dalam ruang hampa = $3 \cdot 10^8$ m/s

n = indeks bias medium

f = frekuensi cahaya

Banyaknya mode yang dihasilkan dalam serat optik multimode dapat ditulis dalam persamaan:

$$M_{FO} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D_f NA}{\lambda} \right)^2 \quad (2.8)$$

Dengan M_{FO} : jumlah mode yang dihasilkan

D_f : diameter Core

NA : tingkat numeris

λ : panjang gelombang serat optik

2.4 Tipe Serat Optik

Berdasarkan faktor struktur dan properti sistem transmisi yang sekarang banyak diimplementasikan, teknologi serat optik terbagi atas dua kategori umum, yaitu :

2.4.1 Serat optik *single mode*

Serat optik *single mode* adalah sebuah sistem transmisi data berwujud cahaya yang hanya terdapat satu buah indeks sinar tanpa terpantul yang merambat sepanjang media tersebut dibentang. Satu buah sinar yang tidak terpantul didalam media optik tersebut membuat teknologi serat ini hanya sedikit mengalami gangguan dalam perjalanannya. Itu pun lebih banyak gangguan yang berasal dari luar maupun gangguan fisik saja.

Single mode dilihat dari segi strukturnya merupakan teknologi serat optik yang bekerja menggunakan inti (*core*) serat yang berukuran sangat kecil dan diameternya bekisar 8 sampai 10 μm . *Single mode* dapat membawa data dan *bandwidth* yang lebih besar dibandingkan dengan *multimode* serat optik, tetapi teknologi ini membutuhkan sumber cahaya dengan lebar *spectral* yang sangat kecil. *Single mode* dapat membawa data dengan lebih cepat dan 50 kali lebih jauh dibandingkan dengan *multi mode*. Inti serat yang digunakan lebih kecil dari *multi mode* dengan demikian gangguan-gangguan didalamnya akibat *distorsi* dan *overlapping* pulsa sinar menjadi berkurang. Inilah yang menyebabkan *single mode* serat optik menjadi lebih stabil, cepat dan jauh jangkauannya (Yuhardin,2006).



Gambar 6 Serat Optik *Single Mode* (Saleh, B.E.A, 2007)

2.4.2 Multi mode serat optik

Multi mode serat optik merupakan teknologi transmisi data melalui media serat optik dengan menggunakan beberapa buah indeks cahaya di dalamnya. Cahaya yang dibawanya tersebut akan mengalami pemantulan berkali-kali hingga sampai ditujuan akhirnya. Banyaknya *mode* yang dapat dihasilkan oleh teknologi ini bergantung dari besar kecilnya ukuran inti serat dan sebuah parameter yang diberi nama *Numerical Aparture (NA)* (Yuhardin,2006).



Gambar 7 Serat Optik *Single Mode* (Saleh, B.E.A, 2007)

2.5 Sumber Optik

Sumber optik pada sistem transmisi serat optik berfungsi sebagai pengubah besaran sinyal listrik / elektris menjadi sinyal cahaya optik (E / O Converter). Pemilihan dari sumber cahaya yang akan digunakan bergantung pada bit rate yang akan ditransmisikan dan pertimbangan ekonomi (harga dari sumber cahaya). Karakteristik dari sumber optik antara lain:

- Emisi cahaya terjadi pada daerah 850 nm – 1.550 nm.
- Kopling daya radiasi keserat optik maksimal.
- Dapat dimodulasi langsung pada frekuensi tinggi.
- Mempunyai lebar spektrum yang sempit.
- Ukuran atau dimensi kecil.
- Mempunyai umur kerja dengan jangka waktu relatif lama.

Sumber optik dapat dibedakan menjadi dua yaitu menggunakan LED dan menggunakan laser.

a. LED

LED merupakan diode semikonduktor yang memancarkan cahaya karena mekanisme emisi spontan. Cahaya yang dipancarkan LED bersifat tidak koheren yang menyebabkan dispersi chromatic sehingga LED hanya cocok untuk transmisi data dengan bit rate rendah sampai sedang. Memiliki lebar spektral 30-50 nm pada panjang gelombang 850 nm dan 50-150 nm pada panjang gelombang 1.300 nm.

b. Dioda LASER (*Light Amplification by Stimulated Emmission of Radiation*)

Merupakan diode semikonduktor yang memancarkan cahaya karena mekanisme emisi terstimulasi. Cahaya yang dipancarkan oleh diode Laser bersifat koheren. Diterapkan untuk transmisi data dengan bit rate tinggi. Kinerja (output daya optik, panjang gelombang, umur) dari diode Laser sangat dipengaruhi oleh temperatur tinggi.

2.6 Rugi-Rugi Serat Optik

Rugi-rugi serat optik atau biasa disebut atenuasi adalah besarnya redaman atau pelemahan energi cahaya pada serat optik dinyatakan dalam persamaan 2.9

$$dB = 10 \log \frac{P_i}{P_o} \quad (2.9)$$

Dengan:

dB = rugi-rugi serat optik

P_i = daya optik yang ditransmisikan (masuk) ke dalam serat optik

P_o = daya optik yang keluar dari serat optik

Atenuasi atau redaman disebabkan oleh tiga faktor utama yaitu absorpsi, hamburan (*scattering*), dan pelengkungan (*bending losses*). Atenuasi menyebabkan pelemahan energi sehingga amplitudo gelombang yang sampai pada penerima menjadi lebih kecil daripada amplitudo yang dikirimkan dari sumber cahaya (Senior J.M,1992)

2.6.1 Absorpsi

Absorpsi merupakan sifat alami suatu gelas sehingga menyebabkan hilangnya suatu daya optik yang ditransmisikan sebagai panas dalam pandu gelombang. Absorpsi cahaya dapat dilakukan dengan cara:

a. Absorpsi Intrinsik

Absorpsi intrinsik disebabkan oleh interaksi dengan satu atau lebih komponen gelas. Pada daerah-daerah tertentu gelas dapat mengabsorpsi sebagian besar cahaya seperti pada daerah ultraviolet yang disebabkan oleh adanya gerakan elektron yang kuat. Demikian pula untuk daerah inframerah, terjadi absorpsi yang besar disebabkan adanya getaran ikatan kimia. Oleh karena itu, sebaiknya penggunaan fiber optik harus menjauhi daerah ultraviolet dan inframerah.

b. Absorpsi Ekstrinsik

Absorpsi Ekstrinsik disebabkan oleh ketidakmurnian dalam gelas, absorpsi transmisi ion-ion logam dan absorpsi ion OH^- . Ketidakmurnian dalam gelas (impurity bahan campuran) didalam serat optik terjadi pada saat pembuatan serat, absorpsi transmisi ion-ion logam disebabkan oleh adanya ion-ion logam transisi besi (Fe^{3+}), tembaga (Cu^{2+}), Timbal (Pb), Nikel (Ni), dan transmisi ion OH^- . ion OH^- ini ternyata memberikan sumbangan absorpsi yang cukup besar. Semakin lama usia suatu fiber maka bisa diduga semakin banyak ion OH didalamnya yang menyebabkan kualitas fiber menurun.

2.6.2 Hamburan

Seberkas cahaya yang melalui suatu gelas dengan variasi indeks bias yang melalui gelas, sebagian energinya akan hilang dihamburkan oleh benda-benda kecil yang ada didalam gelas. Hamburan yang disebabkan oleh tumbukan cahaya dengan partikel dinamakan hamburan Reyleigh. Besarnya hamburan Reyleigh ini berbanding terbalik dengan pangkat empat panjang gelombang cahaya. Rugi-rugi hamburan Reyleigh dinyatakan dalam persamaan 2.10

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} n^3 p^2 \beta_c K T_f \quad (2.10)$$

Dengan

γ_R = koefisien hamburan Reyleigh

λ = panjang gelombang optik

n = indeks bias medium

p = rata-rata koefisien photoelastik

β_c = kompreibilitas isothermal pada temperature fiktif

K = konstanta Boltzman

T_f = temperatur fiktif

Temperatur fiktif didefinisikan sebagai temperatur dimana gelas dapat mencapai dalam kondisi thermal (Senior JM, 1992). Sehingga dapat disimpulkan dengan panjang gelombang kecil, maka hamburan Reyleigh akan besar (Darmansyah, 1994)

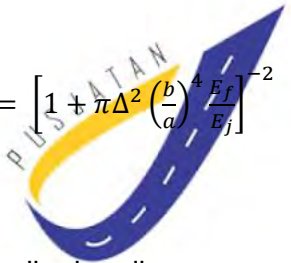
2.6.3 Rugi-rugi Pembengkokan (Bending Losses)

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. Ada dua jenis pembengkokan yang menyebabkan rugi-rugi dalam fiber, yaitu pembengkokan-mikro (*microbending*) dan pembengkokan-makro (*macrobending*). Keduanya timbul karena alasan yang berbeda, dan menimbulkan rugi-rugi dengan dua macam mekanisme yang berbeda pula.

a. Mikrobending

Terjadinya ketidakrataan pada permukaan batas antara inti selubung secara acak atau random pada serat optik karena proses lekukan kecil karena lekukan kecil (Keiser, 2000). Perumusan serat dengan pembungkus direduksi dari serat tanpa pembungkus dengan faktor rugi-rugi mikrobending dituliskan melalui persamaan 2.11



$$F(\alpha M) = \left[1 + \pi \Delta^2 \left(\frac{b}{a} \right)^4 \frac{E_f}{E_j} \right]^{-2} \quad (2.11)$$

Dengan

$F(\alpha M)$ = faktor rugi-rugi mikrobending

a = jari-jari inti

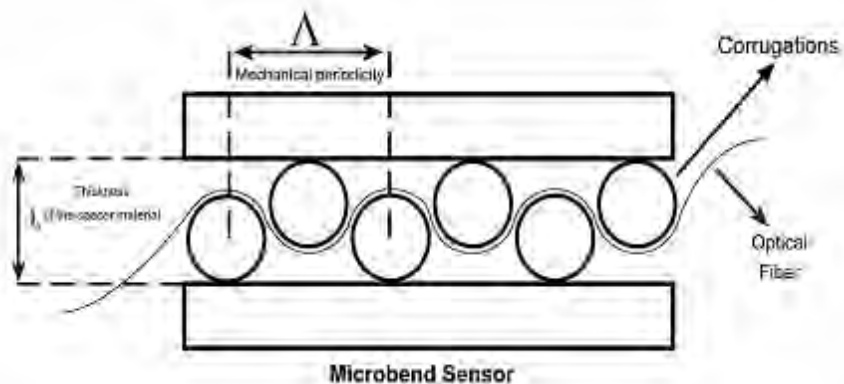
b = jari-jari pembungkus/ selubung

E_f = modulus young inti

E_j = modulus young selubung/ pembungkus



Gambar 8 Proses terjadinya mikrobending (Bailey, 2003)



Gambar 9 Proses penelitian mikrobending (Efendioglu, 2009)

Intensitas modulasi disebabkan oleh microbending dalam serat multimode dapat dimanfaatkan sebagai mekanisme transduksi untuk mendeteksi perubahan lingkungan. Perubahan transmisi cahaya, ΔT dinotasikan dengan persamaan 2.12.

$$\Delta T = \left(\frac{\Delta T}{\Delta X} \right) \Delta F \left(k + \frac{AY}{l} \right) \quad (2.12)$$

Dengan

ΔT = perubahan transmisi cahaya

$\frac{\Delta T}{\Delta X}$ = sensitivitas

ΔF = gaya

k = konstanta

A = Luas

Y = Modulus Young

l = ketebalan

b. Makrobending

Rugi-rugi makrobending terjadi ketika sinar atau cahaya melalui serat optik yang dilengkungkan dengan jari-jari lebar dibandingkan dengan diameter serat. Sebagai contoh kabel serat optik membelok dipojok.

Dari Gambar 10 dapat terlihat sebagaimana prinsip pemantulan dan pembiasan cahaya, jika terjadi kelengkungan dengan sinar datang lebih kecil daripada sudut kritis $\theta < \theta_c$ maka mode sinar tidak dipantulkan secara sempurna melainkan lebih banyak dibiaskan keluar dari inti serat optik. Sedangkan apabila $\theta > \theta_c$ maka sebagian besar mode sinar dipantulkan kembali masuk kedalam selubung seperti prinsip pemantulan internal. Kondisi ini mengakibatkan perubahan mode. Jumlah radiasi optik dari lengkungan serat tergantung kekuatan medan dan kelengkungan jari-jari R . Untuk memperkecil perubahan moda perlu diperhatikan nilai mode efektif yaitu nilai dimana sinar cahaya akan tetap dipandu oleh kelengkungan kabel serat pada jari-jari a . Hal ini dituliskan melalui persamaan 2.13.

$$N_{eff} = N_{\infty} \left\{ 1 - \frac{\alpha+2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2kR} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad (2.13)$$

Dengan

N_{eff} = nilai moda efektif

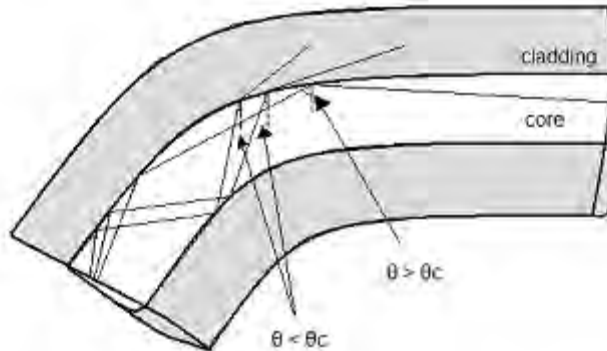
α = jumlah total mode lingkungan

Δ = perbedaan indeks bias

R = jari-jari kelengkungan

k = konstata perambatan gelombang

Gambaran fisis mode gelombang yang merambat pada bengkokan serat optik adalah sebagai berikut:



Gambar 10 Proses terjadinya makrobending (Martins, 2006)

Rugi-rugi radiasi pada sepanjang lintasan bengkokan serat optik berkaitan dengan energi yang hilang akibat bengkokan karena melebihi kecepatan cahaya didalam pembungkus menyebabkan energi cahaya menyebar dari serabut. Parameter untuk mengamati perubahan drastis kerugian bengkokan serat optik dapat diamati melalui perubahan jari-jari kelengkungan. Rugi-rugi bengkokan bernilai besar jika kelengkungan mendekati jari-jari kritis kelengkungan . Jari-jari kritis kelengkungan (R_c) pada serat optik *multimode* bisa diperkirakan menggunakan persamaan 2.14.

$$R_c \cong \frac{3n_1^2\lambda}{4\pi(n_1^2-n_2^2)} \quad (2.14)$$

Dari persamaan 2.14 bahwa kerugian mikrobending dapat dikurangi dengan cara:

- i. Perancangan serabut dengan perbedaan indeks bias yang relatif besar.

- ii. Mengoperasikan pada panjang gelombang terpendek yang mencukupi.

