



TESIS SF-185401

**ANALISA POLA SPEKEL YANG TERBENTUK PADA
JARI TELUNJUK MENGGUNAKAN SENSOR OPTIK
BERBASIS *SELF MIXING INTERFEROMETRY* (SMI)**

**RAHMI INTAN YUNIFAR
NRP 01111850010020**

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc

Program Magister
Bidang Keahlian Fisika Medis dan Biofisika
Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020



TESIS - SF185401

**ANALISA POLA SPEKEL YANG TERBENTUK PADA
JARI TELUNJUK MENGGUNAKAN SENSOR OPTIK
BERBASIS SELF MIXING INTERFEROMETRY (SMI)**

**RAHMI INTAN YUNIFAR
NRP 01111850010020**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc**

**Program Magister
Bidang Keahlian Fisika Medis dan Biofisika
Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020**



TESIS - SF185401

**ANALYSIS OF SPECKEL PATTERNS ESTABLISHED
ON THE FINGERS USING OPTICAL SENSOR
BASED ON SELF MIXING INTERFEROMETRY (SMI)**

**RAHMI INTAN YUNIFAR
NRP 01111850010020**

Advisor

Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc

Master Program
Field Of Medical Physics and Biophysics
Department of Physics
Faculty of Science and Data Analytics
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMI INTAN YUNIFAR

NRP. 01111850010020

Tanggal Ujian : 30 Januari 2020

Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing:

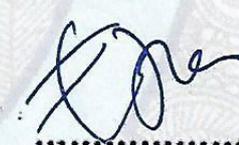
1. Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubivanto, M.Eng.Sc
NIP. 19650619.198903.1.001



.....

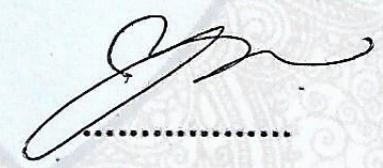
Penguji:

1. Endarko, M.Si, Ph.D.
NIP. 19741117.199903.1.001



.....

2. Dr. Ali Yunus Rohedi, MT.
NIP. 19670514.199303.1.016



.....

Kepala Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Analitika Data

Dr. Gatut Yudoyono, MT.
NIP. 19640616198903.1.004

ANALISA POLA SPEKEL YANG TERBENTUK PADA JARI TELUNJUK MENGGUNAKAN SENSOR OPTIK BERBASIS SELF MIXING INTERFEROMETRY (SMI)

Nama : Rahmi Intan Yunifar
NRP : 01111850010020
Pembimbing : Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc

ABSTRAK

Tesis ini bertujuan untuk menganalisa pola spekel yang terbentuk pada jari telunjuk menggunakan sensor optik berbasis *Self-Mixing Interferometry* (SMI). Sensor SMI merupakan metode non-kontak yang dapat digunakan untuk mengukur berbagai sinyal biologis seperti kecepatan aliran darah pada permukaan kulit. Metode SMI didasarkan pada laser sebagai sumber cahaya dan fotodioda sebagai fotodetektor terintegrasi dalam satu devais. Prinsip *Self-Mixing Interferometry* yakni ketika cahaya keluaran dari laser ditembakkan menuju target, maka sebagian cahaya akan dipantulkan oleh target dan ditangkap kembali oleh detektor yang terletak satu devais di dalam laser. Cahaya pantulan dari target akan berinterferensi dengan cahaya asli di dalam laser. Pada sistem SMI, digunakan laser dioda dengan panjang gelombang 785 nm sebagai sumber cahaya yang disinarkan pada jari telunjuk. Spekel merupakan pola intensitas acak yang terbentuk dari interferensi cahaya terhambur dari permukaan kasar kulit yang disinari berkas cahaya koheren dari laser. Frekuensi spekel terkait langsung dengan kecepatan objek yang bergerak seperti kecepatan aliran darah dalam pembuluh darah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor optik berbasis SMI dapat digunakan untuk menganalisa pola spekel berdasarkan kemampuannya menangkap sinyal balik dari target difus sehingga terjadi intereferensi acak pada rongga laser dioda dan fotodioda mendeteksi sinyal spekel. Hubungan antara frekuensi spekel dan aktivitas aliran darah pada permukaan kulit telah diamati. Daerah dengan warna kontras tinggi memiliki nilai frekuensi spekel yang tinggi, hal ini menandakan bahwa pada daerah tersebut kecepatan aliran darah tinggi. Sebaliknya daerah dengan warna kontras rendah memiliki nilai frekuensi spekel yang rendah, sehingga menandakan bahwa pada daerah tersebut kecepatan aliran darah rendah.

Kata Kunci: Laser Dioda, Jari Telunjuk, Spekel, *Self Mixing Interferometry*.

ANALYSIS OF SPECKEL PATTERNS ESTABLISHED ON THE FINGERS USING OPTICAL SENSOR BASED ON SELF MIXING INTERFEROMETRY (SMI)

Name : Rahmi Intan Yunifar
Student Identity Number : 01111850010020
Supervisor : Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc

ABSTRACT

This thesis aims to analyze the speckle pattern formed on the finger using optical sensors based on Self-Mixing Interferometry (SMI). The SMI sensor is a non-contact method that can be used to measure various biological signals such as the speed of blood flow on the surface of the skin. The SMI method is based on a laser as a light source and a photodiode as a photodetector which integrated in the package. The principle of Self-Mixing Interferometry explains that the light output from a laser is fired at a target, then some of the light will be reflected by the target and captured again by the detector located one device in the laser. The reflected light from the target will interfere with the original light in the laser. In the SMI system, a diode laser with a wavelength of 785 nm is used as a source of light illuminated on the finger. Speckle is a pattern of random intensity that is formed from light interference scattered from the rough surface of the skin which is illuminated by a coherent beam of light from the laser. Speckle frequency is directly related to the speed of moving objects such as the speed of blood flow in blood vessels. The results showed that an SMI-based optical sensor can be used to analyze the speckle pattern based on its ability to capture the return signal from a diffuse target, therefore random interference occurs in the diode laser cavity and the photodiode detects the speckle signal. The relationship between speckle frequency and blood flow activity on the surface of the skin has been observed. Areas with high contrast colors have high frequency speckle values, this indicates that in these areas high blood flow velocity. Otherwise, areas with low contrast colors have low speckle frequency values, thus indicating that in those areas the blood flow velocity is low.

Keywords: Laser diode, Finger, Speckle, Self-Mixing Interferometry

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis ucapkan kepada ALLAH SWT karena atas berkah, rahmat, petunjuk dan pertolongan Nya yang diberikan, sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan Tesis ini dengan optimal setelah melewati perjalanan penelitian yang tidak mudah. Sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan agung Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun dari gelapnya kebodohan menuju terangnya cahaya kebenaran.

Tesis ini penulis susun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan Pascasarjana Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data ITS. Tesis dengan judul :

***“ANALISA POLA SPEKEL YANG TERBENTUK PADA JARI TELUNJUK
MENGUNAKAN SENSOR OPTIK BERBASIS SELF MIXING
INTERFEROMETRY (SMI)”***

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang membantu penyusunan laporan Tesis dan proses penelitiannya.

1. Kedua orang tua tercinta penulis yang telah memberikan semua hal terbaik bagi penulis sejak kecil sampai dewasa dan memberikan doa di tiap malam.
2. Kedua saudara tersayang, Annisa Layali Sakinah dan Annisa Firdausi Nazilah yang telah memberikan support kepada penulis.
3. Bapak Prof. Dr. rer. nat. Agus Rubiyanto, M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberi pengarahan selama proses penelitian dan penyusunan laporan.
4. Bapak Endarko, M.Si, Ph.D selaku dosen mata kuliah dan Dr. Ali Yunus Rohedi selaku dosen penguji .
5. Bapak Dr. Gatut Yudhoyono M.T selaku Ketua Departemen Fisika ITS.
6. Pak Ghofar sebagai laboran Laboratorium Optik dan EM Terapan yang telah banyak membantu ketersediaan alat penelitian
7. Segenap dosen-dosen Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data yang telah mengajarkan berbagai ilmu kepada penulis. Semoga ilmu nya bermanfaat dan mendapatkan pahala yang mengalir terus menerus.
8. Mbak devi sebagai laboran Laboratorium Elektronika yang telah banyak membantu menyiapkan alat penelitian.

9. Prof. Sekartedjo sebagai kepala laboratorium fotonika departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melakukan pengujian laser di Laboratorium Fotonika
10. Pak Adi Humaidillah dan mbak Ria dari UNHASY yang telah memberikan saran, masukan, pengetahuan kepada penulis terkait penelitian
11. Mbak Novi, Mas Zaki, Mas Syam, Mas Okto sebagai alumni pascasarjana Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data ITS terima kasih atas semua saran dan bimbingannya terkait penelitian SMI kepada penulis
12. Aditya Prayugo dan Anna Zakiyatul dari Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data ITS terima kasih atas kesediaannya membantu penulis dalam pengambilan data dan bersedia meluangkan waktu menjadi teman diskusi penulis terkait tesis
13. Segenap teman-teman Pascasarjana Tahun 2018, terutama teman satu perjuangan di Lab Fisika Medis dan Biofisika Departemen Fisika Fakultas Sains dan Analitika Data ITS (Mohammad Ainul Yaqin, Anisa Ratnasari, Sofi Nida, Nura Hajar Hafida, Ahmad Ridlo) yang telah menjadi penyemangat dan keluarga terbaik bagi penulis selama ini.
14. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kesalahan. Mohon kritik dan saran pembaca guna menyempurnakan laporan ini. Akhir kata semoga laporan Tesis ini bermanfaat bagi semua pihak. Amiin Ya Rabbal Alamiin.

Surabaya, 30 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA.....	5
2.1 Interferensi Optik	5
2.1.1 Perkembangan Interferometer Optik	5
2.1.2 Interferometer Fabry Perot.....	8
2.2 Laser Dioda	8
2.2.1. Definisi Laser Dioda.....	8
2.2.2. Struktur dan Cara Kerja <i>Laser dioda</i>	9
2.2.3. Mekanisme Umpan Balik (<i>Feedback</i>) Optik.....	11
2.2.4. Keunggulan Laser dioda	12
2.3 <i>Self-Mixing Interferometry</i> (SMI).....	13
2.3.1. Konsep Dasar <i>Self-Mixing Interferometry</i> (SMI)	13
2.3.2. Perhitungan Parameter Umpan Balik (<i>Feedback</i>)	14

2.3.3.Keunggulan <i>Self-Mixing Interferometry</i>	17
2.5 Akuisisi Data Menggunakan Arduino.....	18
2.6 Efek Spekel	19
2.7 Pengolahan Sinyal <i>Continuous Wavelet Transform (CWT)</i>	21
2.8 Frekuensi Spasial	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1. Perancangan Alat Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis <i>Self-Mixing Interferometry</i>	25
3.1.1.Alat Pengukuran	26
3.1.2.Sumber arus konstan.....	27
3.1.3.Akuisisi dan Pengolahan Data	28
3.2. Diagram Alir Penelitian Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis <i>Self-Mixing Interferometry</i>	29
3.2.1.Kalibrasi Sistem SMI.....	29
3.2.2.Kalibrasi Arduino Sebagai Akuisisi Data.....	30
3.2.3.Pengukuran Objek Berupa Jari Telunjuk.....	30
3.2.4.Pengolahan Sinyal.....	32
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Pengujian Laser dioda	35
4.2 Pengukuran Data Akuisisi.....	36
4.3 Pengukuran Objek.....	36
4.4 Pengolahan Sinyal SMI Menggunakan <i>Continuous Wavelet Transform (CWT)</i>	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN A	59
LAMPIRAN B	61
BIODATA PENULIS	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Percobaan Interferensi Celah Ganda Thomas Young (Wei 2011).....	5
Gambar 2.2 (a) Diagram skema Interferometer Michelson (Assad 2008) (b) Hasil pola interferensi (Wei 2011)	6
Gambar 2.3 Interferometer <i>Mach-Zender</i> (Wei 2011).....	7
Gambar 2.4 Interferometer <i>Sagnac</i> (Wei 2011).....	7
Gambar 2.5 Interferometer <i>Fabry Perot</i> (Wei 2011).....	7
Gambar 2.6 (a) Multibeam Interferometer Fabri-Perot (b) Interferensi amplitudo awal (Dickmann 2003).....	8
Gambar 2.7 Bentuk Laser Dioda (Assad 2008)	9
Gambar 2.8 Struktur Semikonduktor Laser Dioda (Hill 2005)	10
Gambar 2.9 Diagram celah pita (bandgap) dari NpP AlGaAs/GaAs/AlGaAs heterojunction (Hill 2005).....	10
Gambar 2.10 Cahaya umpan balik (<i>feedback</i>) (Pospiech and Liu 2003).....	12
Gambar 2.11 Skema sederhana self-mixing Interferometer dengan Laser dioda dan <i>Photodiode</i> (Marti 2012)	14
Gambar 2.12 Skema dengan tiga model cermin pada <i>self-mixing interferometry</i> (Marti 2012)	14
Gambar 2.13 (a) sinyal input untuk modulasi getaran berbentuk sinusoidal, perbedaan hasil efek feedback (b) $C=0,1$ (c) $C=1$, (d) $C=7$ (e) $C=30$ (El Assad 2008)	16
Gambar 2.14 Arduino Uno (www.arduino.com)	18
Gambar 2.15 Arduino Due	19
Gambar 2. 16 (a) Pengamatan spekel pada kulit manusia menggunakan SM-LD (b) Lapisan kulit manusia (Özdemir, Ohno, and Shinohara 2008)	19
Gambar 2.17 Hubungan skala dan frekuensi pada wavelet	22
Gambar 2.18 Proses Transformasi Wavelet.....	22
Gambar 2.19 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi tinggi (O'Donnell et al. 2002).....	23
Gambar 2.20 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi medium (O'Donnell et al. 2002)	23
Gambar 2.21 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi rendah (O'Donnell et al. 2002).....	23
Gambar 3.1 Set up alat analisa pola spekel pada pengukuran jari telunjuk berbasis SMI.....	25
Gambar 3.2 Laser dioda L785P090	26

Gambar 3.3 Laser dioda Controller (LDC) 202C	28
Gambar 3.4 Skema alur akuisisi data dari laser driver menuju PC.....	28
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis Self-Mixing Interferometry	29
Gambar 3.6 Pengukuran Objek Berupa Jari Telunjuk	31
Gambar 3.7 Proses Pengambilan Data Pola Spekel Pada Pengukuran Jari Telunjuk	31
Gambar 4. 1 Pengujian Daya Keluaran Laser Dioda	35
Gambar 4. 2 Hasil pengukuran sinyal SMI tanpa objek	36
Gambar 4.3 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk tanpa diberikan tekanan	38
Gambar 4.4 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg	38
Gambar 4.5 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk saat tekanan dikompiskan	39
Gambar 4.6 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan.....	45
Gambar 4.7 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg	45
Gambar 4.8 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dikompiskan.....	46
Gambar 4.9 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan.....	49
Gambar 4.10 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg	50
Gambar 4.11 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dikompiskan.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Nilai maksimum dari laser dioda	27
Tabel 3.2 Spesifikasi dari Laser Dioda	27

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel A 1 Datasheet Laser Driver.....	59
Tabel A.2 Absolut Maksimum Laser dioda	60
Tabel A.3 Karakteristik tipe dan pengukuran Laser dioda	60
Gambar B.1 Hasil pengolahan sinyal SMI tanpa objek pengulangan ke 2.....	61
Gambar B.2 Hasil pengolahan sinyal SMI tanpa objek pengulangan ke 3.....	61
Gambar B.3 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-2.....	62
Gambar B.4 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 2	62
Gambar B.5 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 2	63
Gambar B.6 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-3.....	63
Gambar B.7 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 3	64
Gambar B.8 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 3	64
Gambar B.9 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-2.....	65
Gambar B.10 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 2	65
Gambar B.11 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 2	66
Gambar B.12 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-3.....	66
Gambar B.13 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 3	67
Gambar B.14 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 3	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beberapa tahun terakhir ini pengembangan metode non-kontak untuk akuisisi dan interpretasi sinyal kardiovaskuler telah dikembangkan. Pengembangan metode non-kontak ini disebabkan karena meningkatnya penyakit kardiovaskuler yang menjadi penyebab utama kematian di seluruh dunia. Penyakit kardiovaskuler merupakan penyakit yang disebabkan karena gangguan fungsi jantung dan pembuluh darah. Gelombang nadi berhubungan langsung dengan aliran darah yang merupakan salah satu sinyal paling penting untuk mendiagnosis penyakit kardiovaskuler. Metode optik yang diusulkan untuk mendeteksi kecepatan aliran darah yakni *self-mixing interferometry* (Arasanz et al. 2014).

Metode *self-mixing interferometry* (SMI) didasarkan pada sumber cahaya (laser) dan detektor (fotodioda) yang terintegrasi dalam satu devais. Prinsip dasar dari SMI adalah interferometer Fabry-Perot yang terdapat pada laser dioda SMI. Teori Fabry-Perot menjelaskan tentang interferensi berkas jamak cahaya dimana jumlah cahaya yang berinterferensi sangat banyak. Sehingga tanpa diberi objek apapun di depan laser dioda telah terjadi interferensi di dalam sistem SMI sendiri. Saat diberikan target di depan laser dioda SMI maka prinsipnya ketika cahaya keluaran dari laser ditembakkan menuju target menyebabkan sebagian cahaya akan dipantulkan oleh target tersebut dan ditangkap kembali oleh detektor fotodioda yang terletak satu devais di dalam laser dioda SMI. Cahaya pantulan dari target tersebut berinterferensi dengan cahaya asli dari laser, sehingga daya dan frekuensi pantulan dari target tersebut memiliki perbedaan bila dibandingkan dengan daya dan frekuensi awal laser (Ozdemir et al. 2000).

Spekel merupakan pola intensitas acak yang terbentuk dari interferensi cahaya terhambur dari permukaan kasar kulit yang disinari berkas cahaya koheren dari laser. Frekuensi spekel terkait langsung dengan kecepatan objek yang bergerak seperti kecepatan aliran darah dalam pembuluh darah. Pola spekel yang dihasilkan

oleh jaringan manusia seperti jaringan kulit saat diterangi laser memiliki 2 kontribusi yakni dari aliran darah dan gerakan jaringan. Objek dalam penelitian ini adalah jari telunjuk, sehingga frekuensi spekel yang didapatkan berkaitan dengan frekuensi spasial. Pola spekel yang terbentuk diharapkan dapat digunakan untuk menganalisis aliran darah di sekitar permukaan kulit (Özdemir, Ohno, and Shinohara 2008).

Untuk mengetahui pola spekel yang dihasilkan maka perlu dilakukan pengolahan sinyal spekel yang didapatkan menggunakan metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) pada matlab. Metode *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dapat mengekstraksi sinyal dalam domain waktu dan frekuensi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian yang akan dilakukan adalah analisa pola spekel yang terbentuk pada jari telunjuk menggunakan sensor optik berbasis *self mixing interferometry* (SMI).

