

**PEMBUATAN SENSOR BERAT KENDARAAN BERJALAN
DENGAN AREA SENSING YANG DIPERLUAS**



**Disusun Oleh:
Gesit Tali Singgih**

M0213037

SKRIPSI

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
OKTOBER 2018**

**PEMBUATAN SENSOR BERAT KENDARAAN BERJALAN
DENGAN AREA SENSING YANG DIPERLUAS**



**Disusun Oleh:
Gesit Tali Singgih**

M0213037

SKRIPSI

**Diajukan untuk memenuhi sebagian
persyaratan mendapatkan gelar Sarjana Sains**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
OKTOBER 2018**

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI

Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area *Sensing* Yang Diperluas

Yang ditulis oleh:

Nama : Gesit Tali Singgih
NIM : M0213037

Telah diri dan disyahkan beras oleh dewan pengaji pada:

Nama : Karmila
Tanggal : 18 Oktober 2018

Oleh

Gesit Tali Singgih
M0213037

1. Ketua Pengaji : Dr. Pidjo Nurasyid S.Si., M.Si.
NIP. 19721013 200003 1 002

2. Sekutu Pengaji : Telah disetujui oleh
Sopri Kusuma, S.Si., M.Si.
NIP. 19720901 200003 1 001

3. Asisten Pengaji I :
Pembimbing I : Ahmad Marzuki S.Si., Ph.D
NIP. 19680508 1997021001

Ahmad Marzuki S.Si., Ph.D
NIP. 19680508 1997021001

Tanggal : 2 Oktober 2018

Pembimbing II

Mohtar Yunianto S.Si., M.Si
NIP. 19800630 200501 1 001

Tanggal : 20 Oktober 2018

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul: Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area
Sensing Yang Diperluas

Telah ditulis oleh:

Nama : Gesit Tali Singgih
NIM : M0213037

Telah diuji dan dinyatakan lulus oleh dewan penguji pada

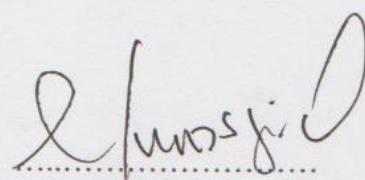
Hari : Kamis

Tanggal : 18 Oktober 2018

Dewan Penguji:

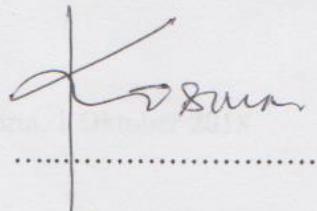
1. Ketua Penguji

Dr. Fahru Nurosyid S.Si., M.Si
NIP. 19721013 200003 1 002



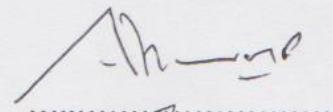
2. Sekretaris Penguji

Sorja Koesuma, S. Si.,M.Si.
NIP. 19720801 200003 1 001



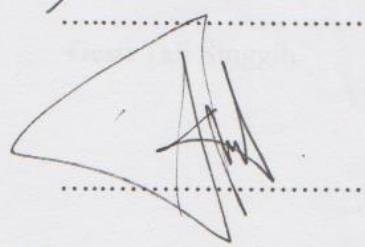
3. Anggota Penguji 1

Ahmad Marzuki S. Si., Ph. D.
NIP. 19680508 199702 1 001



4. Anggota Penguji 2

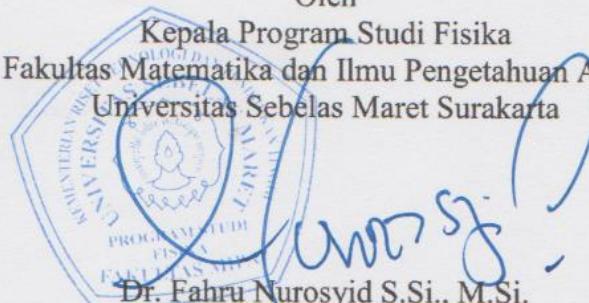
Mohtar Yunianto S.Si., M.Si
NIP. 19800630 200501 1 001



Disahkan pada tanggal 07-11-2018

Oleh

Kepala Program Studi Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Sebelas Maret Surakarta



Dr. Fahru Nurosyid S.Si., M.Si.

NIP. 19721013 200003 1 002

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi intelektual skripsi saya yang berjudul **“Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area Sensing Yang Diperluas”** adalah hasil kerja saya dan sepengetahuan saya hingga saat ini isi skripsi tidak berisi materi yang telah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain atau materi yang telah diajukan untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di Universitas Sebelas Maret atau di Perguruan Tinggi lainnya kecuali telah dituliskan di daftar pustaka skripsi ini dan segala bentuk bantuan dari semua pihak telah ditulis di bagian ucapan terimakasih. Isi skripsi ini boleh dirujuk atau difotokopi secara bebas tanpa harus memberitahu penulis.

Surakarta, 1 Oktober 2018

Gesit Tali Singgih

HALAMAN MOTTO

He looked at the granite. To be cut, he thought, and made into walls. He looked at a tree. To be split and made into rafters. He looked at a streak of rust on the stone and thought of iron ore under the ground. To be melted and to emerge as girders against the sky.

- Ayn Rand, *The Fountainhead*, menceritakan Howard Roark

HALAMAN PERSEMBAHAN

Karya ini dedikasikan kepada:

Liu Ci Xin

Atas idenya

&

Elon Musk

Atas pekerjaanya

Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area *Sensing* Yang Diperluas

Gesit Tali Singgih

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Sebelas Maret

ABSTRAK

Telah dibuat sensor berat kendaraan berjalan dengan area *sensing* yang diperluas untuk mengatasi masalah pengukuran berat kendaraan tanpa mendisrupsi arus transportasi. Penelitian ini menggunakan prinsip fiber optik *macrobending* dan elastisitas karet. Fiber optik dirangkai dalam struktur *heliks* dan ditempatkan di dalam karet. Sumber cahaya dan detektor cahaya ditempatkan di dua ujung fiber optik. Detektor cahaya mengukur perubahan transmitansi cahaya ketika terjadi perubahan bentuk karet akibat adanya *impulse* dari kendaraan yang melewati sensor. Detektor cahaya di desain untuk memaksimalkan nilai *signal to noise ratio* dan *bandwidth*. Program komputer ditulis untuk melakukan akuisisi dan pengolahan data yang berasal dari sensor berat. Data dianalisa untuk menghasilkan nilai kecepatan kendaraan dan sifat sinyal akibat *impulse* kendaraan terhadap sensor. Sensor memiliki akurasi, presisi, dan sensitivitas yang lebih baik dari pekerjaan sebelumnya.

Kata kunci: fiber optik, *macrobending*, *heliks*, transmitansi, *signal to noise ratio*, *impulse*, *bandwidth*.

Wide Area Weight In Motion Sensor

Gesit Tali Singgih

Physics Department, Faculty of Mathematics and Science
Sebelas Maret University

ABSTRACT

Wide area weight in motion sensor has been made to tackle the problem of measuring vehicle weigh while still in motion. The sensor use macrobending principle of fiber optic and rubber elasticity. Fiber optic are woven together into a helix structure and placed within the rubber. Light source and detector are placed within two end of the fiber. Light detector measure the change in light transmittance caused by changes in rubber shapes when a vehicles transfer an impulse towards the detector. Light detector are designed to optimize signal to noise ratio and bandwidth. A software are written to acquire and analyze the signal from sensor. The data are analyzed to measure the speed and signal properties caused by impulse to the sensor. Sensor has accuracy, precision, and sensitivity that surpass previous works.

Keyword: Optical fiber, macrobending, helixs, transmittance, signal to noise ratio, impulse, bandwidth.

KATA PENGANTAR

Penulis menyadari bahwa untuk membuat suatu karya yang dapat berguna dan memiliki dampak yang nyata di kehidupan sehari hari sangatlah sulit, walaupun begitu penulis berharap karya ini dapat berguna walau sekecil apapun bagi yang mempelajarinya. Untuk penulis sendiri karya ini adalah perjalanan penuh dengan optimisme yang diikuti oleh pesimisme dan perasaan ketidak-berdayaan. Ratusan jam dihabiskan untuk mendesain alat, yakni bagian yang paling menyenangkan, diikuti dengan proses pembuatan alat, bagian yang penuh dengan rasa malas dan rentan terhadap distraksi, dan diikuti dengan pemrosesan data, yang penuh dengan kebahagiaan apabila data sesuai harapan dan penuh dengan keputus-asaan apabila tidak terjadi perkembangan dari hasil sebelumnya.

Penulis mengucapkan terimakasih terhadap Bapak Ahmad Marzuki S.Si., Ph.D atas bimbingan dan panduanya, dimana tanpa beliau penelitian ini tidak dapat terealisasikan. Kepada Bapak Mohtar Yunianto S.Si., M.Si penulis mengucapkan terimakasih, karena antusiasmenya di dalam kelas menginspirasi penulis untuk belajar menulis program, tanpa aspek itu karya ini tidak dapat berjalan. Penulis juga berterimakasih kepada seluruh dosen dan karyawan di Prodi Fisika atas seluruh ilmu yang telah diberikan.

Surakarta, Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN MUKA	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Batasan Masalah	4
1.3 Perumusan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Radiasi Elektromagnetik	6
2.1.1 Prinsip Fermat.....	7
2.2 Fiber Optik.....	8
2.2.1 Lintasan Cahaya Dalam Waveguide Bengkok	9
2.3 LED	11
2.4 Photodioda.....	12
2.5 Neural Network	13
2.6 Osilator Harmonik yang Diberi Impulse	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	17
3.2 Alat Dan Bahan Penelitian	17
3.2.1 Alat	18
3.2.2 Bahan Penelitian	19
3.2.3 Software Penunjang	22
3.3 Metode Penelitian	23
3.3.1 Persiapan Alat dan Bahan.....	24
3.3.2 Pembuatan Sensor WIM.....	25
3.3.3 Test Awal.....	25

3.3.4	Test Lapangan.....	25
3.3.5	Pembuatan software pengolah data otomatis.....	26
3.3.6	Test Reliabilitas	26
	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1	Detektor Cahaya	30
4.2	<i>Analog to Digital Converter</i>	32
4.3	Sumber Daya	33
4.4	Pelindung Elektromagnetik	33
4.5	Rangkaian Fiber Optik.....	34
4.6	Hubungan Optik-Elektronik	35
4.7	Karet Sensor	37
4.8	Sensor Kecepatan Berbasis Cahaya.....	38
4.9	Kamera.....	39
4.10	Versi WIM.....	39
4.10.1	Versi 1.....	39
4.10.2	Versi 2.....	40
4.10.3	Versi 3.....	40
4.10.4	Versi 4.....	40
4.11	<i>Software Program WIM</i>	42
4.11.1	Pengiriman Data dan Koreksi <i>Error</i>	43
4.11.2	<i>Convolutional Neural network</i> Untuk Deteksi Jenis Kendaraan.....	43
4.12	<i>Signal to Noise Ratio</i>	44
4.13	Deteksi Pulsa Sinyal	47
4.14	Filter Sinyal	48
4.15	Pengukuran Kecepatan Berdasarkan Perbedaan Waktu Puncak Pulsa WIM.....	49
4.16	Respon WIM Terhadap <i>Impulse</i>	52
4.17	Hubungan Antara Pulsa Dengan dan Kecepatan Kendaraan.....	56
	BAB V PENUTUP.....	59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran	59

Daftar Pustaka	60
LAMPIRAN	62

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Fungsi subsistem dalam sensor WIM	30
Tabel 4.2. Tabel Noise untuk desain Versi 4	46
Tabel 4.3. Nilai koefisien Persamaan (4.6) untuk Gambar 4.20	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Gambar spektrum elektromagnetik, cahaya kasat mata adalah sebagian kecil dari spektrum. (Held, 2009).....	6
Gambar 2.2. Geometri, indeks bias, dan lintasan sinar di: (a) step index multimode fiber, (b) step index single mode fiber, dan (c) graded index multimode fiber. (Saleh, 2007).....	9
Gambar 2.3. Profil fiber optik yang dibengkokan. (Winkler, 1973).....	10
Gambar 2.4. Plot atenuasi fiber optik dalam fiber yang dibengkokan. ρ adalah radius fiber dan $\frac{z}{\rho}$ adalah panjang fiber dibagi dengan radius fiber. $\frac{\rho}{R}$ adalah radius fiber dibagi dengan radius kurva fiber bengkok. (Remouche, 2012)	11
Gambar 2.5. Responsivitas photodioda terhadap berbagai panjang gelombang, terlihat bahwa photodioda memiliki respons paling tinggi di sekitar cahaya merah dan near infrared (OSI Optoelectronics)	13
Gambar 2.6. Arsitektur VGGnet, setiap balok adalah lapisan neural network. (Khiyari, 2015)	14
Gambar 2.7. Response osilator harmonik terhadap impulse.(Nice, 2015).....	16
Gambar 3.1. Skema Sensor Fiber Optik WIM	17
Gambar 3.2. Skema rangkaian transimpedance amplifier	21
Gambar 3.3. Flow chart pembuatan system WIM	24
Gambar 4.1. WIM (a) Versi 1, (b) Versi 2, (c) Versi 3, (d) Versi 4	27
Gambar 4.2. Model 3 dimensi sensor WIM versi 4	28
Gambar 4.3. Grafik korelasi antar variabel dalam sensor WIM	29
Gambar 4.4. Detektor cahaya sensor WIM	31
Gambar 4.5. Sumber daya sensor WIM	33
Gambar 4.6. (a) Pelindung elektromagnetik rangkaian PCB (b) Kabel pelindung	33
Gambar 4.7. (a) Rangkaian fiber optik (b) Rangkaian fiber optik di dalam karet sensor	34
Gambar 4.8. Foto mikroskop (a) Potongan fiber optik dengan gunting, (b) Potongan fiber optik dengan silet ,(c) Permukaan LED, (d) Permukaan photodiode . Ukuran gambar adalah 750 x 1000 mikronM	35
Gambar 4.9. (a) Alat pemotong karet, (b) Karet sensor yang sudah dipotong	37

Gambar 4.10. (a) Sensor kecepatan , (b) Sumber cahaya, (c) Tabung detektor, (d) Lubang detektor	38
Gambar 4.11. Pad WIM (a) Port koneksi pad sensor wim, (b) Konektor kabel, (c) Kabel dan pad sensor, (d) Kotak kontroler	41
Gambar 4.12. Grafik interaksi antar sub-program sensor WIM	42
Gambar 4.13. Proses pengiriman data dilakukan secara berderet sesuai arah panah hijau dan dipisahkan menjadi paralel menuju channel 1 hingga channel 8.....	43
Gambar 4.14. Grafik sinyal yang diperbesar untuk memperlihatkan noise	44
Gambar 4.15. Grafik spektrum frekuensi sinyal	45
Gambar 4.16. Grafik pulsa sinyal kendaraan yang melewati sensor WIM.....	47
Gambar 4.17. Grafik sinyal dari Gambar 4.16 yang sudah di filter.....	48
Gambar 4.18. Grafik perbedaan waktu antara titik ekstrim sinyal dari dua rangkaian fiber optik dalam pad sensor WIM.	49
Gambar 4.19. Grafik pulsa kendaraan dengan berbagai kecepatan yang berbeda	52
Gambar 4.20. Grafik sampel sinyal dan grafik respon pad WIM terhadap impulse. Biru adalah data sinyal dan merah adalah plot persamaan respon pad WIM terhadap impulse.	55
Gambar 4.21. Grafik nilai perubahan transmitansi maksimum terhadap kecepatan kendaraan.....	56
Gambar 4.22. Grafik integrasi transmitansi terhadap kecepatan kendaraan	57
Gambar 4.23. Grafik nilai koefisien w_1 terhadap kecepatan kendaraan.	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perbandingan Operational Amplifier	62
Lampiran 2. Arsitektur <i>Convolutional Neural network</i> yang dibuat untuk mendeteksi kendaraan.....	63
Lampiran 3. Bandwidth dan SNR maksimum.....	64
Lampiran 4. Data sinyal dan pendekatan impulse response	65
Lampiran 5. Program WIM.....	69
Lampiran 6. Grafik sintetik data yang diperoleh dengan metode <i>stochastic gradient descent</i>	79
Lampiran 7. <i>Grafik data stream</i> sensor kecepatan dengan modulasi cahaya..	82

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
n	= indeks bias	-
n_1	= indeks bias medium pertama(<i>core</i>)	-
n_2	= indeks bias medium kedua(<i>cladding</i>)	-
c	= kecepatan cahaya di ruang hampa	m/s
v	= kecepatan cahaya pada material tertentu	m/s
θ_i	= sudut datang	rad atau derajat
θ_r	= sudut pantul	rad atau derajat
r	= Jari jari	cm atau m
λ	= Panjang gelombang	nm
A	= Absorbansi	-
β	= <i>Bandwidth</i>	Hz
W	= Integrasi sinyal	% x detik
T	= Temperatur	K
Q	= Fungsi optimisasi	-
i	= arus	A
R	= Resistansi	Ω
SNR	= <i>Signal to Noise Ratio</i>	Decibel

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Infrastruktur di era modern harus merefleksikan tingkat teknologi yang ada. Infrastruktur harus memanfaatkan secara penuh seluruh perkembangan di bidang sains dan teknologi. Hal yang disayangkan dari infrastruktur sekarang adalah belum diterapkannya secara maksimal kemajuan sains dan teknologi. Kebanyakan infrastruktur masih dibangun menggunakan tenaga manusia, dan baik pembangunan dan operasinya belum memanfaatkan teknologi modern.

Masalah paling besar dalam infrastruktur transportasi adalah ketahanan, hampir setiap tahun harus dilakukan perbaikan pada infrastruktur jalan dan jembatan. Biaya yang dikeluarkan untuk melakukan perbaikan sangat signifikan, pada tahun 2016 Bina Marga menghabiskan sekitar 50 % anggaran untuk biaya perbaikan dan perawatan jalan. Biaya yang sangat besar itu dikeluarkan karena begitu banyaknya titik yang harus diperbaiki, pada tahun 2014 hanya 62% jalan nasional yang dikategorikan dalam kondisi baik. Sebaliknya ada 3,12% atau 1.204 km dalam kondisi rusak ringan dan 2,93% atau 1.130 km rusak berat yang membutuhkan perbaikan (PUSDATIN Kementerian PUPR, 2016). Jelas bahwa kemampuan pemerintah Indonesia untuk menjaga infrastruktur tidak mencukupi dengan kapasitas manusia dan finansial yang ada sekarang.

Penyebab kerusakan jalanan adalah kualitas pembangunan jalan yang tidak memenuhi standar, berat kendaraan melebihi kualifikasi jalan(Jacob dkk., 2010), dan faktor eksternal seperti cuaca di Indonesia yang memang tidak ramah untuk infrastruktur aspal dan beton. Dari faktor-faktor tersebut, kelebihan beban kendaraan dapat diatasi dengan manajemen operasi yang lebih baik. Manajemen operasi yang baik dilakukan dengan memantau beban kendaraan secara *real time*, melarang kendaraan yang melebihi batas dalam regulasi untuk beroperasi dan memberikan denda terhadap pihak yang melanggar aturan. Pemantauan beban kendaraan harus dilakukan di banyak tempat, terutama di area yang selama ini

sering terjadi kerusakan jalan, idealnya pemantauan ini dilakukan tanpa mengganggu arus lalu lintas.

Pengukuran beban kendaraan yang digunakan selama ini menggunakan fasilitas khusus milik kementerian perhubungan. Proses pengukuran dilakukan dengan menempatkan kendaraan di atas timbangan dalam keadaan diam. Proses pengukuran membutuhkan waktu selama beberapa menit dan hanya dapat dilakukan untuk satu kendaraan untuk setiap waktu, akibatnya sering terjadi antrian kendaraan. Dengan alat yang ada sekarang jumlah kendaraan yang ditimbang hanya sekitar 500 kendaraan per alat setiap harinya, dan hanya kendaraan jenis tertentu saja yang dapat dimonitor, dan sebagian besar kendaraan dibiarkan begitu saja, Proses pengukuran beban yang memakan waktu lama juga membawa dampak negatif bagi ekonomi, karena proses pengiriman barang menjadi terhambat.

Infrastruktur jalan membutuhkan teknologi pengukuran beban kendaraan yang tidak mengganggu arus transportasi, terdistribusi di banyak tempat yang rawan, dan dapat beroperasi secara *real time*. Untuk merealisasikan hal ini Laboratorium Optik Fisika UNS telah melakukan pengembangan alat *weight in motion* (WIM) berbasis fiber optik. Fiber optik akan mengalami perubahan transmitansi apabila mengalami perubahan *bending radius* (Wu *et al.*, 2017), sensor berat dapat dibuat dengan memanfaatkan sifat ini. Suatu bahan elastis yang didalamnya ditanamkan fiber optik akan berubah bentuk apabila diberi gaya, dan dalam proses itu akan merubah *bending radius* fiber optik. Dengan melilit fiber optik menjadi bentuk *heliks* (Xiong *et al.*, 2016) ke suatu pipa elastis, bisa didapatkan sesuatu yang dapat digunakan untuk mengukur gaya sepanjang untaian tersebut. Selanjutnya untuk menambah ketahanan sensor, untaian fiber optik ditanamkan dalam bahan dengan elastisitas seperti karet *silicone*.

Penelitian sebelumnya berhasil membuktikan bahwa WIM berbasis fiber optik dapat digunakan untuk mengukur beban kendaraan yang sedang berjalan dengan akurasi yang bagus. Hasil ini sudah cukup untuk digunakan untuk menyeleksi kendaraan yang bebanya melampaui regulasi kementerian perhubungan . Salah satu masalah utama dalam pengembangan WIM adalah material yang

digunakan tidak dapat bertahan lama apabila diberi beban kendaraan dalam waktu lama. Untuk itu dibutuhkan material lain yang dapat beroperasi dalam kondisi cuaca jalanan sekaligus menahan berat kendaraan.

Sensitifitas sistem WIM fiber optik sebelumnya masih sangat terbatas, sistem tidak dapat mendeteksi berat kendaraan pribadi, hanya kendaraan berat saja yang dapat dideteksi. Untuk itu dibutuhkan sistem WIM yang lebih sensitif, akurat , dan presisi.

Alat pengukuran berat kendaraan WIM berbasis fiber optik berpotensi menjadi alat yang sangat bermanfaat. Alat ini tidak membutuhkan infrastruktur pendukung yang mahal seperti gedung dan area khusus, karena dapat beroperasi secara otomatis dan hanya membutuhkan komputer dan koneksi ke jaringan internet. Alat pengukur berat konvensional berharga Rp 565.400.000,- untuk yang paling besar, sedangkan WIM fiber optik diperkirakan hanya membutuhkan biaya sebesar Rp 10.000.000,- untuk dibuat. Di masa depan karena harganya yang murah alat WIM fiber optik dapat digunakan untuk memonitor jalanan di banyak tempat, kontras dengan alat konvensional yang hanya ada di tempat tempat khusus. Hal itu dapat meningkatkan kemampuan manajemen jalan sehingga kualitas jalan dapat lebih terjaga. Berbeda dengan alat konvensional WIM beroperasi tanpa mengganggu arus kendaraan dan dapat memonitor seluruh kendaraan.

Penelitian ini akan membuat prototipe sistem WIM yang dapat bekerja di lapangan dan dapat bertahan dalam kondisi jalanan. Diharapkan dengan menggunakan karet vulkanisir deformasi sensor ketika mendapat beban kendaraan dapat dengan mudah ditransfer menjadi perubahan transmitansi fiber optik. Diharapkan karet dapat mempertahankan elastisitasnya selama operasi dalam skala beberapa bulan dengan perubahan cuaca dan temperatur yang ada. Harapan akhir adalah sistem WIM fiber optik yang dibuat dapat menjadi alternatif menarik untuk memonitor jalan.

1.2. Batasan Masalah

Penelitian harus memiliki fokus agar berlangsung secara efektif. Fokus dari penelitian ini adalah:

1. WIM menggunakan karet ban kendaraan bekas.
2. Fiber yang digunakan dililit menjadi bentuk *heliks*.
3. WIM menggunakan 4 gulungan fiber yang ditanamkan dalam karet.
4. Sensor yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya adalah *Photodiode*.
5. Alat yang digunakan untuk mengakuisisi data adalah *arduino due*.
6. Program yang digunakan untuk memproses data dibuat sendiri oleh penulis menggunakan bahasa *Python*.

1.3. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dibuat berdasarkan latar belakang yang menjadi motivasi penelitian ini, berikut adalah rumusan masalah penelitian:

1. Bagaimana cara membentuk karet ban kendaraan menjadi bentuk dan ukuran yang tepat untuk membuat sensor WIM.
2. Bagaimana cara melilitkan fiber optik menjadi bentuk *heliks* dengan radius konstan dan jarak antar lingkar yang seragam.
3. Bagaimana cara menanamkan lilitan fiber optik dalam karet ban agar tidak ada gelembung udara dalam unit WIM.
4. Bagaimana cara memasang sensor *Photodiode* agar dapat mengukur intensitas cahaya dari fiber dengan level *noise* yang minimum dan dapat bertahan lama dalam kondisi cuaca di jalan.
5. Bagaimana cara memperoleh data dari sensor *Photodiode* tanpa interupsi dan dengan *bandwidth* cukup untuk mengukur sinyal dari kendaraan yang bergerak dengan kecepatan tinggi
6. Bagaimana cara menghilangkan *noise* dalam sinyal yang diperoleh.
7. Bagaimana cara mengekstrak informasi berat dalam sinyal.

1.4. Tujuan Penelitian

Sesuai dari latar belakang di atas, tujuan diadakannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat sensor WIM dengan fokus di bandwidth, akurasi dan presisi.
2. Membuat program analisa sinyal untuk mengekstrak informasi berat kendaraan yang bergerak.
3. Menentukan kecepatan kendaraan menggunakan WIM.
4. Menentukan sifat sinyal akibat impulse kendaraan yang melewati sensor WIM

1.5. Manfaat Penelitian

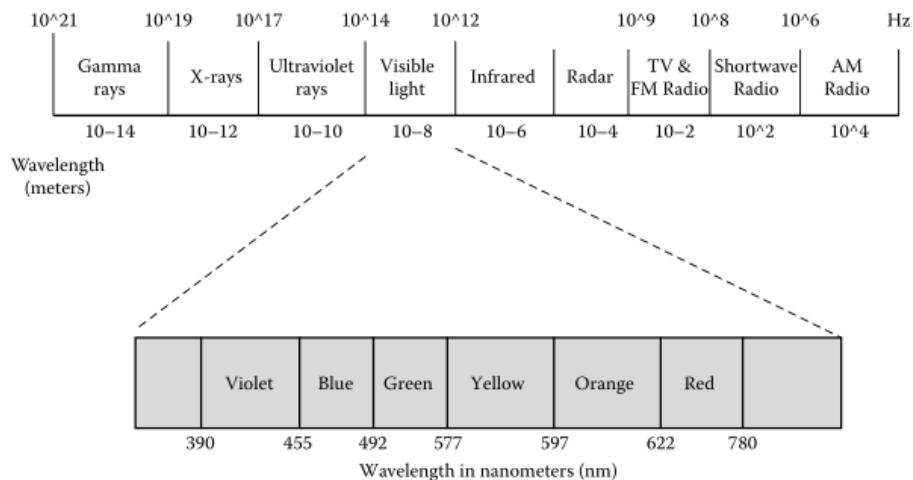
1. Produk berupa prototipe WIM berbasis fiber optik.
2. Sebagai basis produksi massal sistem WIM yang dapat menggantikan sistem jembatan timbang konvensional .