Sedangkan jari-jari kritis kelengkungan untuk serat optik *single mode* dapat dirumuskan dengan persamaan 2.15.

$$R_{cs} = \frac{20\lambda}{(n_1 - n_2)} \left(2,748 - 0,996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \quad (2.15)$$

Dengan

λ_c = panjang gelombang cut off untuk serat optik *single mode*

Oleh karena itu, serat optik *single mode* dengan panjang gelombang dan indeks bias tertentu, ketika jari-jari bengkok dikurangi maka panjang gelombang menjadi lebih pendek (Senior, 1992)

2.6.4 Rugi-rugi Penyambungan

Rugi-rugi akibat penyambungan pada serat optik dapat terjadi di tiga titik sambungan yaitu sumber ke serat optik, serat optik ke serat optik sambungan, serat optik ke detektor. Selanjutnya rugi-rugi ke serat optik dan rugi-rugi serat optik ke detektor dinamakan rugi-rugi kopling. Sedangkan untuk sambungan serat optik ke serat optik dinamakan rugi-rugi penyambungan Splicing.

a. Rugi-rugi Kopling

Rugi-rugi kopling yaitu rugi-rugi pada proses pengkoplingan berkas gelombang dari transmitter kedalam serat optik dan antara serat optik dengan detektor. Tidak seluruh cahaya dari transmitter seluruhnya bisa dimasukkan kedalam serat optik, dan tidak seluruh cahaya dari serat optik bisa masuk ke detektor. Untuk mengurangi kerugian, dipakai konektor yang menjamin efisiensi coupling antara ujung-ujung serat optik.

Penggunaan konektor dalam penyambungan bisa menimbulkan rugi-rugi akibat adanya jarak/celah diantara ujung-ujung konektor.

Meskipun kecil, celah tersebut bisa mengakibatkan sinar yang datang dipantulkan kembali atau *backreflekted*. Selain itu rugi-rugi kopling bisa berupa keluarnya sebagian cahaya dari celah antar konektor ke serat optik.

b. Rugi-rugi Penyambungan Splicing

Rugi-rugi pada titik sambungan antara serat optik dengan serat optik lainnya dinamakan rugi-rugi penyambungan Splicing. Karena kecilnya ukuran serat optik, apabila terjadi sedikit ketidaktepatan dalam penyambungan maka akan terjadi ketidaktepatan penerimaan berkas cahaya yang diterima serat optik yang kedua dari serat optik yang pertama.

Dalam melakukan penyambungan serat optik, digunakan teknik Splicing. Teknik splicing dibuat dengan memanaskan kedua ujung serat dengan elektroda sehingga menjadi satu. Pada metode ini ujung serat optik harus diluruskan dan ditempelkan secara bersama. Teknik ini menghasilkan rugi-rugi splice yang sangat rendah (rata-rata 0,1 sampai 0,5 dB)

2.6.5 Dispersi

Dispersi adalah suatu fenomena di mana suatu pulsa cahaya yang datang akan mengalami pelebaran selama perambatannya di dalam serat optik. Dispersi yang terjadi pada serat optik secara garis besar ada dua yaitu dispersi mode dan dispersi kromatik.

a. Dispersi Modal/Mode

Dispersi ini terjadi karena perbedaan kelambatan perambatan cahaya diantara mode-mode dalam serat multimode. Mode-mode yang berbeda (pulsa dalam serat multimode) merambat sepanjang kanal pada sekumpulan kecepatan yang berbeda sehingga lebar pulsa output bergantung pada saat pengiriman dari mode-mode yang cepat dan lambat. Mekanisme dispersi ini membuat

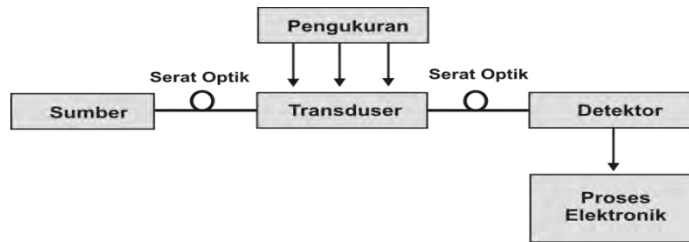
perbedaan yang mendasar pada semua dispersi untuk tiga tipe serat. Setiap sumber optik tidak memancarkan satu frekuensi yang merupakan lebar pita frekuensi serta perbedaan kelambatan propagasi di antara komponen spektrum frekuensi yang berbeda dari sinyal cahaya yang dikirimkan. Banyaknya lintasan cahaya yang merambat melalui serat pada bagian-bagian yang berbeda menyebabkan setiap bagian mempunyai panjang yang berbeda, karena itu setiap mode mempunyai waktu perambatan yang berbeda. Dispersi ini merupakan penyebab utama pengaruh distorsi pada serat jenis *multi mode*.

b. Dispersi Kromatik/Intramodal

Dispersi ini terjadi dalam semua tipe serat optik dan hasil dari terbatasnya spektrum frekuensi dari sumber optik. Setiap sumber optik memancarkan satu frekuensi akan tetapi merupakan beberapa lebar pita frekuensi kemudian dalam perambatan terjadi perbedaan kelambatan di antara spektrum frekuensi yang berbeda. Hal ini menyebabkan pelebaran pulsa dalam setiap mode pengiriman sinyal.

2.7 Sensor Serat Optik

Struktur umum dari system serat optik sebagai sensor ditunjukkan pada Gambar 11 yang terdiri dari sumber cahaya (Laser, LED (*Light Emited Diodes*), Laser *Diodes*), serat optik, elemen sensing atau elemen *modulator*, *detector* cahaya, dan proses elektronik (*osiloskop*, *analyzer spectrum* cahaya). Banyak keuntungan dirasakan ketika serat optik digunakan sebagai sensor, sehingga penelitian semakin sering dikembangkan untuk meningkatkan jenis dari sensor tersebut.



Gambar 11 Komponen dasar dari sistem sensor serat optik.

Sensor Serat optik dapat dikelompokkan berdasarkan dua kategori (Fidanboyu, 2009), yaitu:

2.7.1 Sensor Serat optik Berdasarkan lokasi sensor

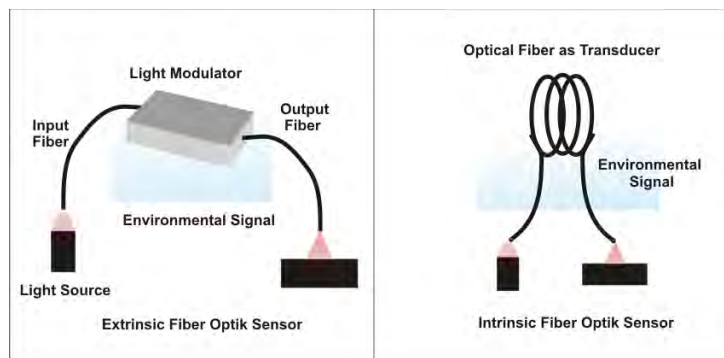
Pembagian jenis sensor berdasarkan pembagian lokasi sensor dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu :

a. *Intrinsik* sensor

Serat optik sebagai sensor *intrinsik* terjadi ketika satu atau lebih sifat fisik dari yang dialami serat berubah. Gangguan yang terjadi menyebabkan perubahan karakteristik cahaya yang terjadi di dalam serat.

b. *Ekstrinsik* sensor

Sensor serat pada jenis ini biasa digunakan untuk membawa cahaya dari atau menuju alat optik *eksternal* dimana pengukuran diambil. Pada kasus ini, serat optik bekerja jika mendapat cahaya dari daerah pengukuran.



Gambar 12 Jenis sensor serat optik ekstrinsik dan intrinsik.

2.7.2 Sensor Serat optik Berdasarkan prinsip operasi sensor

Berdasarkan prinsip kerja dari proses modulasi atau demodulasi, sensor serat optik dapat diklasifikasikan berdasarkan intensitas, *phase*, frekuensi atau polarisasi sensor. Semua parameter merupakan subjek untuk merubah gangguan eksternal. Sehingga, dengan mendeteksi parameter tersebut dan perubahan yang terjadi, maka gangguan dari luar dapat diukur. Sensor Serat optik dapat dikelompokkan berdasarkan tiga klasifikasi, yaitu:

a. Sensor serat optik berdasarkan intensitas

Sensor Serat optik berdasarkan Intensitas dihubungkan dengan beberapa sinyal yang hilang. Alat ini dibuat dengan menggunakan perlengkapan untuk mengubah sesuatu besaran menjadi suatu besaran yang diukur bahwa *fiber* mengalami bending dan menyebabkan attenuasi sinyal. Cara lain untuk melakukan attenuasi pada sinyal yaitu dengan melakukan proses *absorpsi* atau *scattering*. Dengan mengamati perubahan intensitas, perubahan intensitas dapat terjadi akibat mikrobending serat optik. Pendeteksian mikro *bending* dapat menggunakan OTDR (*Optikal Time Domain Reflectometer*) sehingga dapat diketahui posisi terjadinya bending pada serat optik.

b. Sensor serat optik berdasarkan modulasi panjang gelombang

Sensor modulasi panjang gelombang menggunakan perubahan panjang gelombang atau cahaya untuk dideteksi. Contoh dari sensor modulasi panjang gelombang yaitu; *Sensor Fluorescens*, sensor benda hitam, dan *brag grating*.

c. Sensor Serat optik berdasarkan modulasi *phase*

Sensor ini menggunakan fasa yang berubah untuk mendeteksi cahaya. Perubahan fasa dideteksi secara interferensi dan metode yang digunakan untuk pendeteksian secara interferensi ini yaitu; *Mach-Zehnder*, *Michelson*, *Fabry- Perot*, *Sagnac*, *polarimetric*, and *grating interferometers* (widya, 2010).

2.8 Karakteristik Sensor Serat Optik Untuk Performansi Sensor

Untuk mengetahui kinerja atau performansi dari serat optik sebagai alat pengukuran pergeseran obyek dalam skala mikrometer, maka perlu dicari dan diketahui beberapa karakteristik sensor sebagai berikut:

a. Jangkauan sensor

Cara mendapatkan *jangkauan* sensor yaitu dengan melakukan pergeseran hingga tegangan keluaran detektor tidak mampu lagi mendeteksi perubahan yang terjadi. Jangkauan sensor merupakan nilai minimum hingga nilai maksimum dimana suatu sensor masih bisa bekerja.

b. Span

Span pada perancangan sensor serat optik untuk pergeseran mikro didapatkan dari pergeseran maksimum yang dikurangi dengan pergeseran minimum yang terjadi dalam orde mikrometer.

c. Resolusi pergeseran alat

Resolusi pergeseran alat merupakan nilai terkecil yang mampu dideteksi, dilihat berdasarkan grafik hasil penelitian, berkaitan dengan besar perubahan tegangan akibat perubahan jarak yang terjadi dan nilai yang diambil yaitu pergeseran terkecil yang dilakukan, dapat diperoleh berdasarkan persamaan hubungan antara jarak dan tegangan keluaran.

d. Sensitivitas

Pada penelitian sensor serat optik sebagai alat pengukuran pergeseran obyek dalam orde mikrometer maka *sensitivitas* dapat diketahui berdasarkan grafik dengan melihat gradient yang terdapat pada grafik dan ditinjau dari kemiringan yang terjadi, semakin besar nilai kemiringan maka semakin *sensitive* sensor serat optik sebagai pergeseran obyek (Widyana, 2010).

2.9 Perubahan Nilai Intensitas Cahaya Menjadi Tegangan

Konsep mengenai konversi cahaya menjadi arus terjadi pada *photodiode*. Cahaya dengan energi yang cukup, menghasilkan pasangan *elektron-hole* yang terjadi pada sambungan diode yang disebut sebagai "*Depletion Region*" atau sambungan P-N. Elektron bebas berjalan disepanjang daerah N, karena elektron merupakan muatan negatif, kemudian menuju kutub negatif. Demikian halnya *hole* yang bermuatan positif, berjalan disepanjang daerah P, dan menuju ke kutub positif.

Proses penghasilan energi listrik diawali dengan pemutusan ikatan elektron pada atom-atom yang tersusun dalam kristal ketika diberikan sejumlah energi (hf). Karena p dan n tersambung oleh *depletion region* maka akan terjadi difusi *hole* dari p menuju n dan difusi elektron dari n menuju p. Adanya perbedaan muatan pada daerah deplesi akan mengakibatkan munculnya medan listrik. Sambungan p-n menghasilkan medan listrik agar elektron dapat mengalir. Lepasnya pembawa muatan pada permukaan kristal mengakibatkan penambahan kuat medan listrik di daerah deplesi. Adanya kelebihan muatan mengakibatkan muatan tersebut bergerak karena adanya medan listrik pada daerah deplesi. Pada keadaan ini dihasilkan arus berupa arus *drift*, yaitu arus yang dihasilkan karena kemunculan medan listrik. Arus inilah yang kemudian dinamakan sebagai arus listrik (Iswanto, 2008). Arus yang dihasilkan yang melewati suatu hambatan tetap maka dapat diketahui nilai tegangan. Jika arus yang melewati besar maka tegangan yang dihasilkan bernilai besar, jika arus yang melewati kecil maka tegangan yang dihasilkan bernilai kecil.

2.10 Hukum Hooke

Suatu sistem yang menunjukkan gejala gerak harmonik sederhana adalah pada sistem pegas. Pada keadaan setimbang, pegas tidak mengerjakan gaya pada benda. Apabila pegas disimpangkan sejauh x dari kedudukan

setimbangnya, pegas mengerjakan gaya (F) yang dapat dihitung dengan persamaan 2.15

$$\vec{F} = -k\vec{x} \quad (2.15)$$

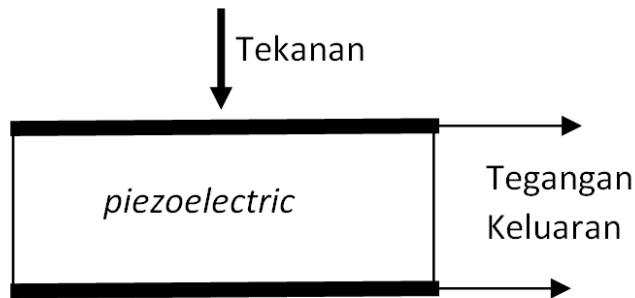
Gaya oleh pegas ini mempunyai arah yang melawan arah simpangan. Sensor fiber optik untuk pemantauan bobot kendaraan berjalan dimana fiber optik ditanam dalam material elastic banyak memanfaatkan kaitan ini. Loss dalam fiber optik yang muncul karena adanya beban F didesain sedemikian hingga besarnya sebanding dengan besar deformasi bahan elastic sejauh x (dalam batas Hukum Hooke masih dipenuhi).

2.11 Jenis Sensor yang telah dikembangkan untuk WIM

Weight In Motion (WIM) adalah proses penimbangan kendaraan dengan menggunakan sensor yang terpasang di atas jalan yang didesain untuk membaca dan merekam berat sumbu kendaraan tanpa kendaraan berhenti, namun cukup melewati sensor yang terpasang tersebut. Beberapa jenis sensor telah dikembangkan untuk penggunaan konsep WIM diantaranya adalah dengan menggunakan *piezoelectric*, *bending plate* dan *load cell*.

2.11.1 WIM Dengan Menggunakan *Piezoelectric*

WIM dengan menggunakan *piezoelectric* menggunakan prinsip perubahan tegangan ketika terjadi perubahan tekanan pada penampang *piezoelectric*. Ketika roda kendaraan menekan *piezoelectric*, maka *piezoelectric* akan menghasilkan tegangan yang sebanding dengan berat kendaraan yang melewatinya dan dengan mengolah data tegangan dari *piezoelectric* maka dapat diketahui berat kendaraan tersebut (Richad dkk., 2006). Gambar 13 adalah skema sensor *piezoelectric*.