1.2 Perumusan Masalah

Didasari oleh latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka perumusan masalah yang diangkat dalam proposal penelitian ini di yakni bagaimana pola spekel yang terbentuk pada jari telunjuk menggunakan sensor optik berbasis *self mixing interferometry* (SMI).

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pola spekel yang terbentuk pada jari telunjuk menggunakan sensor optik berbasis *self mixing interferometry* (SMI).

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan, akan melengkapi sensor optik dari suatu sistem optoelektronika yang dikembangkan sebagai peralatan yang dapat menganalisa pola spekel pada ujung jari telunjuk untuk mendapatkan informasi aliran darah di permukaan kulit yang lebih akurat.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Sensor optik yang digunakan adalah laser dioda dan fotodioda sebagai detektor yang terintegrasi dalam satu devais berdasarkan prinsip *self-mixing interferometry* (SMI) dengan panjang gelombang 785 nm
2. Pengukuran dilakukan pada jaringan tubuh manusia berupa jari telunjuk
3. Proses pengolahan sinyal dilakukan menggunakan Matlab dengan memilih toolbox *Continuous Wavelet Transform* (CWT)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

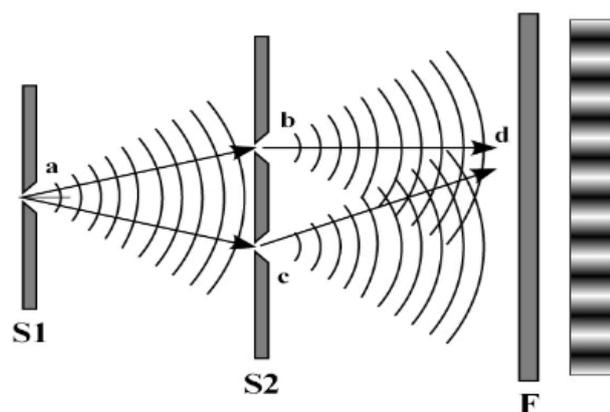
BAB II KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas beberapa hal antara lain interferensi optik, laser dioda, prinsip *self-mixing interferometry*, efek spekel, akuisisi data menggunakan arduino, software PLX-DAQ, serta frekuensi spasial yang menjadi landasan teori dalam penelitian ini.

2.1 Interferensi Optik

2.1.1 Perkembangan Interferometer Optik

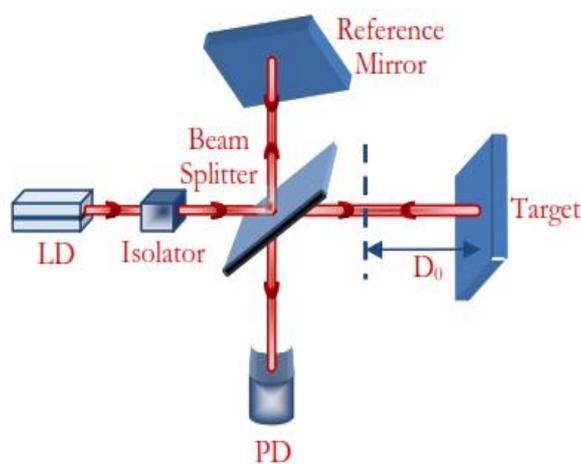
Fenomena cahaya pertama kali diobservasi oleh seorang fisikawan berkebangsaan Inggris bernama Thomas Young pada tahun 1805. Percobaan yang dilakukan oleh Thomas Young menggunakan sumber cahaya tunggal yang dipancarkan pada dua celah sehingga menghasilkan dua sumber cahaya yang koheren. Disebut sumber cahaya koheren karena memiliki frekuensi identik dan beda fase yang konstan. Dua sumber cahaya hasil pemisahan celah yang koheren tersebut menghasilkan interferensi berupa pola gelap dan terang pada layar di belakangnya. Percobaan yang dilakukan Young ini dikenal sebagai interferensi celah ganda. Berdasarkan percobaan Young telah didapatkan prinsip fundamental dalam bidang optik dan interferometer yaitu prinsip koherensi dan superposisi (Wei 2011).



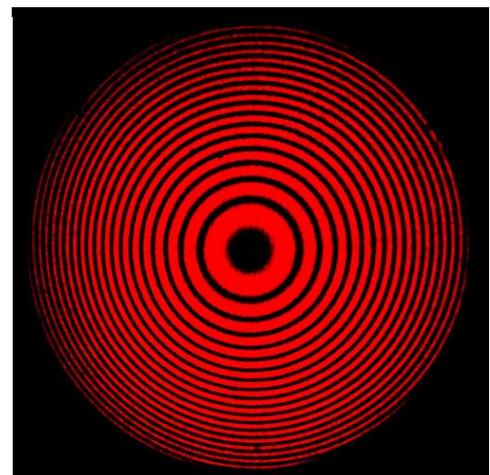
Gambar 2.1 Percobaan Interferensi Celah Ganda Thomas Young (Wei 2011)

Prinsip superposisi menjelaskan bahwa jika terdapat dua gelombang yang datang pada satu titik, akan terjadi interferensi konstruktif (saling menguatkan) jika kedua fasenya sama dan akan menghasilkan pola terang pada layar. Sedangkan pola gelap terbentuk jika terdapat beda fase antara kedua gelombang dengan nilai sebesar π . Prinsip koherensi menyatakan bahwa hanya cahaya koheren yang mampu mengkombinasi dan memproduksi efek interferensi (Wei 2011).

Interferometer optik pertama telah dirancang oleh fisikawan Amerika bernama Albert Abraham Michelson. Prinsip interferometer yang dibuat oleh Michelson adalah pemisahan sumber cahaya menjadi dua bagian menggunakan cermin semi transparan yang disebut *Beam Splitter*. Dua cahaya hasil pemisahan tersebut kemudian direfleksikan oleh dua cermin yang ditempatkan secara terpisah. Hasil pemisahan cahaya tersebut akhirnya menghasilkan pola interferensi (Wei 2011).



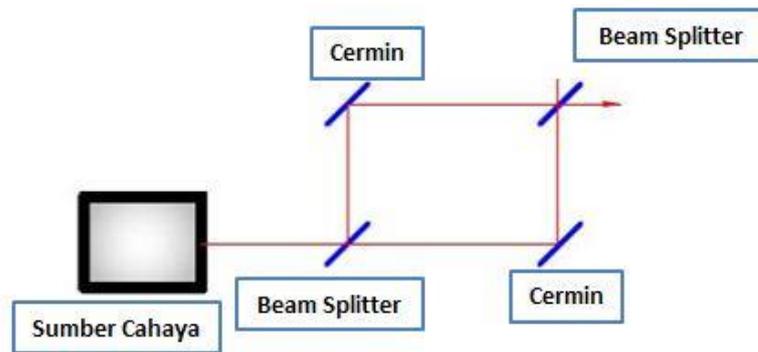
(a)



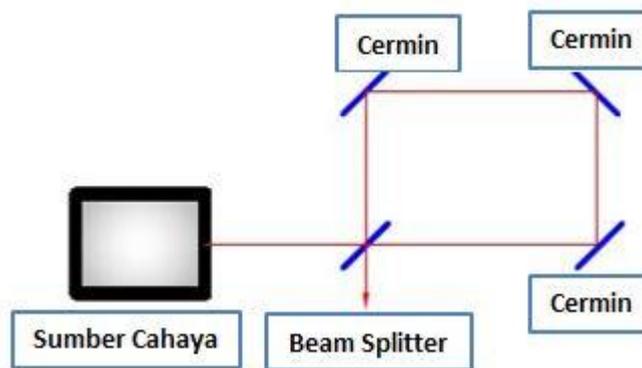
(b)

Gambar 2.2 (a) Diagram skema Interferometer Michelson (Assad 2008) (b) Hasil pola interferensi (Wei 2011)

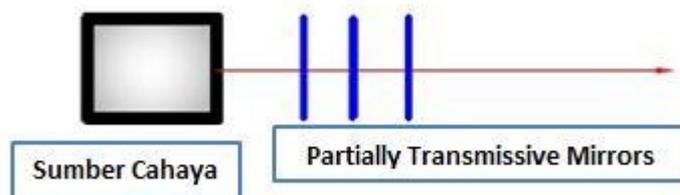
Perkembangan interferometer optik terus berlanjut sehingga memunculkan berbagai jenis interferometer antara lain interferometer Mach-Zender, interferometer Sagnac, dan interferometer Fabry-Perot.



Gambar 2.3 Interferometer *Mach-Zender* (Wei 2011)



Gambar 2.4 Interferometer *Sagnac* (Wei 2011)

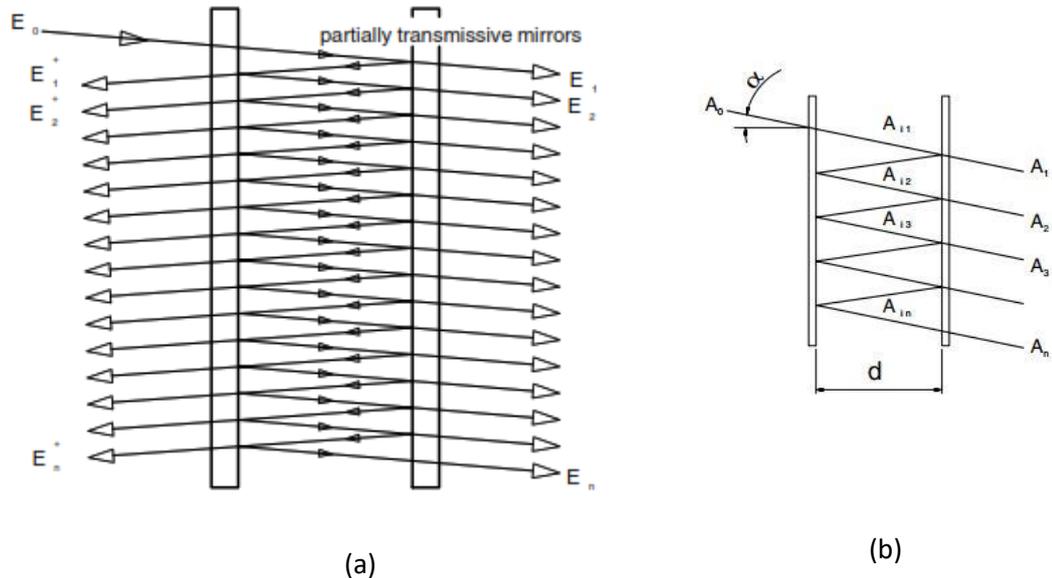


Gambar 2.5 Interferometer *Fabry Perot* (Wei 2011)

Beberapa jenis interferometer di atas menjadi teori dasar dalam sejarah interferometer. Selanjutnya prinsip tersebut berkembang menjadi metode lain, namun tetap mengacu pada prinsip dasar interferometer di atas. Dalam penelitian ini akan digunakan interferometer yang menggunakan prinsip dari interferometer Fabry-Perot.

2.1.2 Interferometer Fabry Perot

Interferometer merupakan sebuah devais yang dapat membuat cahaya mengalami interferensi. Karena adanya beda fase antar cahaya maka timbul efek saling menguatkan.



Gambar 2.6 (a) Multibeam Interferometer Fabri-Perot (b) Interferensi amplitudo awal (Dickmann 2003)

Teori Fabry-Perot menjelaskan tentang interferensi berkas jamak cahaya dimana jumlah cahaya yang berinterferensi sangat banyak. Interferometer ini terdiri dari dua lapisan datar yang terletak secara paralel serta memiliki koefisien refleksi (R) dan koefisien transmisi (T) tertentu (Dickmann 2003).

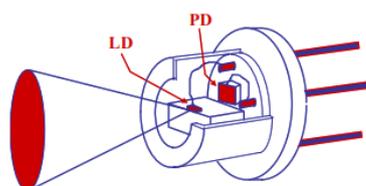
Berdasarkan Gambar 2.6 (b) kedua plat yang memiliki koefisien refleksi dan koefisien transmisi tertentu berada pada jarak d . Dengan mengabaikan penyerapan (*absorption*) menghasilkan $R = 1 - T$ ($T =$ transmisi). Gelombang jatuh di bawah sudut α yang mulai saat ini dinamakan fabry perot (Dickmann 2003).

2.2 Laser Dioda

2.2.1. Definisi Laser Dioda

Laser dioda (LD) merupakan komponen semikonduktor yang dapat menghasilkan radiasi koheren yang dapat dilihat oleh mata ataupun dalam bentuk spektrum inframerah (Infrared/IR) ketika dialiri arus listrik. Radiasi koheren adalah radiasi semua gelombang yang berasal dari satu sumber yang sama dimana berada pada frekuensi dan fasa yang sama. Laser dioda terbuat dari galium arsenit (GaAs)

yang memiliki persimpangan (junction) dari material tipe p dan n . Kata LASER merupakan singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* yang memiliki arti sebagai mekanisme dari suatu alat yang memancarkan radiasi elektromagnetik melalui proses pancaran yang terstimulasi (Assad 2008).

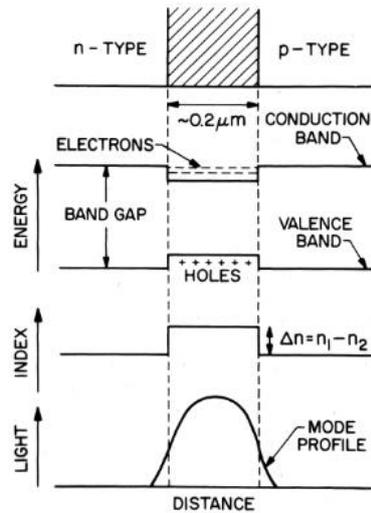


Gambar 2.7 Bentuk Laser Dioda (Assad 2008)

2.2.2. Struktur dan Cara Kerja *Laser dioda*

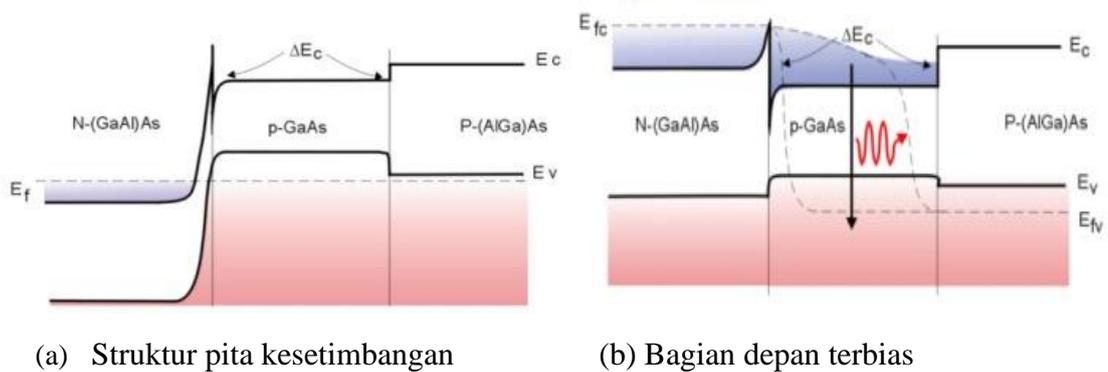
Ketika dioda dalam keadaan bias maju, *hole* dari daerah-p diinjeksikan ke daerah-n, dan elektron dari daerah-n disuntikkan ke daerah-p. Jika ada elektron dan *hole* di wilayah yang sama, mereka mungkin bergabung kembali secara radioaktif, yaitu elektron “jatuh ke” *hole* dan memancarkan foton dengan energi celah pita. Peristiwa ini disebut emisi spontan yang merupakan sumber utama cahaya dalam dioda pemancar cahaya (Hill 2005).

Pada *laser dioda*, semikonduktor dibentuk menjadi seperti selembar kertas yang sangat tipis dan menghasilkan sambungan p-n. Dua ujung kristal dibelah sehingga membentuk tepi yang sejajar dimana dua tepi paralel yang saling reflektif ini disebut rongga/pandu gelombang Fabry-Perot. Setiap cahaya melewati rongga maka harus diperkuat dengan emisi yang terstimulasi. Gambaran umum dari dioda laser inilah yang dikenal sebagai *laser dioda homojunction* namun hal ini sangat tidak efisien. *Laser dioda* jenis ini membutuhkan begitu banyak energi sehingga hanya bisa dioperasikan dalam pulsa yang pendek saja, jika tidak maka semikonduktor akan meleleh (Hill 2005).



Gambar 2.8 Struktur Semikonduktor Laser Dioda (Hill 2005)

Saat ini dikembangkan Laser *heterojunction* menggunakan bahan celah pita rendah yang terjepit di antara dua lapisan celah pita tinggi. Salah satu jenis bahan yang biasa digunakan adalah GaAs dengan AlGaAs. Persimpangan antara bahan celah pita yang berbeda ini disebut *heterojunction*. Sehingga lebih banyak pasangan elektron *hole* yang dapat berkontribusi pada amplifikasi. Selain itu, cahaya dipantulkan dari permukaan hetero, sehingga cahaya akan turun terbatas pada daerah di mana amplifikasi berlangsung dan meningkatkan efisiensi perangkat. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.9 yang menjelaskan tentang diagram celah pita dari NpP AlGaAs/GaAs/AlGaAs *heterojunction*.



(a) Struktur pita kesetimbangan

(b) Bagian depan terbias

Gambar 2.9 Diagram celah pita (bandgap) dari NpP AlGaAs/GaAs/AlGaAs heterojunction (Hill 2005)

Gambar 2.9 (a) menunjukkan struktur pita *heterojunction* ganda dalam kesetimbangan dimana tidak ada voltase yang diterapkan. Area tengah menunjukkan ΔE_c . Gambar 2.9 (b) menunjukkan hetero fungsi ganda yang terbias. Tingkat energi dari bandgap tipe-N dari GaAlAs yang lebih besar telah dinaikkan

sehingga berada di atas penghalang energi potensial ΔEC . Hal ini memungkinkan elektron mengalir ke daerah tipe p dari GaAs. Dimana keduanya dibatasi oleh material dengan *bandgap* yang lebih rendah. Demikian pula, *hole* mengalir dari tipe-P dari AlGaAs ke pita valensi tipe-p dari GaAs. Ketika jumlah elektron pada suatu tingkat eksitasi melebihi jumlah elektron pada suatu tingkat energy dibawahnya maka terjadi "inversi populasi", hal tersebut akan menyebabkan terjadinya emisi terstimulasi. Inversi populasi ini tidak cukup dengan sendirinya untuk menghasilkan penguat. Agar emisi terstimulasi terjadi, cahaya harus tetap berada di rongga cukup lama untuk berinteraksi dengan elektron lain. Ini dicapai dengan menciptakan rongga Fabry-Perot dengan ujung cermin, di mana cahaya dapat memantulkan bolak-balik beberapa kali sebelum meninggalkan rongga (Hill 2005).