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi Elektromagnetik

Radiasi elektromagnetik secara klasik adalah vibrasi medan listrik dan medan magnet. Medan listrik dan medan magnet berosilasi dengan arah yang saling tegak lurus, keduanya merambat dengan kecepatan $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Spektrum gelombang elektromagnetik dikarakterisasikan dengan frekuensi atau panjang gelombangnya. Apabila diurutkan dari frekuensi yang paling tinggi dan panjang gelombang paling pendek, gelombang elektromagnetik dimulai dari sinar gamma, sinar-X, sinar ultraviolet, cahaya kasat mata, sinar inframerah, gelombang mikro, dan gelombang radio seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Gambar spektrum elektromagnetik, cahaya kasat mata adalah sebagian kecil dari spektrum. (Held, 2009)

Secara klasik gelombang elektromagnetik dihasilkan apabila ada muatan listrik yang mengalami akselerasi. Radiasi ini membawa energi, momentum, dan *angular* momentum dari partikel yang menghasilkannya, apabila gelombang elektromagnetik berinteraksi

dengan partikel lain, maka karakteristik itu akan di transfer ke partikel yang baru. Kuanta dari gelombang elektromagnetik adalah *photon*. Efek kuantum memberikan penjelasan baru untuk mekanisme terjadinya gelombang elektromagnet, seperti transisi energi level dalam atom dan radiasi benda hitam. Energi dari individual *photon* terkuantisasi, dan hubungannya linear dengan frekuensi *photon*. Hubungan itu diberikan oleh persamaan planck $E = \hbar\omega$ dimana E adalah energi *photon*, \hbar adalah konstanta *plank* tereduksi dan ω adalah frekuensi *angular* dari *photon*.

2.1.1 Prinsip fermat

Optik geometri digunakan untuk menganalisa cahaya sebagai sinar yang merambat mengikuti suatu garis tanpa mempedulikan aspek gelombang dari cahaya. Tahun 1661 Pierre de Fermat menunjukan bahwa cahaya bergerak mengikuti lintasan dengan waktu yang paling singkat diantara dua media. Menurut prinsip *Hamilton*, lintasan suatu partikel antara t_1 dan t_2 adalah :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} L(q_j, \dot{q}_j, t) dt = 0 \quad (2.1)$$

dimana L adalah Lagrangian yang diintegrasikan terhadap waktu dan $q_j (j = 1, 2, \dots)$ adalah koordinat partikel serta simbol *dot* diatas variabel menunjukan turunan terhadap waktu. Dari Persamaan (2.1) dapat digunakan persamaan Lagrange untuk mencari lintasan partikel:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) = \left(\frac{\partial L}{\partial q_j} \right) \quad (2.2)$$

Dengan menggunakan Persamaan (2.1), dapat ditentukan Lagrangian dari perambatan sinar melalui berbagai media. Formulasi prinsip Fermat dalam bentuk Persamaan (2.1) adalah:

$$\delta \int_A^B n(x, y, z) ds = 0 \quad (2.3)$$

$n(x, y, z)$ adalah distribusi indeks refraksi dan ds adalah panjang busur lintasan cahaya,

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (2.4)$$

persamaan di atas dapat ditulis ulang dalam bentuk :

$$ds = \left(\sqrt{1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right) dz \quad (2.5)$$

$$\dot{x} = \frac{dx}{dz}$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dz} \quad (2.6)$$

Persamaan (2.3) menjadi:

$$\delta \int_A^B n(x, y, z) \left(\sqrt{1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2} \right) dz = 0 \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) dimasukan dalam persamaan *Euler-Lagrange* akan didapat persamaan :

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{n \dot{x}}{\sqrt{1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \right) = \sqrt{1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.8)$$

masukan Persamaan (2.5) dalam Persamaan (2.8) :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dx}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.9)$$

untuk y dan z :

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dy}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial y} \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dz}{ds} \right) = \frac{\partial n}{\partial z} \quad (2.11)$$

ketiga persamaan diatas dapat disingkat menjadi:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (2.12)$$

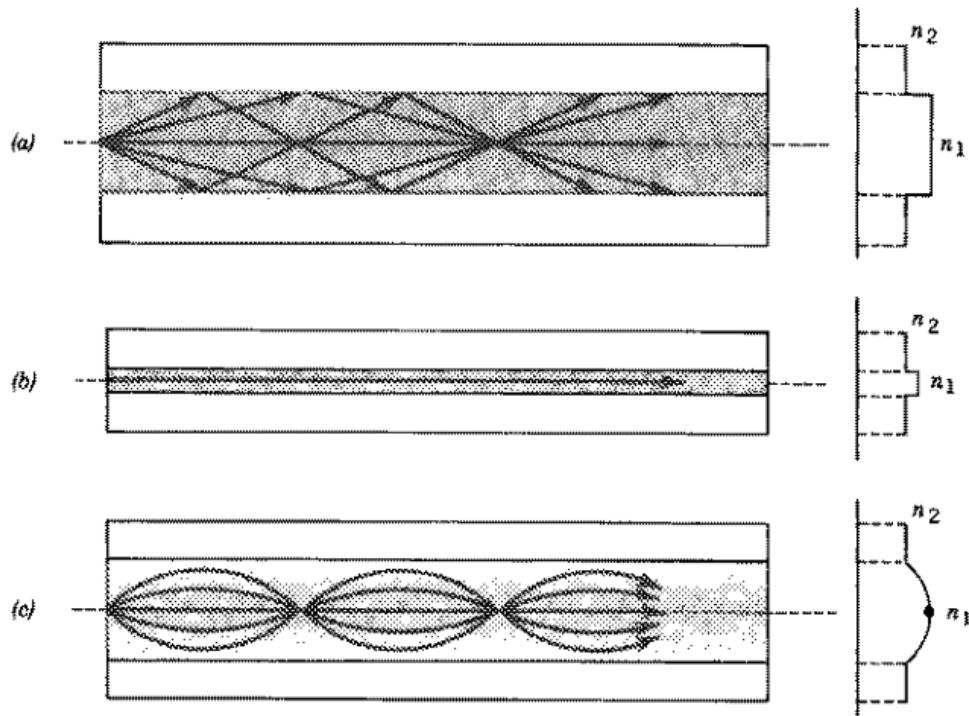
Persamaan (2.12) disebut persamaan sinar, menjelaskan lintasan sinar dalam medium dengan berbagai indeks bias.(Lakshminarayanan *et al.*, 2002)

2.2 Fiber Optik

Fiber optik adalah sejenis fiber yang transparan terhadap cahaya. Di dalam fiber optik cahaya bergerak melalui lintasan yang disebut *waveguide*. Cahaya terperangkap

dalam *waveguide* melalui fenomena pemantulan sempurna. Ada dua macam *waveguide*, yaitu *single mode waveguide* dan *multi mode waveguide*.

Fiber optik *single mode* hanya memperbolehkan satu mode propagasi cahaya. Masalah besar dalam komunikasi jarak jauh menggunakan fiber optik adalah *dispersi mode*, dalam fiber optik *single mode* tidak terjadi *dispersi mode* sehingga jenis fiber ini digunakan untuk komunikasi jarak jauh.



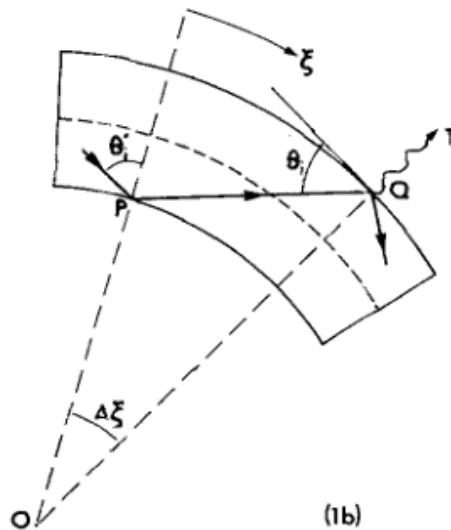
Gambar 2.2. Geometri, indeks bias, dan lintasan sinar di: (a) *step index multi mode* fiber, (b) *step index single mode* fiber, dan (c) *graded index multi mode* fiber.
 (Saleh dkk., 1991)

Dalam fiber optik *multi mode*, cahaya merambat dengan mengikuti berbagai lintasan, setiap sinar dalam lintasan akan membutuhkan waktu yang berbeda beda dalam untuk melalui fiber seperti dalam Gambar 2.2. *Dispersi mode* mengakibatkan pelebaran pulsa cahaya yang melewati fiber optik (DeCusatis, 2006).

2.2.1 Lintasan Cahaya Dalam *Waveguide* Bengkok

Cahaya mengikuti lintasan lurus dalam fiber *step index*. Fiber optik *step index* memiliki karakteristik indeks bias sebagai berikut :

$$n(y) = \begin{cases} n_1 & y \leq \rho \\ n_2 & y > \rho \end{cases} \quad (2.13)$$



Gambar 2.3. Profil fiber optik yang dibengkokan. (Winkler *et al.*, 1979)

Solusi dari persamaan sinar dalam *waveguide* yang lurus menghasilkan suatu *invariant* :

$$\tilde{\beta} = n(y)\cos \theta(y) \quad (2.14)$$

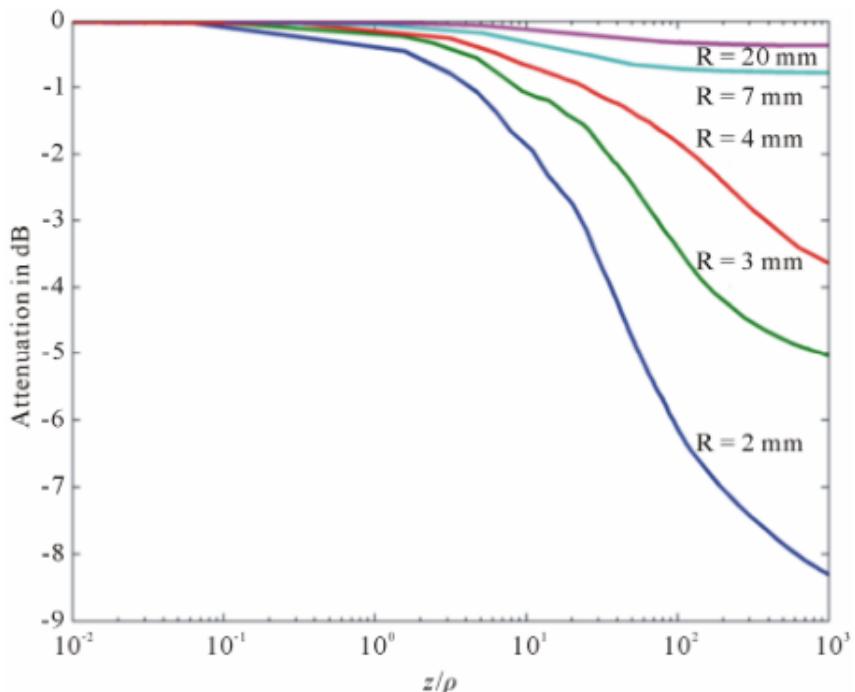
dimana θ adalah sudut yang dibentuk oleh sinar terhadap *waveguide*. Dalam *waveguide* yang dibengkokan, cahaya akan terperangkap dalam suatu bidang dengan *origin* o seperti Gambar 2.3 solusi dari persamaan sinar menunjukkan bahwa kuantitas :

$$\tilde{\eta} = n(r)r^2 \frac{d\xi}{ds} \quad (2.15)$$

Invariant sepanjang jalur cahaya, dimana n adalah indeks refraksi, r adalah jarak dari *origin* dan ξ adalah sudut dari garis refrensi X.

Apabila θ_i adalah sudut sinar terhadap garis tangen bagian luar dan θ'_i adalah sudut sinar terhadap garis dari *origin* ke lokasi sinar, Persamaan (2.14) menjadi :

$$(R - \rho) \cos \theta'_i = (R + \rho) \cos \theta_i \quad (2.16)$$



Gambar 2.4. Plot atenuasi fiber optik dalam fiber yang dibengkokan. ρ adalah radius fiber dan $\frac{z}{\rho}$ adalah panjang fiber dibagi dengan radius fiber. $\frac{\rho}{R}$ adalah radius fiber dibagi dengan radius kurva fiber bengkok. (Remouche *et al.*, 2012)

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa dalam fiber optik *step index* yang bengkok, atenuasi bergantung terhadap jarak. Bagian di dekat sumber cahaya tingkat atenuasi sangat tinggi, *loss* ini didominasi oleh sinar yang mendekati sudut kritis, selanjutnya kurva berbelok dan mengikuti garis lurus. Perilaku sinar dalam fiber yang bengkok perlu diperhatikan dalam membuat sensor fiber optik berbasis *makrobending*, karena tingkat atenuasi bergantung terhadap jarak suatu kejadian *bending* terhadap sumber cahaya fiber. (Remouche *et al.*, 2012)

2.3 Light Emitting Diode

Light Emitting Diode (LED) adalah komponen semikonduktor yang tersusun atas *p-n junction* yang mengemisikan cahaya ketika dialiri arus listrik. *Photon* akan dipancarkan apabila elektron dari semikonduktor tipe *N* berkombinasi dengan *hole* dari semikonduktor tipe *P*. energi *photon* ditentukan oleh *band gap* dari semikonduktor. Cahaya yang dipancarkan memiliki ciri khas spektrum yang sempit, namun tidak koheren seperti laser.

Temperatur berpengaruh terhadap operasi LED. Semakin tinggi temperatur, intensitas cahaya akan menurun dan spektrum akan bergeser menuju ke panjang gelombang yang makin panjang. Untuk menjaga agar intensitas LED konstan diperlukan regulasi arus listrik yang konstan dan manajemen temperatur eksternal yang baik.

2.4 Photodiode

Photodiode adalah komponen semikonduktor yang dapat merubah *photon* menjadi arus listrik. *Photodiode* dibuat dengan mendifusi *doping* tipe *N* terhadap semikonduktor tipe *P* maupun dengan mendifusi *doping* tipe *P* terhadap semikonduktor tipe *N*. *Photon* dengan energi melebihi energi ikat elektron dalam semikonduktor yang menumbuk permukaan akan menghasilkan pasangan elektron dan *hole* melalui efek fotolistrik. *Hole* berpindah ke anoda, sedangkan elektron ke katoda sehingga menghasilkan arus listrik. Arus yang dihasilkan oleh *photodiode* berbanding lurus dengan jumlah *photon* yang menumbuk.

Silikon merupakan semikonduktor yang sering digunakan untuk membuat *photodiode* memiliki *band gap* 1,12 eV. *Photon* yang energinya lebih dari 1,12 eV dapat mengeksitasi elektron, energi ini berkorespondensi dengan panjang gelombang 1100 nm.

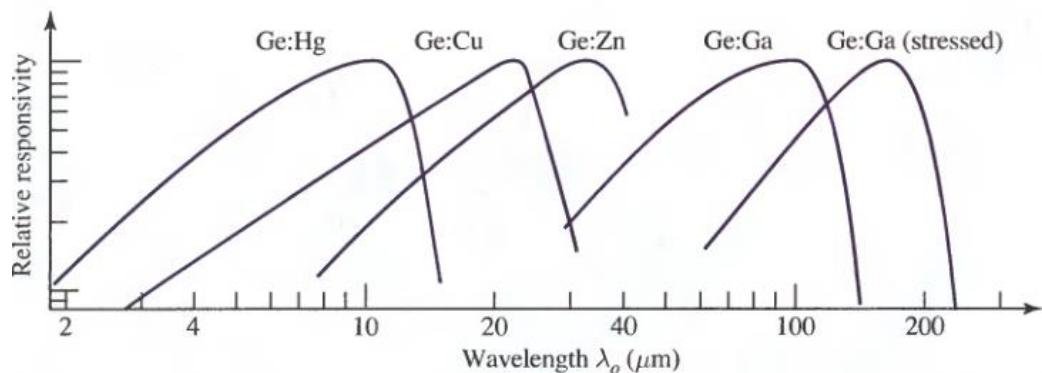
Photodiode memiliki waktu response yang sangat cepat, dalam orde *pico* detik, sehingga dapat digunakan untuk mengukur sinyal dengan *bandwidth* yang besar. Selain itu, karena *photodiode* bekerja berdasarkan efek kuantum, *noise* yang dihasilkan sangat kecil. Dikombinasikan dengan *lifetime* yang lama, *photodiode* sangat cocok digunakan sebagai sensor untuk mengukur perubahan intensitas cahaya. Efisiensi kuantum *Photodiode* berkisar antara 60 hingga 80 %, hampir seluruh *photon* yang menumbuk dikonversi menjadi arus listrik.

Untuk mengoperasikan *photodiode* diperlukan rangkaian *transimpedance amplifier*, yakni rangkaian yang mengubah dan memperkuat arus listrik menjadi tegangan yang dapat diukur. Rangkaian *transimpedance amplifier* membutuhkan komponen *Operational Amplifier* (OP-AMP).

Responsivitas R *photodiode* adalah ukuran sensitivitas terhadap cahaya, didefinisikan sebagai rasio *photocurrent* I_p dengan intensitas cahaya P

$$R = \frac{I_p}{P} \quad (2.17)$$

Photodiode memiliki responsivitas yang berbeda terhadap panjang gelombang yang berbeda. Responsivitas akan berubah tergantung pada temperatur, terutama di panjang gelombang *near infrared*, dimana responsivitas *photodiode* dapat berubah hingga 4 % untuk perubahan temperatur sebesar $\Delta T = 10$ K.



Gambar 2.5.Responsivitas *Photodiode* terhadap berbagai panjang gelombang, (Saleh *et al.*, 1991)

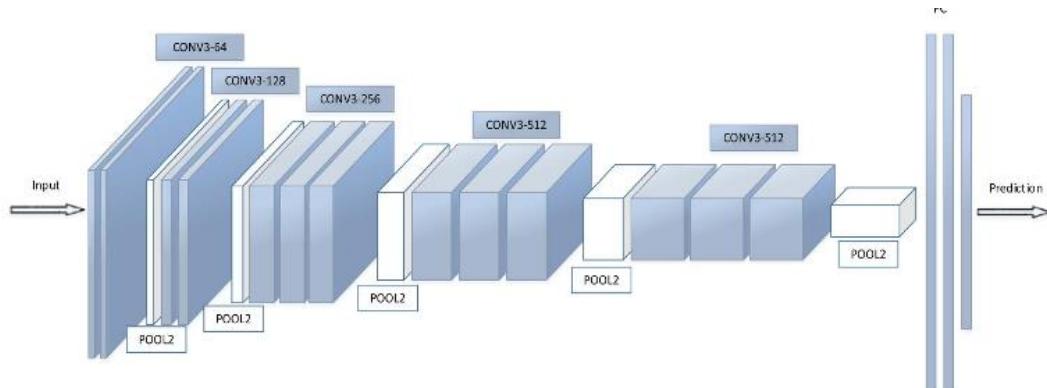
2.5 Neural network

Neural network adalah metode komputasi yang terinspirasi dari jaringan neuron yang ada di otak organisme biologis. *Neural network* masuk ke dalam sub disiplin *artificial intelligence*. Sistem *neural network* menggunakan proses *learning* dengan diekspos terhadap data untuk meningkatkan kemampuannya dalam mengklasifikasi data. *Neural network* dapat digunakan untuk mengklasifikasikan dan menganalisa data sinyal.

Neural network tersusun atas komponen dasar yang disebut dengan neuron buatan. Neuron buatan tergabung menjadi satu unit yang disebut *neural layer*, beberapa *neural layer* saling bertumpuk membentuk sistem *neural network*. *Neural layer* paling atas disebut dengan *input layer* dan *layer* terbawah disebut dengan *output layer*, sedang *neural layer* diantara keduanya disebut dengan *hidden layer*.

Setiap neuron dalam suatu *layer* memiliki koneksi dengan neuron di *layer* di bawahnya. Koneksi dapat diperkuat atau diperlemah dalam proses belajar. Mekanisme memperkuat dan memperlemah koneksi neuron disebut dengan *backporopagation* dan *gradient descent*.

Neural nerwork memiliki berbagai desain. Gambar 2.6 adalah *VGGNet* yang dikembangkan oleh *Visual Geometry Group* (Simoyan *et al.*, 2015). *VGGNet* tersusun atas 19 *layer neural network* dengan 140000000 parameter. *VGGNet* digunakan untuk mengklasifikasikan 1000 jenis objek visual. *Neural Nework* juga dapat mengklasifikasikan sinyal gelombang gravitasi dari *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO).(George *et al.*, 2017)



Gambar 2.6. Arsitektur *VGGNet*, setiap balok adalah lapisan *neural network*.
(Khiyari *et al.*, 2016)

Dalam sensor WIM *neural network* berfungsi sebagai sistem classifier sinyal menjadi berat kendaraan. *Neural network* dapat menganalisa data dengan memperhitungkan semua data dalam sinyal dan korelasinya. Dengan data yang bagus dan

proses *learning* yang sesuai, *neural network* mampu mengekstrak fitur-fitur yang signifikan dalam sinyal dan menggunakan fitur-fitur itu untuk mengklasifikasikan jenis sinyal. Penggunaan *neural network* dapat meningkatkan utilitas data dibandingkan dengan sistem yang hanya menghitung tinggi dan lebar sinyal.

2.6 Osilator Harmonik yang Diberi *Impulse*

Sifat sifat benda elastis yang diberi gaya sesaat dapat dimodelkan dengan osilator harmonik (Taylor, 2005). Gerakan osilator harmonik mengikuti persamaan diferensial sebagai berikut :

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.18)$$

m merupakan massa dari sistem dan b adalah konstanta peredaman dan k adalah konstanta pegas. Apabila sistem secara tiba tiba mengalami gaya sebesar F selama periode t_1 hingga t_2 maka sistem akan mendapatkan *impulse* sebesar :

$$J = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (2.19)$$

meskipun gaya ini berlaku selama periode t_1 hingga t_2 , namun perilaku yang dihasilkan dapat dimodelkan dengan fungsi *delta dirac*. Fungsi *delta dirac* iformulasikan sebagai berikut:

$$\delta(t - a) = \begin{cases} 0 & t < a \\ \infty & t = a \\ 0 & t > a \end{cases} \quad (2.20)$$

dengan $a = \frac{t_2 - t_1}{2}$

$$J = c \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - a) dt \quad (2.21)$$

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = \delta(t) \quad (2.22)$$

momentum $m\dot{x}(t)$ meloncat sebanyak c unit saat $t=a$, sehingga :

$$m\dot{x}(a^+) - m\dot{x}(a^-) = c \quad (2.23)$$

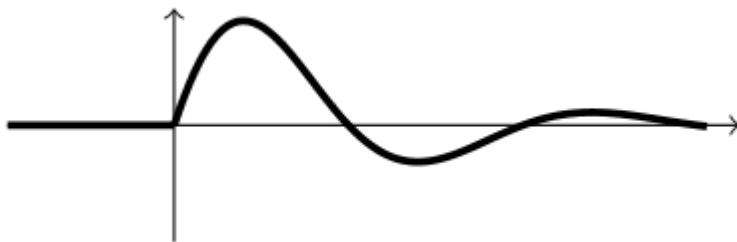
namun posisi tidak berubah

$$x(a^+) = x(a^-) \quad (2.24)$$

sehingga harus diselesaikan persamaan berikut:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 0, \quad \dot{x}(0^+) = \frac{1}{2}, \quad x(0^+) = 0, \quad (2.25)$$

persamaan di atas diselesaikan akan menghasilkan gerakan dengan kurva seperti di Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Response osilator harmonik terhadap *impulse*.(Nice, 2015)

BAB III

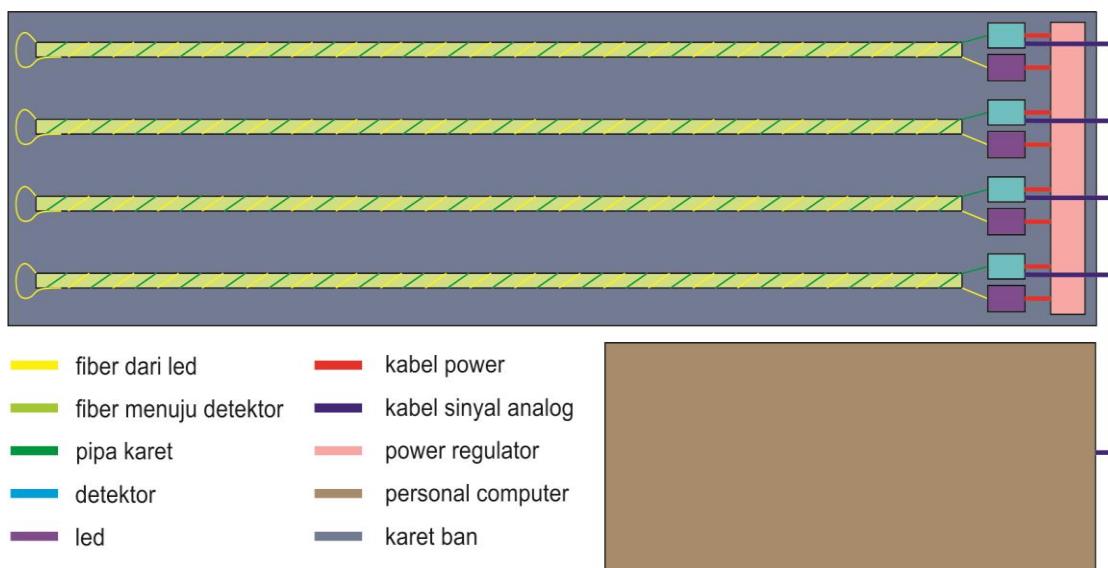
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan pada bulan Desember 2017 hingga April 2018. Tempat pembuatan alat adalah di Laboratorium Optik dan Fotonik Program Studi Fisika dan tempat pengambilan data adalah jembatan timbang kabupaten Wonogiri.