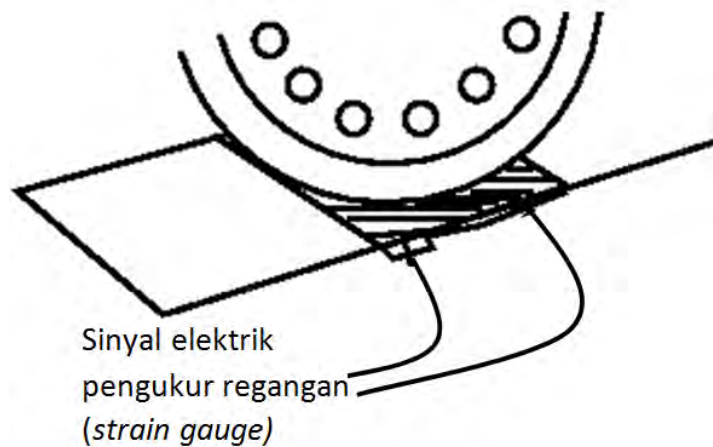


Gambar 13 Skema kerja *piezoelectric*

Kerugian yang dimiliki oleh piezoelektrik sensor ini yaitu tidak dapat digunakan untuk pengukuran beban yang benar-benar statis. Gaya yang statik dapat menyebabkan nilai muatan yang tetap pada material piezoelektrik. Hal tersebut menyebabkan berkurangnya hambatan internal sensor sehingga akan terjadi kehilangan elektron secara konstan dan juga penurunan sinyal. Meningkatnya temperatur juga menyebabkan penurunan hambatan internal dan sensitifitas.

2.11.2 WIM Dengan Menggunakan *Bending Plate*

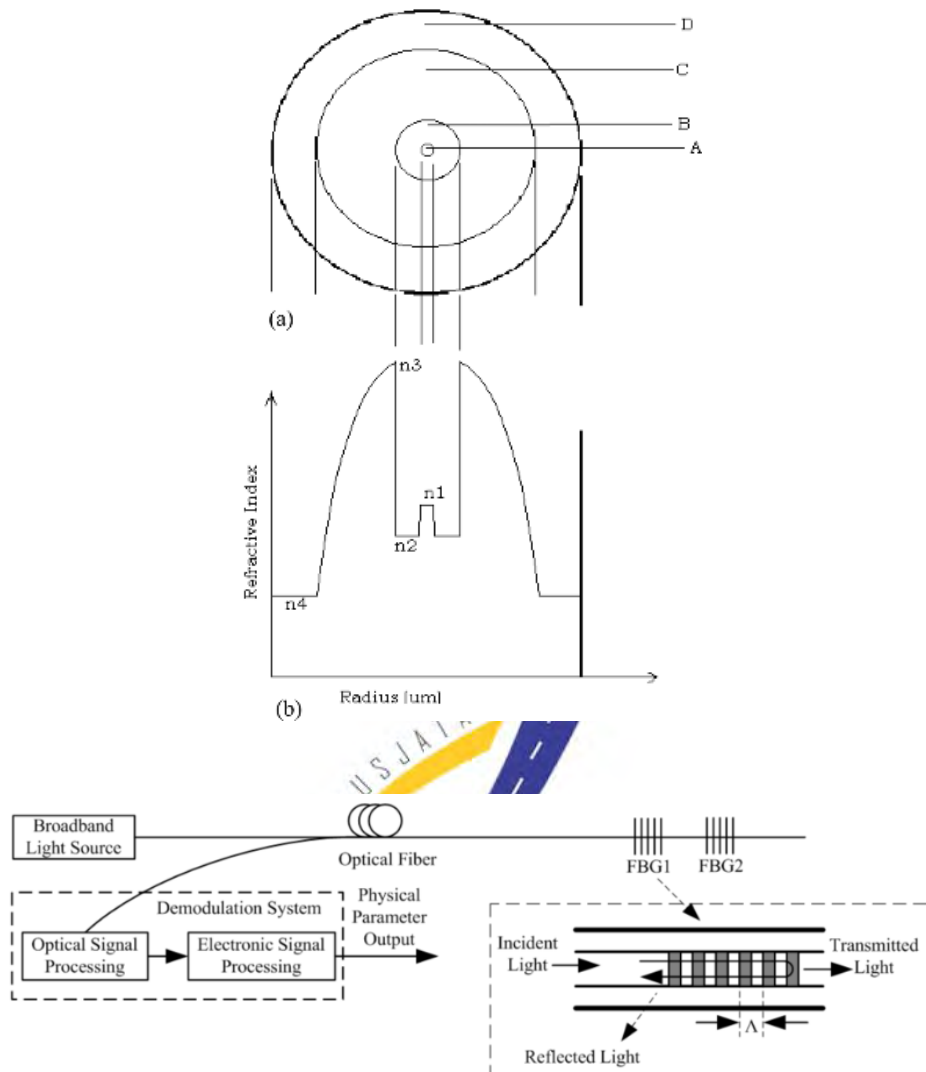
WIM dengan *Bending plate* terdiri dari pelat baja yang dibawahnya terdapat bantalan karet dan sistem pengukur regangan. Ketika roda kendaraan menekan maka akan terjadi perengangan pada bantalan karet dibawah pelat baja. Perubahan regangan ini yang diukur untuk menentukan beban kendaraan. Besarnya regangan ini (positif atau negatif) dikonversikan kedalam sinyal elektrik oleh *strain gauge* (pengukur regangan) yang terpasang pada spring element.



Gambar 14 Proses Kerja *Bending plate* (Mathew, 2014)

2.11.3 WIM dengan menggunakan fiber berjenis khusus

Fiber optik dengan beragam jenis telah dikaji untuk dijadikan sensor bobot kendaraan berjalan. Dua diantaranya adalah fiber bragg grating (FBG) dan fiber optik dengan double core fiber (Gambar 3.3). Seperti terlihat dalam Gambar 3.3, FBG dengan output pergeseran panjang gelombang membutuhkan piranti pengukuran *optical spectrum analyser* (OSA) yang berharga mahal, sehingga walaupun sensor ini memberikan output dengan sensitivitas tinggi namun masih kurang dapat diterima pasar. Hal yang sama terjadi pada fiber sensor dengan *double core*.



Gambar 15 Fiber sensor (a) dengan *double core* dan (b) *fibreg grating*.

2.12 Sistem Akuisisi Data

Akuisisi data adalah proses dimana fenomena fisis dari dunia nyata ditransformasikan ke dalam sinyal listrik yang diukur dan diubah ke dalam format digital untuk pemrosesan, analisis dan penyimpanan oleh komputer. Pada banyak aplikasi sistem akuisisi data didesain tidak hanya sekedar untuk mendapatkan data, tetapi juga untuk mendapatkan data yang lebih

akurat dan praktis jika dibandingkan dengan cara pengambilan data secara manual. Elemen dasar sistem akuisisi data terdiri atas sensor dan transduser, pengkondisi sinyal, perangkat keras akuisisi data, personal komputer serta perangkat lunak akuisisi data (Park dan Mackay, 2003).

Sensor dan transduser adalah penghubung antara dunia nyata dengan sistem akuisisi data dengan mengubah fenomena fisis menjadi sinyal listrik yang dapat diterima oleh perangkat keras. Sensor dan transduser memberikan *input* listrik pada perangkat keras untuk diolah lebih lanjut (Park dan Mackay, 2003).

Sinyal listrik dari transduser sering kali perlu diubah ke dalam bentuk yang bisa diterima oleh perangkat keras sistem akuisisi data. pengkondisi sinyal mempunyai banyak peran antara lain adalah *filtering*, penguatan, linierisasi, isolasi dan eksitasi. Pada penelitian ini pengkondisi sinyal yang berperan dalam proses penguatan. Penguatan dilakukan supaya data-data yang bernilai rendah dapat terbaca oleh perangkat keras sistem akuisisi data (Park dan Mackay, 2003).

Perangkat keras sistem akuisisi data didefinisikan sebagai komponen pelengkap sistem akuisisi data yang mempunyai fungsi sebagai input, pemrosesan dan mengubah ke dalam format digital, dengan menggunakan ADC data sinyal analog dari sebuah sistem atau proses kemudian diubah ke dalam format digital dan dikirim ke personal komputer untuk ditampilkan, penyimpanan dan analisis. Perangkat keras juga digunakan sebagai input sinyal digital yang berisi informasi dari sebuah sistem atau proses. Selain digunakan untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital, perangkat keras juga dapat digunakan dalam proses sebaliknya yaitu mengubah sinyal digital menjadi analog. Hal ini berguna saat perangkat keras digunakan untuk mengontrol sistem atau proses. Fungsi lain selain sebagai input, perangkat keras juga dapat digunakan untuk output sinyal digital.

Perangkat keras pada sistem akuisisi data tidak akan dapat bekerja tanpa menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak berjalan pada sebuah komputer di bawah sistem operasi yang mungkin *single-tasking* (contoh

DOS) atau *multi-tasking* (contohnya Windows, Unix, OS2) yang mengijinkan perangkat lunak dapat berjalan secara simultan. Namun hal yang sangat penting dari sistem akuisisi data adalah personal komputer. Personal komputer memiliki peran yang peting dalam Input-Output (I/O) pada perangkat lunak maupun perangkat keras yang semuanya bekerja secara berkesinambungan (Park dan Mackay, 2003).

2.13 Fabrikasi sensor

Fiber optik adalah saluran cahaya berukuran sangat kecil (seukuran rambut). Agar fiber optik dapat dijadikan sebagai sensor untuk mendeteksi bobot kendaraan maka fiber harus ditanam dalam material elastic. Berikut merupakan gambaran bagaimana fiber sensor dibuat untuk fiber sensor tipe bending.

Prinsip dasar fiber sensor tipe bending adalah munculnya loss bila fiber ini mengalami pembengkokan. Pembengkokan dapat terjadi karena fiber dibuat dalam bentuk lilitan yang kemudian ditanam dalam karet atau fiber diletakkan di anatar dua pin dimana bila beban mngenai karet maka fiber akan terbelokkan. Seperti pada contoh Gambar 16, fiber dengan bentuk lilitan dibuat pada silinder berongga..Serat optik dililit pada silinder tube elastik dengan diameter 1 cm yang terbuat dari *rubber silicone*..



Gambar 16 Lilitan fiber sensor pada silinder

Silinder dibuat dengan menggunakan cetakan yang dibuat dengan bahan resin.Langkah awal dalam pembuatan Cetakan silinder yaitu membuat balok akrilik dengan ukuran 3 x 3 x 50 cm, kemudian ujungnya diberi lubang untuk

memasukkan besi berulir (Gambar 17). Besi berulir dengan diameter 1 cm dan panjang 55 cm kemudian diletakan ditengah kotak akrilik tersebut. Prosedur pembuatan cetakan silinder berulir dari bahan resin adalah sebagai berikut:

1. Menuangkan bahan resin sesuai ukuran ke dalam wadah.
2. Meneteskan katalis ke dalam resin yang sudah ada di wadah.
3. Mengaduk resin hingga tercampur merata.
4. Menuangkan adukan resin ke dalam cetakan.
5. Ditunggu sampai resin sedikit keras
6. Mengambil besi berulir dari cetakan.



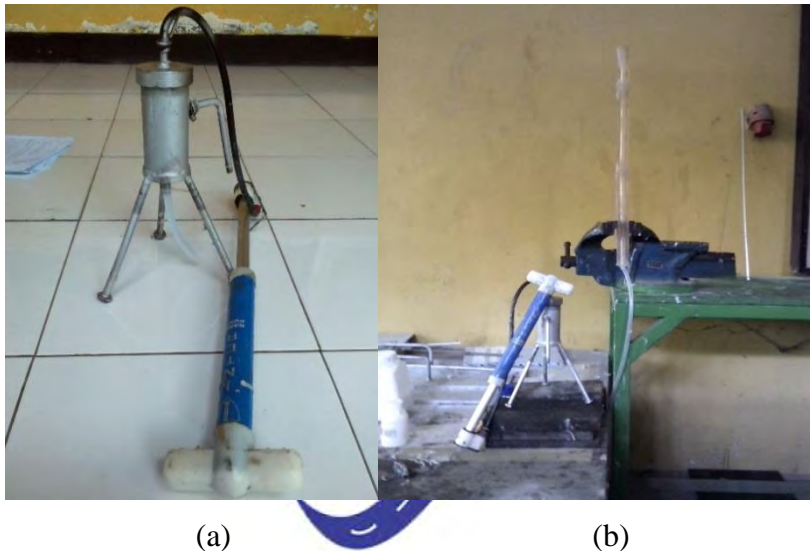
Gambar 17 Contoh cetakan resin dengan besi berulir yang telah dibuat

2.13.1 Pencetakan silinder tube berulir

Silinder tube berulir yang akan dibuat dalam penelitian ini disyaratkan untuk mempunyai tingkat kekerasan yang rendah. Contoh material yang memenuhi syarat ini adalah silicone rubber RTV 588. Proses pembuatan silinder ini dilakukan dengan teknik injeksi. Di Lab kami, tugas injeksi ini dilakukan dengan cara pemompaan silicone rubber ke dalam mold. Contoh alat sederhana untuk injeksi ini diberikan oleh Gambar 18. Prosedur proses pembuatan silinder tube berulir yang kami gunakan adalah sebagai berikut:

1. Menuangkan *silicone rubber RTV588* sesuai ukuran ke dalam wadah.
2. Meneteskan katalis *silicone rubber 588* ke dalam *silicone rubber RTV 588* yang sudah ada dengan perbandingan 10 : 1

3. Mengaduk *rubber* hingga tercampur merata.
4. Menuangkan *rubber* ke dalam tabung penginjeksi.
5. Memompa *rubber* masuk ke mold
6. Menyisipkan batang panjang sebagai pelubang ke tengah mold
7. Dibiarkan selama ± 24 jam agar *rubber* mengeras.
8. Mengambil *rubber silicone* yang sudah padat dari cetakan.



Gambar 18 (a) Pompa udara dan tabung (b) Proses memasukkan *rubber silicone* dengan pompa udara

2.13.2 Pembuatan Rubber Pad Fiber Sensor

Ada dua tahapan proses yang harus dilakukan dalam pembuatan rubber pad fiber sensor, yaitu:

a. Pelilitan fiber optik.

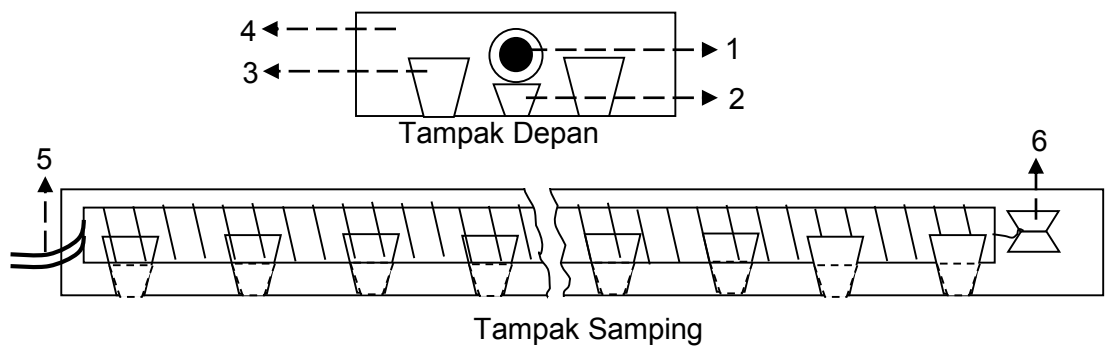
Lilitan fiber optik merupakan inti dari bekerjanya system sensor dalam penelitian ini. Lilitan fiber optik dalam penelitian ini dibuat dengan cara melilitkan Fiber optik berjenis multimode pada silinder tube berulir yang telah dibuat. Dengan alasan jari-jari kritis fiber dan kenyamanan berkendara bagi

pengendara kendaraan saat sensor ini dipasang maka jari-jari lilitan yang akan dibuat adalah 0,5 cm. Ada dua jenis fiber multimode yang akan digunakan dalam penelitian ini: Multimode fiber dari bahan polimer (*Polymer Optical Fibre/POF*) dan dari bahan kaca. Banyak lilitan per satuan panjang dan banyak fiber per ulir merupakan variable yang dipergunakan dalam penelitian.

b. Pembuatan rubber pad.