2.2.3. Mekanisme Umpan Balik (*Feedback*) Optik

Suatu laser dengan efisiensi tinggi harus terbentuk dari resonator yang memiliki kemampuan tidak hanya untuk memperkuat gelombang elektromagnetik saja, namun juga untuk umpan balik (*feedback*). Sebuah resonator laser umumnya terdiri dari dua cermin paralel yang tegak lurus terhadap sumbu optik. Pandu gelombang yang terletak di antara kedua cermin terbuat oleh bahan penguat. Struktur ini disebut sebagai resonator Fabry Perot (Pospiech and Liu 2003). Kedua cermin tersebut memiliki tingkat reflektivitas yang berbeda, dimana salah satu cermin memiliki tingkat reflektivitas sebesar 100% dan yang lain tidak. Pada beberapa kasus, terdapat lapisan khusus yang digunakan untuk meningkatkan reflektivitas (*r*), atau transmisivitas (*t*) dari muka cermin. Ketika resonator dibawa ke keadaan inversi populasi maka foton yang dihasilkan oleh emisi secara langsung diperkuat dan berulang kali terpantul pada kedua muka cermin yang saling berhadapan (Pospiech and Liu 2003).

Pada *laser dioda* heterostruktur, pandu gelombang akan mengkonfirmasi gelombang di daerah aktif. Komponen foton dipancarkan secara spontan dan bergerak sejajar dengan sumbu optik sehingga berulang kali terpantul oleh kedua muka cermin. Seiring gelombang elektromagnetik bergerak melalui bahan semikonduktor maka akan diperkuat oleh emisi terstimulasi. Pada setiap pantulan,

gelombang ditransmisikan sebagian melalui sisi reflektif. Osilasi laser terjadi ketika jumlah amplifikasi menjadi sama dengan jumlah total yang hilang melalui sisi resonator (muka cermin) dan penyerapan oleh kristal (Pospiech and Liu 2003).



Gambar 2.10 Cahaya umpan balik (*feedback*) (Pospiech and Liu 2003)

2.2.4. Keunggulan Laser dioda

Menurut (Pospiech and Liu 2003) berikut ini beberapa kelebihan dioda laser dibandingkan dengan sistem laser lainnya:

- a. Tersusun dengan rapi (*compact*). Sistem-sistem membentuk satu *chip* berisi semua yang diperlukan untuk laser. Salah satunya adalah *photodetector* yang tersusun langsung didalam laser. Hal ini memungkinkan laser semikonduktor mudah dimasukkan ke dalam instrumen lain.
- b. Efisiensi tinggi hingga 50%. Hal ini memungkinkan untuk didukung oleh daya listrik rendah dibandingkan dengan laser lainnya.
- c. Eksitasi langsung dengan arus listrik rendah, sehingga transistor konvensional sebagai dasar rangkaian bisa mensuplai laser.
- d. Kemungkinan modulasi langsung dengan menerapkan arus.
- e. Dioda laser memiliki intensitas yang rendah dibandingkan dengan perangkat laser lainnya. Namun dioda laser ini memiliki efisiensi output koheren yang tinggi dan memiliki kemudahan dalam modulasi untuk komunikasi dan aplikasi pengendalian.
- f. Sudut *beam* yang lebar (*Wide-angle Beam*) memiliki bentuk berkas sinar yang lebih lebar dan berbentuk kerucut sehingga lebih mudah dimodifikasi dengan menggunakan sebuah lensa cembung. Hal ini berbeda dengan laser konvensional yang hanya berbentuk lurus dan sulit untuk di dimodifikasi kelebarannya (Pospiech and Liu 2003).

2.3 Self-Mixing Interferometry (SMI)

2.3.1. Konsep Dasar Self-Mixing Interferometry (SMI)

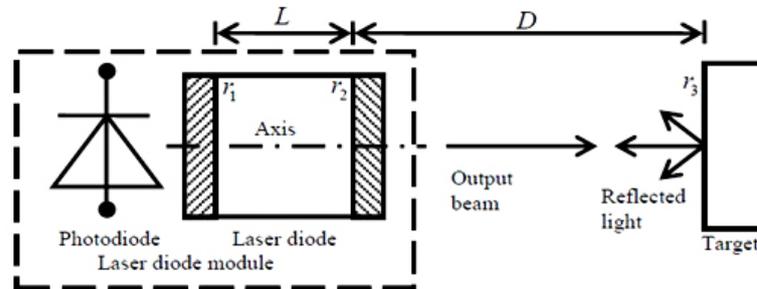
Self-Mixing Interferometry (SMI) merupakan suatu metode yang menggunakan teknologi optik. Metode ini telah menjadi area riset sejak tahun 1980an. Fenomena ini pertama kali diteliti oleh Lang dan Kobayashi yang menganalisa efek *feedback* eksternal optik pada laser dioda (Wang et al. 1994). Set up *self mixing interferometry* sangat sederhana karena hanya membutuhkan lensa kolimator yang berfungsi untuk menyejajarkan cahaya dari laser dan tidak membutuhkan komponen optik eksternal lainnya seperti *beam splitter* (Magnani et al. 2016).

Prinsip dasar self-mixing interferometry adalah interferometry fabry perott. Teori Fabry-Perot menjelaskan tentang interferensi berkas jamak cahaya dimana jumlah cahaya yang berinterferensi sangat banyak. Interferometer ini terdiri dari dua lapisan datar yang terletak secara paralel serta memiliki koefisien refleksi (R) dan koefisien transmisi (T) tertentu seperti yang dipaparkan pada sub bab 2.1.2 diatas.

Prinsip *Self-Mixing Interferometry* yaitu ketika cahaya keluaran dari laser ditembakkan menuju target, maka sebagian cahaya akan dipantulkan oleh target dan ditangkap kembali oleh detektor yang terletak satu devais di dalam laser. Cahaya hasil pantulan dari target tersebut akan berinterferensi dengan cahaya asli laser. Sehingga dapat diukur perbedaan cahaya sebelum dan sesudah terpantul yang mengenai target. Daya dan frekuensi pantulan dari target tersebut akan memiliki perbedaan bila dibandingkan dengan daya dan frekuensi awal. Namun SMI memiliki keunggulan karena strukturnya sederhana, mudah disejajarkan, mudah diintegrasikan, dan bersifat non kontak. Berdasarkan beberapa kelebihan tersebut, SMI telah digunakan secara luas terutama dalam pengukuran kecepatan, getaran, jarak, perpindahan, biomedicine, pemodelan 3 dimensi, dan berbagai pengukuran lainnya (Jiang, Zhang, and Li 2016).

Skema sederhana dari *self-mixing interferometer* dengan laser dioda ditunjukkan oleh Gambar 2.11 . *Photodiode* dan Laser dioda berada pada satu

komponen yang sama yaitu Module Laser dioda. Metode SMI ini lebih unggul dan kuat dibandingkan dengan laser dioda pada umumnya.



Gambar 2.11 Skema sederhana self-mixing Interferometer dengan Laser dioda dan *Photodiode* (Marti 2012)

Keterangan :

L = panjang kavitas luar

l = panjang kavitas laser

D = jarak dari permukaan laser dioda ke permukaan target

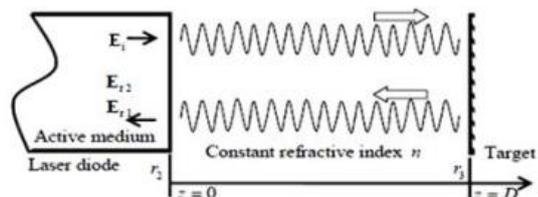
r_1 = koefisien refleksi permukaan belakang

r_2 = koefisien refleksi permukaan depan

r_3 = koefisien refleksi target

2.3.2. Perhitungan Parameter Umpan Balik (*Feedback*)

Pada *self-mixing interferometry* terdapat pengukuran penting yaitu menentukan *feedback* parameter (C) dari laser dioda. Teori dasar dari SMI dapat dijelaskan oleh dua model pandu gelombang Fabry Perot atau persamaan rata-rata waktu tunda Lang Kobayashi. Sinar optik dihamburkan kembali ke resonator aktif laser dioda oleh target, sehingga operasi laser akan terganggu (Tao et al. 2015)



Gambar 2.12 Skema dengan tiga model cermin pada *self-mixing interferometry* (Marti 2012)

Daya optik pada LD dengan *feedback* eksternal P_c dan daya optik tanpa *feedback* eksternal P_s terhubung dengan persamaan (Giuliani et al. 2002)

$$P_c = P_s[1 + m' \cos(2\pi\nu_c \tau_D)] \quad (2.22)$$

Sedangkan frekuensinya

$$2\pi(\nu_s - \nu_c)\tau_D = C \sin(2\pi\nu_c \tau_D + \arctan \alpha) \quad (2.23)$$

dengan ν_s adalah frekuensi tanpa arus *feedback* optik, ν_c adalah frekuensi optik teremisi setelah adanya arus *feedback*, m' adalah parameter modulasi. τ_D adalah waktu kembali sinar dari kavitas luar, α factor penguat *bandwidth*.

Parameter *feedback* optik disimbolkan dengan C dan didefinisikan sebagai

$$C = \left[\frac{L}{nl} \right] (1-r_2^2) \left(\frac{r_3}{r_2} \right) \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (2.24)$$

Kemudian dapat diberikan persamaan

$$m' \approx \exp(-\pi\delta\nu_c \tau_D) \quad (2.25)$$

$$\nu_c = \frac{\langle \omega_c \rangle}{2\pi} \quad (2.26)$$

$$\tau_D = \frac{2nD}{c} \quad (2.27)$$

nilai $\delta\nu_c$ adalah *bandwidth* resonator dengan *feedback* luar, $\langle \omega_F \rangle$ adalah frekuensi sudut rata rata radiasi dengan *feedback* luar. c adalah kecepatan cahaya dalam kondisi vakum. n adalah indeks bias medium. Yang perlu diperhatikan adalah parameter modulasi tidak konstan tapi bergantung pada nilai $\delta\nu_c$ dan τ_D . Sebaliknya, $\delta\nu_c$ juga bergantung pada τ_D . Dengan persamaan 2.33 berikut :

$$\delta\nu_F = \frac{\delta\nu_s}{[1 + C' \cos(2\pi\nu_c \tau_D + \arctan \alpha)]^2} \quad (2.28)$$

dengan $\delta\nu_c$ adalah *bandwidth* resonator tanpa *feedback* luar, C' adalah parameter *feedback* termodifikasi yang berhubungan dengan parameter *feedback* C melalui persamaan

$$C' = C \exp(-\pi\delta\nu_c \tau_D) \quad (2.29)$$

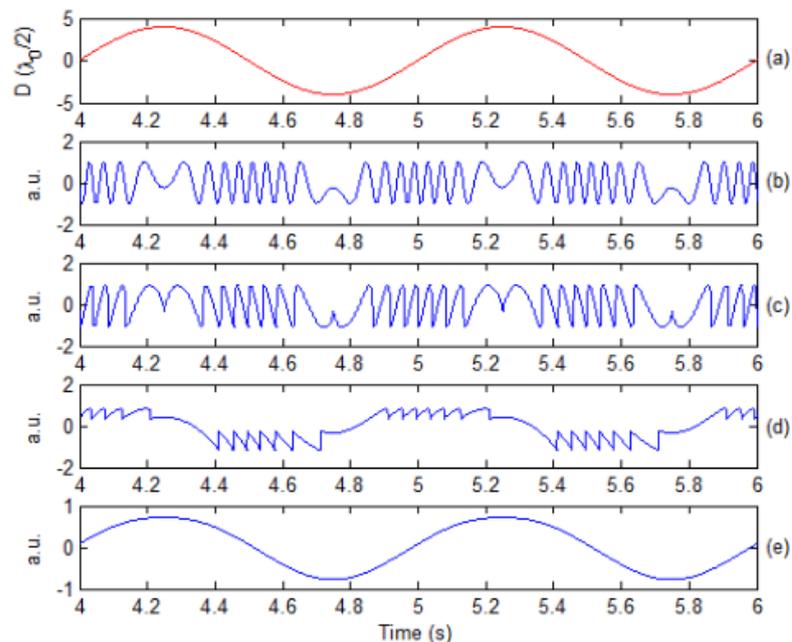
Sehingga persamaan parameter *feedback* dapat ditulis kembali dengan persamaan

$$C = \left[\frac{\tau_D}{\tau_L} \right] (1-r_2^2) \left(\frac{r_3}{r_2} \right) \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (2.30)$$

dengan τ_L adalah waktu tunda foton dalam resonator (Marti 2012).

Menurut (Giuliani et al. 2002) feedback parameter (C) ini sangatlah penting karena dapat membedakan perbedaan antara rezim feedback. Besarnya nilai dari feedback parameter dapat mengindikasikan suatu rezim tertentu. Dimana rezim ini merupakan indikator dari kekuatan umpan balik (feedback) optik. Berikut ini merupakan keterangan dari beberapa rezim feedback, diantara yaitu:

- Untuk $C \ll 1$ menandakan bahwa rezim umpan balik (*feedback*) sangat lemah.
- Untuk $0,1 < C < 1$ menandakan bahwa rezim umpan balik (*feedback*) lemah.
- Untuk $1 < C < 4,6$ menandakan bahwa rezim umpan balik (*feedback*) sedang.
- Untuk $C > 4,6$ menandakan bahwa rezim umpan balik (*feedback*) kuat



Gambar 2.13 (a) sinyal input untuk modulasi getaran berbentuk sinusoidal, perbedaan hasil efek feedback (b) $C=0,1$ (c) $C=1$, (d) $C=7$ (e) $C=30$ (El Assad 2008)

2.3.3. Keunggulan *Self-Mixing Interferometry*

Berikut ini merupakan beberapa kelebihan *self-mixing interferometry* yaitu:

- ❖ Komponen optik pada sumber bersifat internal, sehingga menjadi lebih sederhana, rapi, dan lebih ekonomis. Walaupun dalam beberapa konfigurasi beberapa lensa dan komponen optik lainnya perlu ditambahkan yang berfungsi untuk membentuk sinar atau meningkatkan resolusi. Komponen optik ini akan memberikan beberapa feedback yang menjadi salah satu cara proses deteksi self-mixing (Marti 2012).
- ❖ Tidak diperlukan proses penyejajaran, karena laser itu sendiri memfilter spatial mode yang berinteraksi dengan resonator. Namun jika permukaan menghamburkan sinar dalam sudut yang sempit, masalah penjajaran mungkin diperlukan karena sangat bergantung pada feedback dengan sudut antara garis normal bidang dengan sumbu laser dioda (Marti 2012).
- ❖ Tidak diperlukan photodetector, karena fungsi dari photodetector ini sudah terintegrasi bersama dengan laser dioda. Walaupun dalam beberapa teknik karakterisasi photodiode perlu ditambahkan untuk aplikasi tertentu (Marti 2012).
- ❖ Tidak diperlukan proses pemfilteran sinar yang menyimpang. Hal ini dapat terjadi karena kita menggunakan photodiode sebagai sensor cahaya dan kavitas fabry perot atau DFB grating pada laser juga sudah berfungsi sebagai filter (Marti 2012).
- ❖ Detektor selalu bekerja dalam wilayah quantum dan dapat dideteksi dengan pendekatan yang mudah. Ini dapat terjadi jika noise pada detektor diabaikan. Pergeseran minimum yang dapat dideteksi adalah (Marti 2012).
- ❖ Sensitivitas skema SMI ini sangat tinggi, sehingga menjadi semacam deteksi koheren yang mudah mencapai rezim/wilayah deteksi kuantum (Giuliani et al. 2002).
- ❖ Informasi dibawa oleh sinar laser dan dapat dipantulkan oleh target dimanapun tempatnya meskipun dengan jarak jauh (Giuliani et al. 2002).

2.5 Akuisisi Data Menggunakan Arduino

Dalam melakukan akuisisi data, dibutuhkan komponen devais tambahan yang dapat memproses pengukuran fenomena fisik seperti tegangan, arus, temperatur, tekanan atau suara menggunakan komputer. Devais tambahan tersebut akan mengubah nilai-nilai analog tersebut menjadi digital (ADC) sehingga dapat terbaca pada komputer. Devais tambahan tersebut dapat dibuat dari platform elektronik *open-source* yaitu Arduino Uno.

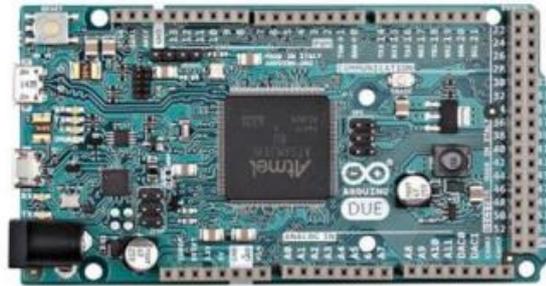


Gambar 2.14 Arduino Uno (www.arduino.com)

Selain itu terdapat beberapa fungsi yang dimiliki oleh Arduino, diantaranya sebagai berikut:

- Mengomunikasikan Personal Computer (PC) dan algoritma untuk transaksi data menggunakan kabel USB.
- Mengontrol sinyal dan mengolahnya pada Analog Digital Converter (ADC).
- Mengomunikasikan program Arduino Software (IDE)

Arduino memiliki berbagai jenis diantaranya Arduino Due, Arduino Uno. Arduino Due adalah papan Arduino pertama yang berbasis pada mikrokontroler ARM core 32-bit yaitu Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. Dengan 54 pin input/output digital, 12 input analog maka ini adalah papan yang sempurna untuk proyek-proyek Arduino skala besar yang kuat. Arduino dapat diisi program-program yang dibuat menggunakan Arduino software (IDE) (Arduino, 2018).