3.2 Alat Dan Bahan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah membuat sensor WIM berbasis fiber optik *makrobending* untuk mengukur beban kendaraan yang bergerak. Alat alat yang diunakan untuk membuat sistem sensor adalah detektor *photodiode*, rangkaian *transimpedance amplifier*, karet ban mobil, karet *silicone*, pipa karet, *Analog to Digital Converter* (ADC), kabel koaksial, fiber optik plastik, dan laptop.



Gambar 3.1. Skema Sensor Fiber Optik WIM

Fiber optik digulung dalam bentuk *heliks* ke empat buah pipa karet dan dimasukan ke dalam karet ban menggunakan karet *silicone* sesuai Gambar 3.1. Masing-masing gulungan fiber optik diberi sumber cahaya berupa LED merah, cahaya yang keluar dari ujung yang lain diteruskan ke dalam detektor *photodiode* dan dimasukan ke dalam rangkaian *transimpedance amplifier*. Sinyal listrik dari *amplifier* lalu ditransmisikan melalui kabel koaksial ke dalam ADC. Sinyal yang didapat adalah 5 *channel* data intensitas cahaya dari 4 gulungan fiber dan 1 sinyal referensi. Data kemudian diproses oleh komputer untuk mengilangkan *noise* dan menentukan berat kendaraan. Gambar 3.1 memperlihatkan rangkaian sensor WIM fiber optik.

3.2.1 Alat

1. *Oscilloscope*

Oscilloscope berfungsi untuk memvalidasi sinyal yang dikeluarkan oleh *transimpedance amplifier*. Rangkaian *transimpedance amplifier* mengeluarkan tegangan yang bervariasi sesuai dengan intensitas cahaya yang dideteksi oleh *photodiode*. Dalam proses pembuatan alat, banyak faktor yang tidak direncanakan akan timbul. Faktor yang paling kritis adalah apabila tegangan *output transimpedance amplifier* melebihi batas kemampuan ADC, sinyal akan merusak perangkat elektronik. Osiloskop dapat melakukan *plotting* sinyal dengan tegangan yang besar, maka digunakan *oscilloscope* dalam proses perancangan rangkaian.

Noise dalam rangkaian memiliki frekuensi yang berbeda beda. *Oscilloscope* dapat juga menganalisa karakteristik berbagai frekuensi yang mengandung *noise*, dengan itu memungkinkan upaya untuk mengidentifikasi dan mengeliminasi sumber *noise*.

2. Solder

Solder merupakan alat yang sangat berguna dalam penelitian ini. Untuk membuat papan *printed circuit board* (PCB) yang bebas dari *noise* diperlukan solder dengan daya yang tinggi dan ujung yang tajam. Kesalahan dalam proses penyolderan dapat memunculkan efek *capacitance* dalam sambungan elektronik, hal ini akan menjadi sumber *noise* yang sulit teridentifikasi, karena frekuensi rangkaian RC yang dihasilkan sulit teridentifikasi. Proses penyolderan yang baik menggunakan alat yang berkualitas sangat penting untuk performa alat.

3. Personal Komputer

Personal komputer digunakan untuk memproses, menyimpan, dan menganalisa data yang dikirimkan oleh ADC. Untuk membawa alat yang diciptakan menjadi sistem yang operasional, diperlukan perangkat lunak untuk mengidentifikasi sinyal dan merubahnya menjadi informasi berat.

4. Kompresor

Kompresor digunakan untuk menekan karet *silicone* ke dalam pipa karet. Karet *silicone* memiliki viskositas yang tinggi dan *curing time* yang cepat, untuk menekan karet *silicone* ke dalam pipa sebelum mulai membeku, diperlukan suatu injektor di yang berisi karet *silicone*, kemudian injektor diberi tekanan menggunakan kompresor.

5. Pemotong karet

Karet ban harus dipotong menjadi bentuk yang mirip dengan polisi tidur agar dapat berfungsi menjadi sensor WIM yang baik. Bagian yang akan ditanami dengan lilitan fiber harus dipotong untuk memberi ruangan. Untuk kedua hal di atas diperlukan alat pemotong karet.

3.2.2 Bahan Penelitian

1. Fiber Optik

Fiber optik dililit menjadi berbentuk *heliks* dan ditanamkan ke dalam karet. Apabila karet menerima berat kendaraan, maka fiber akan mengalami *bending*. Fiber optik yang digunakan adalah yang memiliki elastisitas yang tinggi dan tidak mudah pecah, maka dari itu digunakan fiber optik berbahan plastik.

2. Karet ban

Karet ban mobil memiliki karakteristik yang sangat sesuai untuk WIM. Elastisitas karet ban tidak terlalu besar maupun terlalu kecil sehingga apabila menerima beban kendaraan tingkat deformasi yang dialami tidak terlalu besar dan tidak terlalu kecil. Karet ban didesain untuk menerima berbagai keadaan seperti perubahan temperatur jalanan, kelembaban, dan terik matahari. Alasan di atas adalah mengapa karet ban sangat sesuai untuk membuat sensor WIM.

3. Karet *silicone*

Silcone rubber memiliki elastisitas yang tinggi. Agar untaian fiber optik mengalami deformasi yang seragam, maka diperlukan selubung elastis yang melindung fiber optik sekaligus memberi ruang bagi rangkaian fiber untuk mengalami *bending*.

4. Selang karet

Selang karet berbentuk bulat menyediakan penyangga bagi lilitan fiber. Karena selang bersifat elastis, maka fiber optik dapat berubah bentuk dengan bebas apabila sensor menerima beban. Selang karet juga menjaga agar untaian fiber memiliki diameter *heliks* yang konstan, aspek yang penting untuk menjaga akurasi sensor.

5. LED

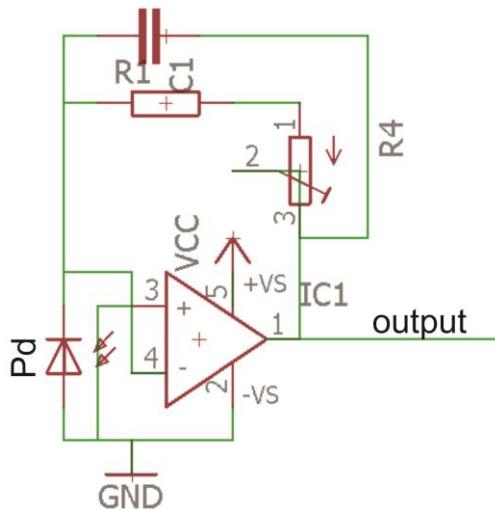
LED merah memancarkan cahaya yang dapat ditrasmisikan melalui fiber optik. Warna merah dipilih karena detektor *photodiode* yang digunakan sangat sensitif terhadap cahaya merah dan cahaya merah memiliki atenuasi yang rendah di fiber yang digunakan. Untuk memaksimalkan intensitas cahaya yang masuk ke dalam fiber optik, maka ujung fiber ditempatkan tepat di depan substrat semikonduktor LED.

6. *Photodiode*

Cahaya yang keluar dari fiber optik harus diukur dengan sangat akurat. *Photodiode* memiliki linearitas yang sangat bagus dalam mengukur intensitas cahaya. *Photodiode* memanfaatkan efek fotolistrik sehingga jumlah arus yang dihasilkan berbanding lurus dengan jumlah foton yang menumbuk *photodiode*. Dalam penelitian ini akan digunakan *photodiode silikon PIN*, yang memiliki sensitivitas tinggi pada cahaya merah. Untuk meningkatkan efisiensi detektor, maka ujung fiber optik yang mengeluarkan cahaya ditempatkan tepat di depan semikonduktor detektor.

7. OP-AMP

Arus listrik yang keluar dari *photodiode* sangat kecil dan rentan terhadap interferensi elektromagnetik. OP-AMP dalam rangkaian *transimpedance amplifier* digunakan untuk mengubah arus *photodiode* menjadi tegangan dan memperkuatnya. Gambar 3.2 memperlihatkan bagaimana berbagai komponen saling berhubungan. Terdapat lima buah rangkaian *transimpedance amplifier*, masing-masing untuk setiap *channel*



Gambar 3.2. Skema rangkaian *transimpedance amplifier*

8. Kabel koaksial

Untuk mentransfer sinyal analog dalam jarak jauh diperlukan kabel yang melindungi sinyal dari interferensi elektromagnetik. Kabel koaksial memiliki lapisan pelindung di sekeliling konduktor utama yang berfungsi sebagai pelindung elektromagnetik. Dengan kabel koaksial, sinyal analog dapat ditransfer menuju ADC yang secara fisik berada di jarak yang jauh dari WIM.

9. PCB

Segala sumber *noise* harus dieliminasi agar sinyal yang didapat memiliki kualitas yang baik. Papan PCB memungkinkan dibuatnya rangkaian listrik yang meminimalisir *noise*. Penempatan komponen dan *routing* lapisan tembaga pcb

harus dilakukan dengan memperhatikan bahwa sinyal yang lemah dari *Photodiode* harus dihubungkan dengan koneksi yang sependek mungkin dengan OP-AMP. Desain dan pembuatan papan PCB merupakan salah satu aspek yang menentukan kualitas sinyal yang didapat.

10. Resistor Presisi

Rangkaian *transimpedance amplifier* harus menggunakan resistor yang memiliki toleransi yang sangat rendah dan variasi yang kecil terhadap temperatur. Apabila resistor memiliki variasi yang tinggi terhadap temperatur, maka sinyal yang didapatkan juga akan memiliki sifat yang sama.

11. Kapasitor

Kapasitor digunakan untuk memfilter *noise* dalam rangkaian *transimpedance amplifier*. Kapasitor yang akan digunakan merupakan kapasitor keramik kualitas tinggi. Penggunaan kapasitor dengan kualitas jelek dapat menjadi sumber *noise* baru yang akan sulit diidentifikasi.

12. *Arduino due*

Kelima *channel* detektor membutuhkan ADC dengan *bandwidth* yang tinggi. *Arduino due* memiliki ADC yang dapat beroperasi hingga 64000 Hz pada resolusi 12 bit. *Multiplexer* digunakan untuk membaca sinyal analog dari setiap *channel*, dimana masing-masing *channel* saling berbagi *bandwidth*. *Bandwidth* tinggi memungkinkan pembacaan sinyal yang dihasilkan oleh kendaraan dengan kecepatan tinggi.

13. Laptop

Komputer digunakan dalam sistem operasional untuk memproses sinyal dan menampilkan data. Dalam sistem yang sudah jadi seluruh data akan diproses menjadi informasi berat kendaraan. Informasi ini digunakan oleh sistem untuk membuat *database* yang dapat diamanfaatkan untuk memonitor kondisi jalan.

3.2.3 Software Penunjang

1. Python

Python merupakan bahasa pemrograman yang sangat fleksibel. *Python* digunakan untuk membuat berbagai program yang digunakan, mulai dari akuisisi data, digital *filtering*, identifikasi sinyal, *neural network*, hingga penampilan data. Berikut adalah modul modul utama yang digunakan dalam penelitian ini:

a. Tensorflow

Tensorflow merupakan modul *neural network* yang digunakan untuk melakukan proses data. Dalam penelitian ini digunakan dua macam *neural network*, yakni 2d *convolutional neural network* untuk mengidentifikasi tipe kendaraan (Khiyari, *et al.*, 2016) dan 1D *neural network* untuk mengklasifikasikan berat kendaraan (George, *et al.*, 2017).

b. Scipy

Scipy digunakan untuk melakukan *digital filtering* dan identifikasi sinyal dari WIM. Sinyal membutuhkan pemrosesan digital yang tidak memakan fraksi komputasi yang signifikan dari komputer. Modul *scipy* menyediakan kemampuan *signal processing* yang cepat dan sesuai untuk aplikasi ini.

c. Numpy

Data dari sensor adalah 64000 angka sebesar 16 *bit* per detik, dan data dari kamera adalah 3 buah matrix dengan ukuran 600x400 dengan kecepatan 25 per detik. Data yang sangat banyak ini membutuhkan modul komputasi numerik yang cepat dan efisien. *Numpy* mampu memproses data dengan ukuran yang sangat besar dengan memanfaatkan secara efisien seluruh kapasitas komputasi komputer.

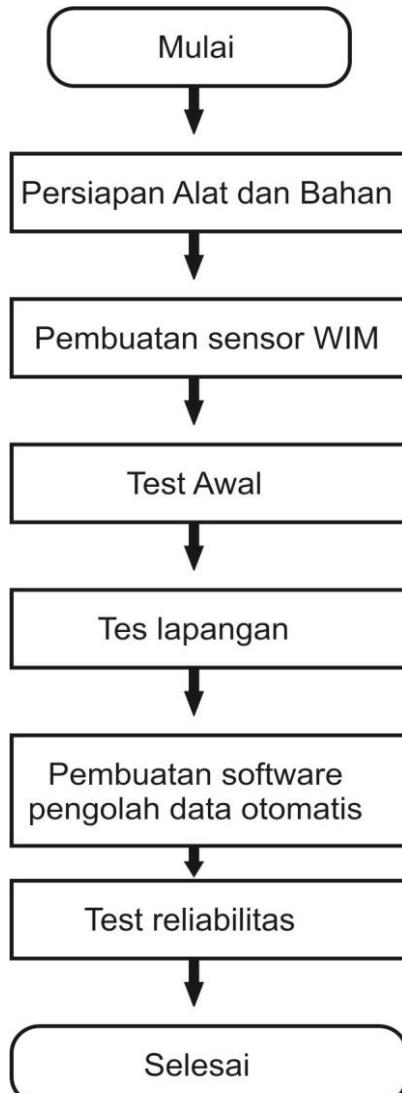
2. Arduino Integrated Development Environment (IDE)

Arduino IDE menyediakan perangkat *library* yang dapat memaksimalkan kemampuan *arduino due* ADC untuk mencapai *bandwidth* 24000 Hz. Strategi akuisisi data sensor cahaya dan transfernya ke komputer membutuhkan perhatian khusus untuk menjaga *reliabilitas* transfer dan menghindari terjadinya *crash*.

3.3 Metode Penelitian

Pembuatan sistem WIM dapat dikategorikan dalam beberapa fase. Fase yang pertama adalah persiapan alat dan bahan, dilanjutkan dengan pembuatan sensor WIM dan tes laboratorium. Setelah sinyal dirasa memuaskan dan level *noise* dirasa cukup rendah, penelitian berpindah ke tes lapangan. Test lapangan diikuti dengan pembuatan perangkat

lunak yang dapat memproses data secara keseluruhan tanpa campur tangan manusia. Yang terakhir adalah test reliabilitas sensor, *flow chart* kegiatan digambarkan di Gambar 3.3



Gambar 3.3 *Flow chart* pembuatan sistem WIM

3.3.1 Persiapan alat dan bahan

Beberapa alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sulit didapatkan, seperti karet ban dengan bentuk yang memenuhi harapan dan komponen komponen elektronik seperti *photodiode* dan OP-AMP. Perencanaan yang matang diperlukan agar semua barang yang diperlukan dapat tersedia pada waktunya. Dalam proses ini setiap komponen kritis harus disiapkan dengan jumlah yang lebih dari yang dibutuhkan, karena untuk meminimalisir waktu tunggu apabila terjadi kerusakan komponen. Khusus untuk OP-

AMP disiapkan berbagai jenis serial OP-AMP untuk mencari yang paling optimal untuk aplikasi WIM.

3.3.2 Pembuatan sensor WIM

Bagian fisik sensor WIM berukuran panjang 3.3 meter dan lebar 0.25 meter sehingga membutuhkan pekerjaan dan waktu yang banyak untuk menyelesaiakanya. Membuat bentuk karet agar sesuai dengan desain membutuhkan perhatian terhadap detail dimensi sensor. Karet *silicone* harus dicetak secara hati hati untuk mencegah timbulnya gelembung udara.

3.3.3 Test awal

Tes awal meliputi pengujian sinyal yang keluar dari sensor dan analisa *noise* level yang ada. Tahap ini dilakukan di dalam laboratorium dan tidak melakukan tes terhadap performa sensor dalam mendeteksi berat. Dalam tahap ini dicari setiap sumber *noise* yang muncul dalam rangkaian detektor cahaya dan dilakukan upaya untuk mengelimasinya. Aspek seperti reliabilitas sinyal juga di uji dengan membiarkan sistem berjalan selama beberapa hari dan mengamati apabila terjadi *crash*. Apabila terjadi ketidakstabilan maka dilakukan upaya untuk mengidentifikasi akar masalah dan upaya untuk menyelesaiakanya.

3.3.4 Test lapangan

Test lapangan bertujuan untuk melihat performa sensor WIM dalam mendeteksi berat kendaraan. Pada uji tahap pertama sensor WIM di uji dengan menepatkannya di jalan Universitas Sebelas Maret. Mobil dan motor pribadi yang lewat menginjak sensor akan membuat sinyal. Sinyal yang dihasilkan kemudian dilihat karakteristiknya tanpa mempedulikan berat kendaraan yang membuatnya, kemudian dilihat apakah terdapat anomali yang tidak terantisipasi yang dapat menjadi penghalang dalam operasi sistem Jembatan timbang memberikan perbandingan antara performa sistem

3.3.5 Pembuatan *software* pengolah data otomatis

Data dari tes lapangan digunakan sebagai basis strategi *signal processing*. Menggunakan *neural network* sinyal dari sensor WIM dirubah menjadi informasi berat kendaraan. Data berat kendaraan dimasukan dalam *database* yang disimpan

dan digunakan operator. Semua pemrosesan dan penyimpanan data dilakukan secara otomatis menggunakan *software* yang dibuat menggunakan *Python*.

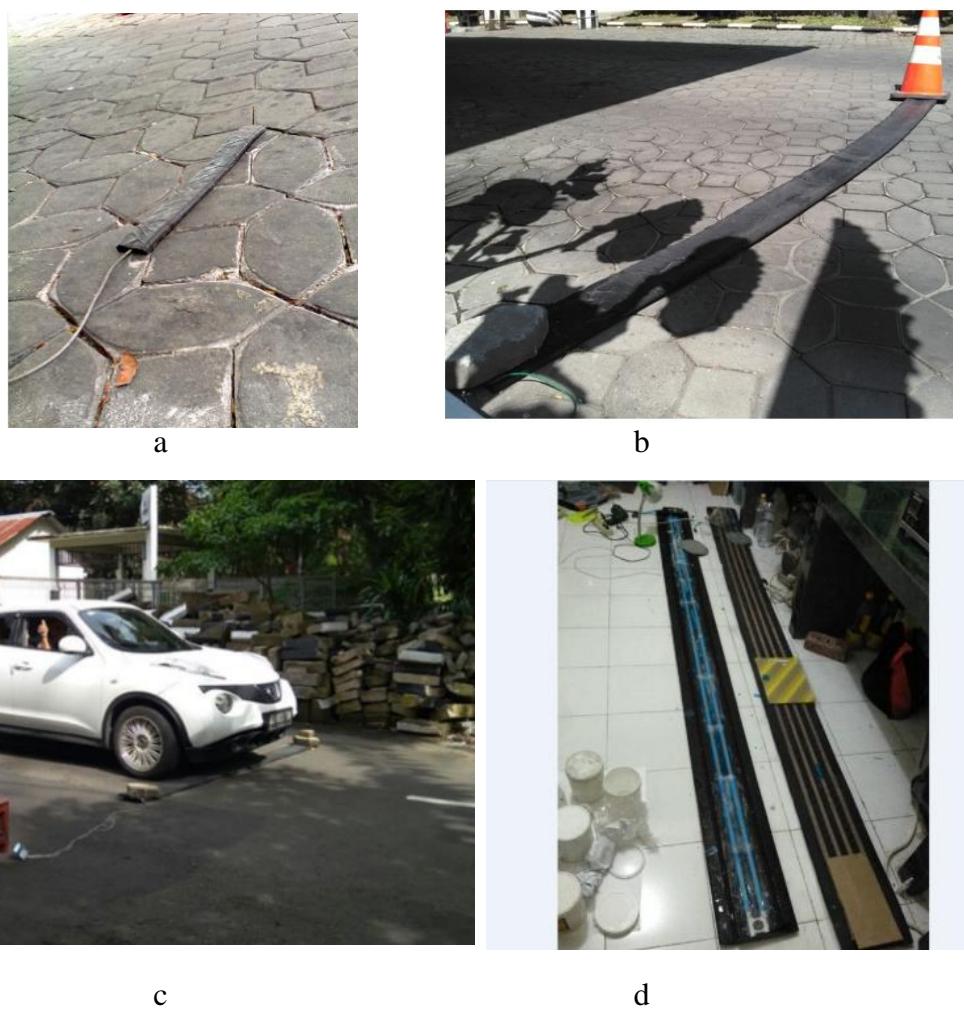
3.3.6 Test ketahanan

Tahap terakhir adalah melakukan uji ketahanan sistem . Bagian yang paling mudah mengalami kerusakan adalah detektor dan perangkat elektronik yang lain karena sensitivitas terhadap air. Test ketahanan dilakukan untuk melihat ketahanan terhadap hujan, panas matahari, perubahan temperatur dan kelembaban. Bagian yang perlu diantisipasi adalah walaupun karet ban dapat mengatasi beban kendaraan, namun masih harus dilihat perubahan elastisitas karet dengan perubahan temperatur dan ketahanan fiber optik dalam menghadapi perubahan bentuk karena beban yang bertubi tubi dari kendaraan.

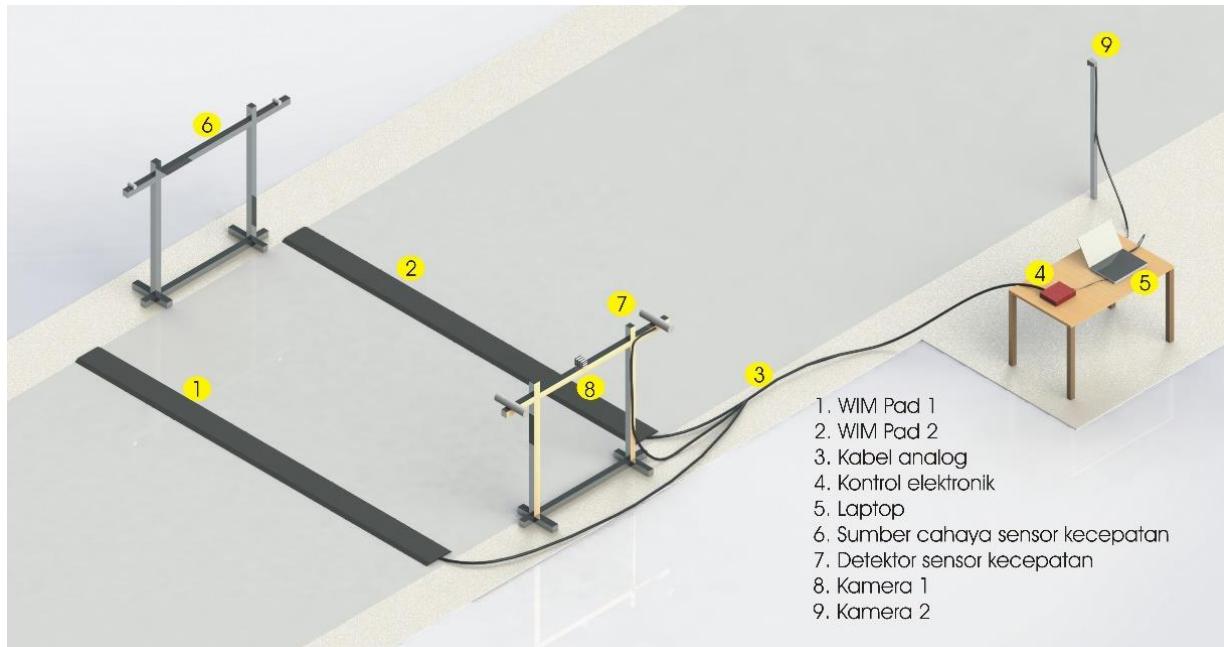
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian “Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area Sensing Yang Diperluas” dilakukan dengan hasil berupa 4 versi sensor WIM berbasis fiber optik. Sensor bekerja dengan mengukur perubahan transmitansi cahaya yang terjadi ketika ada *impulse* yang diterapkan terhadap rangkaian fiber optik di dalam karet. Masing-masing versi sensor tersusun atas sistem optik, sistem elektronik, dan *software*. Dalam bab ini dibahas desain dan data yang diperoleh. Setiap versi didesain dengan pelajaran dari versi sebelumnya. Gambar 4.1 memperlihatkan sensor WIM versi 1 hingga versi 4.



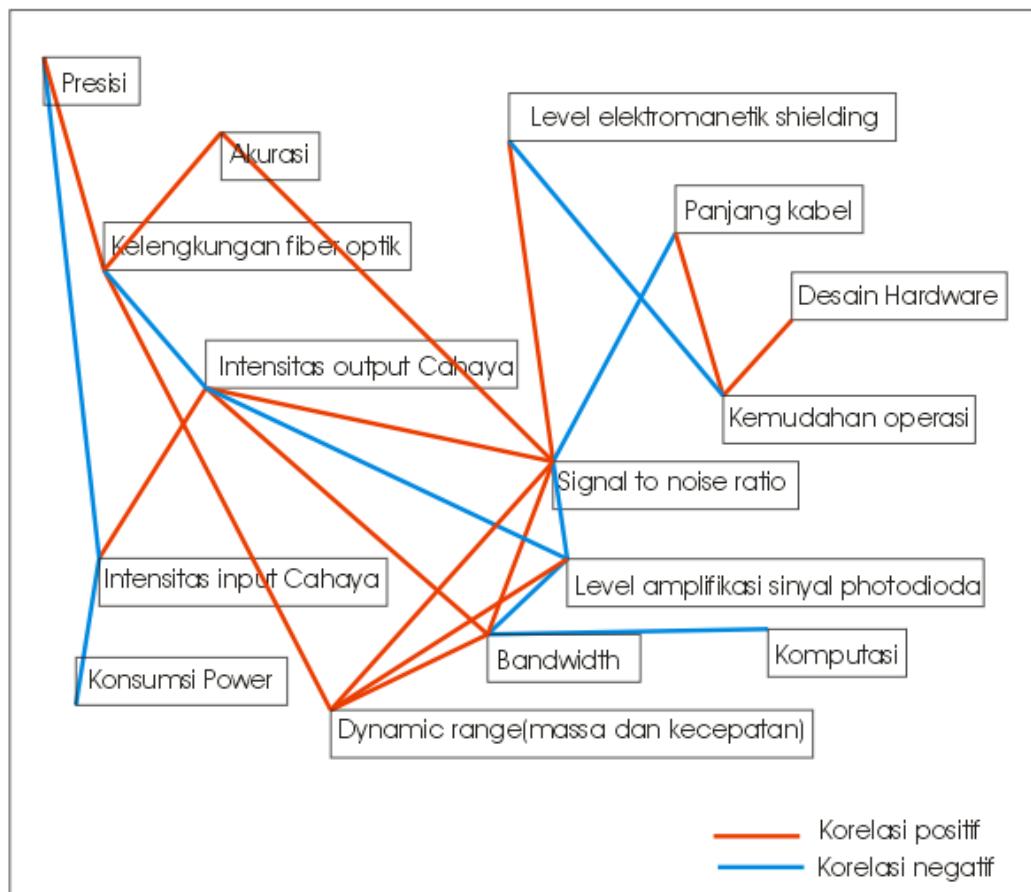
Gambar 4.1. WIM (a) Versi 1, (b) Versi 2, (c) Versi 3, (d) Versi 4



Gambar 4.2. Model 3 dimensi sensor WIM versi 4

Gambar 4.2 merupakan model versi terakhir, yakni versi 4. Versi 4 tersusun atas dua buah sensor berat WIM berbasis fiber optik, satu sensor pengukur kecepatan berbasis cahaya, dan dua buah kamera. Data dari sensor tersusun atas 8 *channel* data transmitansi cahaya. Sensor dikendalikan oleh kontrol elektronik. Kontrol elektronik dan kamera berhubungan secara langsung dengan komputer dan dikendalikan oleh program *python*.