Rubber pad yang akan dibuat dalam penelitian ini adalah rubber pad yang di dalamnya terdapat lilitan fiber optik. Pad yang demikian dibuat dengan cara membungkus silinder tuber berulir yang telah dililit fiber optik dengan menggunakan rubber. Untuk tujuan melakukan pengujian sensitivitas dari konfigurasi suatu lilitan maka rubber yang digunakan dapat berjenis sama atau hampir sama. Namun untuk pengujian di lapangan maka rubber pembungkus ini syarat utamanya adalah rubber dengan hardness tinggi.

Gambar 19 merupakan konfigurasi rubber pad yang akan dicetak dalam penelitian ini. Silinder tuber berulir yang telah terlilit fiber (1) mula-mula diletakkan di atas tumpukan (2) dan di apit oleh bantalan pembatas bobot (3). Agar fiber optik(5) hanya masuk dan keluar dari satu ujung rubber pad maka pada salah satu ujung rubber pad ditempatkan pembalik fiber (6). Setelah konfigurasi tertata rapi dalam cetakan selanjutnya bahan rubber (4) dengan hardness yang telah dipilih dituangkan dalam cetakan hingga diperoleh ketinggian yang merata. Gambar 20 menunjukkan cetakan yang digunakan untuk menanam silinder berulir.



Gambar 19 Konfigurasi lilitan fiber optik dalam rubber pad

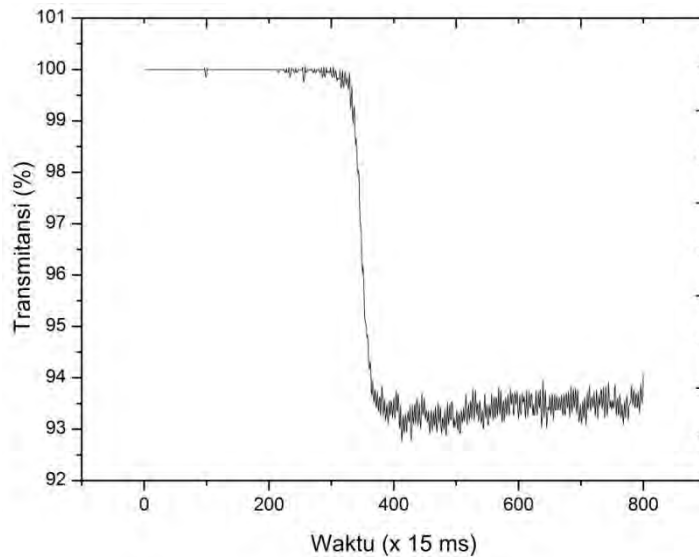


Gambar 20 Cetakan untuk menanam silinder berulir dengan *rubber silicone*

3. DESAIN FIBER SENSOR BOBOT KENDARAAN BERJALAN BERKONFIGURASI BENDING

Bagian ini akan menguraikan hasil pengalaman kami dalam mendesain fiber sensor dengan bentuk konfigurasi bending mulai dari pengalaman kami dalam merancang dan membuat sebuah *fiber sensor* untuk diaplikasikan pada sensor beban berjalan, kemudian merancang dan membuat sebuah sistem untuk menganalisa perubahan sinyal optik pada *fiber sensor* akibat pengaruh beban berjalan dan dapat diketahui pengaruh beban berjalan terhadap perubahan sinyal optik pada *fiber sensor*.

Fiber sensor dibentuk pada pola melingkar dengan melilitkan serat optik pada sebuah silinder berulir dengan jari-jari tertentu. Silinder berulir tersebut kemudian ditanam pada *rubber silicone* balok panjang. Pengujian dilakukan dengan melewati sebuah beban berjalan pada *fiber sensor* sehingga serat optik di dalamnya yang awalnya berbentuk lingkaran akan terdeformasi menjadi bentuk elips. Terdeformasinya serat optik menyebabkan terjadinya perubahan jari-jari kelengkungan. Dengan terjadinya perubahan jari-jari kelengkungan serat optik, maka akan terjadi penurunan intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh serat optik akibat terjadinya rugi-rugi. Gambar 21 menunjukkan *fiber sensor* ketika diberi perlakuan beban diam dan terlihat penurunan transmitansi cahaya dari *fiber sensor*.



Gambar 21 Grafik transmitansi *fiber sensor* ketika diberi beban statis

Detektor cahaya dibuat berfungsi untuk mendeteksi sinyal optik dalam bentuk transmitansi cahaya dari *fiber sensor*. Sistem *interface* digunakan untuk menghubungkan antara detektor cahaya dengan komputer. Rangkaian ADC digunakan sebagai perangkat *interface* detektor cahaya ke komputer. Sedangkan pada komputer dibuat perangkat lunak yang berfungsi untuk menerima dan pemrosesan data melalui komputer. Dengan sistem yang dibuat tersebut dapat diketahui pengaruh penekanan beban berjalan terhadap sinyal optik pada *fiber sensor*.

Untuk mengetahui ketergantungan hasil pengukuran bobot kendaraan terhadap kecepatan kendaraan kami telah membuat *Photogate sensor*. *Photogate sensor* berguna untuk mendeteksi kelajuan gerak beban berjalan ketika melewati *fiber sensor*. Sensor *photogate* terdiri dari dua sumber laser dan detektor cahaya yang diletakkan sejajar. Ketika beban melewati *photogate* maka akan menghalangi laser ke detektor. Dengan menghitung waktu antara laser 1 dan 2 ketika terhalangi beban berjalan maka kelajuan beban berjalan bisa terdeteksi. Sensor *photogate* ini dihubungkan komputer dengan perangkat *interface* untuk bisa menampilkan data kelajuan beban

berjalan di komputer. Gambar 22. merupakan *set-up* yang digunakan untuk simulasi *weigh in motion*.

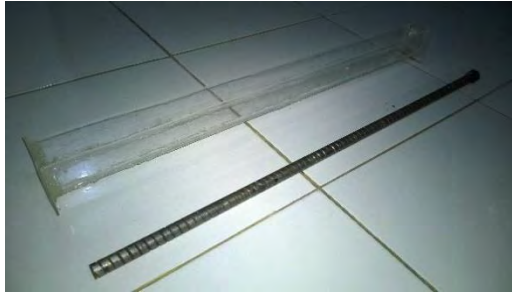


Gambar 22 Set up simulasi weigh in motion

3.1 Fiber Sensor dengan Sistem Bending

Fiber sensor dibuat berdasarkan sistem bending yang diharapkan akan terjadi *loss* cahaya jika *fiber sensor* dilewati suatu beban. Serat optik dililit pada silinder berulir dengan diameter 1 cm yang terbuat dari *rubber silicone*. Silinder berulir dibuat dengan menggunakan cetakan yang dibuat dengan bahan resin. Cetakan silinder berulir dibuat dengan balok akrilik dengan ukuran 3 x 3 x 50 cm yang tengahnya dimasukkan besi berulir.

Penambahan resin dengan katalis akan menyebabkan resin tersebut keras pada selang waktu tertentu dan suhunya juga mengalami peningkatan ketika proses pengerasan. Untuk memudahkan pengambilan besi berulir, Pada saat suhu mencapai 50⁰ C besi berulir ditarik dari cetakan resin. Digunakan suhu 50⁰, karena pada suhu tersebut resin masih lunak dan belum terlalu keras, sehingga mudah dalam pengambilan besi berulir. Gambar cetakan silinder berulir dari resin ditunjukkan pada Gambar 23 dan Gambar 24.



Gambar 23 Cetakan resin dan besi berulir



Gambar 24 Cetakan silinder berulir

Cetakan silinder berulir yang sudah jadi selanjutnya digunakan untuk membuat silinder berulir. Gambar 25 merupakan hasil dari pembuatan silinder berulir. Silinder berulir yang sudah dililit serat optik kemudian ditanam pada *rubber silicone* berbentuk persegi panjang dengan dimensi 50 x 50 x 50 cm. Hasil pembuatan silinder berulir yang telah tertanam pada *rubber silicone*

ditunjukkan pada Gambar 26. Kepadatan dan ketebalan *fiber sensor* ini akan menentukan *range* berat beban yang akan terukur.



Gambar 25 Silinder berulir.



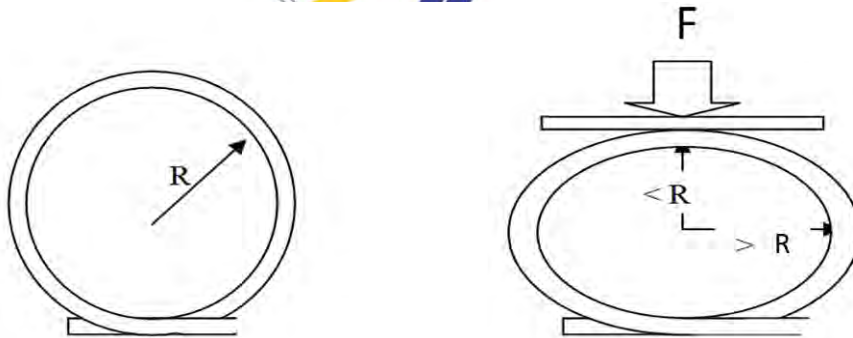
Gambar 26 *Fiber sensor*

Fiber sensor yang sudah dibuat kemudian diletakkan kedalam tempat *fiber sensor*. Tempat *fiber sensor* juga terbuat dari *rubber silicone* yang didalamnya terdapat bahan akrilik keras untuk melindungi serat optik supaya tidak mengalami pergeseran terlalu besar. Pergeseran maksimal yang diperbolehkan adalah 5 mm. Hasil akhir dari pembuatan *fiber sensor* dapat dilihat pada Gambar 27.



Gambar 27 Tempat *fiber sensor*

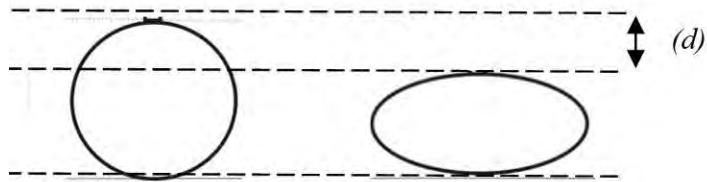
Konsep kerja *fiber sensor* yang dibuat ini adalah ketika *fiber sensor* dilewati sebuah beban berjalan maka, serat optik didalamnya yang awalnya berbentuk lingkaran akan terdeformasi menjadi bentuk elips. Terdeformasinya serat optik menyebabkan terjadinya perubahan jari-jari kelengkungan. Dengan terjadinya perubahan jari-jari kelengkungan serat optik, maka akan terjadi penurunan intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh serat optik akibat terjadinya rugi-rugi. Secara skematik ditunjukkan pada Gambar 28.



Gambar 28 (a) *Fiber sensor* sebelum dilakukan tekanan, (b) *Fiber sensor* setelah dilakukan tekanan

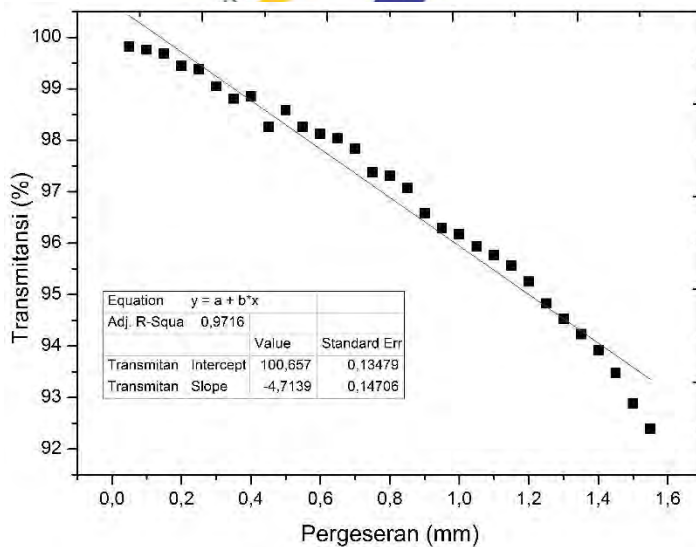
Nilai transmitansi akan mengalami penurunan saat terjadi penekan karena adanya pergeseran. Pergeseran kecil pada fiber optik yang terlilit pada silinder berulir yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 28.. Pada Gambar 29. menunjukkan adanya perubahan bentuk dari lingkaran menjadi *ellips* setelah adanya pergeseran. Jika lingkaran disebut *ellips* yang mempunyai

panjang sumbu mayor dan minor yang sama. Sehingga yang dimaksud pergeseran kecil (d) yaitu pergeseran sumbu vertikal pada *ellips*.



Gambar 29 Pergeseran fiber sensor

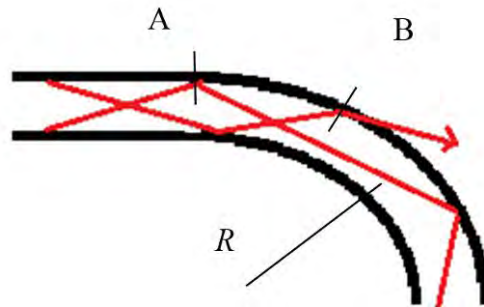
Pergeseran ini diakibatkan karena adanya penekanan oleh beban maka serat optik yang dililitkan pada *rubber* menjadi berbentuk *ellips* sehingga sinar yang masuk ke serat optik ada yang dapat diteruskan (ditransmitasikan) dan ada yang tidak dapat diteruskan (*loss*). Gambar 30 merupakan grafik hasil pengujian pergeseran *fiber sensor* terhadap transmitansi dari *fiber sensor*..



Gambar 30 Grafik pergeseran fiber sensor terhadap transmitansi

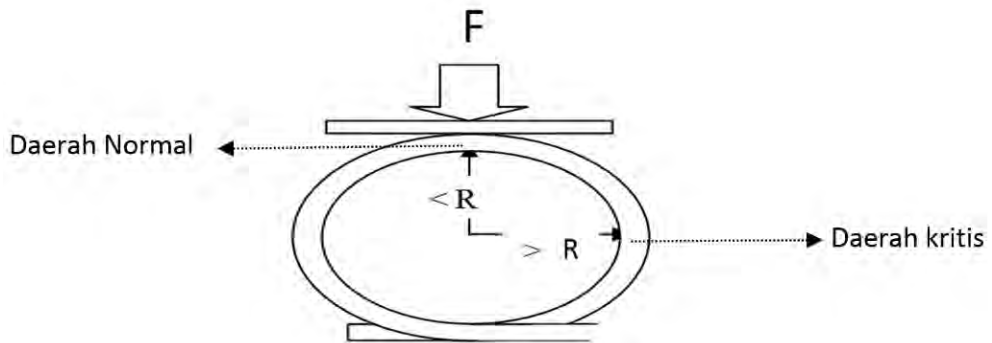
Hasil pengujian pada Gambar 30. menunjukkan bahwa semakin besar pergeseran nilai transmitansi semakin kecil. Penurunan nilai transmitansi ini

disebabkan pada serat optik terjadi bending yang mengakibatkan *loss* cahaya atau cahaya keluar dari fiber optik. Hal ini dapat dijelaskan pada Gambar 31.