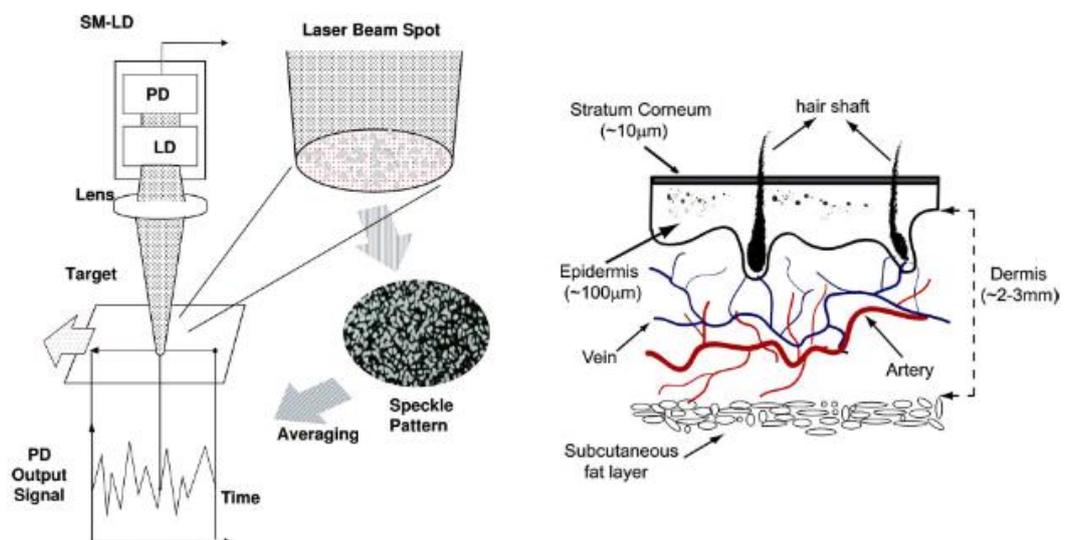


Gambar 2.15 Arduino Due

2.6 Efek Spekel

Efek spekel didapatkan ketika cahaya dipantulkan oleh permukaan tidak rata, dimana berkas yang tersebar menunjukkan karakteristik acak. Efek spekel terjadi ketika cahaya koheren dipantulkan kembali dari permukaan kasar, cahaya pantulan tersebut membentuk pola interferensi granular karena fase superposisi dari daerah yang disinari (Assad 2008). Permukaan difusif yang digunakan sebagai target akan memunculkan efek spekel dan mempengaruhi pola interferensi dari pola sinyal *self-mixing interferometry* (Atashkhouei, Royo, and Azcona 2011).

Interferensi hamburan cahaya koheren pada permukaan objek yang tidak rata akan menimbulkan pola yang disebut pola spekel (Donati, Fellow, and Martini 2013).



Gambar 2. 16 (a) Pengamatan spekel pada kulit manusia menggunakan SM-LD (b) Lapisan kulit manusia (Özdemir, Ohno, and Shinohara 2008)

Menurut Ozdemir, hamburan cahaya pada pengukuran aliran darah secara non kontak disebut dengan “biospekel”. Biospekel ini menunjukkan berbagai informasi penting dari kulit manusia, seperti aliran darah pada pembuluh kapiler dalam kulit, detak jantung, dan aktivitas fisiologi lainnya. Dengan mengeksploitasi biospekel ini, dapat dikembangkan beberapa sistem pengamatan dan telah berhasil diaplikasikan pada pengukuran aliran darah dari kulit manusia.

Gambar 2.18 menunjukkan pengamatan efek spekel pada jaringan kulit manusia menggunakan laser dioda berbasis SMI. Saat cahaya koheren dari laser dipancarkan pada kulit manusia, maka cahaya akan mengalami hamburan dari permukaan kulit. Sebagian cahaya mengalami transmisi dan absorpsi dari jaringan stasioner dalam pembuluh darah. Hanya sebagian kecil dari cahaya tersebut yang mencapai partikel bergerak seperti sel darah merah (Özdemir, Ohno, and Shinohara 2008).

Ketidakteraturan permukaan kulit membuat cahaya akan mengalami hamburan dengan amplitudo dan intensitas yang bervariasi. Inilah yang disebut dengan biospekel. Biospekel ini akan menyebabkan modulasi acak ketika ditangkap dan berada dalam rongga laser dioda. Modulasi acak ini akan terdeteksi oleh photodiode sebagai intensitas acak. Frekuensi spekel dapat ditentukan dengan menghitung banyaknya jumlah pola frinji. Frekuensi spekel ini memiliki hubungan langsung dengan kecepatan gerak suatu objek (Özdemir, Ohno, and Shinohara 2008).

Untuk mendeteksi jumlah dari pola spekel diperlukan suatu pengolahan sinyal. Beberapa metode yang telah diterapkan yakni metode *Fringe Counting Algorithm* (FCA), *Phase Unwrapping Method* (PUM), dan *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Metode-metode tersebut telah digunakan dalam penentuan jumlah frinji pada objek bergerak. Dalam penelitian ini akan digunakan metode CWT untuk menghitung frinji pada objek jari telunjuk.

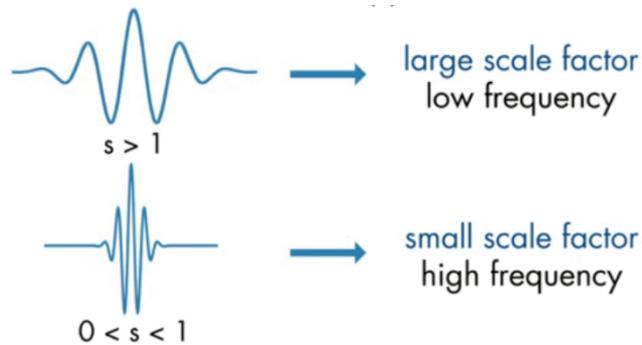
2.7 Pengolahan Sinyal *Continuous Wavelet Transform* (CWT)

Proses mengolah sinyal SMI yang mengandung efek spekel diperlukan pengolahan sinyal dalam domain waktu dan frekuensi secara bersamaan. Domain waktu digunakan untuk menentukan perpindahan objek secara instan sedangkan domain frekuensi digunakan untuk menentukan frekuensi dan kecepatan getaran dari target (Jha et al. 2015).

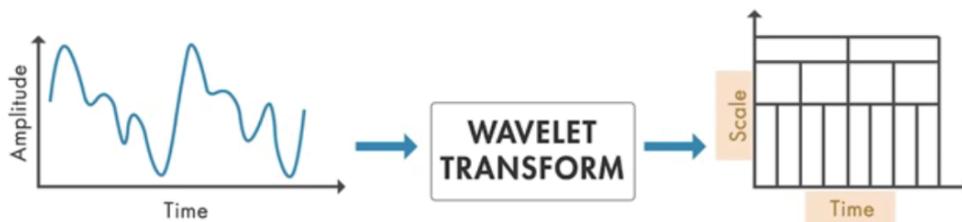
Transformasi Wavelet merupakan metode yang dikembangkan untuk memperoleh informasi yang simultan, resolusi waktu dan frekuensi yang tinggi mengenai suatu sinyal. Metode ini yang mengubah sinyal menjadi bagian-bagian yang sederhana dan memisahkan sinyal ke dalam frekuensi yang berbeda. Kemudian menganalisis masing-masing komponen dengan suatu resolusi yang disesuaikan dengan skala. Pada pemrosesan sinyal, wavelet merupakan suatu bentuk energi yang menggambarkan kondisi sesaat setiap bagian sinyal yang hendak dianalisis (Risnasari 2014).

Dalam transformasi wavelet digunakan istilah translasi dan skala, karena istilah waktu dan frekuensi sudah digunakan oleh transformasi fourier. Translasi adalah lokasi jendela modulasi saat digeser sepanjang sinyal, berhubungan dengan informasi waktu. Sedangkan skala berhubungan dengan informasi frekuensi. Skala tinggi (frekuensi rendah) berhubungan dengan informasi global dari sebuah sinyal. Sedangkan skala rendah (frekuensi tinggi) berhubungan dengan informasi detail (Risnasari 2014).

Kelebihan analisis sinyal menggunakan wavelet adalah dapat dipelajarinya karakteristik sinyal secara lokal dan detail, sesuai dengan skala-nya. Sifat ini sangat berguna untuk sinyal-sinyal *non-stasioner* atau memiliki komponen transien dengan waktu-hidup (lifetime) yang pendek atau memiliki karakteristik yang berbeda pada skala-skala yang berbeda atau memiliki singularitas (Risnasari 2014).



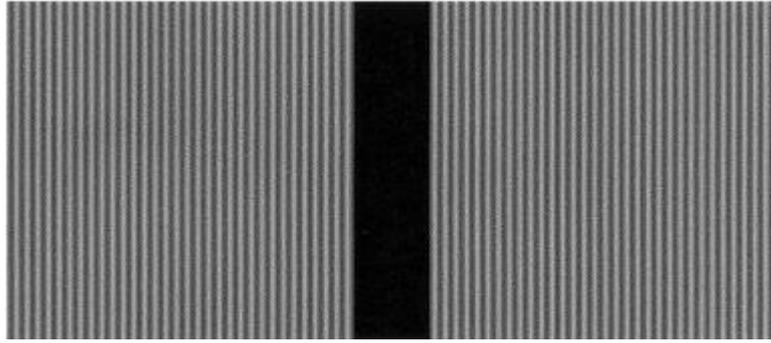
Gambar 2.17 Hubungan skala dan frekuensi pada wavelet



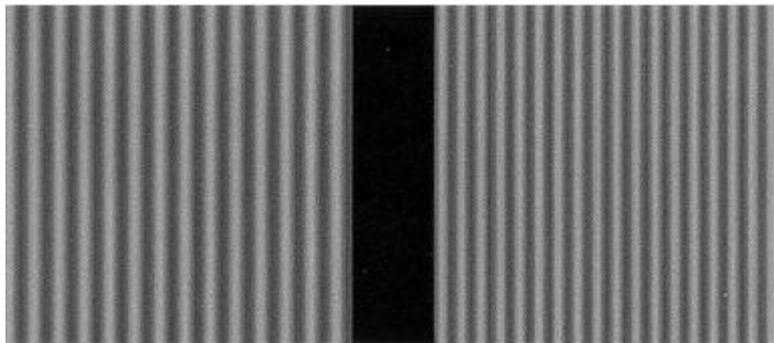
Gambar 2.18 Proses Transformasi Wavelet

2.8 Frekuensi Spasial

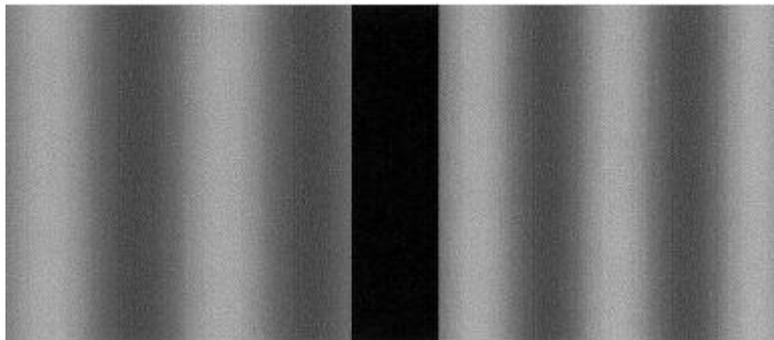
Frekuensi spasial didefinisikan sebagai suatu pola kisi dari struktur yang periodik posisi di dalam ruang dengan satuan siklus per satuan jarak. Frekuensi spasial rendah membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan dalam kondisi kontras rendah. Sebaliknya frekuensi spasial tinggi membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan dalam kondisi kontras tinggi. Kontras merupakan perbedaan intensitas cahaya per satuan luas cahaya yang bergerak dalam arah tertentu antara titik paling terang dan gelap di dalam frekuensi kisi spasial (O'Donnell et al. 2002).



Gambar 2.19 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi tinggi (O'Donnell et al. 2002)



Gambar 2.20 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi medium (O'Donnell et al. 2002)



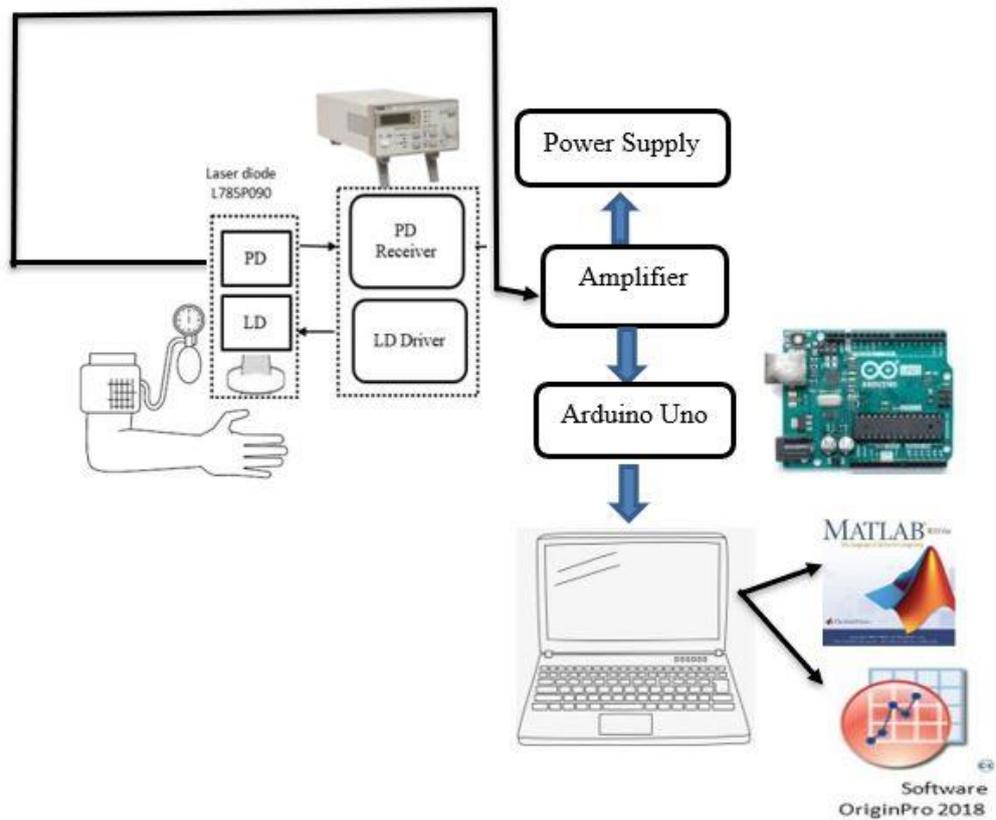
Gambar 2.21 Pasangan frekuensi kisi spasial dengan frekuensi rendah (O'Donnell et al. 2002)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

Langkah pertama dalam metode penelitian ini yakni perancangan alat analisa pola spekel pada jari telunjuk menggunakan sensor optik berbasis SMI.

3.1. Perancangan Alat Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis *Self-Mixing Interferometry*



Gambar 3.1 Set up alat analisa pola spekel pada pengukuran jari telunjuk berbasis SMI

Untuk menganalisa pola spekel pada pengukuran jari telunjuk berbasis *self-mixing interferometry* terdiri dari 4 blok diagram yang berbeda yakni:

1. Blok pertama adalah alat pengukuran yang terdiri dari laser dioda, lensa kolimator dan target berupa jari telunjuk yang diberi tekanan di lengan atas dengan tensimeter air raksa.

2. Blok kedua adalah sumber arus dan tegangan yang merupakan sumber arus konstan (laser Controller) bagi laser dioda sekaligus sebagai penerima sinyal output dari *photodiode*.
3. Blok ketiga yakni amplifier yang diberi power supply berfungsi untuk memberikan penguatan pada sinyal output SMI dari fotodioda.
4. Blok keempat yakni proses akuisisi dan pemrosesan data sinyal yang didapat ke dalam laptop. Terdiri dari arduino uno sebagai *Data Acquisition* dan laptop yang terinstall beberapa software, seperti PLX-DAQ yang terintegrasi dengan excel untuk pengambilan data akuisisi, Matlab dan origin pro.

3.1.1. Alat Pengukuran

a. Laser Dioda

Laser dioda yang digunakan pada penelitian ini adalah laser dioda *single mode Thorlabs L785P090* dengan panjang gelombang ($\lambda = 785 \text{ nm}$) dan $P = 90 \text{ mW}$ dengan nilai maksimumnya ($T_c = 25^\circ\text{C}$) seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.2 Laser dioda L785P090

Kaki-kaki pada laser dioda terdapat tiga bagian yakni laser, fotodioda dan *ground*. Dalam pemasangan kaki-kaki diode tersebut dibutuhkan pemahaman tentang spesifikasi dan diagram kode pin pada laser dioda agar tidak terjadi kesalahan dalam memasang kaki laser dioda atau kelebihan dalam memberikan tegangan dan arus sehingga melewati ambang batas yang diijinkan. Jika terjadi kesalahan dalam pemasangan kaki pada laser dioda akan menyebabkan laser dioda tidak menyala.

Tabel 3.1 Nilai maksimum dari laser dioda

Karakteristik	Simbol	Nilai Maksimum
<i>Optical Output Power (CW)</i>	P_o	100 mW*
<i>LD Reverse Voltage</i>	$V_{R(LD)}$	2 V
<i>PD Reverse Voltage</i>	$V_{R(PD)}$	30 V
<i>Operation Case Temperature</i>	T_c	-10 sampai 70 °C
<i>Storage Temperature</i>	T_{stg}	-40 sampai 85 °C

Keterangan tipe *90 mW

Tabel 3.2 Spesifikasi dari Laser Dioda

Karakteristik	Simbol	minimum	medium	maximum
<i>Lasing Wavelength</i>	λ_p	775 nm	785 nm	795 nm
<i>Threshold Current</i>	I_{th}	-	35 mA	60 mA
<i>Operating Current</i>	I_{op}	-	120 mA	160 mA
<i>Operating Voltage</i>	V_{op}	1,5 V	2 V	2,3 V
<i>Beam Divergence (FWHM)</i>	$\theta_{//}$	8°	9°	10°
	θ_{\perp}	15°	16°	20°
<i>Slope Efficiency</i>	A_s	0,7 W/A	1,1 W/A	1,4 W/A
<i>Monitor Current</i>	η_s	0,3 mA	0,5 mA	1 mA

3.1.2. Sumber arus konstan

Dalam menjalankan laser dioda dibutuhkan arus yang konstan dan stabil. Sumber arus konstan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Laser dioda Controller* (LDC) 202C produksi Thorlabs yang memiliki batas arus 200 mA. Kelebihan dari laser Controller ini adalah sebagai berikut

- Arus Konstan dan Daya Konstan
- Noise yang Rendah
- Cocok dengan semua polarisasi Laser Dioda & Fotodioda
- Memiliki Batas Arus dan Interlock untuk Perlindungan Dioda Laser

Laser Dioda Controller ini dapat membaca langsung tegangan keluaran yang terdeteksi oleh *photodiode* sehingga memudahkan dalam pengambilan data. Data tersebut kemudian diakuisisi dan di proses pada laptop menggunakan beberapa software.



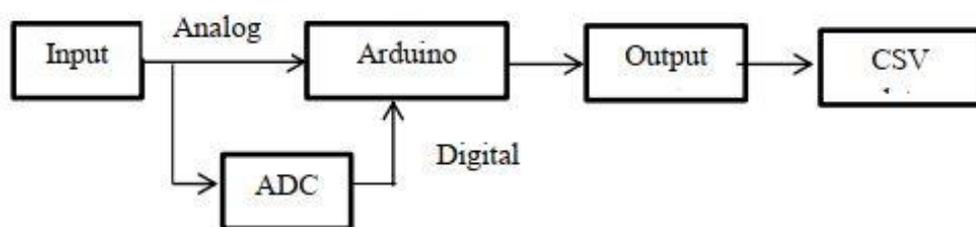
Gambar 3.3 Laser dioda Controller (LDC) 202C

3.1.3. Akuisisi dan Pengolahan Data

Proses akuisisi data berfungsi untuk mengumpulkan informasi yang didapat dari hasil penelitian. Data yang didapat berupa data tegangan dari fotodioda yang selanjutnya akan diakuisisi. Proses akuisisi data dilakukan oleh rangkaian arduino uno. Arduino Uno ini berfungsi untuk mengkonvert sinyal analog menjadi sinyal digital agar mampu terbaca pada laptop.