Data dari keempat versi WIM menemukan bahwa aspek sensor WIM yang dioptimisasi adalah *dynamic range*, akurasi, dan presisi sensor WIM. *Dynamic range* sensor WIM memiliki dua aspek, yakni kemampuan sensor dalam mendeteksi sinyal kendaraan dengan kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi, dan kemampuan sensor dalam mendeteksi kendaraan dengan massa rendah hingga massa tinggi. Semakin kecil massa kendaraan dan semakin cepat kecepatan kendaraan maka semakin sulit untuk mendeteksi sinyal *impulse*.



Gambar 4.3. Grafik korelasi antar variabel dalam sensor WIM

Gambar 4.3 menjelaskan bagaimana variabel akurasi, presisi, dan *dynamic range* berinteraksi dengan variabel lain. Koneksi merah menunjukkan korelasi positif sedangkan koneksi biru menunjukkan korelasi negatif. Korelasi positif antara dua variabel artinya apabila satu variabel mengalami kenaikan nilai maka variabel lain akan mengalami kenaikan juga, sedang korelasi negatif antara dua variabel akan mengurangi nilai satu variabel apabila variabel lain mengalami kenaikan. Semua variabel saling terikat secara kompleks satu sama lain sehingga untuk mengoptimisasi akurasi, presisi, dan *dynamic range* harus mempertimbangkan seluruh variabel lain.

Kerumitan proses optimisasi bisa diilustrasikan dengan variabel kelengkungan fiber optik. Semakin melengkung untaian fiber optik di dalam WIM,

maka sensor akan semakin sensitif dalam merespon terhadap *impulse* dari kendaraan sehingga menaikan dynamic range, presisi dan akurasi sensor. Semakin melengkung fiber optik juga akan menurunkan intensitas *output* cahaya, yang berdampak pada penurunan *bandwidth* dan *Signal to Noise Ratio* (SNR), yang akan berdampak negatif terhadap akurasi, dynamic range, dan presisi. Analisa data dari WIM dan Gambar 4.3 menyimpulkan bahwa subsistem di dalam sensor WIM memiliki fungsi yang harus dioptimisasi sesuai dengan tabel 4.1.

Tabel 4.1. Fungsi subsistem dalam sensor WIM

Nama subsistem	Fungsi
Rangkaian fiber optik	membuat rangkaian fiber optik selengkung mungkin namun cahayanya masih bisa dideteksi sistem elektronik
Hubungan optik-elektronik	Cahaya dari sumber ke fiber optik dan dari fiber optik ke detektor seefisien mungkin
Karet sensor	Cukup elastis untuk mendeteksi kendaraan ringan namun cukup kuat untuk menahan beban kendaraan berat.
Detektor cahaya	mengubah cahaya menjadi sinyal dengan SNR dan <i>bandwidth</i> sebesar mungkin
<i>Analog to Digital Converter</i> (ADC)	Mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital dengan tetap menjaga nilai SNR dan <i>bandwidth</i>
Sumber daya	Menyediakan sumber tegangan dengan <i>noise</i> sekecil mungkin untuk sumber cahaya, dan detektor
Pelindung elektromagnetik	Meminimalisir interferensi elektromagnetik terhadap komponen elektronik
Program <i>Python</i>	Mengelola semua sistem ketika berjalan dengan komputasi seminimal mungkin sehingga bisa dioperasikan di Laptop

4.1 Detektor Cahaya

Sensor versi WIM 1 dan 2 menggunakan sensor cahaya berupa *Light Dependent Resistor*, sedangkan versi 3 dan 4 menggunakan *photodiode* silikon. Sensor cahaya dirangkai dalam PCB. PCB didesain sedemikian rupa untuk mengurangi *noise*. Penggunaan PCB berlubang seperti di Gambar 4.4.(b) menghasilkan SNR paling kecil, desain ini dipakai di sensor versi 1 dan 2. Penggunaan PCB yang di *etching* seperti Gambar 4.4(a) menghasilkan sinyal yang lebih baik, desain ini dipakai di sensor versi 3.

Sinyal terbaik diperoleh dengan menggunakan PCB di Gambar 4.4(c), desain dipakai di sensor versi 4. Desain ini menempatkan komponen di permukaan tembaga dan setiap koneksi dikelilingi oleh *ground* dengan *gap* yang sekecil mungkin. Pajang koneksi *photodiode* dengan OP-AMP dibuat sekecil mungkin, karena semakin panjang koneksi, maka konduktor semakin bersifat sebagai antena, menangkap radiasi elektromagnetik dan menghasilkan *noise*. Model komputer desain PCB ditampilkan di Gambar 4.4(d).

a

b

c

d

Gambar 4.4. Detektor cahaya sensor WIM

Berbagai macam jenis *operational amplifier* (OP-AMP) dicoba dalam penelitian ini. Sifat OP-AMP saling berinteraksi untuk mempengaruhi hasil sinyal yang didapat. Di akhir penelitian ditemukan bahwa sifat *Gain Bandwidth Product*, *Slew Rate*, dan *Temperature Drift*, akan menentukan *bandwidth* dan SNR sinyal. Lampiran 1. menampilkan tabel perbandingan sifat berbagai jenis OP-AMP. Versi 4 WIM menggunakan NE5532 karena mampu menghasilkan SNR dan *bandwidth* yang paling besar.

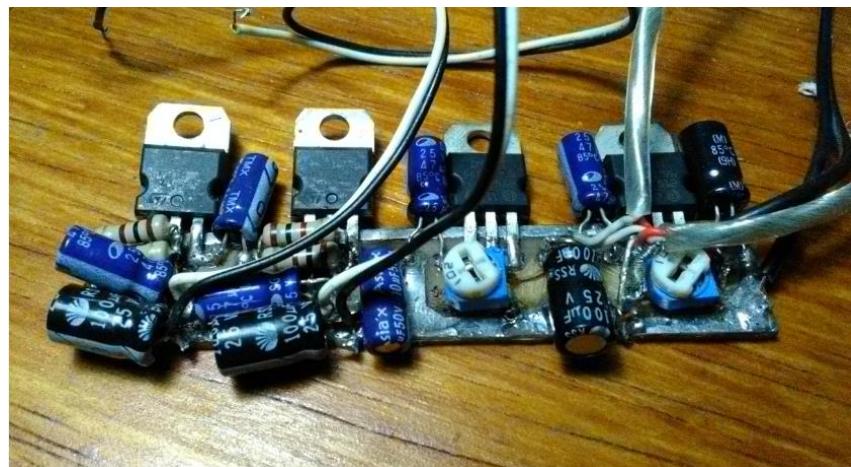
4.2 Analog to Digital Converter

Pada awal penelitian digunakan ADC dari mikrokontroler *Atmega 2560* dengan resolusi 10 *bit* dan *bandwidth* 3100 Hz. Optimisasi program berhasil meningkatkan *bandwidth* menjadi 6000 Hz. ADC ini digunakan di WIM versi 1 dan 2.

Versi 3 menggunakan ADC dari mikrokontroler *Atmel SAM3X* dengan resolusi 12 *bit* dan *bandwidth* 40000 Hz. *Bandwidth* sebesar 40000 Hz dibagi menjadi 5 *channel* data, dengan masing-masing *channel* memiliki *bandwidth* 8000 Hz. Empat dari lima *channel* digunakan untuk mengambil data dari empat rangkaian fiber optik di dalam sensor WIM, sedangkan satu *channel* digunakan untuk mengambil sinyal referensi.

Versi 4 menggunakan *Atmel SAM3X* dengan optimisasi program sehingga *bandwidth* menjadi 64000 Hz. *Bandwidth* dibagi menjadi 8 *channel* data, sehingga masing-masing *channel* memiliki *bandwidth* 8000 Hz. *Channel* 1 hingga *channel* 4 digunakan untuk mengukur rangkaian fiber optik dari sensor WIM 1, *channel* 5 dan 6 digunakan untuk mengukur mengukur rangkaian fiber optik dari sensor WIM 2, dan *channel* 7 dan 8 digunakan oleh sensor kecepatan berbasis cahaya.

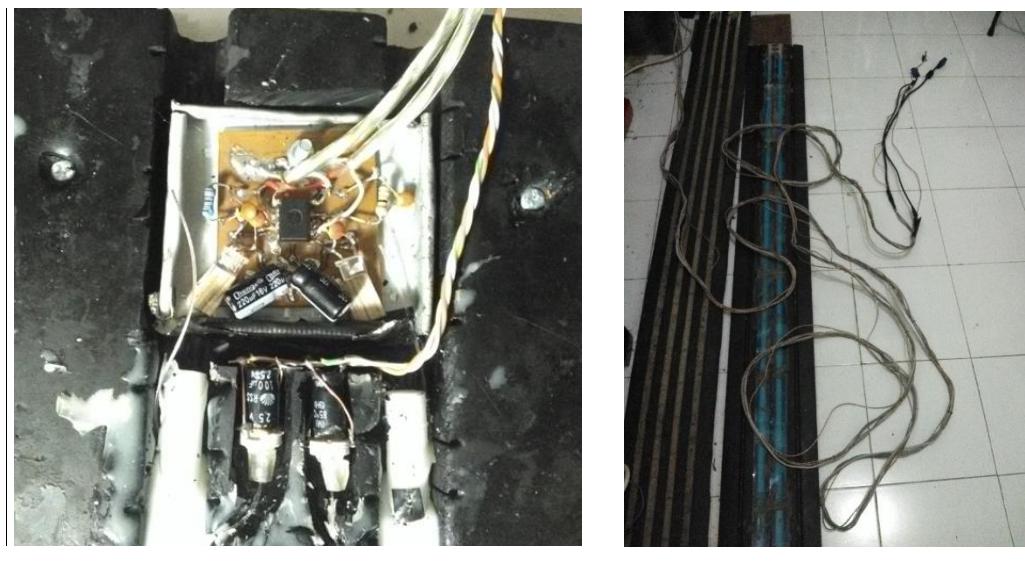
4.3 Sumber Daya



Gambar 4.5. Sumber daya sensor WIM yang menggunakan regulator dan *filter*.

Detektor cahaya membutuhkan daya masukan yang bersih dengan amplitudo *noise* dibawah $100 \mu V$. Target *noise* dicapai dengan menggunakan rangkaian regulator menggunakan IC *LM317* seperti dalam Gambar 4.5. Setiap koneksi menggunakan kabel dengan perlindungan elektromagnetik untuk melindungi arus listrik dari interferensi elektromagnetik.

4.4 Pelindung Elektromagnetik



Gambar 4.6. (a) Pelindung elektromagnetik rangkaian PCB, (b) Kabel pelindung

Interferensi elektromagnetik sangat berpengaruh terhadap sinyal yang didapat. Interferensi terbesar berasal dari jaringan listrik PLN dengan frekuensi 50 Hz, frekuensi ini memiliki periode yang hampir sama dengan panjang pulsa kendaraan dengan kecepatan 10 km/ jam. Untuk mengatasi masalah *noise* dari interferensi elektromagnetik semua rangkaian detektor harus ditempatkan dalam pelindung elektromagnetik berupa kotak konduktor yang di sambung dengan *ground* seperti Gambar 4.6(a).

Selain kotak konduktor, seluruh koneksi sinyal dan daya menggunakan kabel dengan perlindungan elektromagnetik. Kabel yang sangat tebal sepanjang 9 meter digunakan dalam versi 4. Kabel ini sangat tebal karena membawa hubungan untuk sumber cahaya, detektor, dan sumber daya dengan total 24 ujungan seperti pada Gambar 4.6(b).

4.5 Rangkaian Fiber Optik



a



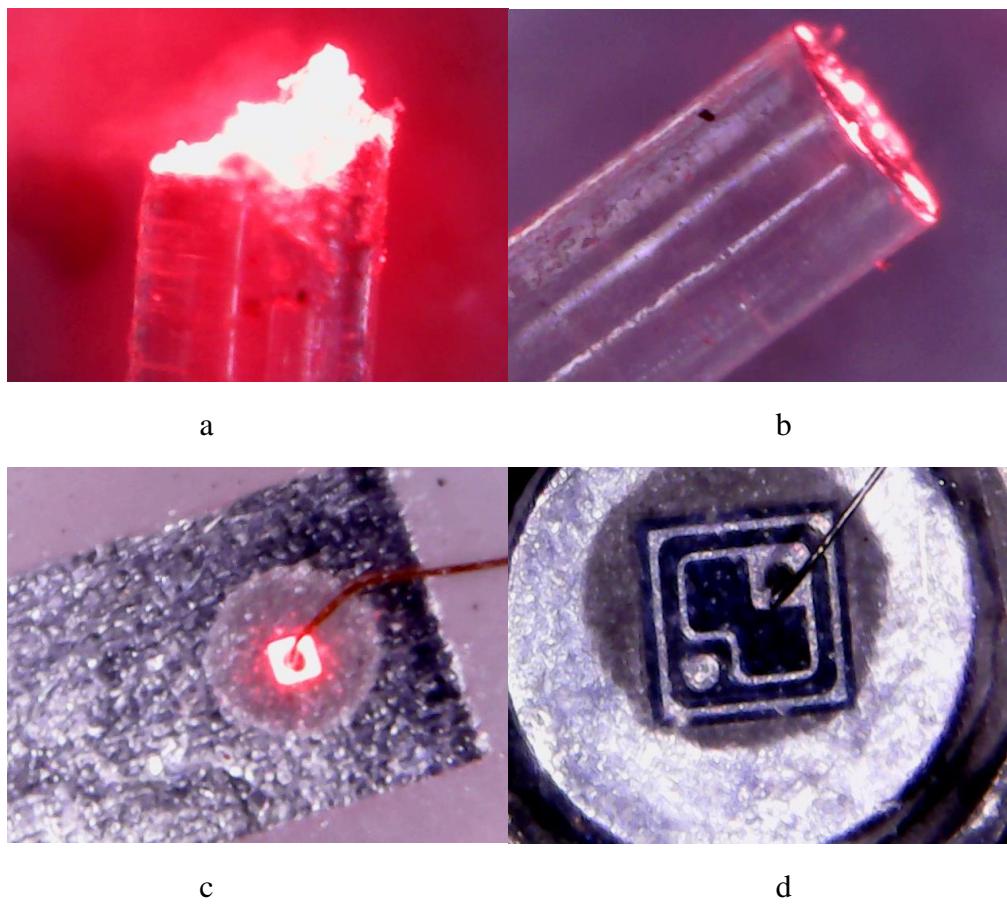
b

Gambar 4.7. (a) Rangkaian fiber optik, (b) Rangkaian fiber optik di dalam karet sensor

Gambar 4.7(a) merupakan untaian fiber optik yang sedang dalam proses pembentukan menjadi struktur *heliks*. Perhatian yang sangat tinggi diperlukan dalam proses penguntaian, karena ketidakteraturan dalam penguntaian akan menurunkan akurasi sensor. Gambar 4.7(b) menunjukkan satu untaian dalam proses penanaman ke dalam karet WIM dan tiga untaian yang sudah tertanam dalam karet *silicone*.

4.6 Hubungan Optik-Elektronik

Hubungan antara bagian optik dan elektronik sangat penting karena efisiensinya hubungan menentukan kuat sinyal yang diperoleh sensor. Semakin efisien hubungan, maka semakin kuat sinyal, dan semakin besar nilai SNR.



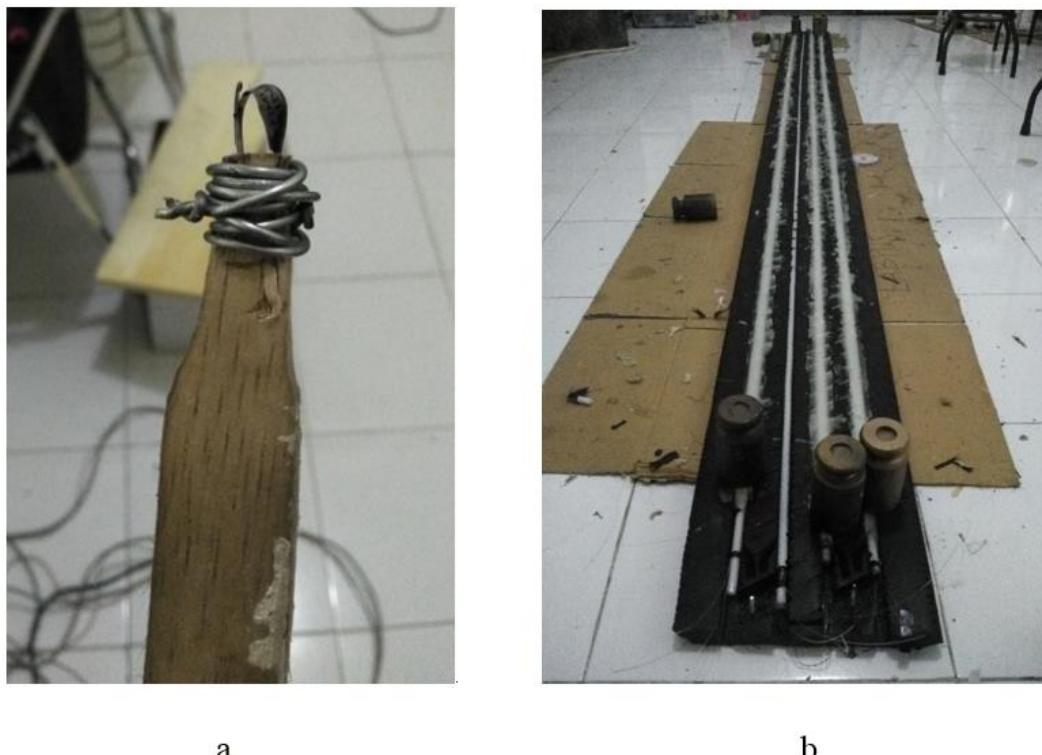
Gambar 4.8. Foto mikroskop (a) Potongan fiber optik dengan gunting, (b) Potongan fiber optik dengan silet ,(c) Permukaan LED, (d) Permukaan *photodiode* . Ukuran gambar adalah 750 x 1000 mikron

Fiber optik dipotong menggunakan silet. Apabila fiber dipotong menggunakan alat yang kurang tajam seperti gunting, maka daerah potongan akan menghasilkan bentuk seperti Gambar 4.8(a), potongan ini menyebarkan dengan sudut yang lebar sehingga mengurangi efisiensi hubungan optik-elektronik. Potongan menggunakan silet seperti Gambar 4.8(b) menghasilkan cahaya yang terarah dan meningkatkan efisiensi hubungan elektronik optik.

Gambar 4.8(d) menunjukkan foto mikroskop *photodiode*. Permukaan *photodiode* yang awalnya cembung *dipolish* menjadi datar. Dari Gambar 4.8(d) dihitung bahwa *photodiode* terbuat dari lapisan semikonduktor persegi dengan sisi berukuran 350 mikron. Untuk meningkatkan efisiensi sistem, fiber optik yang diameternya 500 mikron ditempatkan di depan permukaan detektor. Sebagai sumber cahaya menggunakan LED jenis *surface mount* dengan permukaan datar. Gambar 4.8(c) memperlihatkan komponen yang dipakai, komponen terbuat dari lapisan semikonduktor persegi dengan lebar 100 mikron.

Hubungan antara fiber optik-LED dan fiber optik-*photodiode* harus tegar. Komponen yang terlibat memiliki ukuran dibawah 500 mikron, sehingga getaran dengan amplitudo 1 mikron pada hubungan fiber akan menimbulkan gangguan yang sangat besar pada sinyal. Untuk meminimalisir getaran dan meningkatkan kestabilan koneksi, konektor fiber dan LED ditempatkan di dalam lapisan karet *silicone*, sedangkan koneksi fiber dengan detektor ditempatkan di pelat besi.

4.7 Karet Sensor



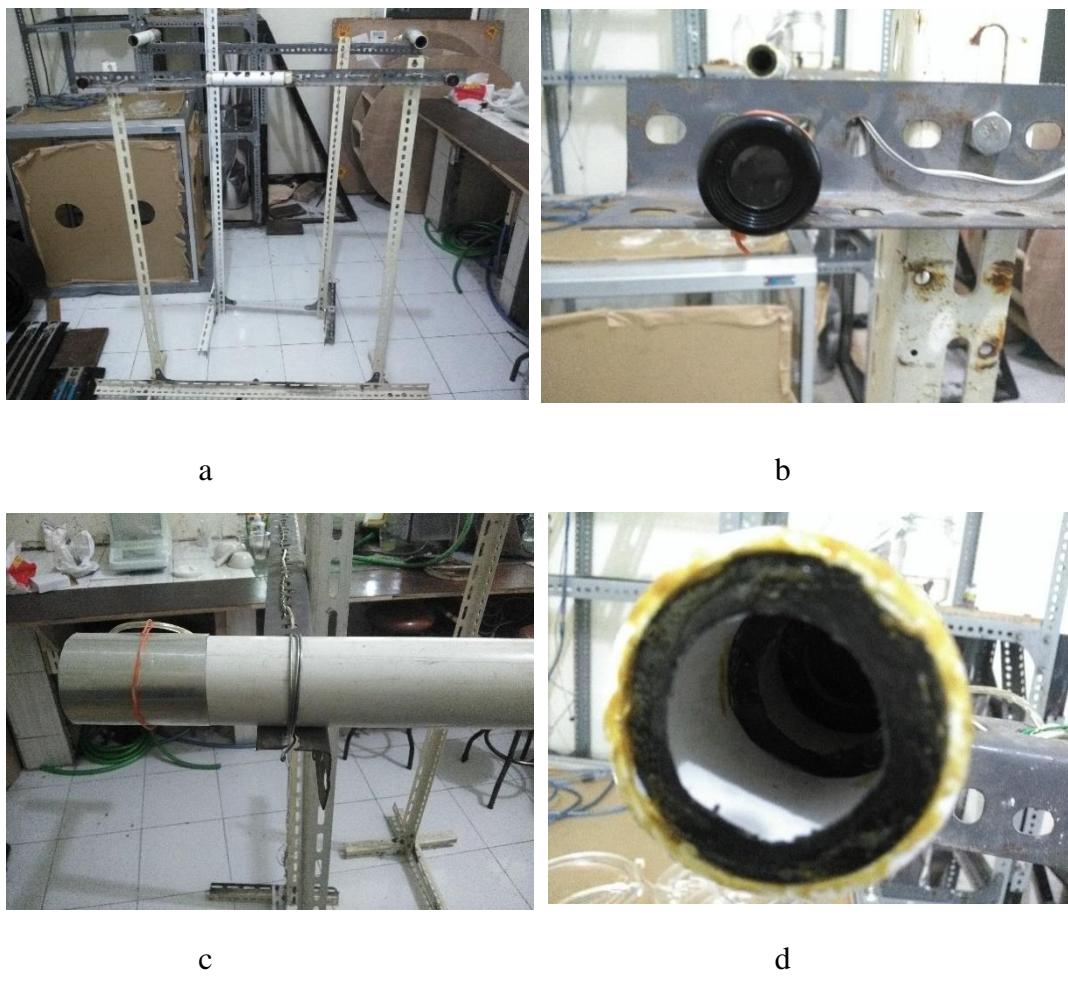
Gambar 4.9. (a) Alat pemotong karet, (b) Karet sensor yang sudah dipotong

Karet versi 1 dan 2 dibentuk menggunakan pisau. Metode ini ternyata membutuhkan jam kerja yang sangat lama. Solusi terbaik yang ditemukan adalah dengan membentuk karet dengan menggunakan silet. Gambar 4.9(a) menunjukkan alat yang dibuat, yakni silet yang dilengkungkan dan dipasang pada batangan kayu. Alat ini digunakan untuk membentuk karet 3 dan 4. Aspek keselamatan sangat penting dalam memotong karena alat potong sangat tajam.

Karet versi 4 menggunakan karet ban yang masuk dalam golongan *soft*. Karet yang terlalu keras mengalami kesulitan untuk mendeteksi *impulse* dari kendaraan ringan. Gambar 4.9(b) menunjukkan karet sensor yang sudah dibentuk dan dilapisi dengan karet *silicone*.

4.8 Sensor Kecepatan Berbasis Cahaya

Sensor kecepatan tersusun dari dua unit detektor dan dua unit sumber cahaya. Kedua detektor ditempatkan dengan jarak 1 meter. Kedua sumber ditempatkan di depan detektor dengan jarak sesuai lebar jalan. Sumber cahaya dibuat dari LED dengan daya 3 Watt . Lensa cembung ditempatkan di depan LED untuk memfokuskan cahaya, dengan ini cahaya yang dipancarkan memiliki ukuran sudut yang sempit dan memiliki jangkauan yang jauh. Detektor ditempatkan di dalam tabung yang dilengkapi dengan cincin-cincin untuk menyaring cahaya yang tidak searah dengan sumber cahaya.



Gambar 4.10. (a) Sensor kecepatan , (b) Sumber cahaya, (c) Tabung detektor, (d) Lubang detektor

Gambar 4.10(a) memperlihatkan sumber cahaya dan detektor cahaya yang ditempatkan pada tiang besi berbentuk persegi. Gambar 4.10(b) memperlihatkan salah satu lensa yang menutupi LED. Gambar 4.10(c) memperlihatkan salah satu tabung detektor apabila dilihat dari samping, bagian yang mengkilat adalah pelindung elektromagnetik. Gambar 4.10(d) memperlihatkan tabung detektor dari depan, terlihat cincin-cincin penyaring cahaya. Kecepatan kendaraan diperoleh dengan menghitung perbedaan waktu perubahan sinyal antara kedua detektor apabila ada kendaraan yang melewati daerah antara sumber dan detektor

4.9 Kamera

Kamera berfungsi untuk mengambil gambar kendaraan yang melewati sensor. Sensor WIM memiliki 2 buah kamera. Satu kamera digunakan untuk mengamati daerah yang paralel dengan WIM dan yang lain ditempatkan di jarak 5 meter dari sensor. Masing-masing kamera menghasilkan video dengan ukuran $640 \times 480 \times 3\text{ pixel}$. Video ini kemudian ditampilkan di monitor. Apabila ada kendaraan yang lewat setiap *frame* video akan diambil dan disimpan dalam bentuk gambar. Gambar diubah menjadi 3 buah matriks berukuran 640×480 . Matriks kemudian di masukan ke dalam *neural network* untuk mengidentifikasi jenis kendaraan.