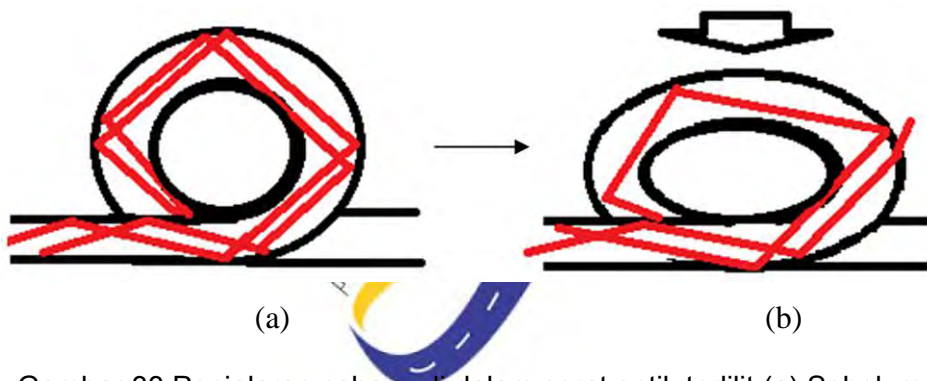


Gambar 31 *Loss* cahaya pada lekukan serat optik

Gambar 31. adalah lekukan pada serat optik dengan jari-jari lekukan R . Pada bagian A sinar dapat ditransmisikan karena mempunyai sudut datang lebih besar dari pada sudut kritis sehingga terjadi pemantulan sempurna. Ketika sinar melewati daerah lekukan (bagian B) maka sudut datangnya sinar lebih kecil dari pada sudut kritisnya. Sehingga pada bagian B terjadi pemantulan tidak sempurna, karena ada sebagian sinar yang *loss*. Semakin besar kelengkungan di serat optik, maka jari-jari kelengkungan semakin kecil. Semakin kecil jari-jari kelengkungan maka attenuasi pada serat optik semakin besar atau cahaya yang dapat diteruskan semakin berkurang. Pada penelitian ini saat serat optik yang dililit *rubber* ditekan maka terjadi perubahan bentuk dari lingkaran menjadi *ellips* (Gambar 32). Pada daerah normal cahaya masih banyak yang diteruskan. Tetapi pada daerah kritis banyak cahaya yang hilang.



Gambar 32 Daerah normal dan kritis pada lilitan serat optik saat ada penekanan



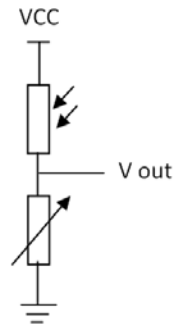
Gambar 33 Penjalaran cahaya di dalam serat optik terlilit (a) Sebelum ditekan, (b) saat ditekan

Sinar yang dapat ditransmitansi mempunyai sudut datang lebih besar dari pada sudut kritis sehingga terjadi pemantulan sempurna seperti Gambar 33.a. Saat ditekan ada sebagian sinar yang sudut datangnya lebih kecil daripada sudut kritis yaitu pada daerah kritis sehingga terjadi loss seperti pada Gambar 33.b. Hal ini mengakibatkan menurunnya nilai transmitansi.

3.2 Detektor Cahaya

Gambar 34 adalah rangkaian detektor cahaya yang telah dibuat dalam penelitian ini. Rangkaian detektor cahaya tersebut menggunakan sensor

Light Dependent Resistor (LDR) dan dirangkai dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan.



(a)



(b)

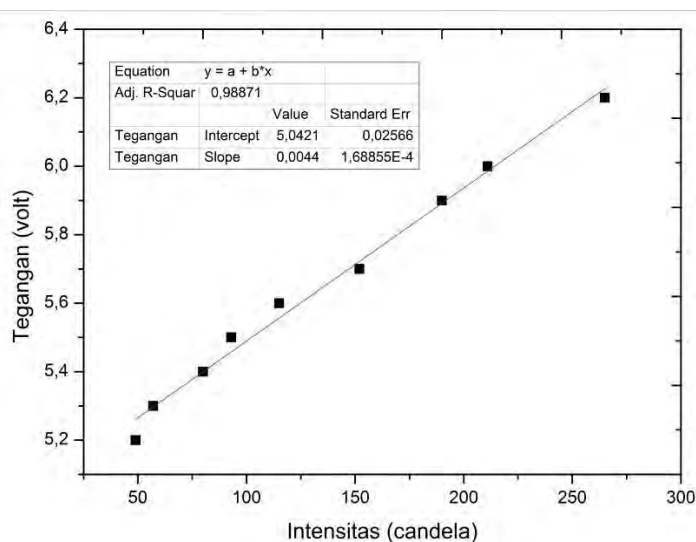
Gambar 34 Rangkaian Detektor Cahaya

Rangkaian pembagi tegangan dibuat menggunakan sebuah LDR yang dipadukan dengan sebuah *Variable Resistor* (VR) yang nilai hambatannya 10 kΩ. LDR merupakan jenis resistor yang memiliki nilai hambatan dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang mengenainya. LDR terbuat dari bahan Cds (cadmium sulfida) yang memiliki hambatan besar (~ 10 MΩ) bila tidak terkena cahaya. Sebaliknya jika ada cahaya yang mengenai bahan Cds hambatannya akan berkurang. Pada saat bahan Cds tidak terkena cahaya, konsentrasi pembawa elektron bebas dalam bahan tersebut bebas rendah, sehingga hambatannya tinggi. Jika ada cahaya mengenai bahan LDR maka elektron dalam atom bahan Cds mendapat energi untuk menghasilkan elektron bebas (efek fotoresistivitas). Semakin banyak elektron bebas maka hambatannya akan menurun.

LDR dalam penelitian ini dirangkai sebagai komponen pembagi tegangan sehingga jika terjadi perubahan hambatan pada LDR maka terjadi pula perubahan tegangan pada rangkaian pembagi tegangan tersebut. Persamaan rangkaian pembagi tegangan adalah

$$V_{out} = V_{CC} \frac{R}{R_{LDR} + R} \quad (3.1)$$

Pengujian kinerja LDR sebagai sensor dilakukan dengan melakukan variasi intensitas cahaya yang mengenai LDR tersebut. Variabel terikat akibat dari intensitas cahaya dalam pengujian ini adalah tegangan hasil dari rangkaian pembagi tegangan pada LDR itu sendiri. Pada saat pengujian, sumber cahaya diletakkan di depan lensa cembung sehingga cahaya akan terfokus pada LDR. Tegangan pada sumber cahaya diubah – ubah untuk memvariasi intensitas cahaya yang keluar dari sumber cahaya. Untuk mengetahui nilai intensitas cahaya digunakan alat ukur yaitu *Luxmeter* sebagai alat ukur intensitas cahaya. Hasil pengujian sensor cahaya yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 35.



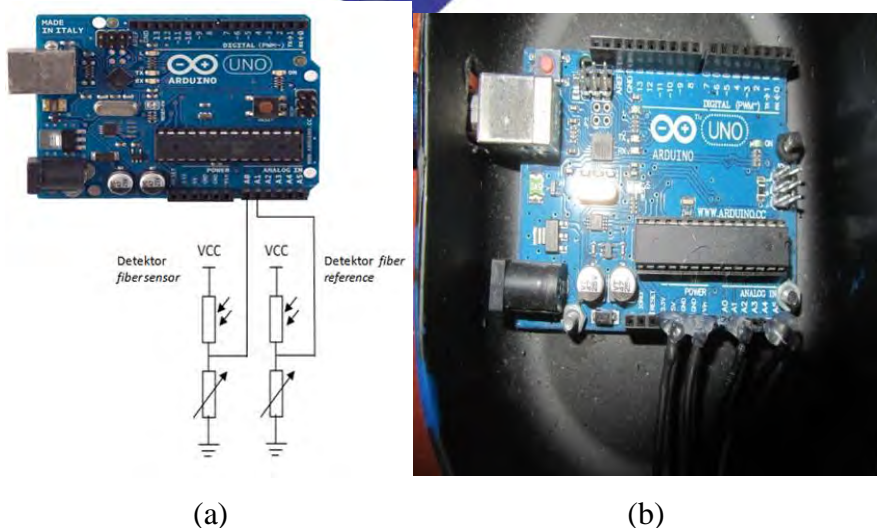
Gambar 35 Hasil Pengujian LDR

Grafik tersebut menunjukkan adanya perubahan tegangan *output* pada rangkaian pembagi tegangan. Besarnya *output* bergantung pada intensitas cahaya yang mengenai LDR. Dari pengukuran yang dilakukan terlihat adanya hubungan linier antara intensitas cahaya yang mengenai LDR dengan tegangan *output* yang terukur. Pengujian yang dilakukan ini menunjukkan sensitivitas LDR yang digunakan dan kelinierannya terhadap intensitas cahaya. Dari hasil pengujian LDR tersebut maka dapat disimpulkan bahwa LDR dapat digunakan sebagai sensor cahaya.

3.3 Analog Digital Converter (ADC)

Analog Digital Converter (ADC) merupakan salah satu bagian yang penting dalam *interface* sensor ke komputer. Komputer dalam penelitian ini digunakan sebagai sarana pengolah data dan penampil data sinyal optik dari *fiber sensor* atau *photogate sensor*. Hasil pengukuran sinyal optik oleh detektor cahaya masih berupa sinyal analog dalam berupa tegangan. Sedangkan komputer memerlukan sinyal digital untuk dapat diolah datanya. Sehingga diperlukan pengubah dari sinyal analog ke sinyal digital. Oleh karena itu, digunakanlah ADC.

Dalam penelitian yang kami lakukan, ADC yang digunakan adalah ADC 10 bit dari arduino uno R3. ADC 10 bit mempunyai resolusi sebesar $2^{10}-1 = 1024$ artinya data digital yang dihasilkan adalah mulai dari 0 sampai 1024 dan bisa membedakan tegangan sebesar $5 \text{ volt}/1024 = 0,0048828 \text{ volt}$. Dalam penelitian ini Komunikasi yang digunakan dengan komputer adalah komunikasi secara serial yaitu data dikirim secara berurutan dan bergantian dalam satu jalur.



Gambar 36 Rangkaian ADC arduino

Arduino perlu dimasukkan program kontrol untuk mengaktifkan ADC dan mengaktifkan komunikasi serial dengan komputer. Arduino diisi dengan program. Dalam penelitian ini terdapat dua arduino, pertama digunakan untuk interface *fiber sensor* dan yang kedua digunakan untuk interface *photogate sensor*.

List program arduino untuk interface *fiber sensor* dapat dilihat dibawah ini

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  analogReference(INTERNAL);
}
void loop()
{
  int ldr1=analogRead(1);
  Serial.println((ldr1));
  int ldr2=analogRead(5);
  Serial.println((ldr2));
  delay(14);
  //delayMicroseconds(265);
}
```



Sedangkan *list* program arduino untuk *photogate sensor* adalah sebagai berikut

```
void setup()
{
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  int ldr1=analogRead(0);
  //Serial.write(highByte(ldr1));
}
```

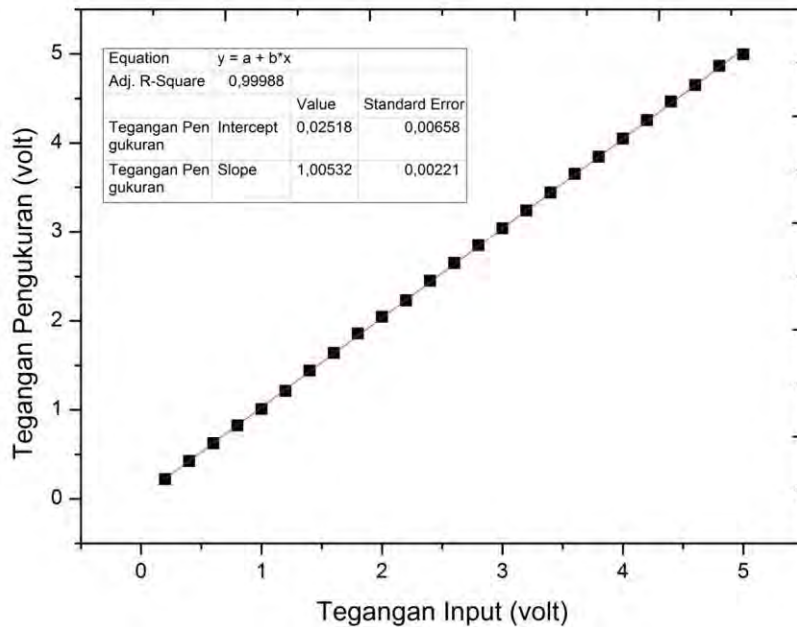
```