Untuk menampilkan data pada PC digunakan software parallax DAQ (PLX-DAQ) yang terintegrasi dengan software Microsoft Excel. Sebelum pengambilan data dimulai, maka kodingan PLX-DAQ harus diinput terlebih dahulu ke Arduino uno. Setelah kodingan PLX-DAQ “terupload” secara sempurna maka PLX-DAQ dapat digunakan untuk pengambilan data.

Berikut ini merupakan diagram proses akuisisi data.



Gambar 3.4 Skema alur akuisisi data dari laser driver menuju PC

Analog to Digital Conversion (ADC) merupakan suatu metode untuk mengonversi data analog ke data digital. Data digital ini dapat memudahkan dalam pengambilan data karena dalam waktu yang singkat dapat mengambil banyak data.

3.2. Diagram Alir Penelitian Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis *Self-Mixing Interferometry*



Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian Analisa Pola Spekel Pada Jari Telunjuk Menggunakan Sensor Optik Berbasis *Self-Mixing Interferometry*

3.2.1. Kalibrasi Sistem SMI

a. Kalibrasi Laser Dioda

Proses kalibrasi pada laser dioda dilakukan dengan cara memberikan objek pantulan di depan laser dioda. Laser dioda yang mampu menjalankan fungsi SMI sebagaimana yang terdapat pada jurnal-jurnal referensi adalah dapat merespon ketika ada pantulan sinar dari objek. Selain itu, perlu dipastikan bahwa sinyal yang diterima oleh *photodiode* adalah benar-benar sinyal pantulan dari objek. Caranya adalah dengan membuat sedemikian rupa agar objek berada pada posisi tegak lurus terhadap laser dioda.

Laser dioda merupakan sensor yang sangat sensitif pada gelombang berukuran mikro. Sehingga diperlukan cara agar selama pengukuran, dapat

meminimalisir noise dan gangguan yang tidak diinginkan. Salah satu caranya yakni dengan meletakkan semua sistem pengukuran di meja anti getar.

3.2.2. Kalibrasi Arduino Sebagai Akuisisi Data

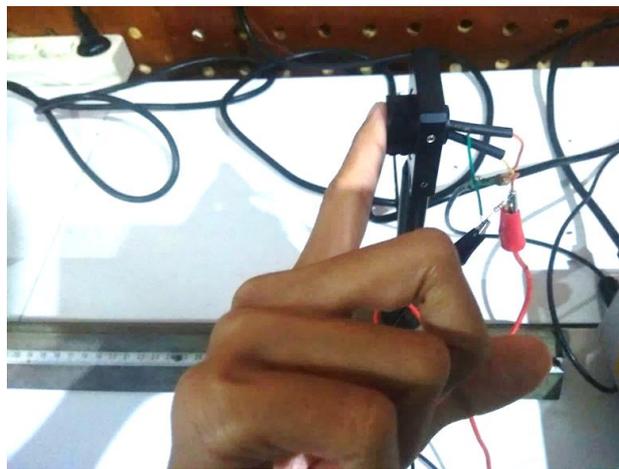
Kalibrasi arduino sebagai akuisisi data dilakukan dengan membandingkan data yang diukur dengan multimeter dengan data yang keluar pada serial monitor pada arduino. Data yang diukur dengan multimeter diatur menggunakan potensiometer.

Pada proses kalibrasi menggunakan bahasa pemrograman untuk ADC yang diisi ke Arduino. Secara bersamaan pengambilan data kalibrasi ini dilakukan dengan pencatatan data pengukuran di multimeter dan serial monitor. Setelah kedua data pengukuran tersebut didapat kemudian kedua data tersebut diolah menggunakan software origin untuk mendapatkan kelinearannya. Apabila nilai linearitasnya semakin mendekati satu maka kalibrasi dapat dikatakan berhasil.

3.2.3. Pengukuran Objek Berupa Jari Telunjuk

Dalam penelitian ini subjek penelitian yakni 1 orang mahasiswa perempuan dan 1 orang mahasiswa laki-laki. Subjek pertama adalah mahasiswa laki-laki dengan usia 24 tahun, berat badan 60 kg, tinggi badan 166 kg, tekanan darah normal 120/80 mmHg. Dan subjek kedua adalah mahasiswa perempuan dengan usia 24 tahun, berat badan 52 kg, tinggi badan 155 kg, tekanan darah normal 120/80 mm Hg. Objek pengukuran berupa jari telunjuk dari subjek penelitian. Terdapat tiga perlakuan yang diterapkan dalam penelitian ini yakni pertama saat jari telunjuk tanpa diberikan tekanan, kedua saat pemberian tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas sebelah kiri subjek penelitian, ketiga saat tekanan pada lengan atas subjek dikempiskan. Langkah awal dalam penelitian ini yakni pengukuran sinyal SMI tanpa diberi objek terlebih dahulu untuk mengetahui perbedaan pola spekel yang ditangkap dengan sinyal SMI saat diberi objek. Kemudian dilanjutkan dengan pengukuran sinyal SMI pada objek telunjuk dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas sebelah kiri subjek. Selanjutnya dilakukan pengukuran sinyal SMI pada objek telunjuk saat tekanan dikempiskan. Pengambilan data dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali dan pengambilan 100 data pada setiap subjek dengan perlakuan yang berbeda.

Pulsa sinyal yang ditangkap oleh fotodioda merupakan pulsa sinyal SMI. Kalibrasi dapat dilakukan dengan meletakkan target tepat sesuai dengan fokus lensa. Penelitian yang dilakukan oleh Arazans mengambil jarak laser dan target jari sekitar 10 cm. Namun dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan dengan menempelkan laser pada bagian tubuh yang diukur yakni jari telunjuk karena saat diberikan jarak yang jauh, laser dioda tidak dapat fokus dan tidak dapat menghasilkan sinyal sesuai yang diinginkan.



Gambar 3.6 Pengukuran Objek Berupa Jari Telunjuk

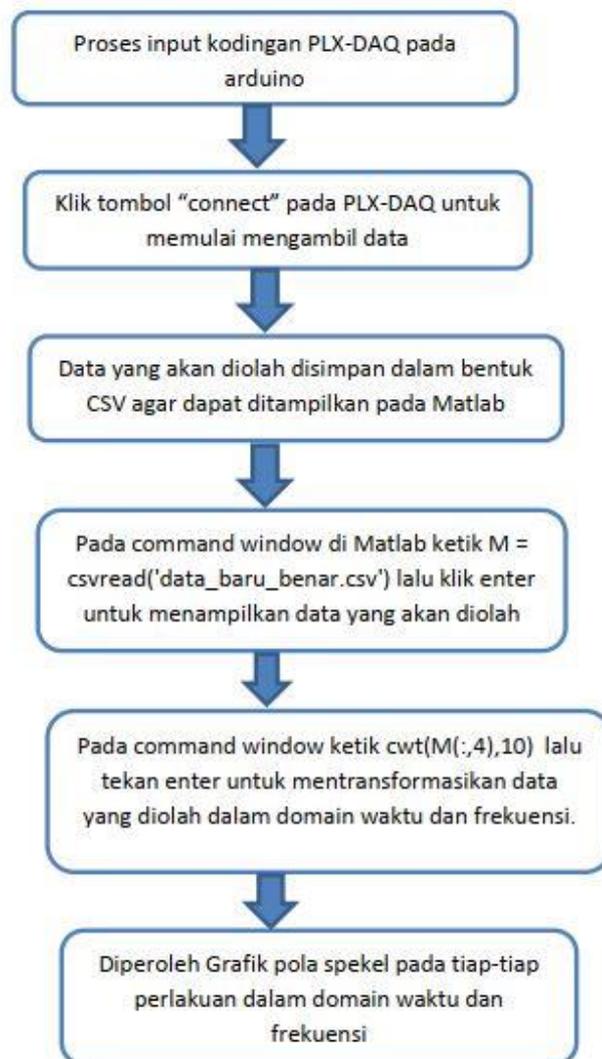


Gambar 3.7 Proses Pengambilan Data Pola Spekel Pada Pengukuran Jari Telunjuk

3.2.4. Pengolahan Sinyal

Sinyal SMI yang didapat dari hasil pengukuran jari telunjuk dari kedua subjek penelitian selanjutnya diolah menggunakan software matlab dengan memilih toolbox *Continuous Wavelet Transform* (CWT). Dengan menggunakan fasilitas *toolbox Continuous Wavelet Transform* (CWT) maka sinyal SMI yang mengandung spekel akan diekstrak dalam domain waktu dan frekuensi.

Berikut ini merupakan alur pengolahan sinyal hingga didapatkan pola spekel pada pengukuran jari telunjuk dari ketiga perlakuan yang berbeda :



Gambar 3.8 Diagram alir pengolahan sinyal hingga didapatkan grafik pola spekel dalam domin waktu dan frekuensi

```
kodingan_PLX_baru | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help

kodingan_PLX_baru

#define sensorPin A0 // select the input pin for the potentiometer
int sensorValue = 0; // variable to store the value coming from the sensor 0-1023
float sensorVoltage = 0; // variable to store the voltage coming from the sensor 0-5V

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,t,A0");
}

void loop() {

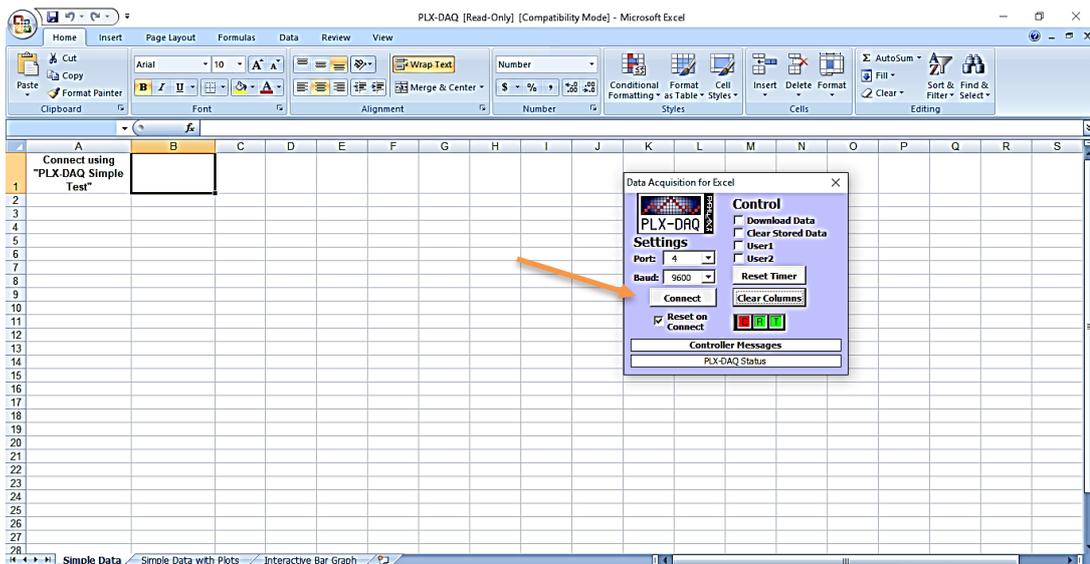
  sensorValue = analogRead(sensorPin);

  sensorVoltage = sensorValue*5.0/1023.0;

  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.println(sensorVoltage);
  delay(100);
}
```

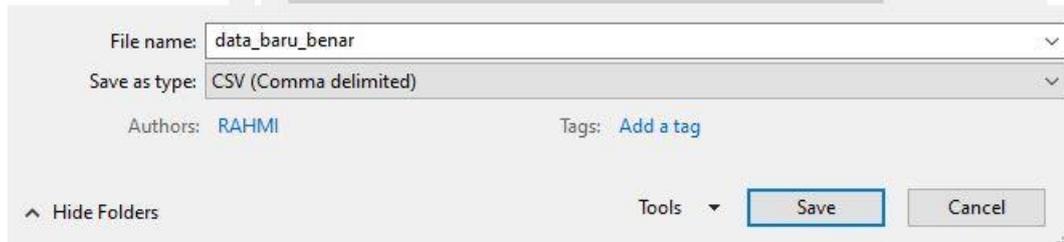
Gambar 3.9 Kodingan PLX-DAQ yang diinput pada Arduino

Kodingan PLX-DAQ diatas menunjukkan bahwa yang ditampilkan pada PLX-DAQ adalah nilai tegangan output fotodioda dengan delay pengambilan data yakni 100 ms yang berarti tiap 1 data diambil dalam waktu 0.1 sekon.

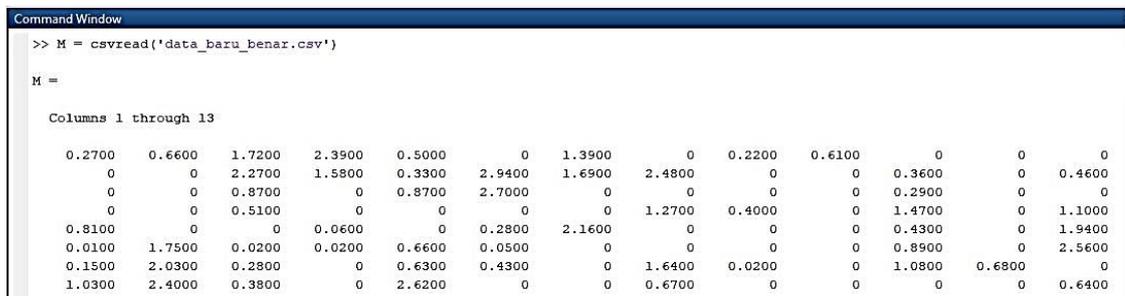


Gambar 3.10 Tampilan awal PLX-DAQ sebagai software akuisisi data

Pengambilan data dimulai dengan mengklik tombol “connect” pada kotak biru di dalam software PLX-DAQ. Kemudian setelah didapatkan 100 data untuk mengakhiri pengambilan data klik tombol “disconnected”. Selanjutnya data di “copy” dalam ms excel.



Gambar 3.11 Data disimpan dalam tipe CSV



Gambar 3.12 Data yang disimpan dalam tipe CSV di input pada Matlab

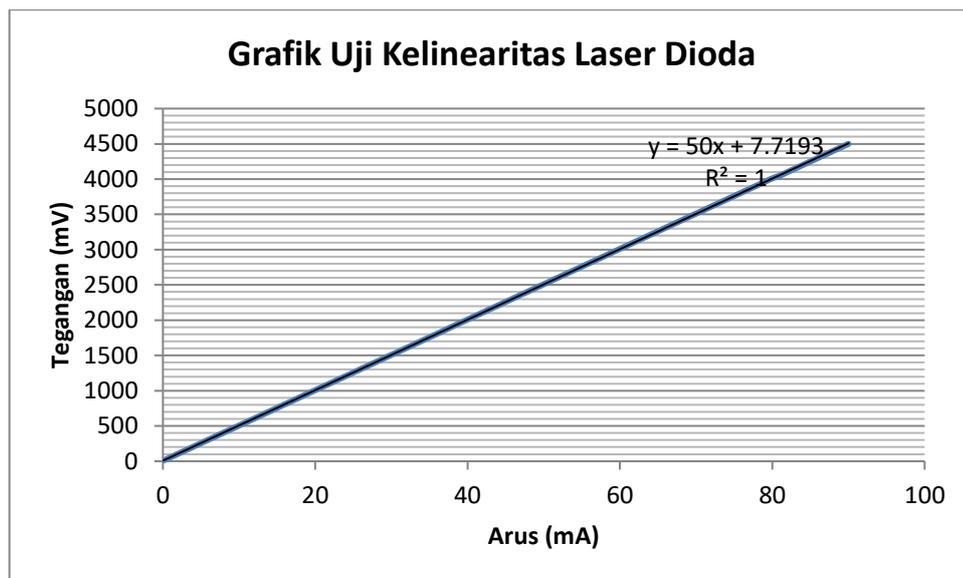
Data yang sebelumnya telah disimpan dalam format CSV pada matlab, lalu ditampilkan pada “command window” matlab dengan mengetikkan `M = csvread('data_baru_benar.csv')`. Kemudian data ditampilkan seperti bentuk matriks baris dan kolom seperti pada Gambar 3.12 diatas.

Untuk menampilkan hasil transformasi wavelet dalam domain waktu dan tegangan dilakukan dengan mengetikkan `cwt(M(:,4),10)` pada “command window” matlab. CWT (Continuous Wavelet Transform) menunjukkan salah satu metode transformasi yang terdapat dalam “toolbox” matlab yang mengubah suatu sinyal input menjadi domain waktu dan frekuensi. Tanda (:) menunjukkan jumlah baris dalam pengambilan data yakni 100 baris. Sedangkan angka 4 setelah koma menunjukkan kolom yang datanya akan ditransformasi wavelet. Angka 10 menunjukkan frekuensi sampling yang dirumuskan sebagai banyaknya sampling per detik, delay yang digunakan yakni 100 ms sama dengan 0.1 sekon. Kemudian tekan enter maka akan muncul gambar grafik kontur yang merepresentasikan pola spekel agar mudah dianalisis.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Laser dioda

Laser dioda yang kami gunakan dalam penelitian ini adalah laser dioda L785P090 produksi Thorlabs, laser ini berkode pin C dengan panjang gelombang 785 nm. Sebelum laser dioda digunakan untuk pengukuran maka harus diuji dahulu kelinearannya. Arus masukan pada laser driver diatur mulai dari 0.08 mA hingga 90 mA, kemudian diamati tegangan yang terukur pada multimeter untuk setiap arus masukan laser driver. Arus masukan dan tegangan yang terukur dicatat dan di plot dalam bentuk grafik pada ms excel. Hasil plot arus dan tegangan yang terukur di tampilkan pada grafik berikut ini:



Gambar 4.1 Grafik uji kelinearitas laser dioda

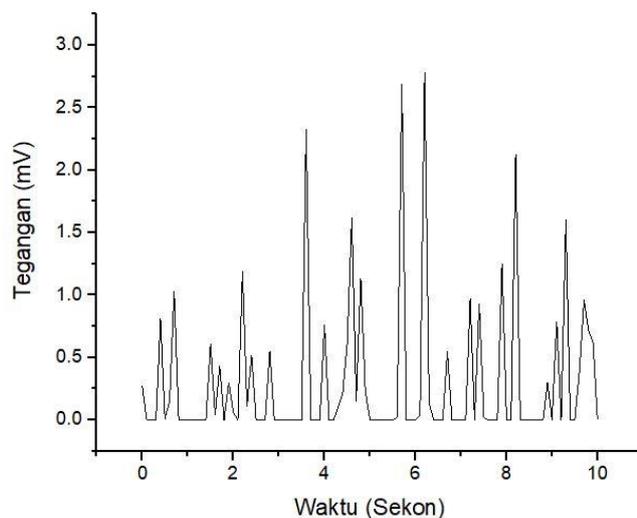
Berdasarkan uji kelinearitas laser driver diatas terlihat bahwa hubungan antara arus dan tegangan linear karena nilai kelinearitas $R^2 = 1$. Tujuan uji linearitas adalah untuk mengetahui apakah dua variabel mempunyai hubungan linear atau tidak secara signifikan.