4.10 Versi WIM

4. 10.1 Versi 1

Versi 1 berukuran panjang 50 cm dan lebar 8 cm. Beberapa pelajaran yang dicapai dari pembuatan dan eksperimen menggunakan sensor Versi 1 :

1. Karet ban bisa digunakan untuk memuat sensor WIM dengan sensitifitas lebih baik dari karet *Polyuthyrene*.
2. Menempatkan rangkaian elektronik ke dalam karet memudahkan aplikasi sensor.

Versi ini menunjukkan pentingnya meminimalisir getaran di bagian hubungan optik-elektronik dan pentingnya *bandwidth* dan resolusi pengambilan data.

4. 10.2 Versi 2

Desain versi 2 sama dengan versi 1, hanya saja ukuranya 25x330 cm. Versi 2 mengkonfirmasi bahwa karet ban dengan ukuran besar bisa digunakan untuk sensor WIM. Pembuatan versi 2 memberikan pelajaran dalam memotong karet dan membuat rangkaian fiber optik. Pelajaran utama yang dicapai oleh karet versi 2:

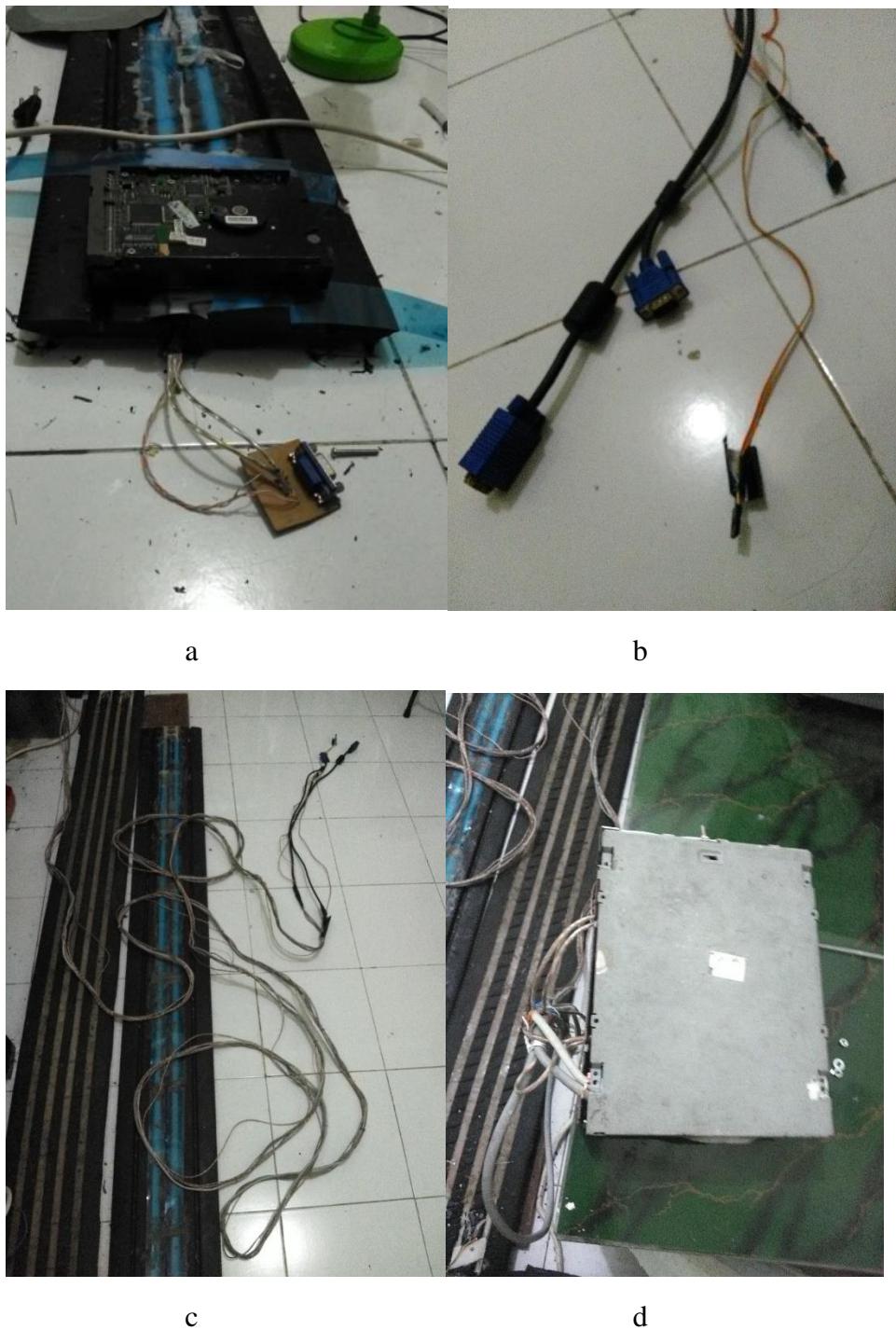
1. SNR perlu ditingkatkan
2. Sensor LDR tidak memiliki kecepatan respon yang cukup untuk sensor WIM

4. 10.3 Versi 3

Versi 3 merupakan perkembangan yang drastis dari versi 2. Versi 3 memuat 4 buah rangkaian fiber optik di dalam karet sensor, sedangkan versi 1 dan 2 hanya memuat 1 rangkaian fiber optik. Versi 3 memiliki *bandwidth* dan SNR yang lebih besar dari versi sebelumnya, sehingga sensor memiliki *dynamic range* yang cukup besar untuk mendeteksi kendaraan roda dua.

4. 10.4 Versi 4

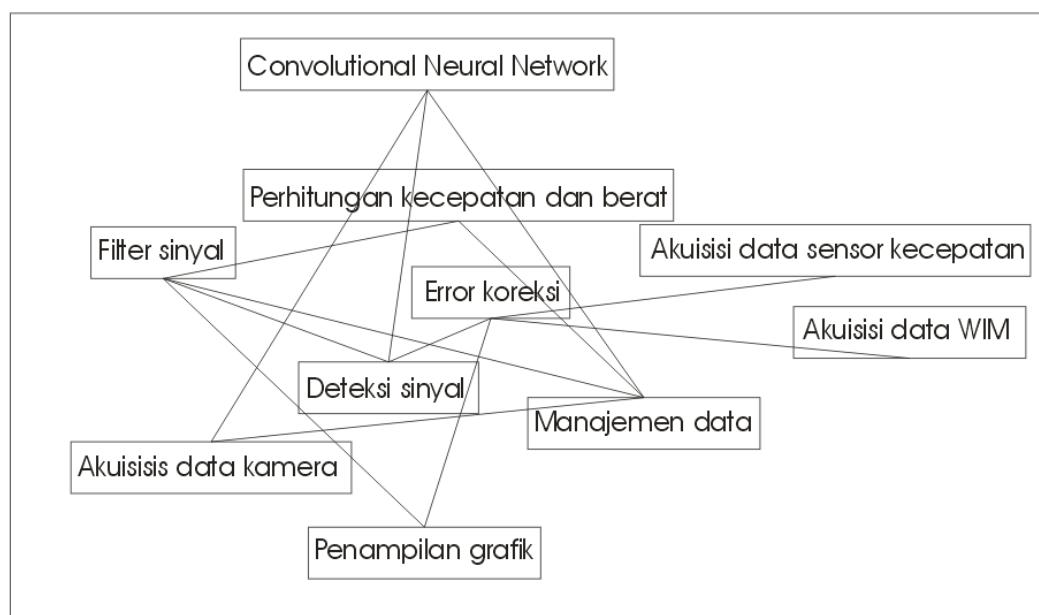
Versi 4 dibuat dengan memperbaiki kekurangan dari versi sebelumnya. Versi 4 tersusun atas dua sensor yang dihubungkan dengan kabel sepanjang 9 meter ke kotak kontroler. Kabel dengan sensor dihubungkan dengan konektor DE15 untuk memudahkan pemasangan sensor dan meminimalisir *noise*.



Gambar 4.11. WIM (a) Port koneksi sensor wim, (b) Konektor kabel, (c) Kabel dan sensor, (d) Kotak kontroler

4.11 Software Program WIM

Software komputer ditulis menggunakan bahasa *Python*. Software tersusun atas beberapa sub-program yang berjalan secara bersamaan menggunakan skema *multithreading*. Gambar 4.12 menjelaskan bagaimana setiap sub-program saling berkomunikasi. Setiap kotak adalah sub-program , sedangkan garis yang menghubungkan setiap kotak menggambarkan data yang saling bertukar antar sub-program .

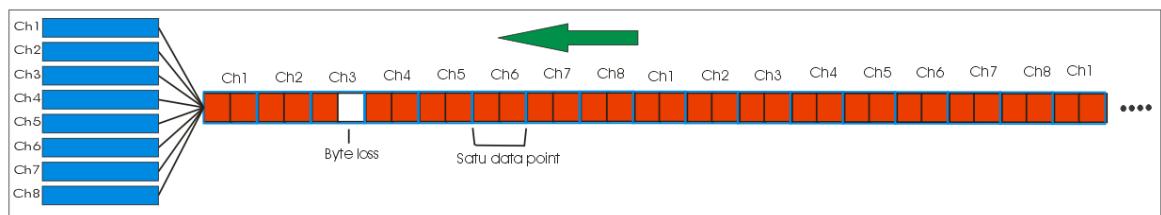


Gambar 4.12. Grafik interaksi antar sub-program sensor WIM

Beberapa sub-program membutuhkan komputasi yang besar dan setiap sub-program beroperasi dengan frekuensi yang berbeda. Sub-program kamera membutuhkan frekuensi 50 Hz, sub-program akuisisi data di 8 Hz, dan sub-program penayangan grafik di 8 Hz. Solusi yang dipakai untuk mengatasi masalah perbedaan frekuensi dan komputasi adalah dengan menggunakan metode *multithreading*. Metode ini memaksimalkan penggunaan *multi core* CPU di mana komputasi setiap sub-program terdistribusi kepada seluruh *core* CPU yang ada. Hasil akhir adalah *software* sensor WIM yang mampu mengelola data dari dua buah sensor WIM, satu unit detektor kecepatan dan dua buah kamera yang bisa beroperasi di laptop biasa.

4. 11.1 Pengiriman Data dan Koreksi Error

Dengan *bandwidth* total 64000 Hz dan ukuran 16 *bit* per data, sensor WIM memiliki koneksi yang mampu mengirimkan data dengan kecepatan 1024000 *bit*/detik atau 128000 *byte*/detik. Kesulitan ini ditambah dengan keharusan pengiriman data yang konstan tanpa interupsi dan tanpa *error*.



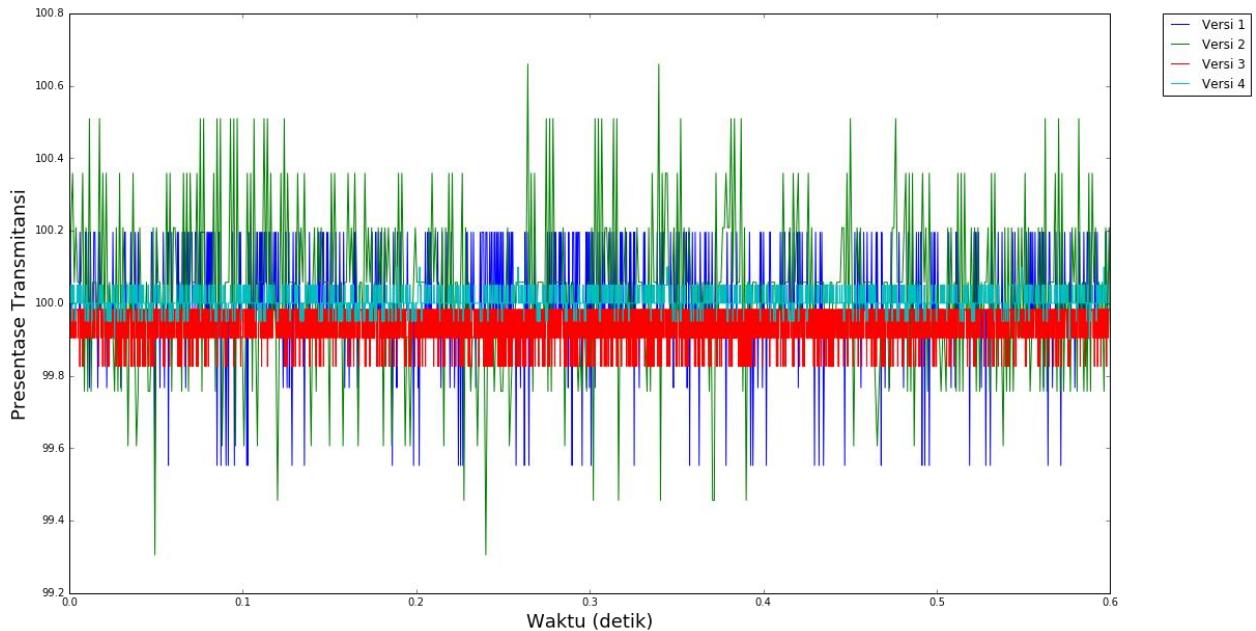
Gambar 4.13. Proses pengiriman data dilakukan secara berderet sesuai arah panah hijau dan dipisahkan menjadi paralel menuju *channel* 1 hingga *channel* 8.

Error yang pertama adalah *byte loss*. Dalam Gambar 4.13 satu *byte* dalam kotak putih mengalami *loss*, apabila dibiarkan hal ini akan mengakibatkan kerusakan seluruh data. Jenis *error* yang kedua adalah pergeseran *byte*, dimana data yang dikirimkan secara *serial* mengalami pergeseran. Hal ini menimbulkan kesalahan identifikasi *channel* data. *Error* ini diatasi dengan melakukan penandaan terhadap data yang berasal dari *channel* 8 dan melakukan pengecekan secara periodik terhadap aliran data. *Software* yang dibuat mampu melakukan koreksi *error* dengan komputasi yang kecil.

4. 11.2 Convolutional Neural network Untuk Deteksi Jenis Kendaraan

CNN mengidentifikasi jenis kendaraan berdasarkan gambar dari kamera. Lampiran 2 menampilkan tipe koneksi, ukuran parameter, dan ukuran masukan *neural network* yang digunakan. Sebagian besar koneksi antar neural nework buatan adalah tipe *convolutional*. *Neural network* memiliki jumlah parameter sebanyak 4200000 parameter. Karena keterbatasan komputasi, maka parameter yang digunakan adalah parameter *open source*. *Neural network* ini mampu melakukan beroperasi dengan kecepatan 5 identifikasi gambar/detik.

4.12 Signal to Noise Ratio



Gambar 4.14. Grafik sinyal yang diperbesar untuk memperlihatkan *noise*.

Perkembangan yang besar dicapai dalam menaikan nilai SNR dari sensor WIM versi 1 hingga versi 4. Gambar 4.14 merupakan sampel *plot* sinyal output dari keempat versi. *Plot* biru tua merupakan sinyal output dari versi 1, terlihat sinyal berosilasi dengan amplitudo yang besar. *Plot* hijau merupakan sinyal dari versi 2, sinyal yang didapat tidak lebih baik dari versi 1. Grafik merah menggambarkan sinyal dari versi 3, amplitudo osilasi jauh lebih kecil dari sinyal versi sebelumnya. Sinyal terbaik diperoleh dari versi 4, digambarkan oleh grafik biru muda.

Perhitungan SNR dilakukan dengan membagi nilai rata rata sinyal dengan nilai standar deviasi mengikuti Persamaan (4.1). Variabel $y(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ adalah sampel data, dimana n adalah jumlah sampel.

$$SNR = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (4.1)$$

Aplikasi Persamaan (4.1) terhadap data di Gambar 4.14 menghasilkan nilai SNR sebagai berikut :

SNR versi 1= 881,06 (29.,45 Desibel)

SNR versi 2= 484,51 (26,85 Desibel)

SNR versi 3= 1648,73 (32,17 Desibel)

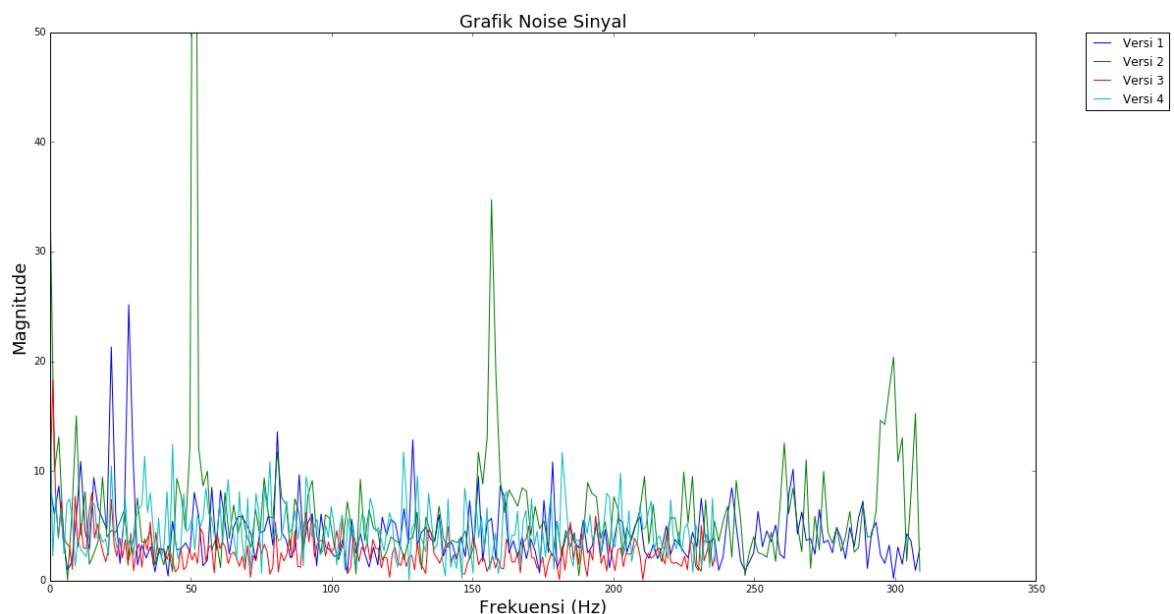
SNR versi 4= 3444,98 (35,37 Desibel)

Versi keempat memiliki SNR sebesar 3444.98, dengan ini mampu mendeteksi perubahan transmitansi cahaya sebesar 0,02903 %. Tes laboratorium menunjukan bahwa dengan nilai ini versi 4 mampu mendeteksi berat sekecil manusia. Tingginya SNR membuat versi 4 memiliki *dynamic range* yang sangat besar.

Transformasi Fourrier diskrit dengan Persamaan (4.2) diterapkan kepada data di Gambar 4.14 untuk memperoleh spektrum *noise* data.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_i e^{-\frac{2\pi i k n}{N}} \quad (4.2)$$

N adalah jumlah data dalam sampel, x adalah sampel, k adalah frekuensi yang nilainya 0 Hz hingga $N-1$ Hz dan X_k adalah hasil transformasi.



Gambar 4.15. Grafik spektrum frekuensi sinyal

Gambar 4.15 merupakan hasil transformasi dari data di Gambar 4.14. Garis hijau dan biru tua dari versi 2 dan versi 1 memiliki beberapa puncak yang terdefinisi dengan jelas. Puncak dengan frekuensi 50 Hz merupakan hasil dari interferensi elektromagnetik dari jaringan listrik PLN. Grafik merah dan biru muda menunjukkan spektrum yang nilainya cenderung konstan karena sumber *noise* elektromagnetik sudah dieliminasi menggunakan pelindung elektromagnetik.

Tabel 4.2. Tabel *Noise* untuk desain Versi 4

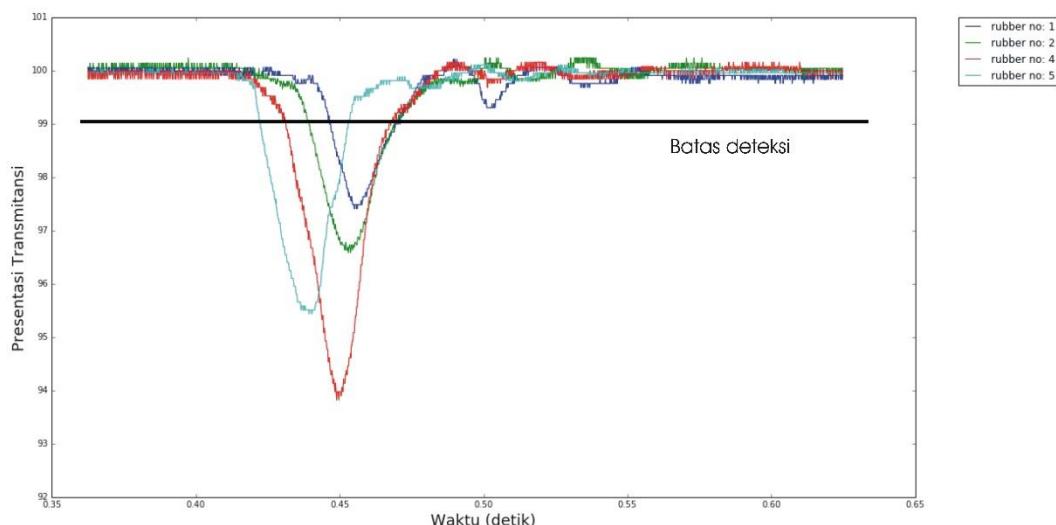
Sumber	Persamaan	Mendominasi ketika	Nilai	Persentase <i>Noise</i>
<i>Shot noise photodiode</i>	$i = \sqrt{eI_d}$	Intensitas cahaya rendah	$9.804 \times 10^{-13} \text{ A}$ dengan $I_d=6 \times 10^{-6} \text{ A}$	$1.63 \times 10^{-5} \%$
<i>Johnson noise</i>	$i = \sqrt{\left(\frac{4kT}{R}\right)}$	Temperatur tinggi	$1.813 \times 10^{-13} \text{ A}$ dengan $R=500000 \Omega$ dan $T= 298 \text{ K}$	$3.023 \times 10^{-6} \%$
OP-AMP	-	-		
Sumber daya	-	-		
Interferensi Elektromagnetik	-	Di dekat peancar radio	$1.741 \times 10^{-9} \text{ A}$ (berdasarkan 3444.98 SNR)	99.999981%

$$I_d = V_o x R \quad (4.3)$$

Tabel 4.2 memperlihatkan perhitungan *noise* untuk berbagai sumber. Perhitungan menyimpulkan bahwa sumber *noise* sangat didominasi oleh OP-AMP, sumber daya, dan interferensi elektromagnetik. i adalah arus *noise*, I_d =arus *photodiode*, V_o =Tegangan output OP-AMP, e =muatan electron ($1.60217662 \times 10^{-19}$ coulomb), k = konstanta Boltzmann($1.3806485 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$), R = resistansi resistor (untuk Versi 4 $R=500000 \Omega$). Perhitungan batas maksimum SNR dan *bandwidth* yang bisa dicapai secara teoritik ada di Lampiran 3.

4.13 Deteksi Pulsa Sinyal

Software yang dibuat secara otomatis melakukan *normaliasi* agar sinyal selalu memiliki nilai transmitansi 100 % apabila tidak ada kendaraan yang melewati sensor. Kendaraan yang melewati sensor akan menimbulkan penurunan nilai transmitansi cahaya yang melewati fiber optik sehingga membentuk pulsa di sinyal yang didapat oleh komputer. Keberadaan pulsa dideteksi dengan melakukan pengecekan terhadap sinyal 16 kali setiap detik.



Gambar 4.16. Grafik pulsa sinyal kendaraan yang melewati sensor WIM

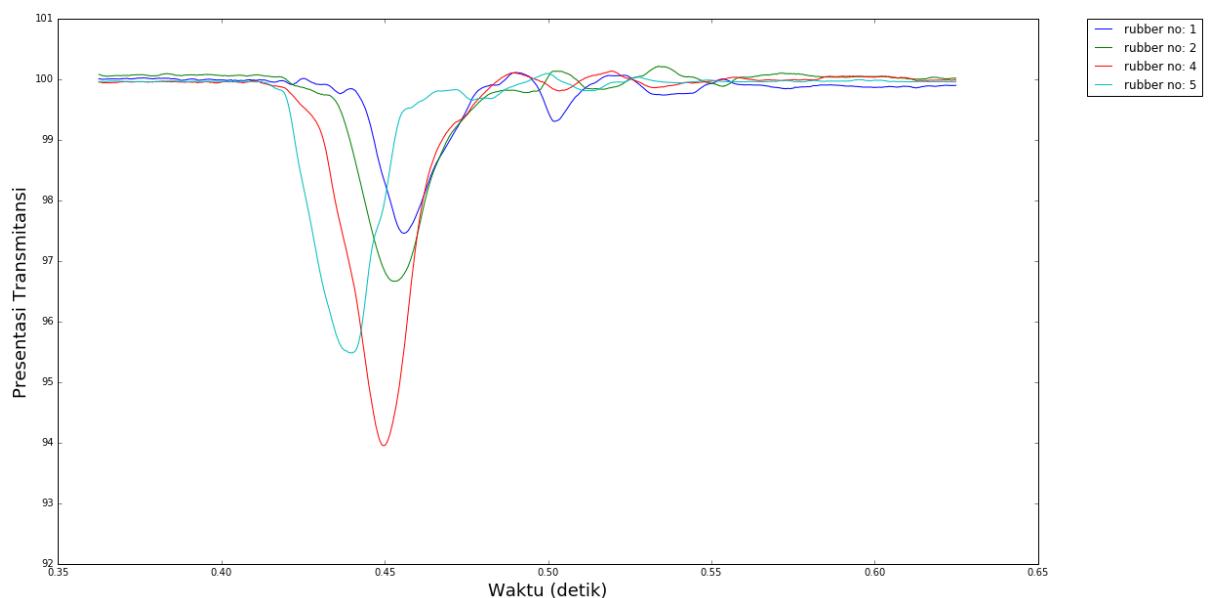
Garis hitam dalam Gambar 4.16 dapat diatur sesuai dengan ukuran pulsa yang akan dideteksi. Batas deteksi dalam *software python* diatur sebesar 1 % perubahan transmitansi. Apabila sinyal melebihi batas deteksi, maka dinyatakan pada saat itu ada kendaraan yang lewat, dan perintah akan dikirimkan ke sub-program manajemen data untuk merekam data WIM dan data kamera, kemudian melakukan perhitungan kecepatan kendaraan. Efisiensi komputasi dijaga dengan melakukan pengecekan data terhadap 500 data secara paralel.