//Serial.write(lowByte(ldr1));
Serial.println((ldr1));
int ldr2=analogRead(1);
Serial.println((ldr2));
delay(10);
//delayMicroseconds(150);
}

```

Pengujian ADC dilakukan dengan melakukan variasi tegangan pada pin analog A0 arduino dari 0 V sampai dengan 5 V dengan kenaikan 0,1 V. Arduino dihubungkan dengan komputer untuk mengolah data digital hasil konversi ADC. Data digital tersebut kemudian ditampilkan dilayar sebagai tegangan. Untuk melihat hasil ADC dibuat grafik perbandingan antara tegangan inputan dan tegangan dari hasil pengukuran. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 37. Data lengkap pengujian ADC diberikan pada lampiran 3.

Hubungan antara tegangan *input* dengan tegangan hasil konversi ADC pada grafik digunakan untuk menentukan persamaan grafik dan linieritasnya. Kelinieritasan grafik menunjukkan kesesuaian antara *input* dengan *output* ADC. Pada penelitian ini diperoleh persamaan garis lurus $y = 1,00532x + 0,00221$ dan $R^2 = 0,99988$. Dari persamaan tersebut diketahui bahwa nilai y hampir sama dengan nilai x dan linieritasnya hampir mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa keluaran ADC hampir sama dengan tegangan masukannya.

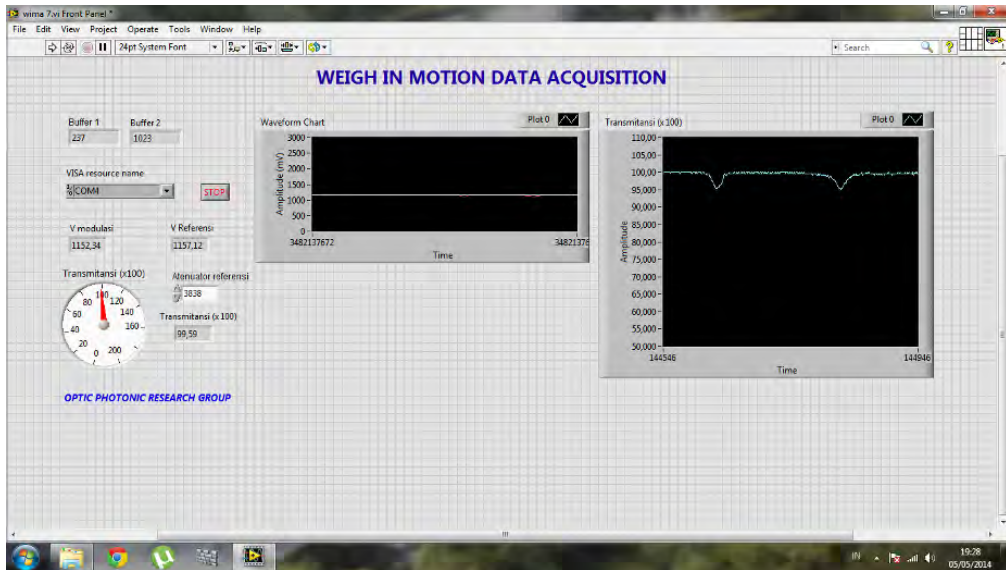


Gambar 37 Hasil Pengujian ADC Arduino

3.4 Perangkat lunak

3.4.1 Weigh In Motion Data Acquisition

Dalam penelitian ini digunakan komputer sebagai pengolah data serta penyimpanan data di dalam komputer. Program *Weigh In Motion Data Acquisition* ini dibuat menggunakan *LabVIEW 2013* digunakan untuk mengolah, menampilkan dan menyimpan data dari detektor cahaya. Tampilan perangkat lunak yang telah dibuat ditunjukkan pada Gambar 38.



Gambar 38 Tampilan Program *Weigh In Motion Data Acquisition*

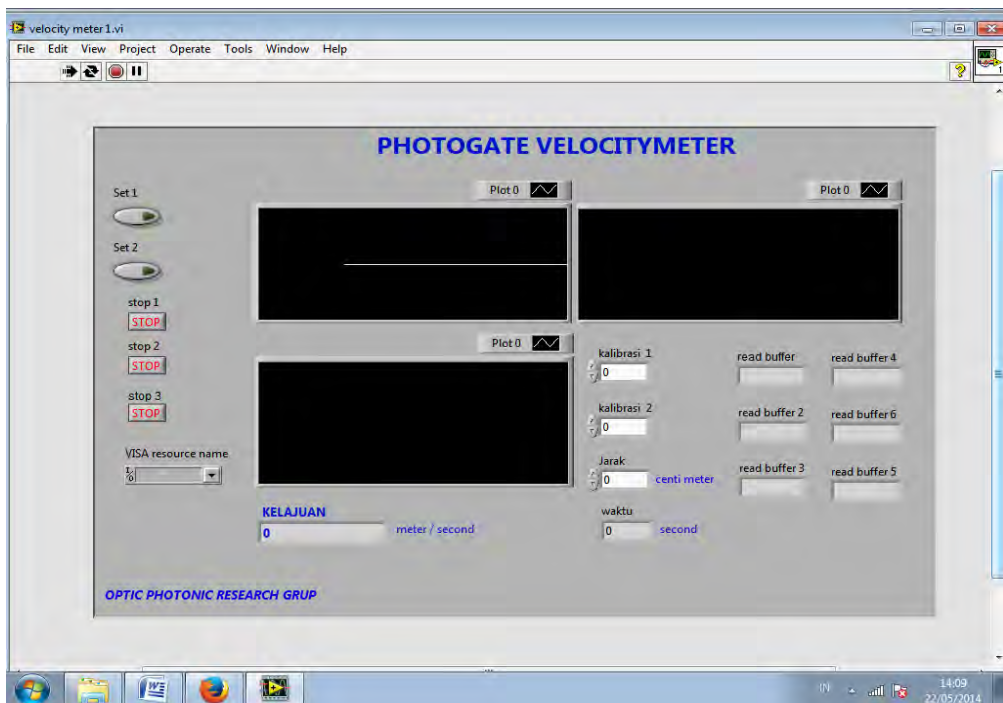
Cara kerja program ini yaitu komputer melalui komunikasi serial menerima data digital dari ADC arduino. Data-data yang diperoleh dalam bentuk desimal diubah menjadi dalam bentuk nilai tegangan yang sesuai dengan tegangan pada rangkaian detektor cahaya. Data ditampilkan dalam sebuah grafik dengan pola intensitas referensi dan intensitas modulasi dari *fiber sensor* secara *realtime* pada saat beroperasi. Di dalam program ini dibuat agar bisa menampilkan nilai transmitansi pada *fiber sensor* secara langsung. Nilai transmitansi diperoleh dengan persamaan

$$Transmitansi = \frac{I_{modulasi}}{I_{referensi}} \quad (3.2)$$

Data yang diperoleh adalah nilai referensi, nilai modulasi, dan transmitansi cahaya. Data-data tersebut disimpan secara permanen. Dalam perangkat lunak ini dilengkapi fasilitas *eksport* data yang diperoleh ke data dalam bentuk file *Microsoft Excel*.

3.4.2 Photogate Velocitymeter

Program *photogate velocitymeter* ini dibuat menggunakan *LabVIEW 2013*. Perangkat lunak ini dibuat untuk menerima dan mengolah data dari *photogate sensor* dan kemudian menampilkan data kelajuan dari benda yang melewati *photogate sensor*. Tampilan perangkat lunak *photogate velocitymeter* yang berhasil dibuat ditunjukkan pada Gambar 39.



Gambar 39 Tampilan Program *photogate velocitymeter*

Prinsip kerja program ini yaitu menghitung waktu antara *photogate sensor* 1 dan 2 ketika dilewati benda. Dalam kondisi normal (belum ada benda lewat) maka laser dalam *photogate* mengenai detektor, tetapi ketika dilewati benda maka benda tersebut akan menutupi cahaya laser dan detektor tidak terkena laser. Ketika detektor tidak terkena laser maka detektor akan mengirim sinyal *low* melalui interface ke komputer. Perangkat lunak yang dibuat ini akan berfungsi sebagai penghitung waktu antara dua sinyal *low*

dari *photogate sensor*. Untuk menentukan kelajuan maka dalam perangkat lunak dimasukkan perhitungan kelajuan yaitu

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.3)$$

dimana v = kelajuan benda

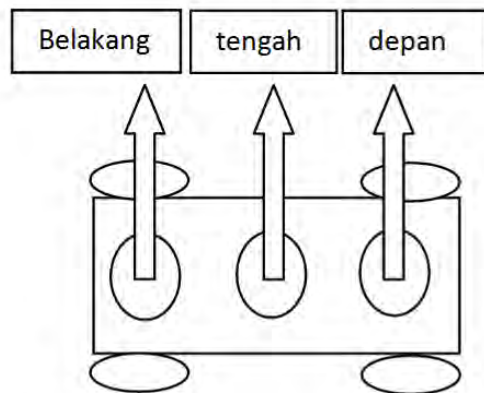
s = jarak antara *photogate sensor*

t = waktu antara sinyal *low*

dengan mengetahui jarak antara *photogate sensor* maka kelajuan benda yang melewati *photogate sensor* bisa terdeteksi.

3.5 Pengujian sensor

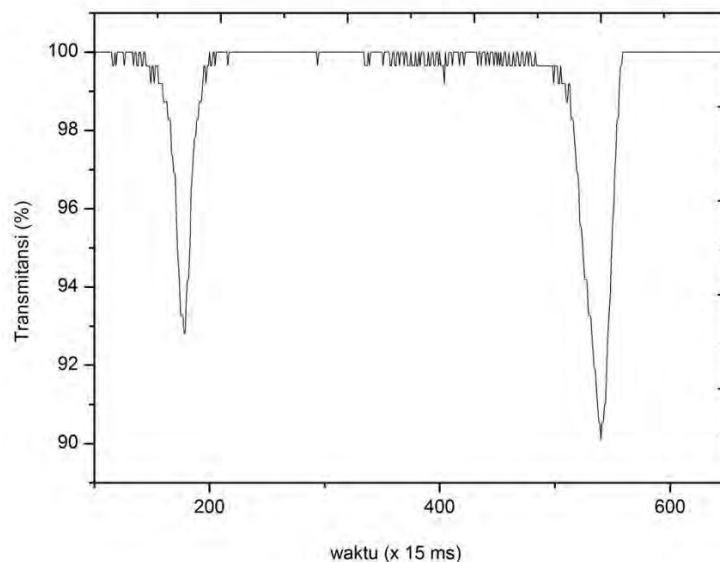
Pengujian variasi massa dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi massa terhadap perubahan transmitansi *fiber sensor*. Selain itu juga untuk mengetahui juga pengaruh posisi massa terhadap transmitansi cahaya beban berjalan. Pada penelitian ini beban berjalan menggunakan mobil *Remote Control* (RC). Bagian atas mobil RC tersebut diberi 3 tempat untuk meletakkan beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 40.





Gambar 40 Mobil mainan sebagai beban berjalan

Untuk mengetahui pengaruh penekanan beban berjalan *fiber sensor* terhadap perubahan nilai transmitansinya, pengambilan data dilakukan dengan melakukan variasi beban pada posisi bagian depan, tengah, dan belakang. Pengukuran dilakukan dengan melewati beban berjalan (mobil RC) dengan kelajuan sangat pelan dan diusahakan sama pada saat pengambilan data tipikal. Hasil pengukuran beban berjalan didapatkan grafik transmitansi secara *realtime* seperti pada Gambar 41.

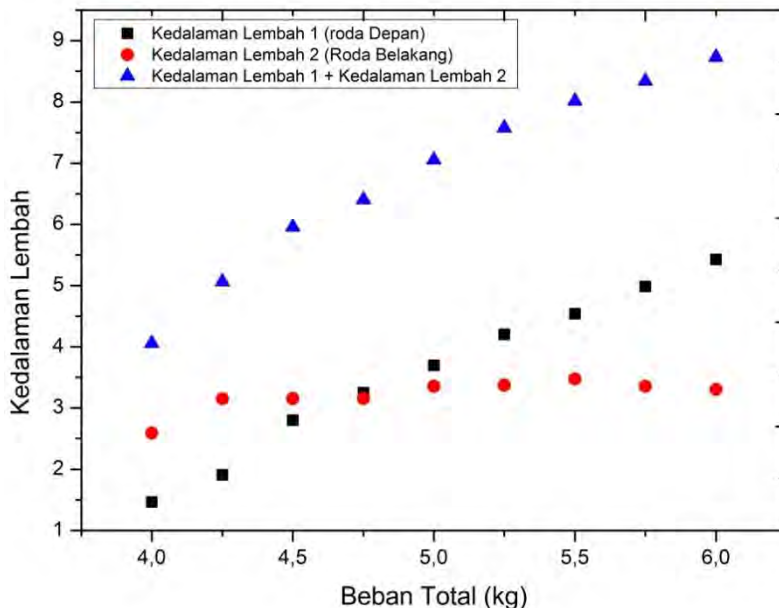


Gambar 41 Grafik waktu dengan transmitansi ketika *fiber sensor* dilewati beban berjalan

Grafik pada Gambar 41 menunjukkan rekaman transmitansi cahaya dalam waktu tertentu. Kedalaman lembah menunjukkan presentase cahaya *fiber sensor* yang hilang atau tidak diteruskan karena adanya pergeseran serat optik akibat penekanan oleh beban. Terlihat dari bentuk grafik terbentuk dua lembah. Lembah yang pertama terbentuk karena pengaruh penekanan dari sumbu roda depan (lembah 1) sedangkan lembah kedua terbentuk karena pengaruh penekanan dari sumbu roda belakang (lembah 2). Dalam penelitian ini akan diamati pengaruh variasi massa dan posisi beban terhadap kedalaman lembah yang terbentuk. Setelah itu akan dibuat grafik hubungan antara jumlah total jumlah beban yang diberikan dengan kedalaman lembah 1 dan lembah 2.

3.5.1 Variasi Beban Bagian Depan

Variasi massa dilakukan di bagian depan mulai dari 1 kg sampai dengan 3 kg dengan kenaikan 0,25 kg. Sedangkan tempat beban bagian tengah dan belakang dibuat konstan dengan massa bagian tengah 2 kg dan bagian belakang 1 kg. Gambar 42. menunjukkan grafik hubungan antara beban total dengan kedalaman lembah yang menunjukkan gaya berat pada sumbu roda depan dan belakang.



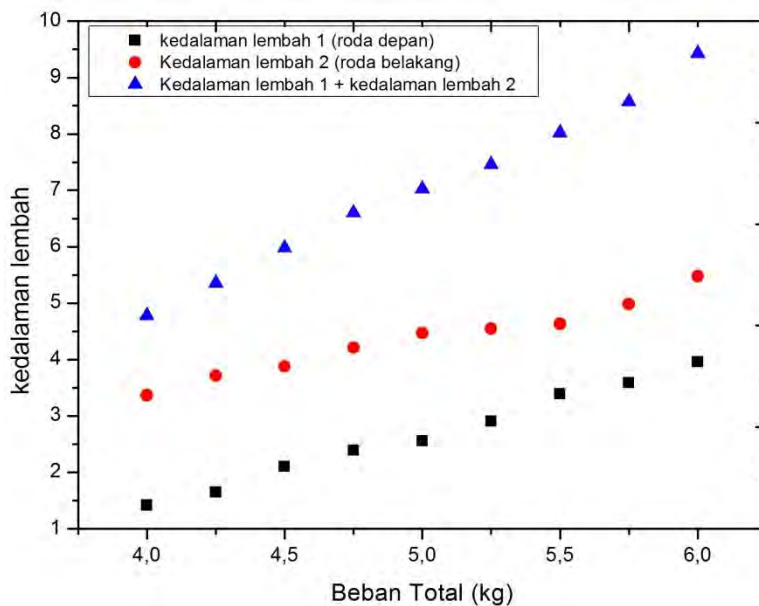
Gambar 42 Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian depan

Dari grafik pada Gambar 42 terlihat bahwa kedalaman lembah 1 mengalami kenaikan ketika bagian depan ditambah beban terus menerus, sedangkan kedalaman lembah 2 tidak mengalami penambahan yang berarti. Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa distribusi gaya berat pada awalnya lebih berat sumbu roda belakang karena mobil rc yang dipakai bagian bagian belakang merupakan bagian mesin sehingga distribusi gaya berat lebih besar di sumbu roda belakang.

Ketika bagian depan ditambah beban, sumbu roda depan bertambah sedangkan sumbu roda belakang tidak bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh penambahan beban bagian depan hanya mempengaruhi sumbu beban bagian depan. Pada Gambar 5.22. ditunjukkan juga penjumlahan antara lembah 1 dan lembah 2 dan menghasilkan grafik yang liner. Grafik penjumlahan ini menunjukkan gaya berat total yang bekerja pada beban berjalan.

3.5.2 Variasi Beban Bagian Tengah

Data selanjutnya adalah variasi penambahan massa beban di bagian tengah mulai dari 1 kg sampai dengan 3 kg dengan kenaikan 0,25 kg. Sedangkan tempat beban bagian depan dan belakang dibuat konstan dengan massa bagian depan 1 kg dan bagian belakang 2 kg. Gambar 43 menunjukkan grafik hubungan antara beban total dengan kedalaman lembah yang menunjukkan penurunan transmitansi cahaya akibat penekanan pada roda depan dan belakang.



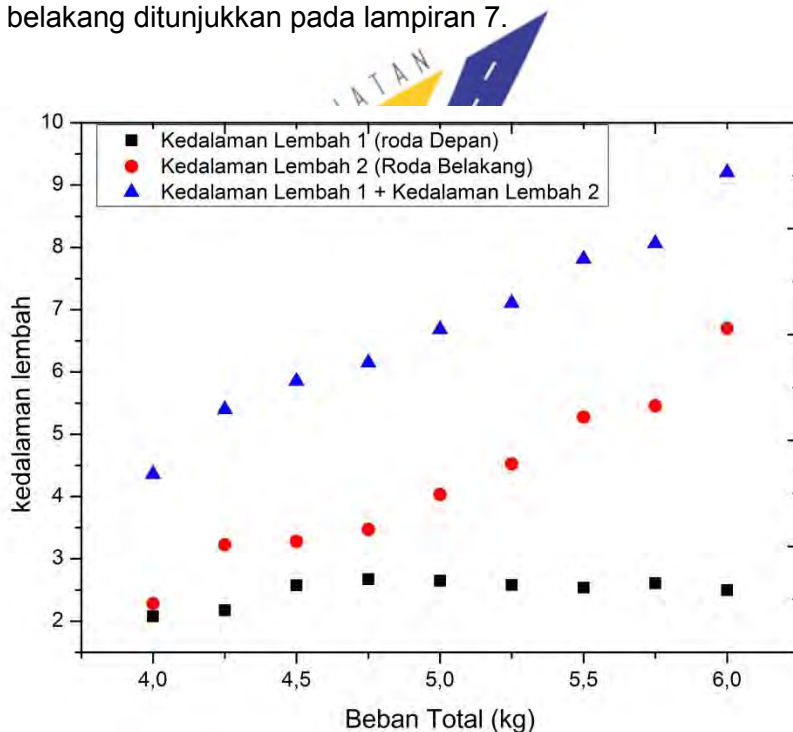
Gambar 43 Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian tengah.