4.2 Pengukuran Data Akuisisi

Beberapa jurnal referensi yang menjadi acuan kami menggunakan alat khusus untuk pengambilan data akuisisi yang disebut *Data Acquisition Card* (DAQ Card) sebagaimana yang dilakukan oleh Wei dkk yang menggunakan DAQ ISDS205A. Namun, kami menggunakan alternatif lain yaitu Arduino Uno sebagai rangkaian pengubah sinyal analog menjadi digital. Pengambilan data dilakukan dengan software PLX-DAQ, selanjutnya data yang diperoleh diolah menggunakan software origin pro dan matlab.

4.3 Pengukuran Objek

Pengukuran objek diaplikasikan pada jaringan kulit berupa jari telunjuk. Namun sebelumnya dilakukan pengukuran sinyal SMI tanpa diberi objek terlebih dahulu untuk mengetahui perbedaan pola spekel yang ditangkap dengan sinyal SMI saat diberi objek.

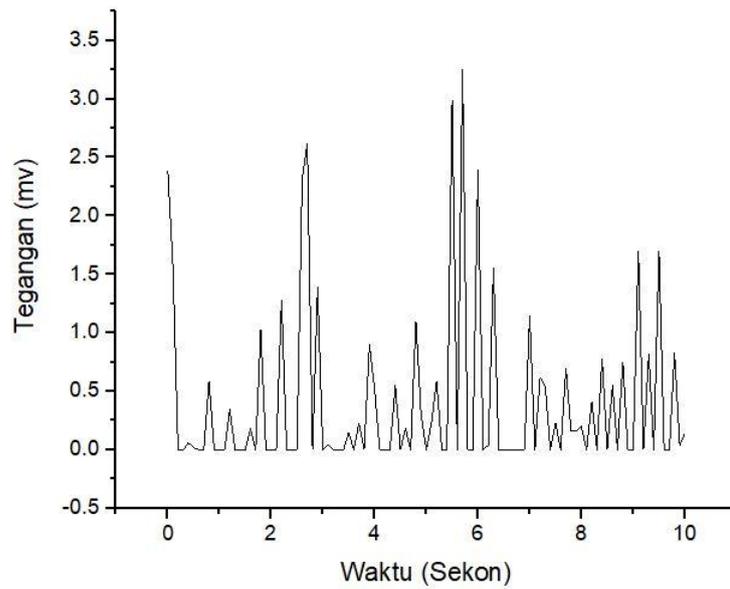


Gambar 4.2 Hasil pengukuran sinyal SMI tanpa objek di hadapannya.

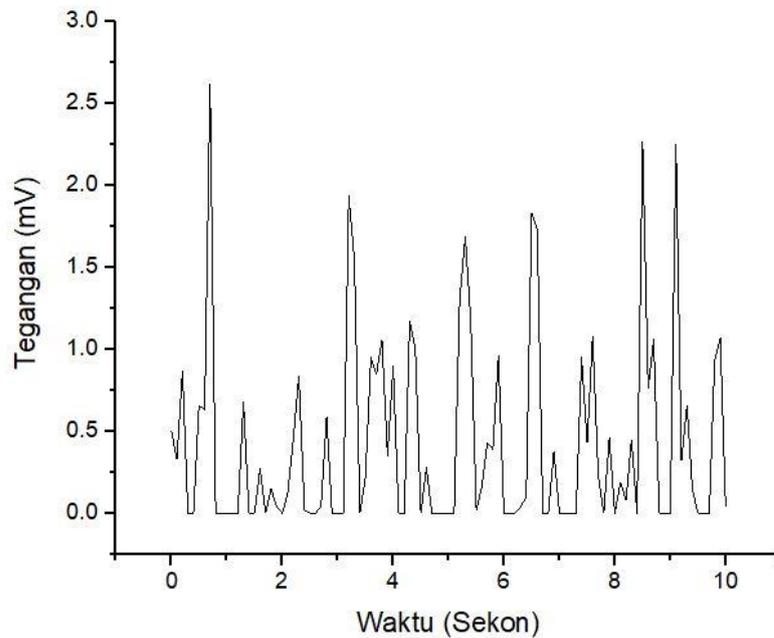
Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengukuran sinyal SMI tanpa objek. Terlihat pada Gambar 4.2 bahwa sinyal SMI yang terbentuk tanpa pemberian objek sangat fluktuatif dengan nilai tegangan output fotodiode yang terukur memiliki nilai antara 0 sampai 2.5 mV. Namun ada beberapa sinyal yang memiliki puncak dibawah 1 mv. Hasil pengukuran sinyal SMI tersebut menunjukkan bahwa tanpa

diberi objek apapun di depan laser dioda, nilai tegangan output fotodioda yang terukur sangat fluktuatif. Hal ini dikarenakan di dalam laser dioda SMI terdapat rongga fabry perot yang merupakan karakteristik dari SMI. Interferometer fabry perot terdiri dari 2 lapisan datar yang sangat reflektif, sehingga ketika terdapat cahaya datang pada salah satu lapisan maka sebagian akan diteruskan dan sebagian akan dipantulkan kembali dalam rongga fabry perot. Banyaknya cahaya yang dipantulkan dalam rongga fabry perot menyebabkan terjadi banyak interferensi dalam rongga fabry perot tersebut. Sehingga hasil interferensi tersebut ditangkap oleh fotodioda sebagai intensitas yang bervariasi. Saat intensitas cahaya yang diterima fotodioda tinggi mengakibatkan tegangan output fotodioda semakin besar. Sebaliknya saat intensitas cahaya yang diterima fotodioda rendah maka tegangan output fotodioda akan semakin kecil. Interferensi yang terjadi terdiri dari interferensi konstruktif dan destruktif. Interferensi destruktif (saling melemahkan) terjadi saat beda fase antara kedua gelombang sebesar 180° yang menyebabkan energinya bernilai nol sehingga intensitasnya juga bernilai nol. Intensitas merupakan energi per satuan luas, sehingga dapat diperoleh hubungan antara intensitas dan energi yang sebanding. Sebaliknya untuk interferensi konstruktif (saling menguatkan) terjadi saat beda fase antara kedua gelombang bernilai sama yang menyebabkan energinya tinggi sehingga intensitasnya juga tinggi.

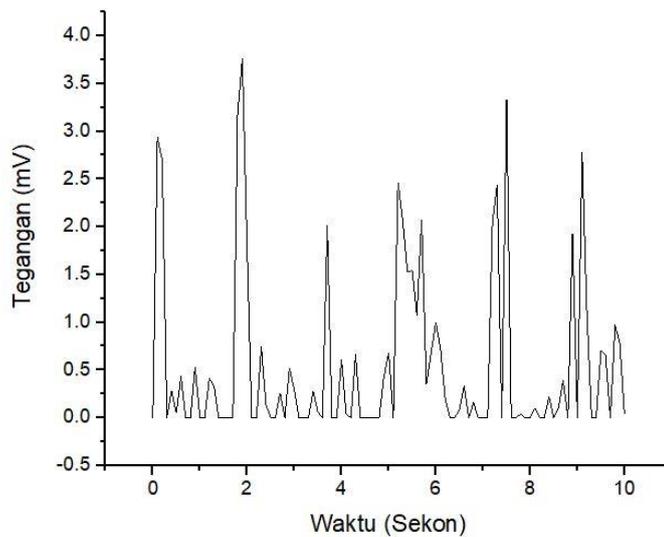
Berikut ini merupakan hasil pengukuran sinyal SMI saat diberi objek berupa jari telunjuk di depan laser dioda dengan pemberian 3 perlakuan yang berbeda yakni pertama saat jari telunjuk tanpa diberikan tekanan, kedua saat pemberian tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas sebelah kiri subjek penelitian, ketiga saat tekanan pada lengan atas subjek dikempiskan. Subjek penelitian yakni 1 orang mahasiswa laki-laki dan 1 orang mahasiswa perempuan yang keduanya dalam kondisi santai. Subjek 1 merupakan mahasiswa laki-laki dan subjek 2 merupakan mahasiswa perempuan.



Gambar 4.3 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 tanpa diberikan tekanan



Gambar 4.4 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg



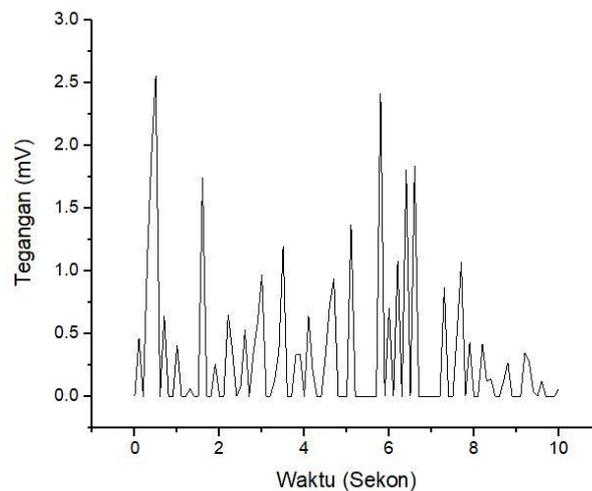
Gambar 4.5 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dikempiskan

Berdasarkan hasil pengukuran sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 dengan pemberian 3 perlakuan yang berbeda terlihat bahwa nilai tegangan output dari fotodiode SMI yang terukur berbeda-beda. Hasil pengukuran sinyal SMI objek telunjuk pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa tanpa pemberian tekanan nilai tegangan output fotodiode memiliki nilai paling tinggi diantara 2 perlakuan yang lain yakni berada pada rentang nilai 0 - 3 mv. Tekanan darah yang terdapat pada jari telunjuk sangat kecil sekali karena letaknya yang sangat jauh dari jantung, sehingga denyut nadi yang terukur di jari telunjuk sangat lambat serta tidak terasa. Hal ini menyebabkan laju aliran darah yang menuju ke jari telunjuk sangat kecil karena vibrasi sel-sel darah sangat kecil akibat kecilnya laju aliran darah. Saat laser dioda mengenai permukaan objek yang kasar seperti jari telunjuk, maka sinyal output fotodiode yang terukur merupakan sinyal spekel. Prinsip terbentuknya pola spekel pada jari telunjuk tanpa diberikan perlakuan tekanan yakni saat cahaya laser dioda disinarkan pada permukaan jari telunjuk yang kasar, maka akan terjadi hamburan dari masing-masing titik di permukaan kulit. Cahaya yang terhambur tersebut saling berinterferensi satu sama lain. Interferensi yang terjadi merupakan perpaduan 2 atau lebih cahaya koheren yang terhambur sehingga memiliki amplitudo dan beda fase berbeda satu sama lain. Beda fase dan amplitudo yang berbeda-beda tersebut akan menyebabkan terjadinya interferensi acak. Interferensi

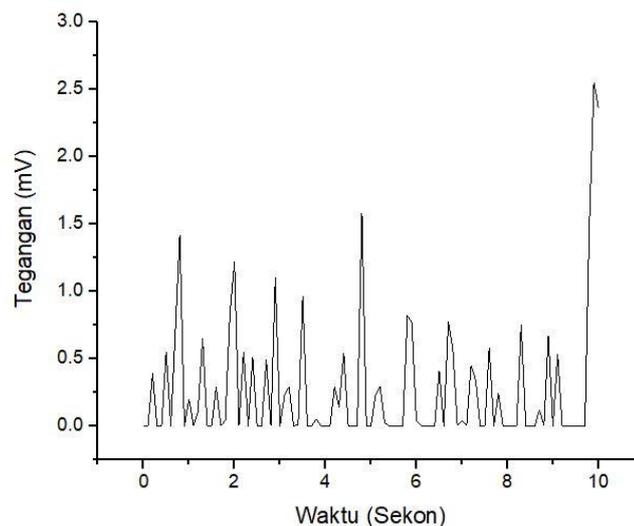
yang terjadi berupa interferensi konstruktif (saling menguatkan) dan interferensi destruktif (saling melemahkan). Interferensi konstruktif terjadi saat beda fase antar kedua gelombang cahaya berada pada fase yang sama sehingga menghasilkan pola terang, sedangkan interferensi destruktif terjadi saat beda fase antar kedua gelombang sebesar 180° sehingga menghasilkan pola gelap. Terjadinya interferensi acak ini akan ditangkap oleh fotodioda sebagai intensitas acak. Ketika interferensi yang terjadi konstruktif maka intensitas cahaya yang yang diterima fotodioda sangat tinggi, hal ini menyebabkan nilai resistansi fotodioda mengecil sehingga arus yang mengalir pada fotodioda semakin besar. Hukum Ohm menyatakan bahwa arus dan tegangan memiliki hubungan sebanding namun arus dan resistansi berbanding terbalik, sehingga saat arus yang mengalir besar maka tegangan output dari fotodioda yang terukur juga besar. Sebaliknya saat interferensi yang terjadi destruktif maka intensitas cahaya yang diterima oleh fotodioda sangat kecil. Hal ini menyebabkan nilai resistansi fotodioda semakin besar sehingga arus yang mengalir semakin sedikit, sehingga menyebabkan tegangan output dari fotodioda kecil. Sehingga dapat dianalisis dari Gambar 4.3 saat nilai tegangan fotodioda yang terukur berada pada nilai 0 mv menunjukkan bahwa pada saat itu terjadi interferensi destruktif, namun saat nilai tegangan fotodioda yang terukur berada pada nilai puncak 1.5 hingga 3 mv menunjukkan bahwa pada saat itu terjadi interferensi konstruktif.

Hasil pengukuran sinyal SMI dengan pemberian perlakuan berupa tekanan 200 mmHg pada lengan atas subjek 1 ditampilkan pada Gambar 4.4. Terlihat pada hasil pengukuran sinyal SMI Gambar 4.4 nilai tegangan output dari fotodioda semakin kecil yakni berada pada rentang nilai 0 hingga 2.5 mv. Hal ini dikarenakan saat pemberian tekanan 200 mmHg pada lengan atas subjek penelitian menyebabkan aliran darah yang mengalir pada jari telunjuk terhambat sehingga berpengaruh pada gerakan partikel sel darah yang semakin lambat. Gerakan partikel sel darah yang lambat tersebut mengakibatkan kecepatan aliran darah akan menurun, sehingga intensitas cahaya yang diterima fotodioda juga semakin kecil. Hal ini menyebabkan tegangan output fotodioda juga semakin kecil.

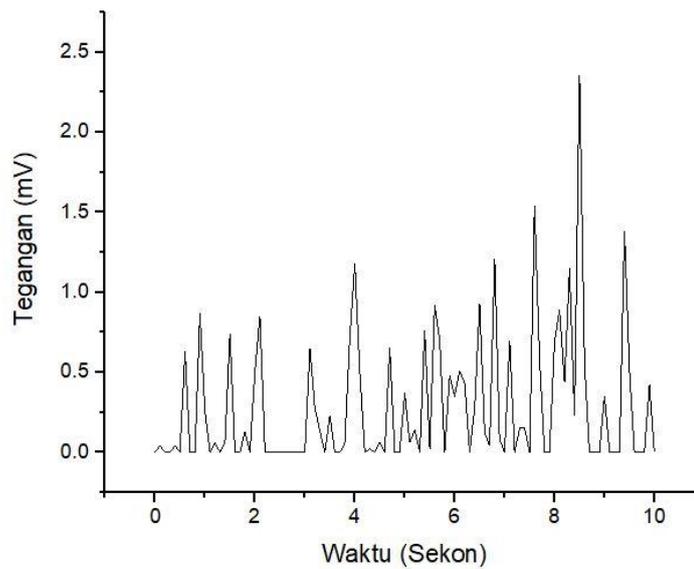
Hasil pengukuran sinyal SMI saat tekanan pada lengan atas subjek 1 dikompiskan ditampilkan pada Gambar 4.5. Terlihat pada Gambar 4.5 saat tekanan pada lengan atas subjek dikompiskan menyebabkan pembuluh darah di sekitar lengan atas kembali seperti semula. Kecepatan sel-sel darah yang mengalir menuju jari telunjuk mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode semakin besar, sehingga tegangan output fotodiode yang terukur semakin besar.



Gambar 4.6 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 tanpa diberikan tekanan



Gambar 4.7 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg



Gambar 4.8 Hasil pengukuran sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dikempiskan

Berdasarkan hasil pengukuran sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 dengan pemberian 3 perlakuan yang berbeda terlihat bahwa nilai tegangan output dari fotodiode SMI yang terukur berbeda-beda. Hasil pengukuran sinyal SMI objek telunjuk pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa tanpa pemberian tekanan nilai tegangan output fotodiode memiliki nilai paling tinggi diantara 2 perlakuan yang lain yakni berada pada rentang nilai 0 – 2.5 mv. Tekanan darah yang terdapat pada jari telunjuk sangat kecil sekali karena letaknya yang sangat jauh dari jantung, sehingga denyut nadi yang terukur di jari telunjuk sangat lambat serta tidak terasa. Hal ini menyebabkan laju aliran darah yang menuju ke jari telunjuk sangat kecil karena vibrasi sel-sel darah sangat kecil akibat kecilnya laju aliran darah. Saat laser dioda mengenai permukaan objek yang kasar seperti jari telunjuk, maka sinyal output fotodiode yang terukur merupakan sinyal spekel. Prinsip terbentuknya pola spekel pada jari telunjuk tanpa diberikan perlakuan tekanan yakni saat cahaya laser dioda disinarkan pada permukaan jari telunjuk yang kasar, maka akan terjadi hamburan dari masing-masing titik di permukaan kulit. Cahaya yang terhambur tersebut saling berinterferensi satu sama lain. Interferensi yang terjadi merupakan perpaduan 2 atau lebih cahaya koheren yang terhambur sehingga memiliki amplitudo dan beda fase berbeda satu sama lain. Beda fase dan amplitudo yang berbeda-beda tersebut akan menyebabkan terjadinya interferensi acak. Interferensi

yang terjadi berupa interferensi konstruktif (saling menguatkan) dan interferensi destruktif (saling melemahkan). Interferensi konstruktif terjadi saat beda fase antar kedua gelombang cahaya berada pada fase yang sama sehingga menghasilkan pola terang, sedangkan interferensi destruktif terjadi saat beda fase antar kedua gelombang sebesar 180° sehingga menghasilkan pola gelap. Terjadinya interferensi acak ini akan ditangkap oleh fotodiode sebagai intensitas acak. Ketika interferensi yang terjadi konstruktif maka intensitas cahaya yang diterima fotodiode sangat tinggi, hal ini menyebabkan nilai resistansi fotodiode mengecil sehingga arus yang mengalir pada fotodiode semakin besar. Hukum Ohm menyatakan bahwa arus dan tegangan memiliki hubungan sebanding namun arus dan resistansi berbanding terbalik, sehingga saat arus yang mengalir besar maka tegangan output dari fotodiode yang terukur juga besar. Sebaliknya saat interferensi yang terjadi destruktif maka intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode sangat kecil. Hal ini menyebabkan nilai resistansi fotodiode semakin besar sehingga arus yang mengalir semakin sedikit, sehingga menyebabkan tegangan output dari fotodiode kecil. Sehingga dapat dianalisis dari Gambar 4.3 saat nilai tegangan fotodiode yang terukur berada pada nilai 0 mv menunjukkan bahwa pada saat itu terjadi interferensi destruktif, namun saat nilai tegangan fotodiode yang terukur berada pada nilai puncak 1.5 hingga 3 mv menunjukkan bahwa pada saat itu terjadi interferensi konstruktif.