4.14 Filter Sinyal

Sinyal dari WIM memiliki *bandwidth* 8000 Hz, sehingga sinyal mengalami *oversampling* untuk pulsa yang periodenya tidak terlalu singkat. Fakta ini memungkinkan diaplikasikanya filter *Savitzky–Golay* untuk meningkatkan SNR dan mendapatkan sinyal yang lebih halus.

Filter diterapkan dengan melakukan pendekatan polynomial orde 3 sesuai Persamaan (4.4) secara beruntun terhadap data. Dalam hal ini pendekatan dilakukan setiap 51 data point, setara dengan jumlah data yang diambil setiap 6.3 milidetik. Filter akan menghilangkan semua *noise* dengan periode di bawah 6.3 milidetik atau dengan frekuensi 156 Hz.

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (4.4)$$

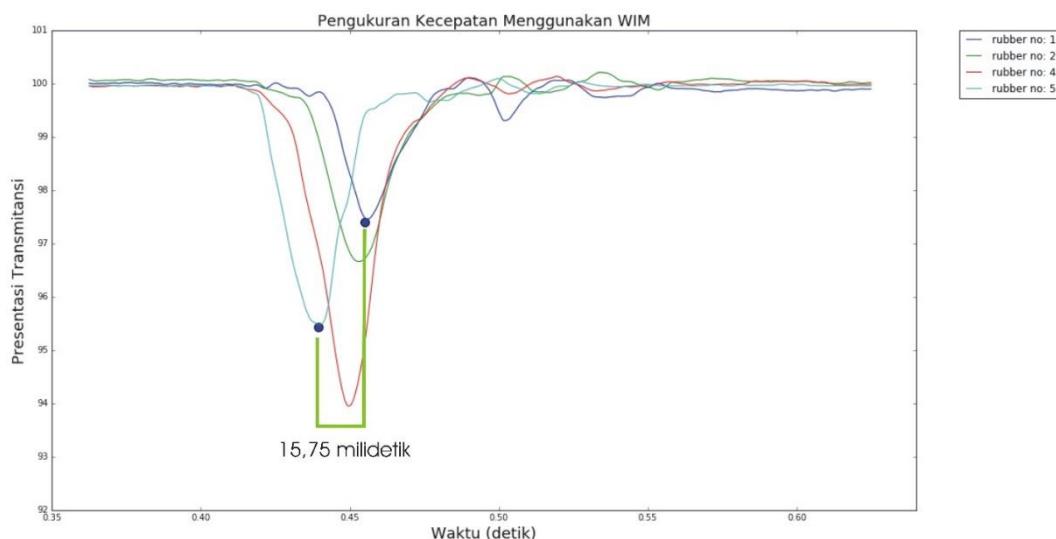


Gambar 4.17. Grafik sinyal dari Gambar 4.16 yang sudah di filter

Gambar 4.17 memperlihatkan sinyal yang jauh lebih halus dengan garis yang lebih jelas dibandingkan dengan grafik dari sinyal tanpa filter. Bentuk pulsa sinyal tetap terjaga dengan *noise* yang berkurang.

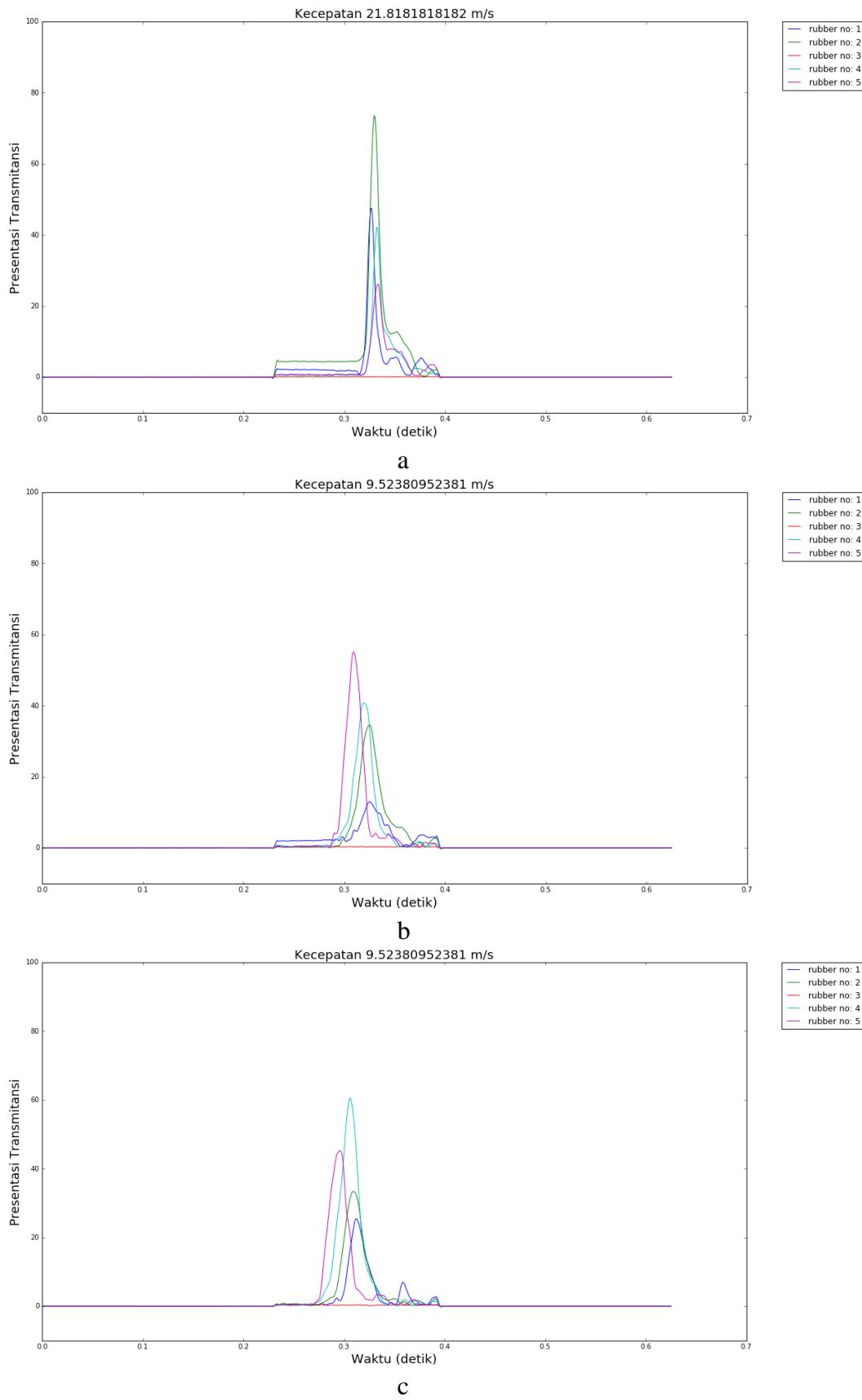
4.15 Pengukuran Kecepatan Berdasarkan Perbedaan Waktu Puncak Pulsa WIM

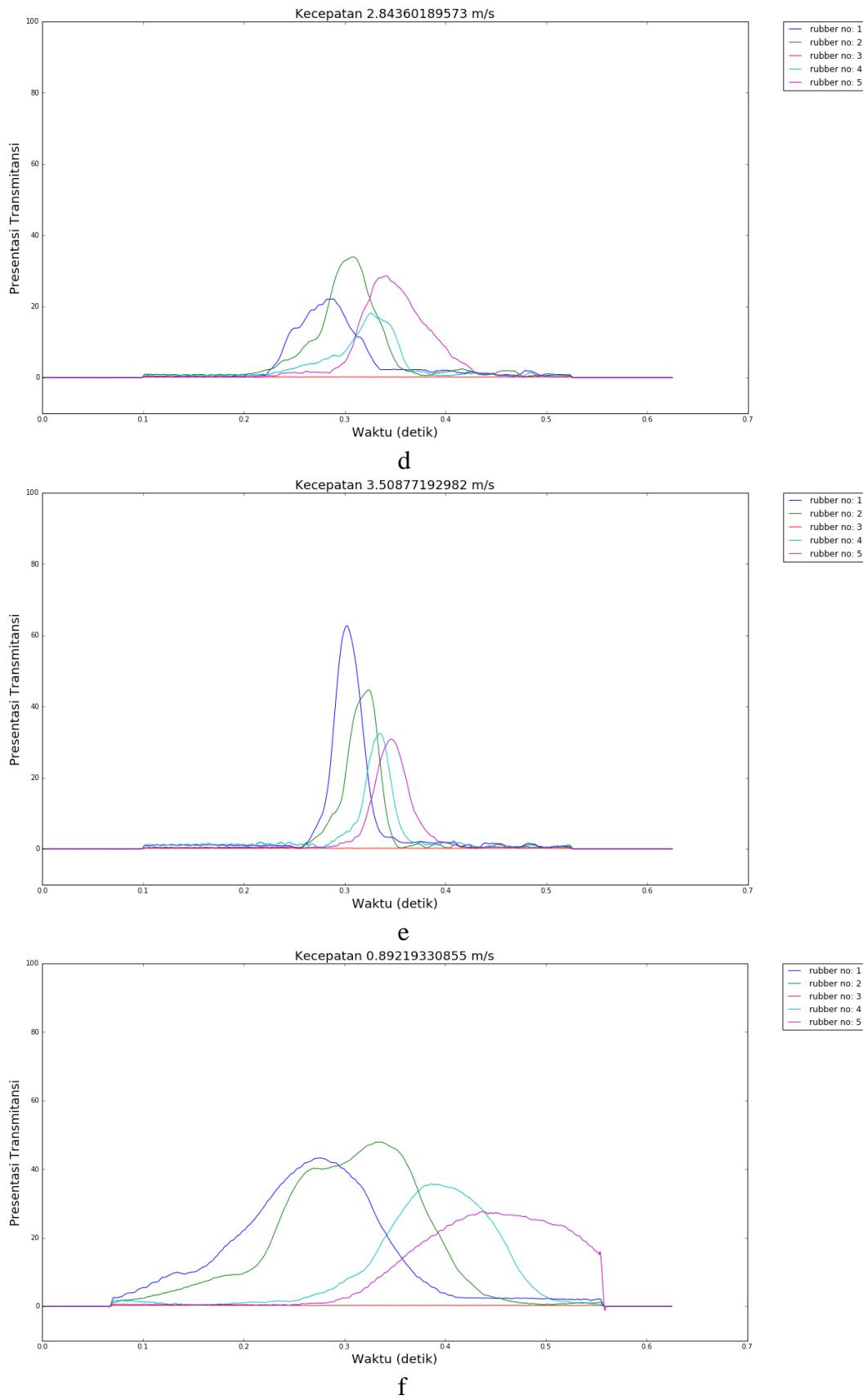
Sensor WIM yang dibuat memiliki dua metode untuk mengukur kecepatan kendaraan. Selain menggunakan sensor cahaya, sensor WIM juga dapat untuk mengukur kecepatan kendaraan dengan memanfaatkan perbedaan waktu ketika roda kendaraan menginjak dua rangkaian fiber optik dalam sensor WIM.

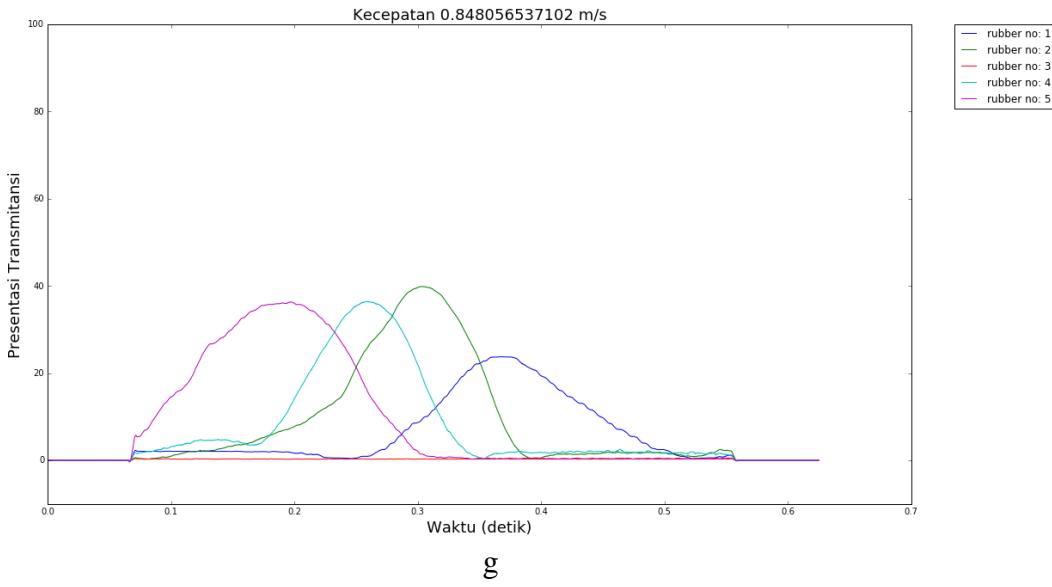


Gambar 4.18. Grafik perbedaan waktu antara titik ekstrim sinyal dari dua rangkaian fiber optik dalam sensor WIM.

Perhitungan kecepatan dilakukan dengan menghitung perbedaan waktu antara dua titik ekstrim pulsa yang berasal dari dua buah untaian yang jaraknya paling jauh di dalam sensor WIM. Gambar 4.18 mengilustrasikan bagaimana *software* melakukan perhitungan kecepatan dari sinyal pulsa kendaraan. *Software* mengidentifikasi waktu terjadinya titik ekstrim pulsa dari dua rangkaian fiber optik yang dalam sensor WIM, kemudian menghitung selisih waktunya. Variabel waktu kemudian di ubah menjadi kecepatan menggunakan informasi jarak antar kedua rangkaian fiber.







Gambar 4.19. Grafik pulsa kendaraan dengan berbagai kecepatan yang berbeda

Gambar 4.19 menggambarkan bentuk pulsa kendaraan yang telah di balik dan dihitung kecepatanya. Kecepatan kendaraan akan mempengaruhi bentuk pulsa. Dari Gambar 4.19 didapatkan informasi bahwa semakin cepat kendaraan maka semakin sempit lebar pulsa.

4.16 Respon WIM Terhadap *Impulse*

Sistem orde 2 akan menghasilkan respon dengan bentuk sesuai Persamaan (4.5) apabila diberi *impulse*. Sensor WIM akan mengikuti bentuk yang sama, karena waktu interaksi antara roda kendaraan dengan sensor yang sangat cepat sehingga berat kendaraan bisa dianggap sebagai *impulse*.

$$y = w_1 e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) \quad (4.5)$$

Untuk menghasilkan persamaan respon sensor WIM terhadap *impulse*, digunakan *stochastic gradiend descent* (SGD). Persamaan (4.6) digunakan untuk melakukan pendekatan. Persamaan (4.6) memiliki tambahan variabel x dan konstanta w_4 karena sensor WIM tidak mengukur perubahan posisi karet secara langsung, melainkan mengukur perubahan intensitas cahaya dari fiber optik.

$$y = w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 \quad (4.6)$$

$$Q(w) = \sum_{i=1}^n Q_i(w) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (4.7)$$

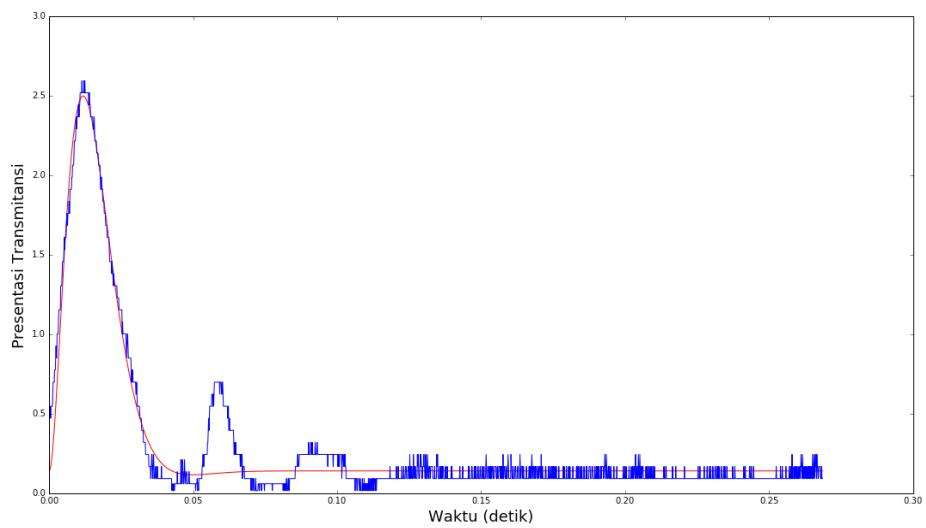
$$Q(w) = \sum_{i=1}^n (w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 - y_i)^2 \quad (4.8)$$

Persamaan respon *impulse* (4.6) di masukan ke dalam Persamaan (4.7) untuk mencari nilai parameter (w_1, w_2, w_3, w_4) . Persamaan (4.7) adalah fungsi yang harus diminimalisir nilainya menggunakan SGD. Nilai $= (x_1, x_2, x_3, \dots x_n)$, $y = (y_1, y_2, y_3, \dots y_n)$ merupakan data sinyal.

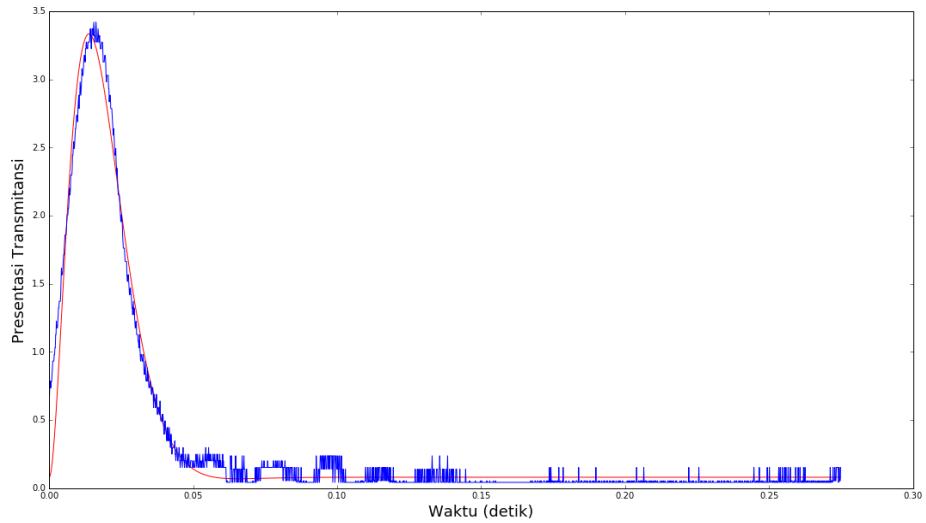
$$w_{\text{sekarang}} := w_{\text{loop sebelumnya}} - \eta \nabla Q_i(w) \quad (4.9)$$

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} w_1' \\ w_2' \\ w_3' \\ w_4' \end{bmatrix} - \eta \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial w_1} (w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 - y_i)^2 \\ \frac{\partial}{\partial w_2} (w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 - y_i)^2 \\ \frac{\partial}{\partial w_3} (w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 - y_i)^2 \\ \frac{\partial}{\partial w_4} (w_1 x e^{-w_2 x} \sin(w_3 x) + w_4 - y_i)^2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

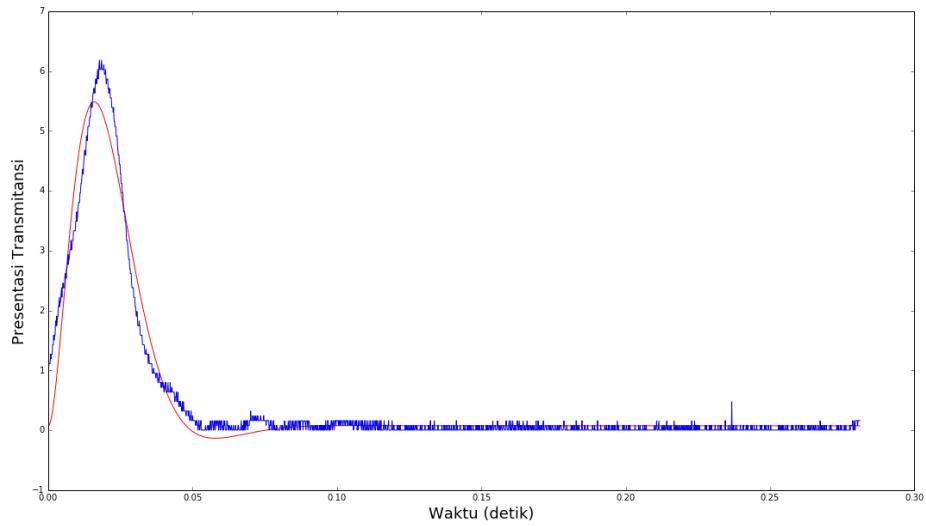
Untuk meminimalisir fungsi $Q(w)$, SGD melakukan iterasi untuk menemukan nilai koefisien w yang paling optimal sesuai Persamaan (4.9). Koefisien w dicari dengan melakukan pengurangan sebesar $\eta \nabla Q_i(w)$ terhadap nilai w awal yang ditentukan secara acak. ∇Q_i adalah gradien fungsi Q dan koefisien η adalah nilai yang menentukan kecepatan program dalam menemukan solusi. Persamaan (4.9) diuraikan menjadi Persamaan (4.10) dan di masukan ke dalam program.



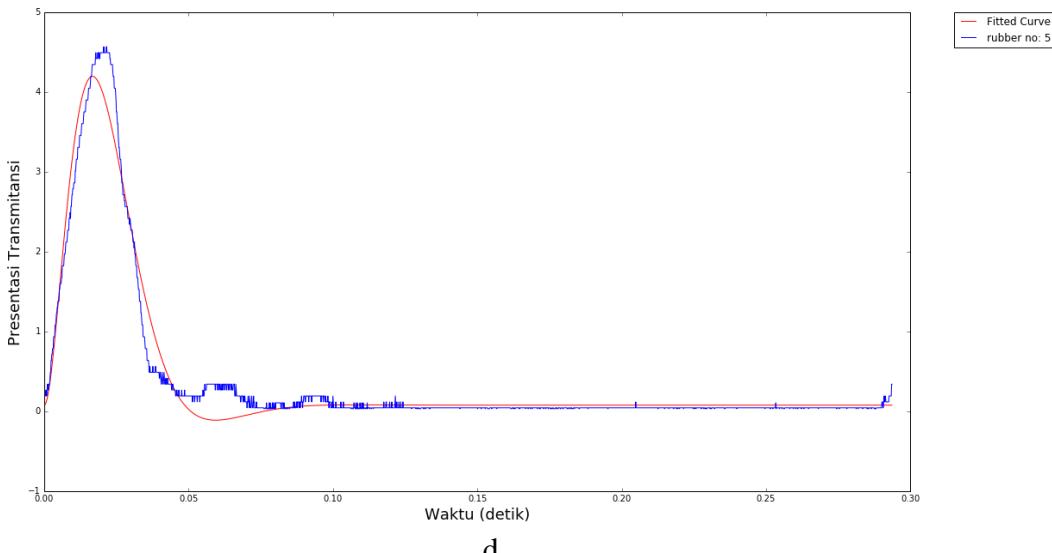
a



b



c



Gambar 4.20. Grafik sampel sinyal dan grafik respon WIM terhadap *impulse*. Biru adalah data sinyal dan merah adalah *plot* persamaan respon WIM terhadap *impulse*.

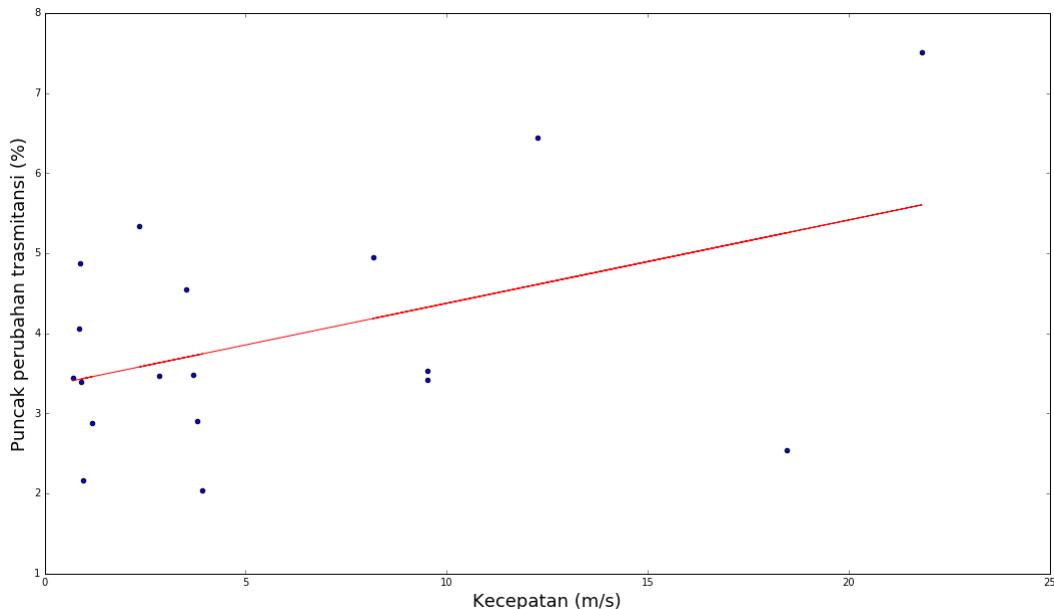
Gambar 4.20 menayangkan 4 sampel sinyal yang telah dihitung bentuk fungsi responsnya. SGD berhasil memodelkan pulsa dengan baik, namun pada Gambar 4.20(a) terlihat bahwa bentuk pulsa sekunder belum dapat dimodelkan.