Berdasarkan trend grafik pada Gambar 4.23., jumlah cahaya fiber sensor yang hilang pada sumbu roda belakang dan depan mengalami kenaikan ketika posisi beban bagian tengah ditambah. Berdasarkan data tersebut juga dapat diketahui bahwa penambahan massa beban bagian tengah mempengaruhi distribusi beban pada kedua sumbu roda beban berjalan. Kedua sumbu roda beban berjalan sama-sama mengalami penambahan gaya berat karena penambahan massa dilakukan ditengah sehingga

distribusi gaya berat akan dibagi ke sumbu roda depan dan belakang. Penjumlahan kedalaman lembah 1 dan 2 pada grafik dalam Gambar 43. juga menghasilkan trend grafik yang linier, dimana grafik penjumlahan ini menunjukkan total gaya berat dari beban berjalan ketika variasi beban di tengah.

3.5.3 Variasi Beban Bagian Belakang

Variasi massa bagian belakang sama dengan sebelumnya yaitu mulai dari 1 kg sampai dengan 3 kg dengan kenaikan 0,25 kg. Sedangkan tempat beban bagian tengah 2 kg dan bagian depan 1 kg. Gambar 44 menunjukkan grafik hubungan antara beban total dengan kedalaman lembah yang diakibatkan oleh sumbu roda depan dan belakang. Data lengkap variasi bagian belakang ditunjukkan pada lampiran 7.



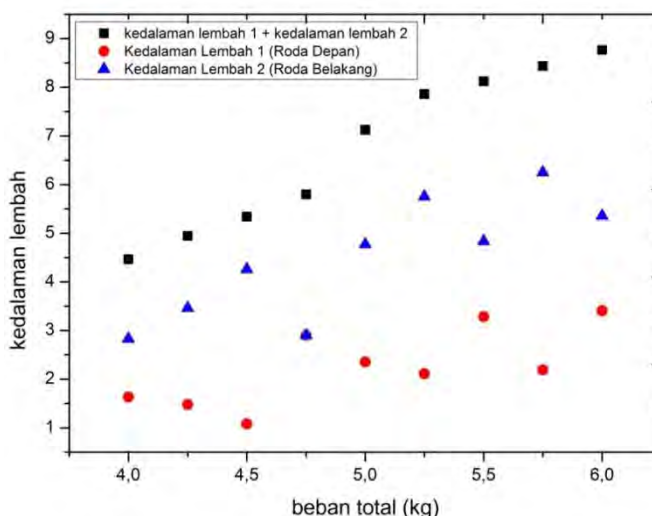
Gambar 44 Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban bagian belakang.

Berdasarkan grafik pada Gambar 44, terlihat bahwa kedalaman lembah 2 mengalami kenaikan ketika bagian belakang ditambah beban terus menerus, sedangkan pada lembah 1 tidak mengalami mengalami kenaikan. Pertambahnya nilai kedalaman lembah 2 menunjukkan bertambahnya gaya berat yang diberikan pada sumbu roda belakang.

Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa pengaruh penambahan beban bagian belakang hanya mempengaruhi gaya berat pada sumbu roda bagian belakang. Pada gambar diatas ditunjukkan penjumlahan antara lembah 1 dan lembah 2 dan menghasilkan grafik yang liner. Grafik penjumlahan ini menunjukkan gaya berat total yang bekerja pada beban berjalan ketika variasi massa pada posisi belakang.

3.5.4 Variasi Beban Posisi Tidak Menentu

Pada pengujian ini beban tidak divariasi pada satu tempat melainkan acak atau tidak tergantung posisi peletakan beban. Gambar 45 menunjukkan grafik hubungan antara beban total dengan kedalaman lembah 1 dan lembah dua yang menunjukkan penekanan pada roda depan dan belakang.

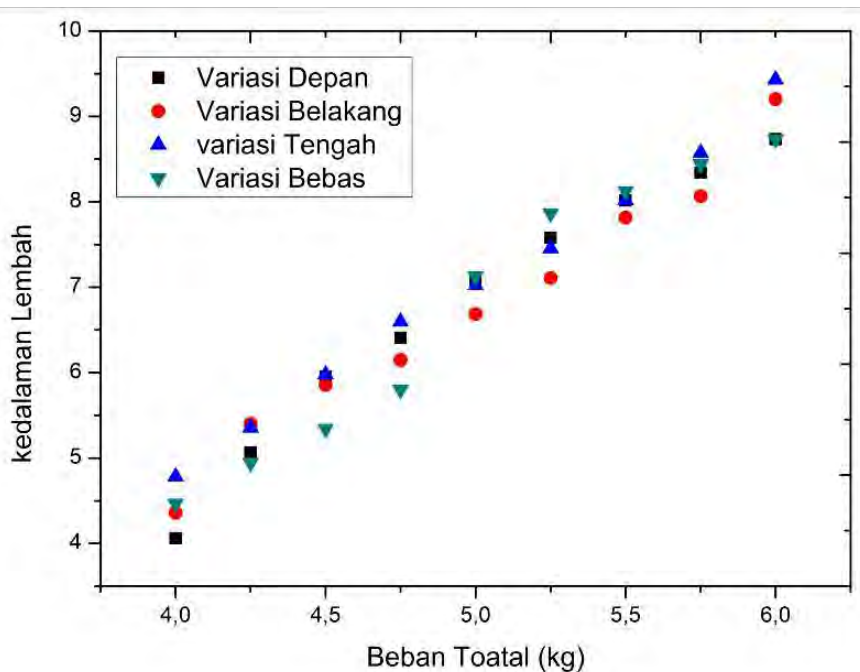


Gambar 45 Grafik hubungan beban total dengan kedalaman lembah pada variasi beban tidak menentu

Grafik pada Gambar 45, menunjukkan kedalaman lembah 1 dan 2 pada saat penambahan beban. Berdasarkan trend grafik tersebut terlihat bahwa kedalaman lembah 1 dan 2 tidak menentu ketika beban bertambah. Hal ini terjadi karena penambahan beban divariasi pada posisi yang tidak menentu atau bebas dalam penambahan massanya sehingga kedalaman lembah 1 dan 2 menjadi tidak menentu. Kemudian meninjau grafik penjumlahan antara lembah 1 dan lembah 2 pada grafik tersebut ternyata menghasilkan trend yang linier. Grafik penjumlahan lembah 1 dan 2 menunjukkan hubungan beban total dengan kedalaman lembah total antara sumbu roda depan dan belakang. Grafik yang linier tersebut membuktikan bahwa gaya berat pada beban berjalan.

3.5.5 Analisa sinyal optik *fiber sensor* terhadap variasi massa Beban

Data beban total dengan jumlah nilai presentase cahaya yang hilang akibat penekanan roda depan dan belakang pada pengujian berbagai posisi variasi penambahan massa beban pada pengujian sebelumnya kemudian ditinjau dan dibandingkan. Gambar 46 merupakan grafik gabungan data antara berbagai variasi posisi penambahan massa beban berjalan.



Gambar 46 Grafik gabungan posisi variasi beban

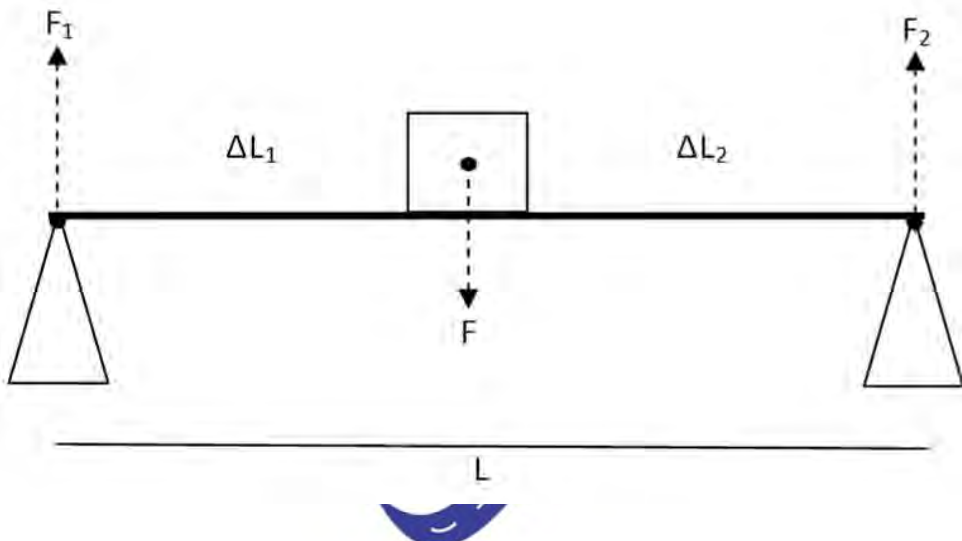
Pada grafik tersebut menunjukkan bahwa variasi massa pada berbagai posisi menghasilkan trend grafik yang sama. Hal ini membuktikan bahwa gaya berat total beban berjalan adalah penjumlahan dari gaya berat per sumbu dan tidak dipengaruhi posisi beban pada beban berjalan. Persamaan garis pada grafik Gambar 46. dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Persamaan garis berbagai variasi posisi penambahan massa beban

Posisi variasi	Persamaan Garis	R ²
Depan	$y = 2,2554x - 4,47156$	0,96554
Belakang	$y = 2,15007x - 4,013$	0,97553
Tengah	$y = 2,213x - 4,04189$	0,99397
Tidak Menentu	$y = 2,35467x - 5,00978$	0,95949

Berdasarkan persamaan garis yang di dapat dari pengujian berbagai variasi posisi penambahan massa di dapat persamaan garis hampir sama.

Hasil di atas membuktikan bahwa gaya berat total beban berjalan tidak dipengaruhi posisi massa beban pada beban berjalan. Beban pada beban berjalan akan terdistribusi pada sumbu roda beban berjalan yang presentase beratnya sesuai dengan posisi beban tersebut. Hal ini dapat dijelaskan dengan ilustrasi fisika pada gambar 47.



Gambar 47 Ilustrasi distribusi gaya pada beban berjalan

Gambar 47 memperlihatkan beban dengan massa tertentu diletakkan lempengan yang ditumpu oleh dua penyangga. Beban tersebut memberikan gaya F yang arahnya ke bawah. Menurut hukum Newton Ketiga tentang aksi reaksi maka ada gaya balik yang arahnya berlawanan dan besarnya sama. karena lempengan ini ditumpu oleh dua penyangga maka gaya balik akan terdistribusi pada dua penyangga tersebut.

$$\begin{aligned} F &= - F \\ &= - (F_1 + F_2) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dimana Besarnya F_1 dan F_2 bergantung pada posisi beban, sehingga

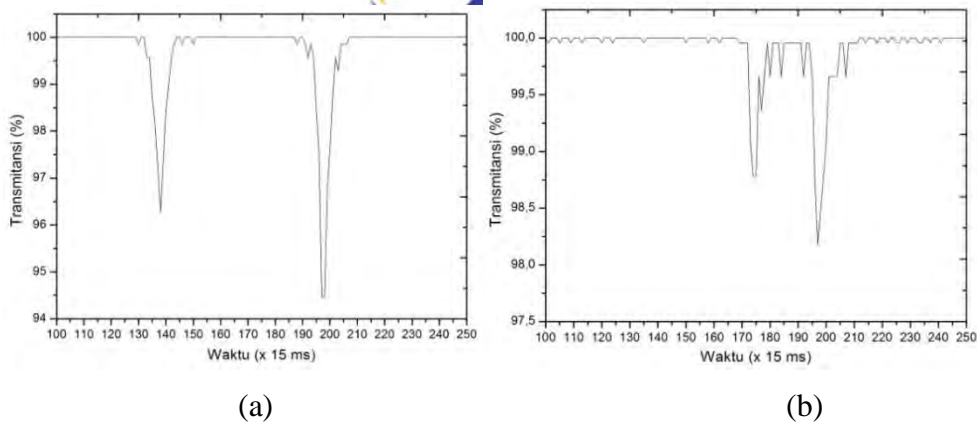
$$F_1 = F \Delta L_2 / L \text{ dan} \quad (3.5)$$

$$F_2 = F \Delta L_1 / L \quad (3.6)$$

3.5.6 Hasil Data dan Pembahasan Variasi Kelajuan Beban berjalan

Pengujian variasi kelajuan ini berguna untuk mengetahui pengaruh kelajuan beban berjalan pada saat melintasi *fiber sensor* terhadap sinyal optik keluaran *fiber sensor*. Dalam pengujian variasi kelajuan ini, kelajuan diatur dengan menggunakan power supply yang dihubungkan pada sumber daya beban berjalan. Beban berjalan dideteksi dengan menggunakan sensor *photogate* yang sebelumnya sudah dibuat.

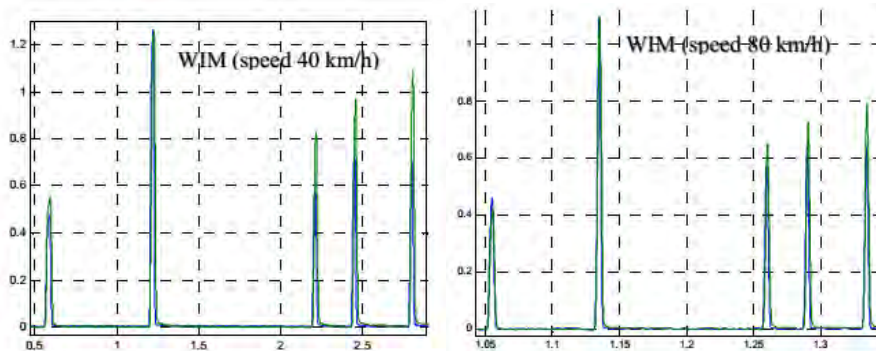
Berdasarkan data yang sudah diambil terdapat perbedaan nilai transmitansi ketika beban berjalan bergerak dengan kelajuan yang berbeda. Gambar 48. merupakan grafik sensor ketika dilewati beban berjalan dengan kelajuan yang berbeda.



Gambar 48 Grafik fiber sensor ketika dilewati beban berjalan (a) kelajuan 0,24 m/s (b) kelajuan 0,6 m/s

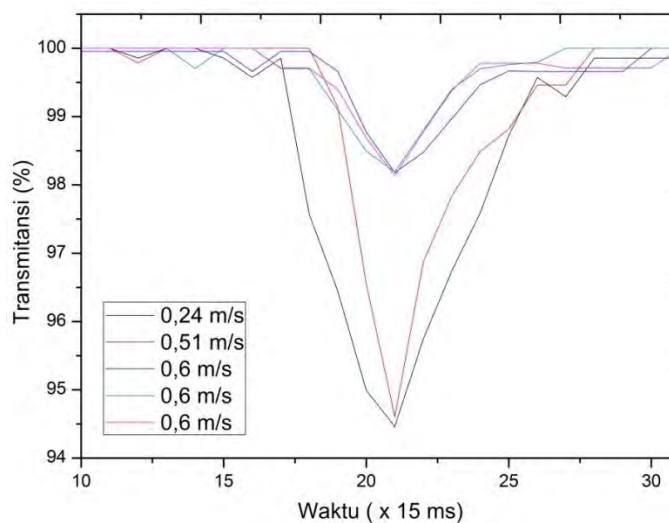
Hasil di atas menunjukkan bahwa kelajuan yang berbeda menyebabkan nilai transmitansi yang berbeda. Hasil tersebut juga sesuai dengan penelitian sebelumnya yang sudah dilakukan oleh Batenko *et al* (2011). Gambar 4.29.

Merupakan grafik hasil pengujian yang dilakukan oleh Batenko *et al* (2011). Gambar 49. menunjukkan sensor WIM ketika dilewati beban berjalan dengan 5 sumbu roda dengan kelajuan yang berbeda yang menunjukkan fenomena yang sama pada penelitian ini.

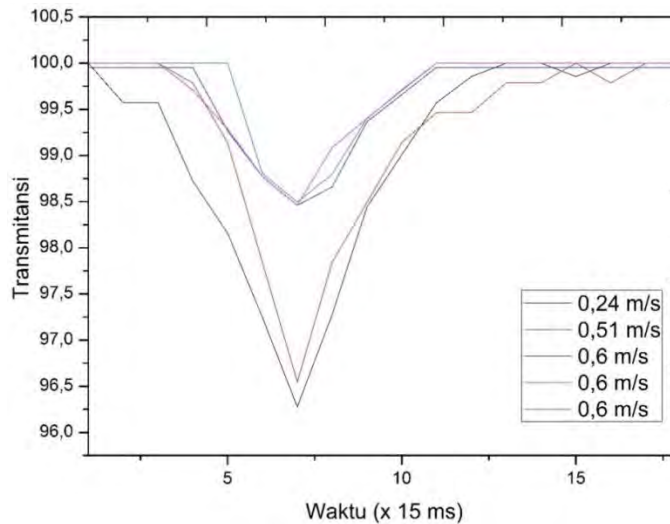


Gambar 49 Contoh grafik sensor WIM ketika dilewati beban berjalan
(Batenko *et al*, 2011)

Hasil pengujian *fiber sensor* tentang variasi kelajuan yang ditampilkan per sumbu roda ditunjukkan pada Gambar 50 dan 51. Gambar tersebut menunjukkan nilai transmitansi roda depan dan dengan nilai titik lembah ditempatkan satu garis.



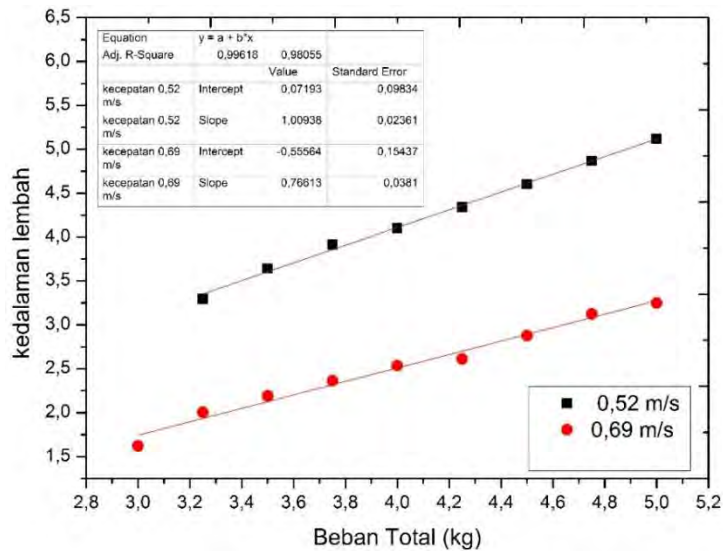
Gambar 50 Grafik tinjauan roda belakang transmitansi *fiber sensor* yang dilewati beban berjalan dengan kelajuan bervariasi.



Gambar 51 Grafik tinjauan roda depan transmitansi *fiber sensor* yang dilewati beban berjalan dengan kelajuan bervariasi

Berdasarkan grafik pada Gambar 50 dan 51 dapat diketahui bahwa jika beban berjalan dengan beban konstan dan bergerak dengan kelajuan sama, maka akan didapat nilai transmitansi dari *fiber sensor* yang sama. Ketika kelajuan beban berjalan divariasikan, maka nilai transmitansi *fiber sensor* menjadi berbeda. Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa nilai penurunan transmitansi *fiber sensor* semakin besar jika kelajuan beban berjalan rendah dan penurunan transmitansi *fiber sensor* semakin kecil ketika kelajuan beban berjalan tinggi.