Hasil pengukuran sinyal SMI dengan pemberian perlakuan berupa tekanan 200 mmHg pada lengan atas subjek 2 ditampilkan pada Gambar 4.7. Terlihat pada hasil pengukuran sinyal SMI Gambar 4.7 nilai tegangan output dari fotodiode semakin kecil yakni berada pada rentang nilai 0 hingga 1.5 mv. Hal ini dikarenakan saat pemberian tekanan 200 mmHg pada lengan atas subjek penelitian menyebabkan aliran darah yang mengalir pada jari telunjuk terhambat sehingga berpengaruh pada gerakan partikel sel darah yang semakin lambat. Gerakan partikel sel darah yang lambat tersebut mengakibatkan kecepatan aliran darah akan menurun, sehingga intensitas cahaya yang diterima fotodiode juga semakin kecil. Hal ini menyebabkan tegangan output fotodiode juga semakin kecil.

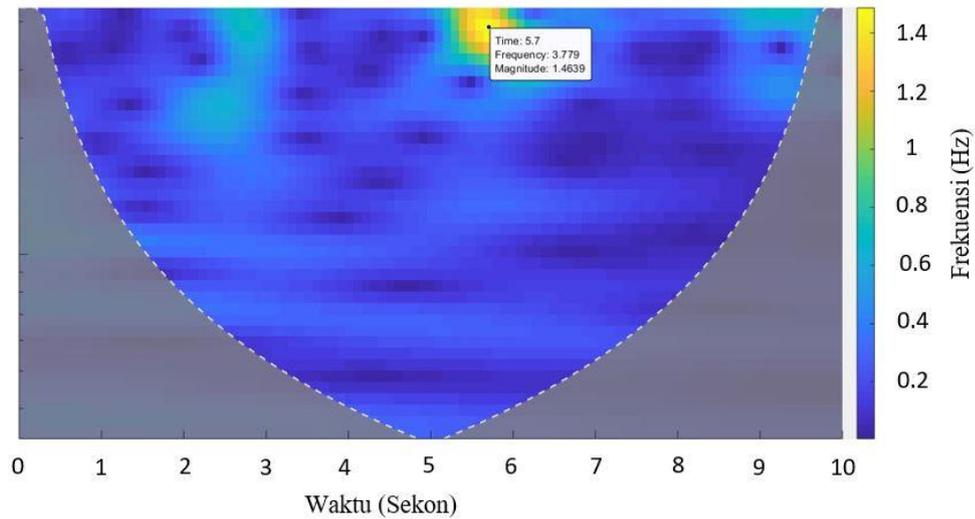
Hasil pengukuran sinyal SMI saat tekanan pada lengan atas subjek 2 dikompresikan ditampilkan pada Gambar 4.8. Terlihat pada Gambar 4.8 saat tekanan pada lengan atas subjek dikompresikan menyebabkan pembuluh darah di sekitar lengan atas kembali seperti semula. Kecepatan sel-sel darah yang mengalir menuju jari telunjuk mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan intensitas cahaya yang diterima oleh fotodiode semakin besar, sehingga tegangan output fotodiode yang terukur semakin besar.

Hasil pengukuran sinyal SMI jika dibandingkan antara subjek 1 dan subjek 2 dalam penelitian ini terdapat perbedaan. Hasil pengukuran sinyal SMI pada subjek 1 penelitian memiliki nilai tegangan output fotodiode yang lebih besar jika dibandingkan dengan hasil pengukuran sinyal SMI pada subjek 2 penelitian. Hal ini disebabkan terdapat faktor lain yang mempengaruhi perbedaan hasil pengukuran sinyal SMI seperti faktor medis terkait kondisi tubuh seperti berat badan, tinggi badan, tekanan darah normal dari kedua subjek penelitian.

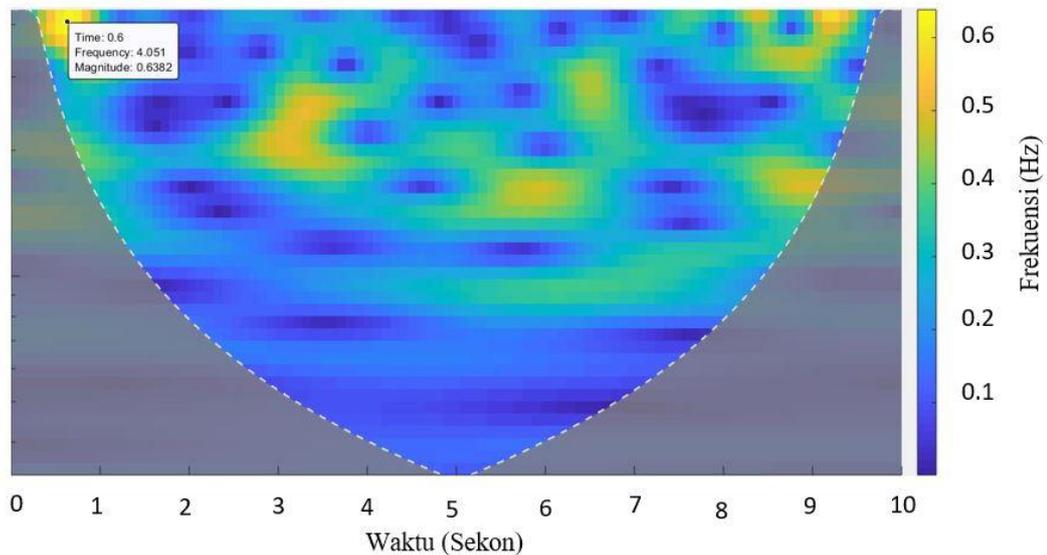
4.4 Pengolahan Sinyal SMI Menggunakan *Continuous Wavelet Transform* (CWT)

Dalam penelitian ini untuk menganalisa pola spekel yang terdapat pada jari telunjuk digunakan metode *continuous wavelet transform* pada software Matlab. Metode *continuous wavelet transform* merupakan metode yang dikembangkan untuk memperoleh informasi dalam domain waktu dan frekuensi mengenai suatu sinyal. Tujuan pengolahan sinyal SMI menggunakan metode *continuous wavelet transform* pada matlab yakni agar diperoleh informasi sinyal dalam domain waktu dan frekuensi secara bersamaan, karena untuk menganalisis hubungan antara spekel dengan aliran darah diperlukan informasi dalam domain frekuensi. Metode CWT memisahkan sinyal ke dalam frekuensi yang berbeda. Hasil pengolahan sinyal SMI menggunakan metode *continuous wavelet transform* menghasilkan nilai frekuensi spekel dalam fungsi waktu dan ditampilkan dalam bentuk kontur warna. Masing-masing warna menunjukkan persebaran nilai frekuensi yang berbeda satu sama lain. Frekuensi yang dihasilkan merupakan frekuensi spekel yang berhubungan dengan aktivitas aliran darah di permukaan kulit.

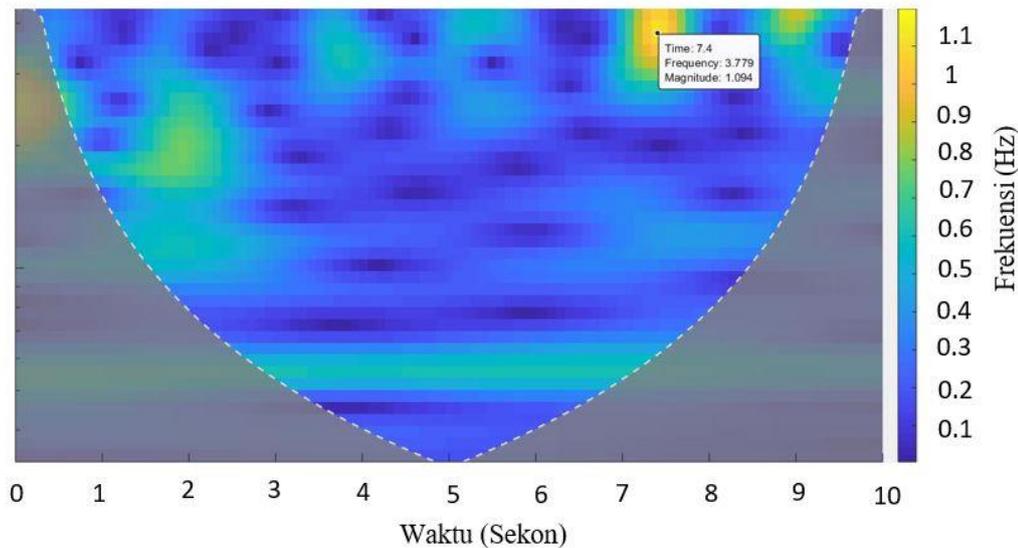
Berikut ini merupakan hasil pengolahan sinyal SMI menggunakan metode *continuous wavelet transform* dengan objek telunjuk pada subjek 1 penelitian dengan pemberian 3 perlakuan yang berbeda yakni tanpa pemberian tekanan, dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg, dan saat tekanan dikempiskan.



Gambar 4.9 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan



Gambar 4.10 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg



Gambar 4.11 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dikempiskan

Pola spekel merupakan pola intensitas acak yang terbentuk dari interferensi cahaya terhambur pada permukaan objek yang kasar saat disinari oleh sumber cahaya koheren seperti laser. Proses terjadinya pola spekel pada jari telunjuk yakni saat permukaan kulit yang kasar pada jari telunjuk disinari oleh berkas cahaya koheren dari laser maka akan terjadi hamburan dari masing-masing titik di permukaan kulit. Cahaya yang terhambur tersebut akan berinterferensi satu sama lain. Interferensi yang terjadi ini merupakan perpaduan dari 2 atau lebih cahaya koheren yang terhambur sehingga memiliki amplitudo dan beda fase yang berbeda satu sama lain. Beda fase dan amplitudo yang berbeda-beda tersebut menyebabkan terjadinya interferensi acak. Interferensi yang terjadi merupakan interferensi destruktif dan konstruktif. Interferensi destruktif atau saling melemahkan terjadi saat beda fase antar kedua gelombang sebesar 180° sehingga menyebabkan energinya bernilai nol sehingga intensitasnya juga bernilai nol. Ketika intensitas yang ditangkap fotodiode bernilai nol maka nilai resistansi dari fotodiode akan bernilai nol, sehingga tegangan output fotodiode yang dihasilkan juga bernilai nol. Sebaliknya interferensi konstruktif atau saling menguatkan terjadi saat beda fase antar kedua gelombang bernilai sama sehingga energinya tinggi sehingga intensitas yang dihasilkan juga tinggi. Saat intensitas yang ditangkap fotodiode tinggi maka resistansi fotodiode rendah sehingga tegangan output fotodiode akan tinggi.

Berikut ini akan dijelaskan hubungan antara frekuensi spekel dengan kecepatan aliran darah pada ketiga perlakuan pada penelitian ini. Tekanan darah yang ada di ujung jari telunjuk sangat kecil karena letaknya yang sangat jauh dari jantung, sehingga denyut nadi di ujung jari tidak terasa atau sangat lambat. Hal ini mengakibatkan laju aliran darah di ujung jari sangat kecil, sehingga frekuensi spekel juga kecil akibat vibrasi keping darah yang kecil. Pada perlakuan kedua saat diberikan tekanan pada lengan atas, maka mengakibatkan pembuluh darah di area lengan menyempit sehingga aliran darah yang menuju ke ujung jari terdapat sedikit penurunan yang mengakibatkan frekuensi spekel juga mengalami penurunan. Pada perlakuan ketiga saat tekanan pada lengan dikempiskan, maka pembuluh darah berada dalam kondisi normal kembali seperti semula sehingga terjadi peningkatan fluktuasi vibrasi keping-keping darah dalam aliran darah. Hal ini mengakibatkan meningkatnya frekuensi spekel. Hal ini sesuai dengan persamaan gelombang yang menyatakan bahwa cepat rambat gelombang sebanding dengan frekuensi. Sehingga semakin cepat vibrasi keping darah maka frekuensi spekel yang dihasilkan juga semakin besar. Sebaliknya semakin lambat vibrasi keping darah maka frekuensi spekel yang dihasilkan juga semakin kecil (Ozdemir et al. 2000).

Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan ditampilkan pada Gambar 4.9. Terlihat pada Gambar 4.9 frekuensi spekel memiliki rentang nilai 0.2 – 1.4 Hz. Frekuensi spekel memiliki hubungan dengan frekuensi spasial. Seperti yang dijelaskan pada tinjauan pustaka sub bab 2.8 bahwa frekuensi spasial menyatakan pola kisi dari struktur yang periodik posisi di dalam ruang dengan satuan siklus per satuan jarak. Frekuensi spasial rendah membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan dalam kondisi kontras rendah. Sebaliknya frekuensi spasial tinggi membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan dalam kondisi kontras tinggi. Aliran darah yang ada di jari telunjuk sangat lambat karena letaknya jauh dari jantung. Tanpa diberikan tekanan pada lengan atas aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk sangat lambat, sehingga jarak antar partikel sel darah merah lebih renggang atau tidak rapat. Frekuensi spasial memiliki nilai rendah jika berada pada struktur yang tidak rapat. Sehingga dapat dianalisis berdasarkan Gambar 4.9

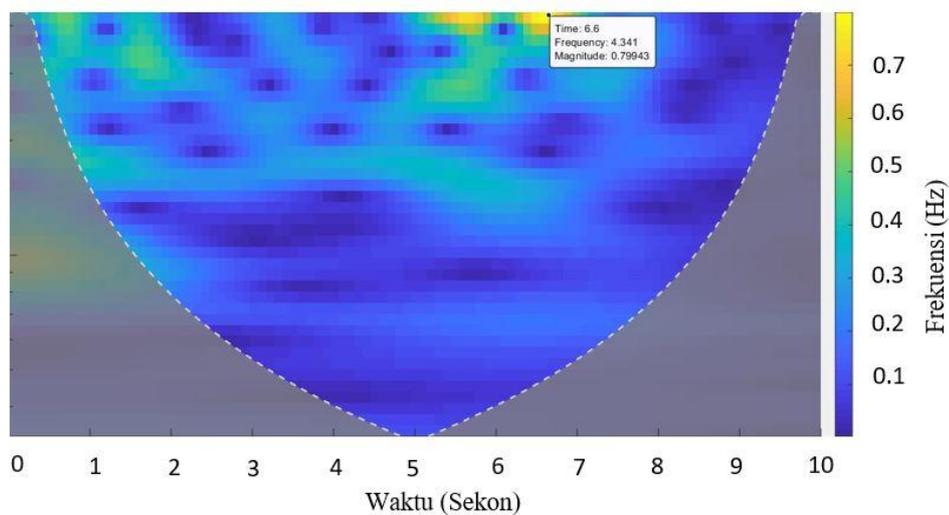
saat aliran darah lebih lambat maka jarak antar partikel sel darah merah lebih renggang. Saat laser menyinari permukaan kulit dengan aliran darah di permukaan yang lambat maka sedikit sekali cahaya yang dihamburkan kembali ke dalam laser dioda, sehingga sedikit sekali interferensi yang terjadi. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat dan struktur sel darah merah lebih renggang menyebabkan interferensi yang terjadi sangat sedikit. Sedangkan warna kuning serta hijau menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat dan struktur sel darah merah lebih rapat menyebabkan interferensi yang terjadi lebih banyak.

Gambar 4.10 menampilkan hasil pengolahan sinyal SMI pada subjek 1 saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas subjek. Terlihat pada Gambar 4.10 frekuensi spekel memiliki rentang nilai 0.1 – 0.6 Hz. Nilai frekuensi spekel saat subjek 1 diberikan tekanan di lengan lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai frekuensi spekel saat subjek 1 tanpa diberikan tekanan pada lengannya. Hal ini disebabkan saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg, aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk terhambat sehingga kecepatan aliran darah menuju jari telunjuk sangat kecil sekali. Semakin rendah nilai frekuensi spekel menunjukkan bahwa pada daerah tersebut aliran darah yang mengalir sangat lambat. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat dan struktur sel darah merah lebih renggang menyebabkan interferensi yang terjadi sangat sedikit. Sedangkan warna kuning serta hijau menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat dan struktur sel darah merah lebih rapat menyebabkan interferensi yang terjadi lebih banyak.

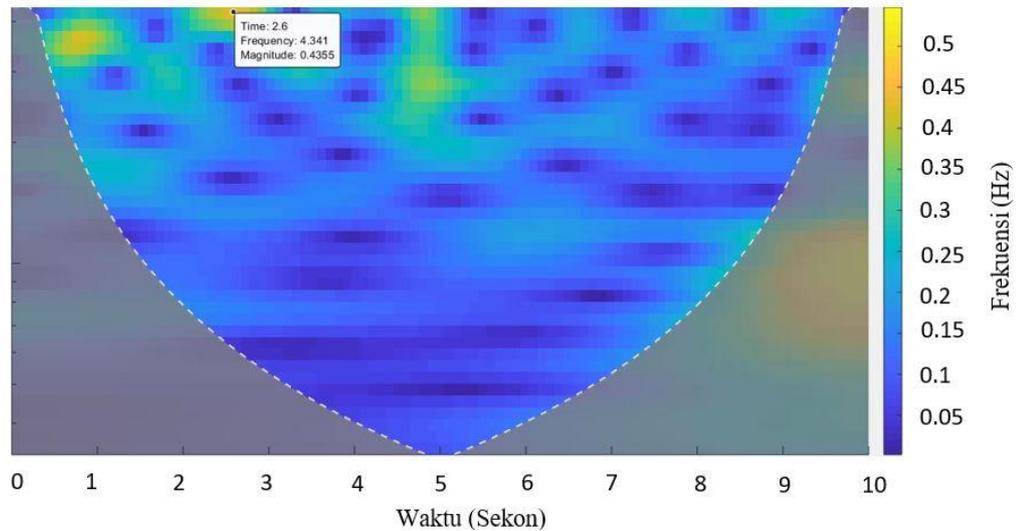
Hasil pengolahan sinyal SMI pada subjek 1 saat tekanan dikompresikan dapat diamati pada Gambar 4.11. Terlihat pada Gambar 4.11 nilai frekuensi spekel berada pada rentang nilai 0.1 – 1.1 Hz. Nilai frekuensi spekel saat tekanan dikompresikan mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan nilai frekuensi spekel saat

diberikan tekanan di lengan. Hal ini dikarenakan saat tekanan dikempiskan pembuluh darah berada dalam kondisi normal kembali seperti semula dan mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk. Hal ini mengakibatkan meningkatnya nilai frekuensi spekel. Saat tekanan dikempiskan aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk lebih cepat, sehingga jarak antar partikel sel darah merah lebih rapat. Frekuensi spasial memiliki nilai tinggi jika berada pada struktur yang rapat. Sehingga dapat dianalisis berdasarkan Gambar 4.11 saat aliran darah lebih cepat maka jarak antar partikel sel darah merah lebih rapat. Saat laser menyinari permukaan kulit dengan aliran darah di permukaan yang cepat maka banyak sekali cahaya yang dihamburkan kembali ke dalam laser dioda, sehingga banyak terjadi interferensi. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat. Sedangkan warna kuning serta hijau menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat.