Tabel 4.3. Nilai koefisien Persamaan (4.6) untuk Gambar 4.20

Gambar 4.20	Nilai Koefisien			
	w_1	w_2	w_3	w_4
a	14,84469399	1,47152736	0,73720267	0,1401543
b	20,81983288	1,3045413	0,54677184	0,08042251
c	19,41290351	1,00418316	0,65801906	0,07370304
d	13,554329	0,94448742	0,64571006	0,07624806

Algoritma *gradient descent* membutuhkan 100 iterasi untuk terhadap seluruh sampel sinyal untuk menghasilkan nilai koefisien yang terbaik. Dari hasil terbaik diperoleh *standard deviasi* grafik sintetis terhadap sampel sinyal kurang dari 1 %. hasil ini sangat bagus, karena dengan ini aspek teoritik pendekatan impulse terhadap sinyal dari sensor WIM sangat sesuai. Meskipun demikian ada beberapa bagian dari sinyal yang belum dapat didekati oleh grafik sintetis, terutama di pulsa sekunder.

4.17 Hubungan Antara Pulsa Dengan dan Kecepatan Kendaraan

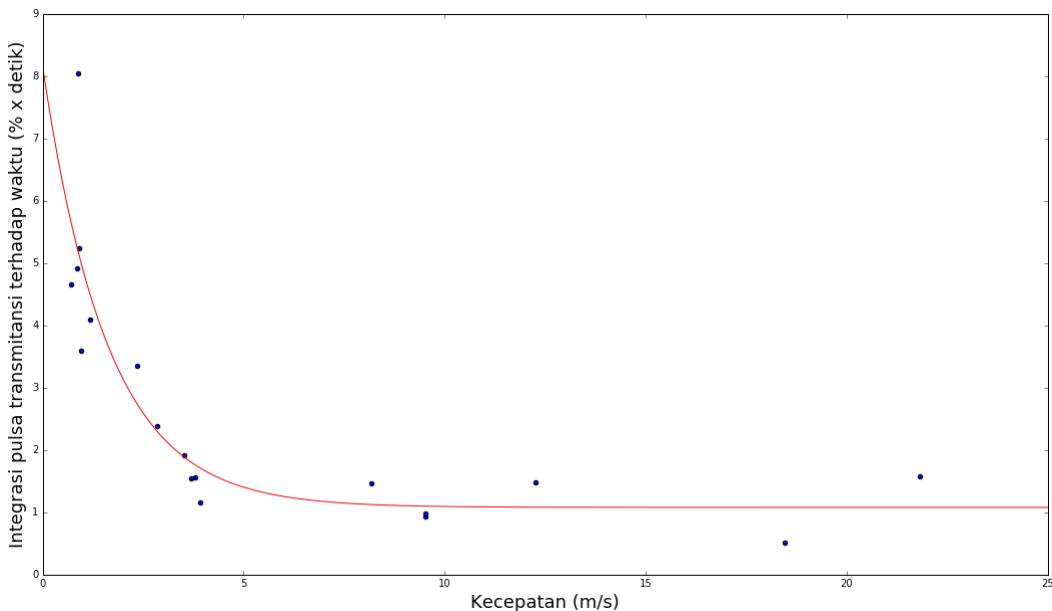


Gambar 4.21. Grafik nilai perubahan transmitansi maksimum terhadap kecepatan kendaraan

Dalam skripsi ini data yang ditampilkan adalah data yang diperoleh dengan menggunakan *Nissan Juke* dengan massa 1285 kg. Kendaraan dilewatkan ke sensor dengan kecepatan mulai dari 1 m/s hingga 20 m/s. Gambar 4.21 menggambarkan hubungan nilai ekstrim pulsa sinyal terhadap kecepatan. Data didekati dengan persamaan linear dalam grafik merah.

Integrasi pulsa sinyal terhadap waktu dihitung menggunakan Persamaan (4.11). β adalah *bandwidth* yang nilainya 8000 Hz dan s_i adalah sinyal transmitansi. W adalah nilai integrasi sinyal.

$$W = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^{i=n} s_i \quad (4.11)$$



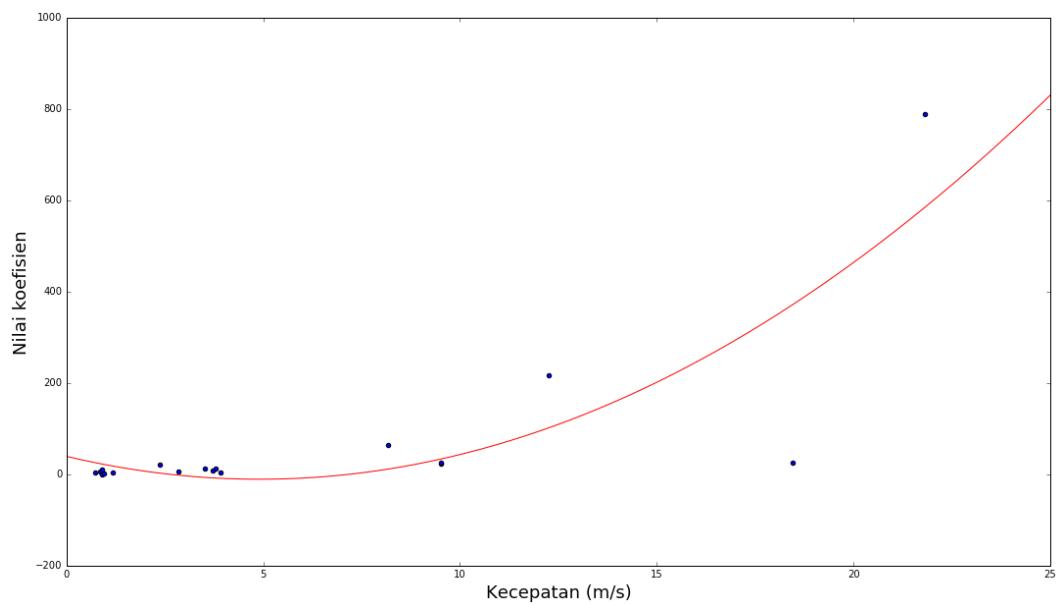
Gambar 4.22. Grafik integrasi transmitansi terhadap kecepatan kendaraan

$$y = ae^{-bx} + c \quad (4.12)$$

Gambar 4.22 menggambarkan *plot* nilai integrasi terhadap kecepatan kendaraan. Grafik merah didapat menggunakan SGD terhadap Persamaan (4.12), yang merupakan persamaan peluruhan eksponensial. Nilai koefisien yang diperoleh adalah $a=1,1327$ $b=0,1986$ dan $c = 0,4477$. Hubungan ini menarik karena ternyata luasan pulsa kendaraan akan mengalami peluruhan eksponensial dengan naiknya kecepatan.

Perhitungan koefisien menggunakan SGD dalam sub bagian 4.16 diterapkan terhadap seluruh data yang diambil, selanjutnya nilai koefisien di *plot* terhadap kecepatan kendaraan. Gambar 4.23 menggambarkan *plot* koefisien W_1 . *Plot* didekati menggunakan persamaan orde 2 seperti Persamaan (4.13) menghasilkan garis merah dan koefisien $a = 2,0831$, $b = -20,4339$, dan $c = 39,2036$.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.13)$$



Gambar 4.23. Grafik nilai koefisien w_1 terhadap kecepatan kendaraan.

Data digunakan untuk membuat Gambar 4.23 ada di Lampiran 4.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil penelitian “Pembuatan Sensor Berat Kendaraan Berjalan Dengan Area *Sensing* Yang Diperluas” adalah sistem sensor WIM yang mampu mengukur sinyal *impulse* dan kecepatan kendaraan serta mengidentifikasi jenis kendaraan. Sensor mampu mengukur sinyal *impulse* dari kendaraan dengan massa 1,3 ton. Sinyal dari sensor WIM terdiri dari 8 *channel* data yang memonitor *impulse* dan kecepatan kendaraan. Sinyal memiliki *signal to noise ratio* sebesar 3445 dan *bandwidth* 64000 Hz.
2. Program sensor WIM mampu menganalisa sinyal WIM, mengambil gambar kendaraan, dan mengukur kecepatan kendaraan
3. Kecepatan kendaraan diukur menggunakan data sinyal *impulse* sensor WIM dan sensor kecepatan berbasis cahaya.
4. Analisa *impulse* sinyal menyatakan bahwa bentuk *response* sensor WIM sesuai dengan sistem orde 2. Perhitungan integrasi sinyal *impulse* terhadap waktu menyatakan bahwa integrasi sinyal memiliki hubungan eksponensial negatif.

5.2 Saran

1. Otomatisasi proses penggulungan fiber optik untuk meningkatkan keseragaman struktur fiber optik.
2. Optimisasi kode ADC untuk meningkatkan *bandwidth* menjadi 1 MHz dan memanfaatkan teknik *oversampling* untuk melakukan filter sinyal menggunakan *Savitzky-Golay* tanpa menghilangkan informasi *impulse*, sehingga meningkatkan SNR, *dynamic range*, dan sensitifitas sensor.
3. Optimisasi kode komputasi dengan memanfaatkan paralelisme.
4. Gunakan *zero drift* OP-AMP untuk meningkatkan presisi.
5. Tingkatkan perlindungan elektromagnetik pada kabel dan sensor.

Daftar Pustaka

- DeCusatis, C.M., (2006). *Fiber Optics Essentials*. Elsevier: New York.
- El Khiyari, H., Wechsle, H., (2016). Face Recognition across Time Lapse Using Convolutional Neural networks. *Journal of Information Security*, pp. 141-157.
- George, Daniel., Huerta, E.A., (2017). Deep Learning for Real-time Gravitational Wave Detection and Parameter Estimation: Results with Advanced LIGO Data. *arXiv:1711.03121v1 [gr-qc]*
- Held, Gilbert., (2009). *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Application*. Taylor&Francis Group: Boca Raton.
- Jacob, B., La Beaumelle, V. F., (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research* 34 , 9-15.
- Lakshminarayanan,V., Ghatak, A.K., Thyagarajan, K., (2002). *Lagrangian Optics*. Springer Science+Business Media: New York.
- Nice, Norman S., (2015). *Control System Engineering*. John Wiley & Sons, In: New Jersey.
- PUSDATIN Kementerian PUPR, (2016). *Informasi Statistik Infrastruktur Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2015*.
- Remouche, M., Georges, F., Meyrueis, P., (2012). Flexible Optical Waveguide Bent Loss Attenuation Effects Analysis and Modeling Application to an Intrinsic Optical Fiber Temperature Sensor. *Optics and Photonics Journal*, pp. 1-7.
- Saleh, B.E.A., Teich, M.C., (1991). *Fundamentals of Photonics*. John Wiley& Sons: New York.
- Simonyan, K., Zisserman, A., (2015). *Very Deep Convolutional Networks for Large Scale Image Recognition*. ICLR 2015.
- Taylor, John., (2005). *Classical Mechanics*. University Science Books.

Winkler, C., Love, J.D., Ghatak, A.K., (1979). Loss Calculation in Bent Multimode Optical Waveguides. *Optical and Quantum Electronics*, pp. 173-183.

Wu, Yue., Pei, Li., Jin, Wenxing., Jiang, Youchao., Yang, Yuguang., Shen, Ya., Jian, Shuisheng., (2017). Highly sensitive curvature sensor based on asymmetrical twin core fiber and multimode fiber. *Optics & Laser Technology*, 92, 74-79.

Xiong, Mengling., Gong, Huaping., Wang, Zhiping., Zhao, Chun-Liu., Dong, Xinyong., (2016). Fiber curvature sensor based on spherical-shape structures and long-period grating. *Optics and Lasers in Engineering*, 86

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perbandingan Operational Amplifier

Jenis OP-AMP	Sifat			
	Gain <i>Bandwidth</i> Product	Slew Rate	Noise Level	Temperature drift
UA741	1 Mhz	0,5 V/ μ s	Besar	
NE5332	10 Mhz	9 V/ μ s	Kecil	
RC4558	3 Mhz	1,7 V/ μ s	Besar	
TL074	3 Mhz	13 V/ μ s	Sedang	10 μ V/K
LM358	1 Mhz	0.031375	Besar	7 μ V/K

Gain *Bandwidth Product* akan mempengaruhi intensitas minimum cahaya yang bisa dideteksi. Semakin besar *Gain Bandwidth Product*, semakin kecil intensitas cahaya yang bisa dideteksi, dengan itu memudahkan desain sistem optik. *Slew rate* mempengaruhi bentuk pulsa yang didapat. *Slew rate* adalah ukuran kecepatan output voltase OP-AMP dalam mengikuti kecepatan perubahan intensitas cahaya yang dideteksi *photodiode*. *Slew rate* yang terlalu kecil akan menghasilkan sinyal yang tidak akurat, hal ini sangat penting apabila kendaraan dalam kecepatan tinggi.

Sangat sulit untuk mencari *zero temperature drift* OP-AMP karena sebagian besar dibuat untuk industri dan tidak dijual dalam kuantitas kecil. Semua data yang diambil menggunakan *non zero drift* Op-AMP, sehingga ada efek temperatur, walaupun kecil dalam sinyal. Di akhir penelitian OP-AMP yang digunakan adalah NE5332.

Lampiran 2. Arsitektur *Convolutional Neural network* yang dibuat untuk mendeteksi kendaraan

Tipe Koneksi / <i>Stride</i>	Ukuran Parameter	Ukuran <i>Tensor</i> Masukan
Conv / s2	3 X 3 X 3 X 32	224 X 224 X 3
Conv dw / s1	3 X 3 X 32 dw	112 X 112 X 32
Conv / s1	1 X 1 X 32 X 64	112 X 112 X 32
Conv dw / s2	3 X 3 X 64 X dw	112 X 112 X 64
Conv / s1	1 X 1 X 64 X 128	56 X 56 X 64
Conv dw / s1	3 X 3 X 128 X dw	56 X 56 X 128
Conv / s1	1 X 1 X 128 X 128	56 X 56 X 128
Conv dw / s2	3 X 3 128 dw	56 X 56 X 128
Conv / s1	1 X 1 128 256	28 X 28 X 128
Conv dw / s1	3 X 3 256 dw	28 X 28 X 256
Conv / s1	1 X 1 256 256	28 X 28 X 256
Conv dw / s2	3 X 3 256 dw	28 X 28 X 256
Conv / s1	1 X 1 256 512	14 X 14 X 256
5 X Conv dw / s1	3 X 3 X 512 X dw	14 X 14 X 512
Conv / s1	1 X 1 X 512 X 512	14 X 14 X 512
Conv dw / s2	3 X 3 512 dw	14 X 14 X 512
Conv / s1	1 X 1 512 1024	7 X 7 X 512
Conv dw / s2	3 X 3 1024 dw	7 X 7 X 1024
Conv / s1	1 X 1 1024 1024	7 X 7 X 1024
Avg Pool / s1	Pool 7 X 7	7 X 7 X 1024
FC / s1	1024 X 1000	1 X 1 X 1024
Softmax / s1	Classifier	1 X 1 X 1000

Koneksi conv adalah tipe koneksi *convolutional*, sedangkan koneksi conv dw adalah tipe *convolutional deephtwise*.

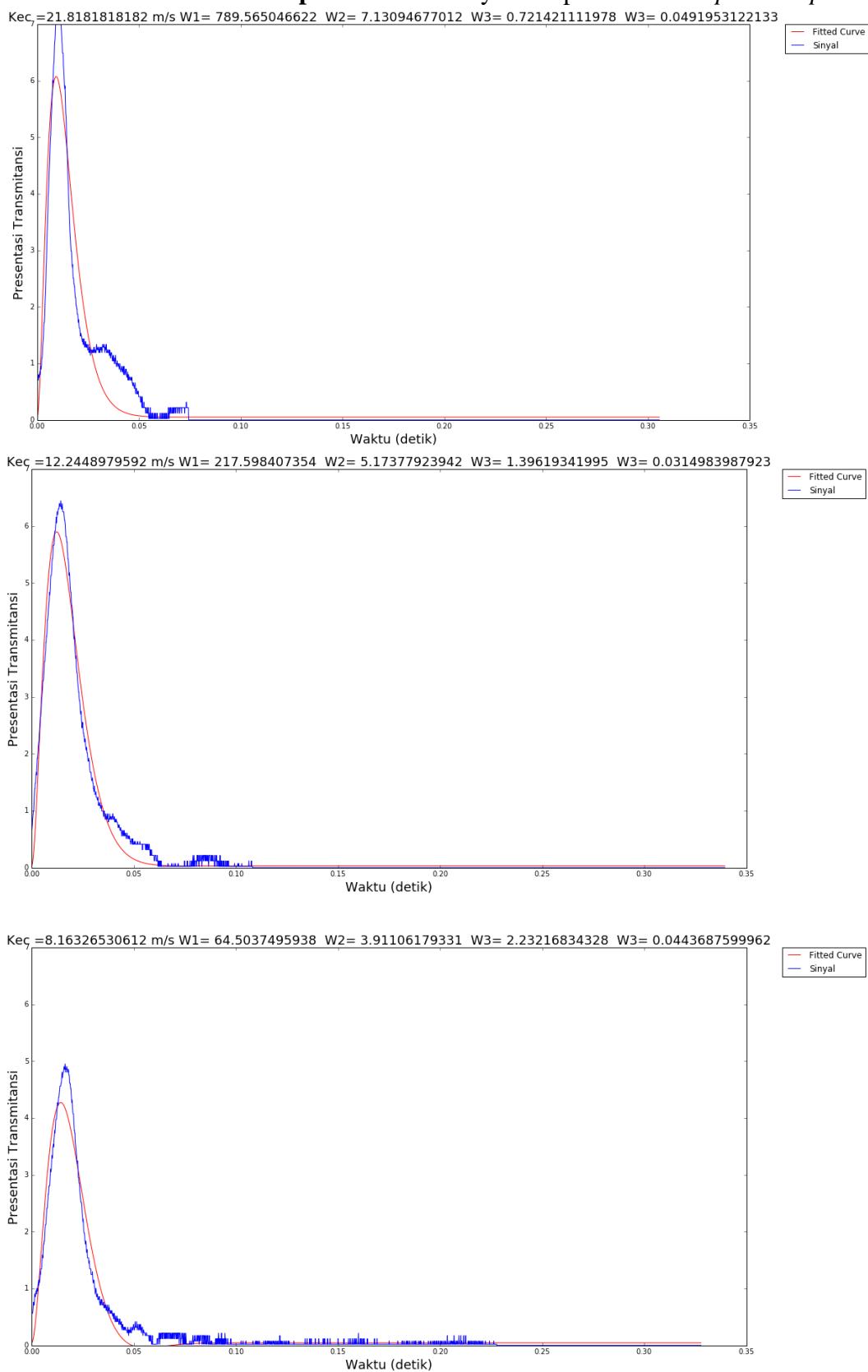
Lampiran 3. Bandwidth dan SNR maksimum

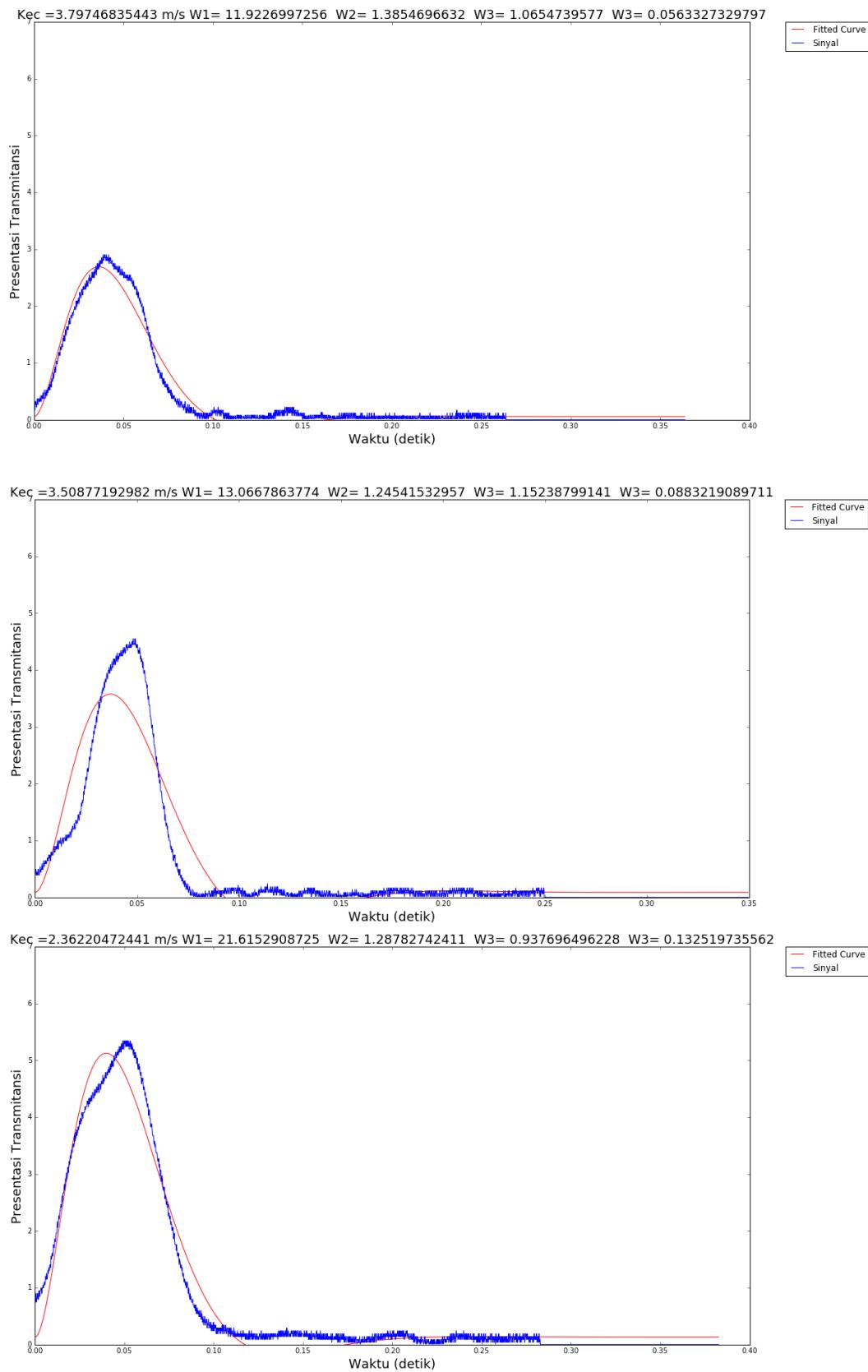
Bandwidth maksimum teoritik apabila semua *noise* dapat dihilangkan dibatasi oleh sifat diskrit dari *photon*. Apabila untuk menerima satu sinyal dibutuhkan dua *photon*, maka *bandwidth* maksimum mengikuti persamaan dibawah

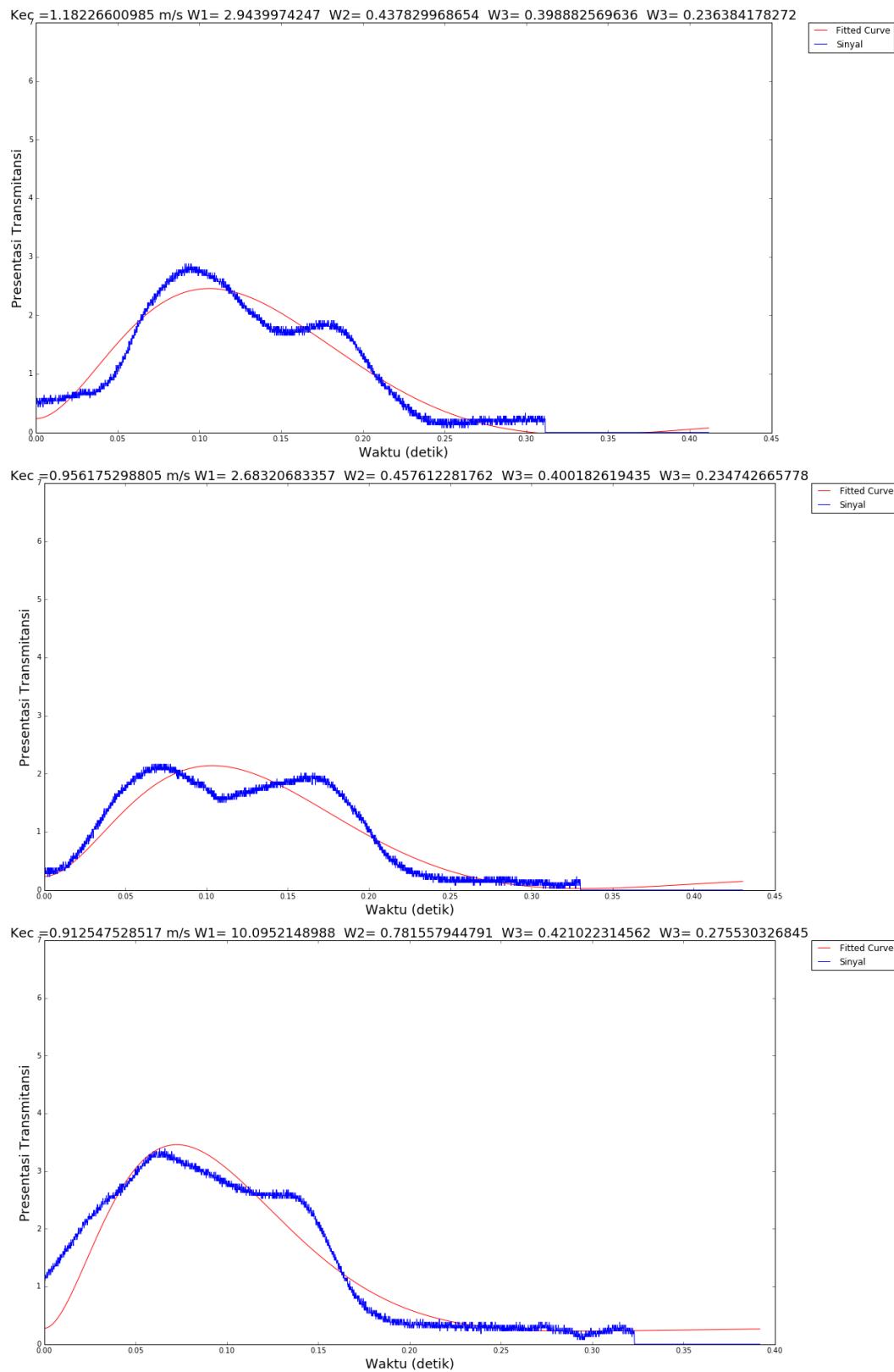
$$\text{Bandwidth} = \frac{I_d}{2 \times \text{SNR} \times e}$$

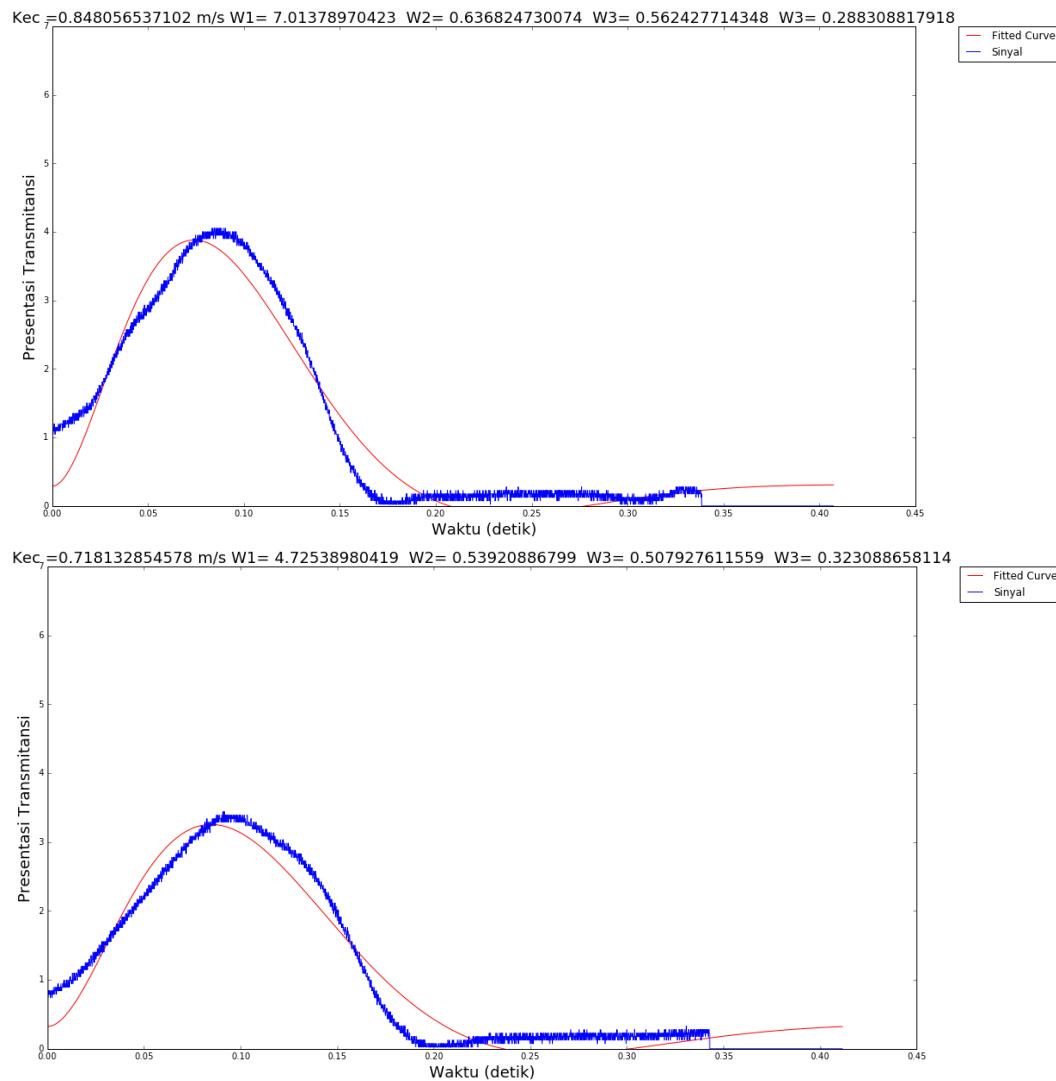
Nilai I_d dipengaruhi oleh jumlah photon yang memasuki detektor dan efisiensi detektor, dimana $I_d = \text{jumlah photon} \times \text{efisiensi detektor}$. Dengan nilai $I_d=6 \times 10^{-6}$ A dan SNR 3445, apabila semua sumber *noise* dapat dihilangkan *bandwidth* maksimum yang bisa dicapai adalah 5437 Mhz. Nilai ini sangat tinggi, pada prakteknya shot *noise*, *Johnson noise*, interferensi elektromagnetik dan kualitan komponen akan menurunkan SNR secara signifikan, walaupun begitu nilai ini bisa menggambarkan bahwa masih banyak ruang untuk melakukan perkembangan di dalam aspek *bandwidth* dan SNR.