Pengujian selanjutnya yaitu variasi beban dengan dua kelajuan yang berbeda kemudian akan dibandingkan antara keduanya. Grafik perbandingan tersebut ditunjukkan pada Gambar 52.



Gambar 52 Grafik Beban vs kedalaman lembah dengan dua kelajuan berbeda

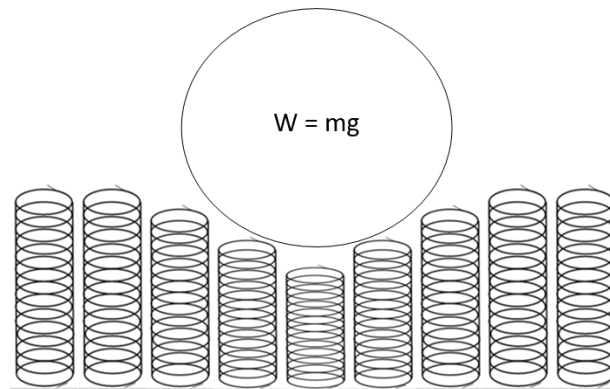
Berdasarkan grafik pengujian pada Gambar 52, terlihat jelas bahwa pada kelajuan yang berbeda, penambahan beban akan membentuk grafik yang linier dengan posisi berbeda. Dari grafik tersebut juga ditunjukkan jika kelajuan semakin besar maka kedalaman lembah akan kecil dan juga sebaliknya. Berdasarkan pengujian tersebut dalam penerapan lapangan akan ada hasil pengukuran beban dinamik dan beban statik, di mana beban dinamik lebih kecil daripada beban statik yang tergantung dari kelajuan beban berjalan tersebut.

Fenomena tersebut belum dijelaskan pada penelitian yang sudah dilakukan oleh Batenko *et al* (2011). Pada penelitian ini fenomena tersebut dapat dijelaskan dengan pendekatan konsep implus yang terjadi pada *fiber sensor*. Ketika beban berjalan bergerak dengan kelajuan tertentu melewati *fiber sensor*, maka gaya berat akan diberikan pada *fiber sensor* pada waktu sesaat Δt atau lamanya waktu sumbu roda beban berjalan mengenai *fiber sensor*. Ketika sumbu roda beban berjalan mengenai *fiber sensor*, akan ada energi yang diberikan pada *fiber sensor* (E_k). Karena sumbu roda beban

berjalan mengenai *fiber sensor* hanya sesaat maka akan ada implus (I) yang juga bekerja pada *fiber sensor*.

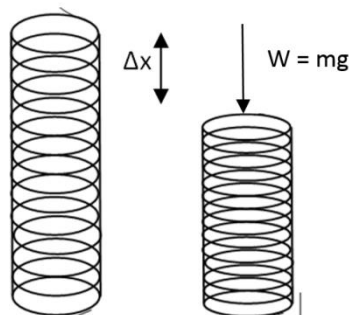
$$I = W\Delta t \quad (3.7)$$

Dimana W pada persamaan 4.7 menunjukkan gaya berat pada sumbu roda beban berjalan. *Fiber sensor* yang bahan utamanya adalah *rubber* dipandang sebagai deretan pegas yang tersusun rapi. Ketika terkena beban berjalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 53, maka pegas tersebut akan mengalami penurunan sejauh Δx . Deretan pegas seperti pada Gambar 5.33 mengalami penurunan sesuai dengan gaya yang diterimanya.



Gambar 53 *Rubber silicone* yang dipandang sebagai deretan pegas

Jika ditinjau satu pegas maka akan seperti pada Gambar 54.



Gambar 54 Pegas pada saat diberi gaya.

Pegas ketika terkena gaya maka akan mengalami pergeseran sebesar Δx . Ketika gaya diberikan pada pegas, energi kinetik beban (E_k) diubah menjadi energi potensial pegas (E_p), Sehingga

$$E_k = E_p \quad (3.8)$$

$$\frac{P^2}{2m} = \frac{1}{2} k \Delta x^2 \quad (3.9)$$

Dimana P adalah momentum ketika beban mengenai pegas. Seperti yang sudah dijelaskan diatas yaitu karena beban berjalan mengenai *fiber sensor* pada selang waktu tertentu, maka akan ada implus yang bekerja sehingga persamaan (4.9) menjadi:

$$\frac{(W\Delta t)^2}{2m} = \frac{1}{2} k \Delta x^2 \quad (3.10)$$

Dimana W adalah gaya berat yang mengenai *fiber sensor* yang besarnya $W = mg$. Nilai m adalah massa beban berjalan dapat diubah menjadi $m = \frac{W}{g}$. Sehingga persamaan 3.10 menjadi:

$$\frac{W^2 \Delta t^2 g}{2 W} = \frac{1}{2} k \Delta x^2 \quad (3.11)$$

$$\Delta x = \Delta t \sqrt{\frac{Wg}{k}} \quad (3.12)$$

Persamaan diatas meperlihatkan bahwa nilai Δx sebanding dengan waktu sesaat Δt . Nilai Δt menunjukkan waktu sentuh pada pegas dan jika waktu sentuh ini lama maka Δx akan bernilai maksimal. Waktu sentuh ini berhubungan dengan kelajuan beban berjalan ketika melewati *fiber sensor*. Ketika kelajuan semakin besar maka waktu sentuh juga semakin kecil. Secara matematis

$$v = \Delta s / \Delta t \quad (3.13)$$

Karena bertujuan untuk menghitung waktu sentuh beban berjalan yang mengenai *fiber sensor* maka Δs dalam persamaan diatas adalah lebar *fiber sensor*. dan Δt adalah waktu sentuh atau waktu beban berjalan mengenai *fiber sensor*. Dari persamaan 4.12 terlihat bahwa kelajuan beban berjalan berbanding terbalik dengan waktu sentuh. Hal ini yang menyebabkan terjadinya perbedaan penurunan transmitansi cahaya pada *fiber sensor* ketika kelajuannya bervariasi.

Dengan adanya hasil yang pengukuran berbeda ketika beban berjalan mempunyai kelajuan yang berbeda dapat menimbulkan error pengukuran. Dalam upaya mengatasi hal ini maka pada penelitian selanjutnya dimungkinkan untuk membuat database kelajuan untuk mengelompokkan grafik beban dengan kedalaman lembah yang sesuai dengan kelajuan tersebut. Dengan adanya pengelompokan berdasarkan kelajuan ini maka sensor *weigh in motion* akan bekerja lebih akurat.

4. PENUTUP

Hasil pengujian sensor terhadap bobot kendaraan bergerak memberikan hasil bahwasannya konfigurasi sensor serat optik yang terbaik sudah dapat diketahui dan dapat mengukur beban kendaraan di lapangan setelah melalui tahap kalibrasi, uji akurasi dan durabilitas.

Hal yang sangat penting dalam pembuatan sistem WIM adalah bobot kendaraan terukur sangat tergantung pada kecepatan kendaraan. Sebaran bobot kendaraan untuk tiap kecepatan dengan variasi massa membentuk garis lurus yang untuk sensor yang sama mempunyai gradient yang sama. Hasil experiment yang telah kami lakukan memberi rekomendasi dapat diperolehnya bobot kendaraan statis dari data bobot kendaraan terukur dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abramovich, H., 2012, Piezoelectric-based weigh-in-motion system and method for moving vehicles, Patent Publication No. WO2012038955 A1.
- Angel, S., 1994, *Mass-produced flat multiple-beam load cell and scales incorporating it*, US Patent Number: 5,090,493.
- Bergan, T. A. dan Hanson, R.L., 2009, Measurement of wheel and/or axle load of road vehicles US 8080742 B2.
- Cantero, D., Karaumi, R., Gonzales, 2015., The Virtual Axle concept for detection of localised damage using Bridge Weigh-in-Motion data, Engineering Structures, Volume 89, Pages 26-36
- Huang, Y.,Palek, L., Strommen, R., Worel B., dan; Chen, G., 2014, Real-time weigh-in-motion measurement using fiber Bragg grating sensors, Proc. SPIE 9061, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014.
- Jacob, B. and Beaumelle, V. F., 2010, Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology, [IATSS Research](#), [Volume 34, Issue 1](#), 9–15
- Lydon, M. Taylor, S.E. ; Robinson, D. ; Callender, P, 2.14, Development of a Bridge Weigh-in-Motion Sensor: Performance Comparison Using Fiber Optic and Electric Resistance Strain Sensor Systems, Sensors Journal, IEEE Volume:14 Issue:12.
- Marzuki, A., 2008, Kajian Awal Karakteristik Rugi-rugi Fiber Optik PT Telkom Bermode Tunggal Terlilit yang Diarahkan untuk sensor Bobot/Tekanan, Proc. Seminar Nasional Fotonika, Jurusan Teknik Fisika ITS.
- Marzuki, A., Heriyanto, M., Setiyadi, D., Koesuma, S., 2015, Development of Landslide, Early Warning System Using Macro-bending Loss Based Optical Fibre Sensor, Proc. The International Conference on Science and Engineering, Bali.

- Marzuki, A., Novianto, H., Hidayat, W., Setyawan, A., 2014, Intensity Modulated Fiber Sensor Configuration Equipped with a Variable Fiber Optic Attenuator, Proc. The Second International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE2014)
- Navarrete, M.C. dan Bernabeu, E., 1994, Fibre-optic weigh-in-motion sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 41, Issues 1–3, 1 April 1994, Pages 110-113
- Reynold, W. R., Hertel, J. E., Rutkowski, K.R., 2014, *Weigh in Motion Scale*, US Patent No. 8,736,458 B2.
- Rocha, J.G., Couto, C., J.H. Correia, J. H., 2000, *Smart load cells: an industrial application*, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 85, Issues 1–3, 25, 262-266.
- Vijayaraghavan, K., Pruden, S., Rajamani, R., Paul., S., 2011, Weigh in Motion Sensors, Patent US20110127090 - Weigh-In-Motion (WIM) Sensor.
- Wawan., K. dan Marzuki, A., 2011, Rancang bangun Spectrometer Digital untuk Mengukur Panjang Gelombang Laser He-Ne., Proc. Seminar Nasional, Lontar Physics Forum IKIP PGRI Semarang.