Lampiran 4. Data sinyal dan pendekatan *impulse response*









Lampiran 5. Program WIM

```

from multiprocessing import Process, Queue
import pyqtgraph as pg
from pyqtgraph.Qt import QtCore, QtGui
import numpy as np
from serial import Serial
import time
from os import listdir
from os.path import isfile, join
import Queue as Q
import msvcr
#from scipy.signal import savgol_filter

"""
result =63141.2687254
63341.2504158
63191.1516201
63241.1014749
65199.674103
63191.1516201
63643.5853369
65520.0678741
64000.0
63191.1516201
64000.0
64000.0
63191.1516201
64000.0
63241.1133941
67510.5517831
64000.0
63191.1516201
63191.1516201
dps
"""

def func1(queue,queue2):

    ser = Serial("COM13")
    data_buff_size = 8000
    data = np.zeros(data_buff_size)
    n_bytes = 16000
    n=2000
    nn=n+1
    k=0
    kk=0

```

```

kkk=0
data11=np.zeros(n)
data22=np.zeros(n)
data33=np.zeros(n)
data44=np.zeros(n)
data55=np.zeros(n)
data66=np.zeros(n)
data77=np.zeros(n)
data88=np.zeros(n)

k1=0

def save_file(dmas,t2):

    files = [f for f in listdir('data_r3/take_1') if isfile(join('data_r3/take_1', f))]
    hh=len(files)+1
    hh1='data_r3/take_1/data_'+str(hh)+'.npy'
    y22 = dmas.astype(dtype=np.float16)
    np.save(hh1, y22)
    print "logging data for : ", time.time()-t2, " second"
    print "saving data as : ", hh1


def kb():

    x=msvcrt.kbhit()
    if x:
        xx=msvcrt.getch()
    else:
        return False
    return xx

number=0
while k == 0:
    number+=1

    if number==1:
        time2=time.time()

    if number ==21:
        number=0
        print (8000.0*20)/(time.time()-time2)

    kkk=kkk+1
    rslt = ser.read(n_bytes)

```

```
data = np.fromstring(rslt, dtype=np.uint16)
## print "ok ", time.time()-t1
if data[0] > 9000:
    rslt=rslt[1:-1]
    data = np.fromstring(rslt, dtype=np.uint16)
    kk=ser.read(1)
    data1pp=data[0::8]
    data2pp=data[1::8]
    data3pp=data[2::8]
    data4pp=data[3::8]
    data5pp=data[4::8]
    data6pp=data[5::8]
    data7pp=data[6::8]
    data8pp=data[7::8]

    if data8pp[0] > 4400:
        data8p=data8pp-4500
        data7p=data7pp
        data6p=data6pp
        data5p=data5pp
        data4p=data4pp
        data3p=data3pp
        data2p=data2pp
        data1p=data1pp

    elif data7pp[0] > 4400:
        data8p=data7pp-4500
        data7p=data6pp
        data6p=data5pp
        data5p=data4pp
        data4p=data3pp
        data3p=data2pp
        data2p=data1pp
        data1p=data8pp

    elif data6pp[0] > 4400:
        data8p=data6pp-4500
        data7p=data5pp
        data6p=data4pp
        data5p=data3pp
        data4p=data2pp
        data3p=data1pp
        data2p=data8pp
        data1p=data7pp

    elif data5pp[0] > 4400:
        data8p=data5pp-4500
```

```
data7p=data4pp
data6p=data3pp
data5p=data2pp
data4p=data1pp
data3p=data8pp
data2p=data7pp
data1p=data6pp
elif data4pp[0] > 4400:
    data8p=data4pp-4500
    data7p=data3pp
    data6p=data2pp
    data5p=data1pp
    data4p=data8pp
    data3p=data7pp
    data2p=data6pp
    data1p=data5pp
elif data3pp[0] > 4400:
    data8p=data3pp-4500
    data7p=data2pp
    data6p=data1pp
    data5p=data8pp
    data4p=data7pp
    data3p=data6pp
    data2p=data5pp
    data1p=data4pp
elif data2pp[0] > 4400:
    data8p=data2pp-4500
    data7p=data1pp
    data6p=data8pp
    data5p=data7pp
    data4p=data6pp
    data3p=data5pp
    data2p=data4pp
    data1p=data3pp
elif data1pp[0] > 4400:
    data8p=data1pp-4500
    data7p=data8pp
    data6p=data7pp
    data5p=data6pp
    data4p=data5pp
    data3p=data4pp
    data2p=data3pp
    data1p=data2pp

#     data1=data1p[0::20]
```

```

#      data2=data2p[0::20]
#      data3=data3p[0::20]
#      data4=data4p[0::20]
#      data5=data5p[0::20]

data1=data1p
data2=data2p
data3=data3p
data4=data4p
data5=data5p
data6=data6p
data7=data7p
data8=data8p

data11=np.append(data11,data1)
data22=np.append(data22,data2)
data33=np.append(data33,data3)
data44=np.append(data44,data4)
data55=np.append(data55,data5)
data66=np.append(data66,data6)
data77=np.append(data77,data7)
data88=np.append(data88,data8)
data11=data11[-n:]
data22=data22[-n:]
data33=data33[-n:]
data44=data44[-n:]
data55=data55[-n:]
data66=data66[-n:]
data77=data77[-n:]
data88=data88[-n:]

#      data333=data33[:-1]-data33[1:]
#      data333=data33[:-1]-data33[1:]
#      print data333.shape
#      try :
#          n11=51
#          data33 = (savgol_filter(data33,n11, 3))
#      except IndexError:
#          data33=data33

mydata=np.append([data11],[data22],axis=0)
mydata=np.append(mydata,[data33],axis=0)
mydata=np.append(mydata,[data44],axis=0)
mydata=np.append(mydata,[data55],axis=0)
mydata=np.append(mydata,[data66],axis=0)
mydata=np.append(mydata,[data77],axis=0)

```

```

mydata=np.append(mydata,[data88],axis=0)

mydata1=mydata[:,0::3]
queue.put(mydata1)

try :
    x=queue2.get(timeout=0.001)
except Q.Empty:
    x=4

if x==0:
    print "begin data logging"
    k1=1
    dmas=np.append(mydata,mydata,1)
    t2=time.time()
if x==1:
    k1=0
    save_file(dmas,t2)

if k1==1:
    try:
        dmas=np.append(dmas,mydata,1)
    except ValueError:
        print data1.shape
        print data2.shape

def func2(queue):
#  from scipy.signal import savgol_filter

    time.sleep(0.4)
    win = pg.GraphicsWindow()
    win.setWindowTitle('Data, last 3 second')
    n=2000
    data11=np.zeros(n)
    data22=np.zeros(n)
    data33=np.zeros(n)
    data44=np.zeros(n)
    data55=np.zeros(n)
    data66=np.zeros(n)
    data77=np.zeros(n)
    data88=np.zeros(n)

    p1 = win.addPlot()#(colspan=2)
#    win.nextRow()

```

```

p2 = win.addPlot()#(colspan=2)
win.nextRow()
p3 = win.addPlot()#(colspan=2)
#  win.nextRow()
p4 = win.addPlot()#(colspan=2)
win.nextRow()
p5 = win.addPlot()#(colspan=2)
#  win.nextRow()
p6 = win.addPlot()#(colspan=2)
win.nextRow()
p7 = win.addPlot()#(colspan=2)
#  win.nextRow()
p8 = win.addPlot()#(colspan=2)

curve1 = p1.plot(data11, pen=(255,0,0), name="Original")
curve2 = p2.plot(data22)
curve3 = p3.plot(data33)
curve4 = p4.plot(data44)
curve5 = p5.plot(data55)
curve6 = p6.plot(data66)
curve7 = p7.plot(data77)
curve8 = p8.plot(data88)
#  curve6 = p1.plot(data11, pen=(0,0,255), name="Filtered")

```

```

def update1():

    mydata=queue.get(timeout=1)
    data11=mydata[0]
    data22=mydata[1]
    data33=mydata[2]
    data44=mydata[3]
    data55=mydata[4]
    data66=mydata[5]
    data77=mydata[6]
    data88=mydata[7]

```

```

curve1.setData(data11)
curve2.setData(data22)
curve3.setData(data33)
curve4.setData(data44)
curve5.setData(data55)
curve6.setData(data66)
curve7.setData(data77)

```

```

curve8.setData(data88)

timer = pg.QtCore.QTimer()
timer.timeout.connect(update1)
timer.start(50)

import sys
if (sys.flags.interactive != 1) or not hasattr(QtCore, 'PYQT_VERSION'):
    QtGui.QApplication.instance().exec_()

def func3(queue4):
    import cv2
    cap = cv2.VideoCapture(1)
    kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE,(3,3))
    fgbg = cv2.createBackgroundSubtractorMOG2()
    while True:
        ret, frame = cap.read()
    #    gray = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
        gray=frame
        fgmask = fgbg.apply(gray)
        fgmask = cv2.morphologyEx(fgmask, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    #
        cv2.imshow('webcam original', frame)
        cv2.imshow('webcam masked', fgmask)
    #    cv2.imshow('gray', gray)
        if cv2.waitKey(27) & 0xFF == ord('q'):
            break

def func4(queue2):

    import csv
    def kb():
        x=msvcrt.kbhit()
        if x:
            xx=msvcrt.getch()
        else:
            return False
        return xx
    k=0
    k2=1
    k3=0
    cons0=0
    cons1=1
    cons2=2

```

```

cons3=3
saveornot=0
while k==0:
    x=kb()
    if x != False and x =='\r':
        print '\r'
        print x1
        print time.time()-ttt
    #    queue5.put(x1)
    if x != False and x!='\r'and x !=';' and x !=<':
        if saveornot == 1:
            x=x.decode()
            print x,
            x1=x1+x
    if x != False and x ==<':
        queue2.put(cons1)
        saveornot=0
    #    print '\r'
    #    print x1
    #    queue5.put(x1)
    #    x1=x1+' took '+str(time.time()-t22)+' second'
    com=[x1, str(time.time()-t22)]
    files = [f for f in listdir('data_r3/take_1') if isfile(join('data_r3/take_1', f))]
    hh=len(files)+1
    hh='data_r3/take_1/comment/comment_'+str(hh)+'.csv'
    with open(hh,'w') as csvfile:
        w = csv.writer(csvfile)
        w.writerow(com)
    if x != False and x ==';':
        t22=time.time()
        x1="Description : "
        ttt=time.time()
        queue2.put(cons0)
        saveornot=1
        time.sleep(0.03)

if __name__ == '__main__':
    queue=Queue()
    queue2=Queue()
    # queue3=Queue()
    queue4=Queue()

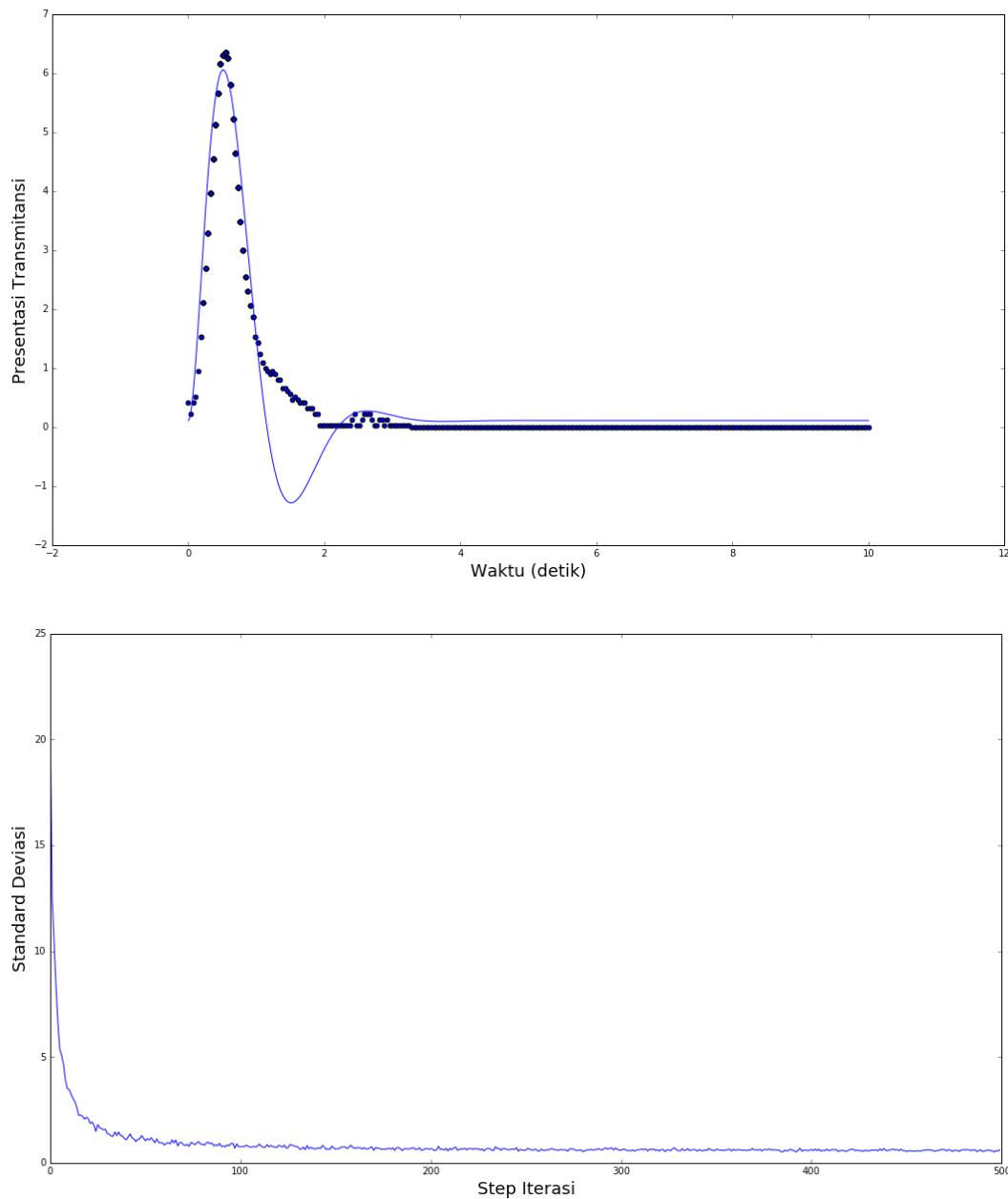
    # queue5=Queue()
    # queue6=Queue()

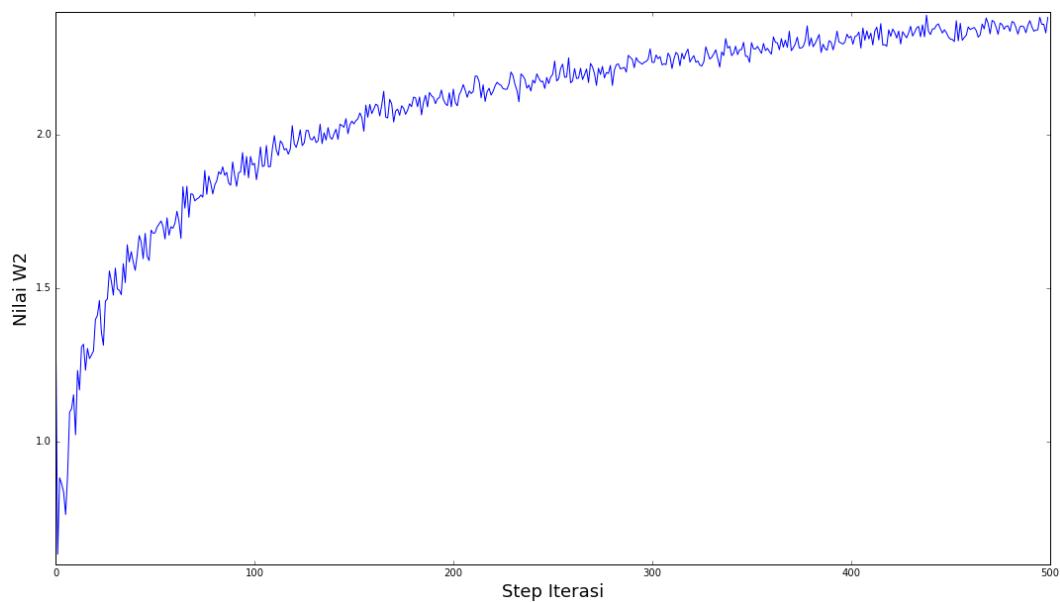
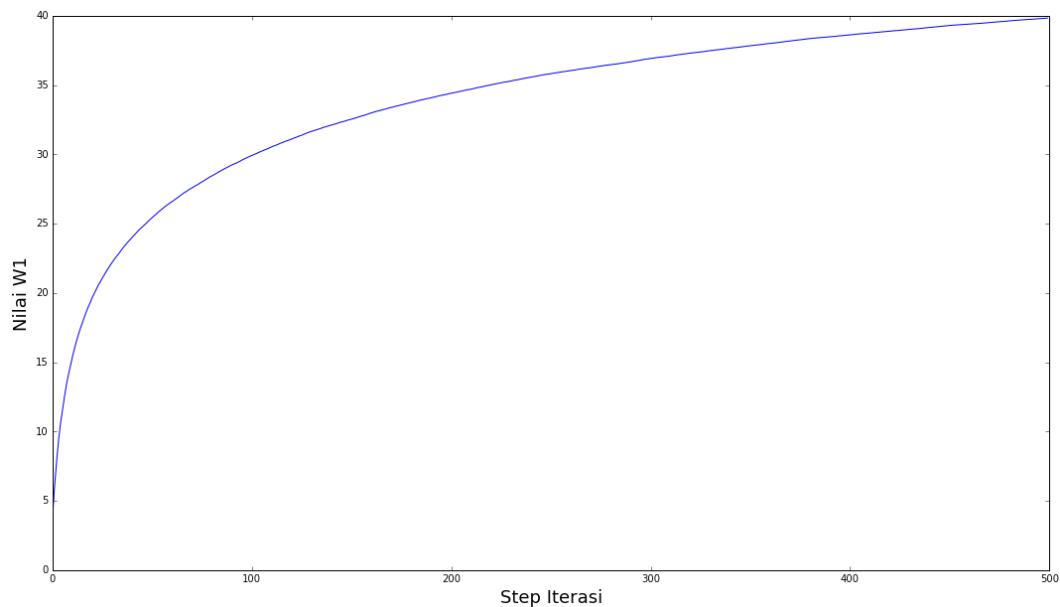
```

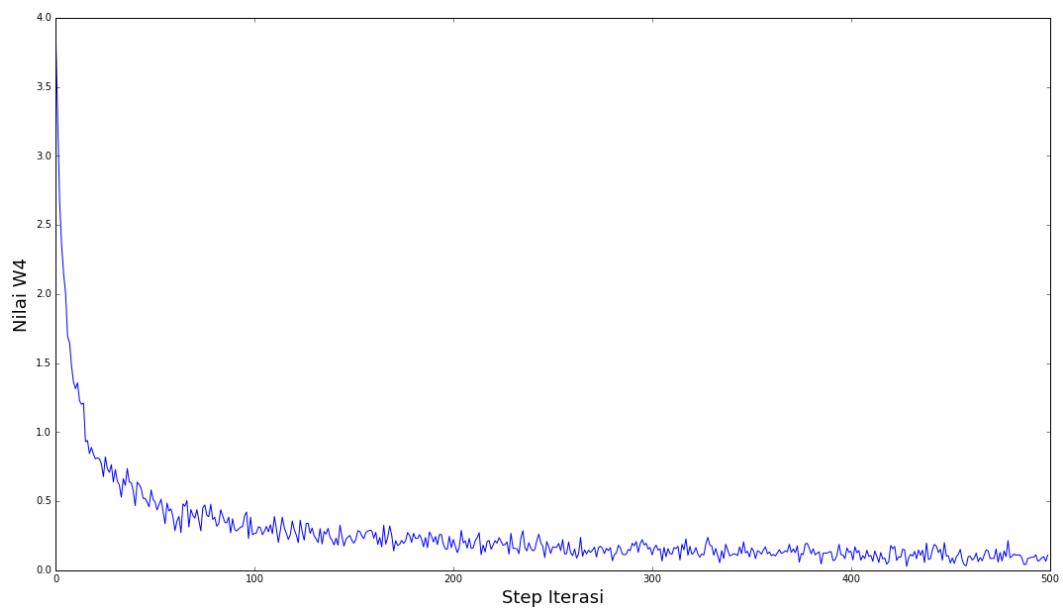
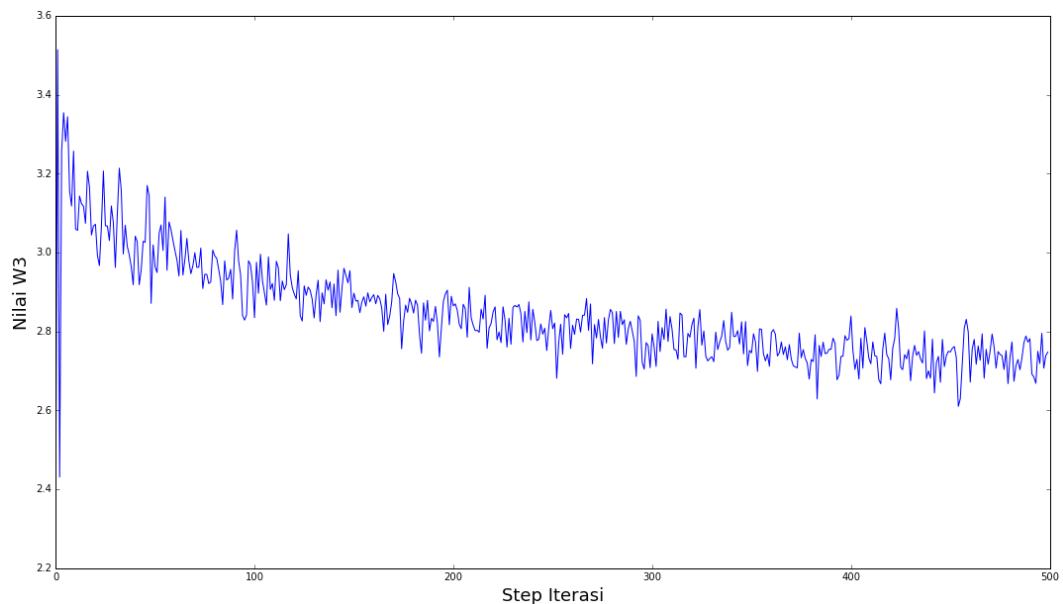
```
p1 = Process(target=func1,args=(queue,queue2,))
p1.start()
p2 = Process(target=func2,args=(queue,))
p2.start()
# p3 = Process(target=func3,args=(queue4,))
# p3.start()
p4 = Process(target=func4,args=(queue2,))
p4.start()

p1.join()
p2.join()
# p3.join()
p4.join()
```

Lampiran 6. *Grafik sintetik data yang diperoleh dengan metode stochastic gradient descent*







Lampiran 7. Grafik data stream sensor kecepatan dengan modulasi cahaya