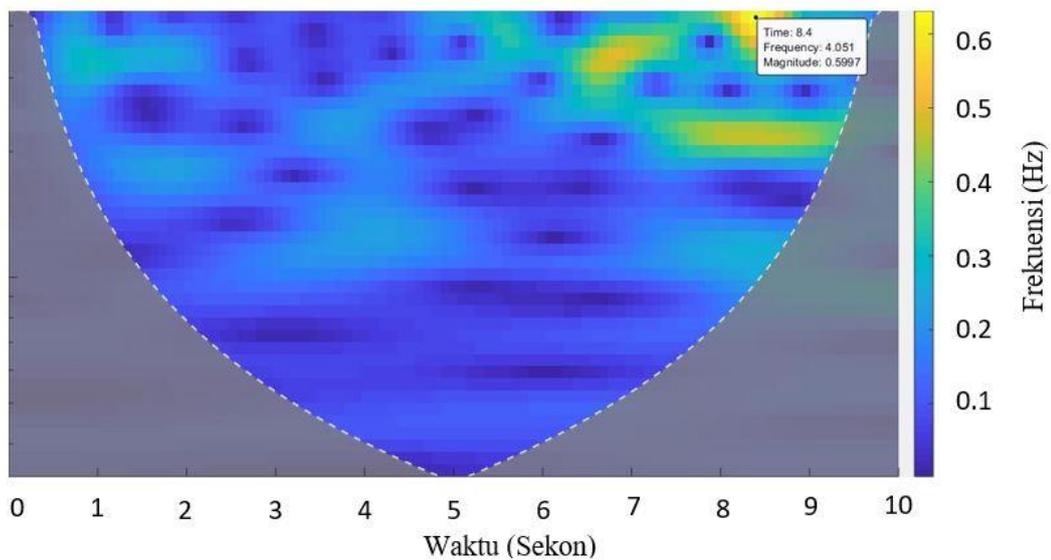
Berikut ini merupakan hasil pengolahan sinyal SMI menggunakan metode *continuous wavelet transform* dengan objek telunjuk pada subjek 2 penelitian dengan pemberian 3 perlakuan yang berbeda yakni tanpa pemberian tekanan, dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg, dan saat tekanan dikempiskan.



Gambar 4.12 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan



Gambar 4.13 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 dengan pemberian tekanan sebesar 200 mmHg



Gambar 4.14 Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dikempiskan

Hasil pengolahan sinyal SMI dengan objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan ditampilkan pada Gambar 4.12. Terlihat pada Gambar 4.12 frekuensi spekel memiliki rentang nilai 0.1 – 0.7 Hz. Frekuensi spekel memiliki hubungan dengan frekuensi spasial. Seperti yang dijelaskan pada tinjauan pustaka sub bab 2.8 bahwa frekuensi spasial menyatakan pola kisi dari struktur yang periodik posisi di dalam ruang dengan satuan siklus per satuan jarak. Frekuensi spasial rendah membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan

dalam kondisi kontras rendah. Sebaliknya frekuensi spasial tinggi membawa karakteristik spasial luas dari suatu objek dan dominan dalam kondisi kontras tinggi. Aliran darah yang ada di jari telunjuk sangat lambat karena letaknya jauh dari jantung. Tanpa diberikan tekanan pada lengan atas aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk sangat lambat, sehingga jarak antar partikel sel darah merah lebih renggang atau tidak rapat. Frekuensi spasial memiliki nilai rendah jika berada pada struktur yang tidak rapat. Sehingga dapat dianalisis berdasarkan Gambar 4.12 saat aliran darah lebih lambat maka jarak antar partikel sel darah merah lebih renggang. Saat laser menyinari permukaan kulit dengan aliran darah di permukaan yang lambat maka sedikit sekali cahaya yang dihamburkan kembali ke dalam laser dioda, sehingga sedikit sekali interferensi yang terjadi. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat dan struktur sel darah merah lebih renggang menyebabkan interferensi yang terjadi sangat sedikit. Sedangkan warna kuning serta hijau menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat dan struktur sel darah merah lebih rapat menyebabkan interferensi yang terjadi lebih banyak.

Gambar 4.13 menampilkan hasil pengolahan sinyal SMI pada subjek 2 saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas subjek. Terlihat pada Gambar 4.13 frekuensi spekel memiliki rentang nilai 0.05 – 0.5 Hz. Nilai frekuensi spekel saat subjek 2 diberikan tekanan di lengan lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai frekuensi spekel saat subjek 2 tanpa diberikan tekanan pada lengannya. Hal ini disebabkan saat diberikan tekanan sebesar 200 mmHg, aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk terhambat sehingga kecepatan aliran darah menuju jari telunjuk sangat kecil sekali. Semakin rendah nilai frekuensi spekel menunjukkan bahwa pada daerah tersebut aliran darah yang mengalir sangat lambat. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat dan struktur sel darah merah lebih renggang menyebabkan interferensi yang terjadi sangat sedikit. Sedangkan warna kuning serta hijau

menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat dan struktur sel darah merah lebih rapat menyebabkan interferensi yang terjadi lebih banyak.

Hasil pengolahan sinyal SMI pada subjek 2 saat tekanan dikempiskan dapat diamati pada Gambar 4.14. Terlihat pada Gambar 4.14 nilai frekuensi spekel berada pada rentang nilai 0.1 – 0.6 Hz. Nilai frekuensi spekel saat tekanan dikempiskan mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan nilai frekuensi spekel saat diberikan tekanan di lengan. Hal ini dikarenakan saat tekanan dikempiskan pembuluh darah berada dalam kondisi normal kembali seperti semula dan mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk. Hal ini mengakibatkan meningkatnya nilai frekuensi spekel. Saat tekanan dikempiskan aliran darah yang mengalir menuju jari telunjuk lebih cepat, sehingga jarak antar partikel sel darah merah lebih rapat. Frekuensi spasial memiliki nilai tinggi jika berada pada struktur yang rapat. Sehingga dapat dianalisis berdasarkan Gambar 4.14 saat aliran darah lebih cepat maka jarak antar partikel sel darah merah lebih rapat. Saat laser menyinari permukaan kulit dengan aliran darah di permukaan yang cepat maka banyak sekali cahaya yang dihamburkan kembali ke dalam laser dioda, sehingga banyak terjadi interferensi. Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI warna biru menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih lambat. Sedangkan warna kuning serta hijau menunjukkan daerah yang memiliki frekuensi spekel yang tinggi, sehingga aliran darah pada daerah tersebut lebih cepat.

Berdasarkan hasil pengolahan sinyal SMI menggunakan metode *continuous wavelet transform* pada Matlab menunjukkan bahwa spekel yang terbentuk sangat dinamis karena memiliki nilai frekuensi yang berbeda-beda pada setiap titik dalam fungsi waktu yang berbeda. Sehingga pemberian 3 perlakuan yang berbeda pada kedua subjek penelitian menghasilkan pola spekel yang berbeda-beda satu sama lain. Hasil pengolahan sinyal menggunakan metode CWT menunjukkan pola spekel yang terbentuk dapat diamati dalam persebaran warna yang memiliki nilai frekuensi yang berbeda. Warna dengan kontras tinggi seperti kuning menunjukkan bahwa pada daerah tersebut memiliki nilai frekuensi spekel yang tinggi sehingga aliran

darah yang mengalir pada daerah tersebut lebih cepat. Sebaliknya warna dengan kontras rendah seperti biru menunjukkan bahwa pada daerah tersebut memiliki nilai frekuensi spekel yang rendah sehingga aliran darah yang mengalir pada daerah tersebut lebih lambat.

Secara umum pola spekel yang dihasilkan berdasarkan metode SMI ini dapat digunakan untuk mengetahui tingkat aliran darah pada permukaan kulit. Frekuensi spekel yang dihasilkan memiliki hubungan dengan kecepatan aliran darah. Daerah yang memiliki aliran darah yang aktif memiliki frekuensi spekel yang lebih tinggi, sebaliknya frekuensi spekel lebih rendah pada daerah dengan aliran darah yang kurang aktif. Pemberian perlakuan berupa tekanan sebesar 200 mmHg pada lengan atas subjek kemudian mengempiskannya kembali juga mempengaruhi frekuensi spekel yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Sensor optik berbasis *self-mixing interferometry* dapat digunakan untuk menganalisa pola spekel karena memiliki kemampuan menangkap sinyal balik dari target difus seperti permukaan kulit sehingga terjadi interferensi acak pada rongga laser dioda dan fotodioda mendeteksi sebagai spekel.
2. Hubungan antara frekuensi spekel dan aktivitas aliran darah pada permukaan kulit telah diamati. Daerah dengan warna kontras tinggi memiliki nilai frekuensi spekel yang tinggi, hal ini menandakan bahwa pada daerah tersebut kecepatan aliran darah tinggi. Sebaliknya daerah dengan warna kontras rendah memiliki nilai frekuensi spekel yang rendah, sehingga menandakan bahwa pada daerah tersebut kecepatan aliran darah rendah.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian *self-mixing interferometry* (SMI) selanjutnya adalah :

1. Menggunakan software pengolah sinyal lain untuk membandingkan hasil pola spekel yang terbentuk
2. Menambah variasi objek pengukuran dengan berbagai kondisi lain sebagai pembandingan.
3. Menggunakan penguat sinyal output SMI yang lebih baik spesifikasinya agar diketahui dengan pasti nilai penguatannya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Arduino (2018), Arduino Due dan Arduino Uno, Laman Resmi Arduino
- Arasanz, A, F J Azcona, S Royo, A Jha, and J Pladellorens. 2014. "A New Method for the Acquisition of Arterial Pulse Wave Using Self-Mixing Interferometry." *Optics & Laser Technology* 63: 98–104. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.04.004>.
- Assad, El. 2008. "Analysis of Self-Mixing Moderate and Strong Feedback Regimes for Mechatronics Applications," 0–141.
- Atashkhouei, Reza, Santiago Royo, and Francisco Azcona. 2011. "Analysis and Control of Speckle Effects in Self-Mixing Interferometry," 2–5.
- Dickmann. 2003. "Fabry Perot Resonator."
- Donati, Silvano, Life Fellow, and Giuseppe Martini. 2013. "Speckle Pattern Errors in Self-Mixing Interferometry" 49 (9): 798–806.
- El Assad, Joseph. 2008. "Analysis of Self-Mixing Moderate and Strong Feedback Regimes for Mechatronics Applications." PhD Thesis. October 22, 2008. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001790/>.
- Giuliani, Guido, Michele Norgia, Silvano Donati, and Thierry Bosch. 2002. "Laser dioda Self-Mixing Technique for Sensing Applications." *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 4 (6): S283–S294. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/4/6/371>.
- Hill, Jason. 2005. "Laser dioda Technology And Applications."
- Jha, Ajit, Francisco J Azcona, Carlos Ya, and Santiago Royo. 2015. "Extraction of Vibration Parameters from Optical Feedback Interferometry Signals Using Wavelets," 1–10.
- Jiang, Chunlei, Zihua Zhang, and Chengwei Li. 2016. "Vibration Measurement Based on Multiple Self-Mixing Interferometry." *Optics Communications* 367 (May): 227–33. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.01.032>.
- Magnani, Alessandro, Dario Melchionni, Alessandro Pesatori, and Michele Norgia. 2016. "Self-Mixing Digital Closed-Loop Vibrometer for High Accuracy Vibration Measurements." *Optics Communications* 365 (April): 133–39. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.002>.
- Marti, L. 2012. "Vibrometer Based on a Self-Mixing Effect Interferometer." *Revista Mexicana de Fisica* 58: 422–27.
- O'Donnell, Brian F., Geoffrey F. Potts, Paul G. Nestor, Kiriaki C. Stylianopoulos, Martha E. Shenton, and Robert W. McCarley. 2002. "Spatial Frequency Discrimination in Schizophrenia." *Journal of Abnormal Psychology* 111 (4): 620–25. <https://doi.org/10.1037//0021-843x.111.4.620>.
- Ozdemir, S. K., S. Takamiya, S. Ito, S. Shinohara, and H. Yoshida. 2000. "Self-Mixing Laser Speckle Velocimeter for Blood Flow Measurement." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 49 (5): 1029–35. <https://doi.org/10.1109/19.872925>.
- Özdemir, Sahin Kaya, Isao Ohno, and Shigenobu Shinohara. 2008. "A Comparative Study for the Assessment on Blood Flow Measurement Using Self-Mixing

- Laser Speckle Interferometer.” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57 (2): 355–63. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.909473>.
- Pospiech, Matthias, and Sha Liu. 2003. “Diode Laser,” no. December: 1–24.
- Risnasari, Medika. 2014. “Penekanan Noise Pada Sinyal Ekg Menggunakan Transformasi Wavelet” 1 (1): 1–7.
- Tao, Yufeng, Ming Wang, Dongmei Guo, Hui Hao, and Qiang Liu. 2015. “Self-Mixing Vibration Measurement Using Emission Frequency Sinusoidal Modulation.” *Optics Communications* 340 (April): 141–50. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.10.071>.
- Wang, W. M., K. T. V. Grattan, A. W. Palmer, and W. J. O. Boyle. 1994. “Self-Mixing Interference inside a Single-Mode Diode Laser for Optical Sensing Applications.” *Journal of Lightwave Technology* 12 (9): 1577–87. <https://doi.org/10.1109/50.320940>.
- Wei, Lu. 2011. “Improving the Performance of Optical Feedback Self-Mixing Interferometry Sensing.”

LAMPIRAN A

Tabel A 1 Datasheet Laser Driver

Current Control (Constant Current Mode)	
Control Range	0 to ± 200 mA
Compliance Voltage	>10 V
Resolution	10 μ A
Accuracy	± 100 μ A
Noise Without Ripple (10Hz to 10MHz, rms, typ.)	<1.5 μ A
Ripple (50/60Hz, rms, typ.)	<1.5 μ A
Transients (typ.)	<0.2 mA
Drift, 24hours (typ., 0-10Hz, at constant ambient temperature)	<3 μ A
Temperature Coefficient	<50 ppm/ $^{\circ}$ C
Current Limit	
Setting Range	0 to >200 mA
Resolution	10 μ A
Accuracy	± 500 μ A
Power Control (Constant Power Mode)	
Photo Current Control Range	25 μ A to 10 mA
Photo Current Resolution	1 μ A
Photo Current Accuracy	± 10 μ A
Analog Modulation Input	
Input Resistance	10 kW
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode	DC to 250 kHz
Modulation Coefficient, CC Mode	20 mA/V $\pm 5\%$
Modulation Coefficient, CP Mode	1 mA/V $\pm 5\%$
Laser Current Monitor Output	
Load Resistance	>10 kW
Transmission Coefficient	50 V/A $\pm 5\%$
General data	
Maximum Power Consumption	25 VA
Weight	<3.1 kg

Tabel A.2 Absolut Maksimum Laser dioda

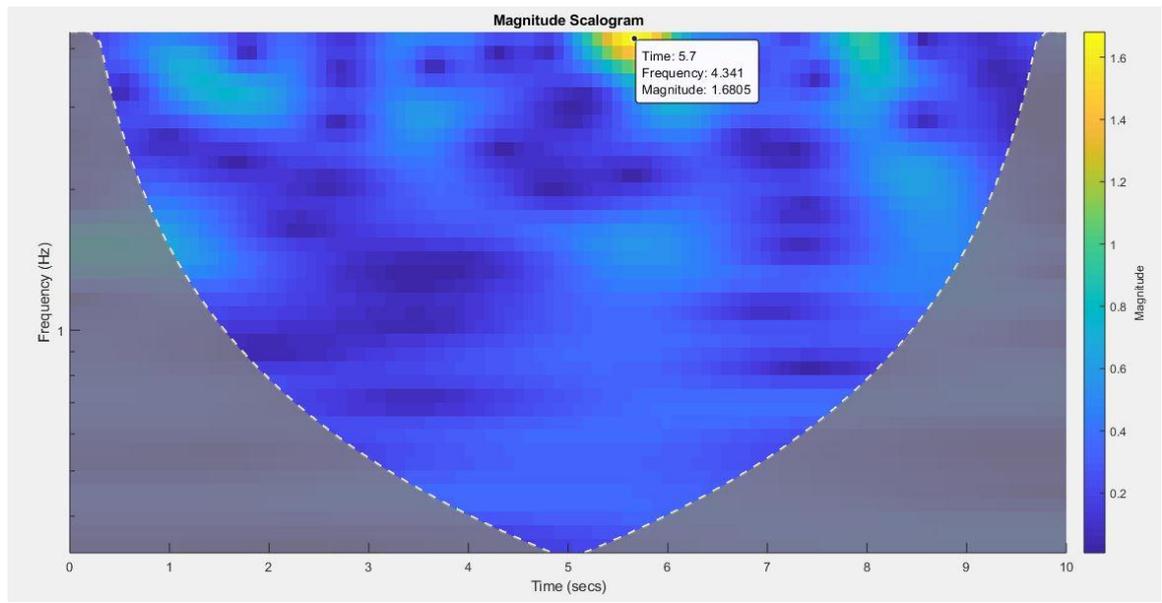
Specification	Symbol	Value
Optical Output Power	P_o	100 mW
LD Reverse Voltage	$V_{r(LD)}$	2 V
PD Reverse Voltage	$V_{r(PD)}$	30 V
Storage Temperature	T_S	-40 to 85 °C
Operating Case Temperature	T_C	-10 to 70 °C

Tabel A.3 Karakteristik tipe dan pengukuran Laser dioda

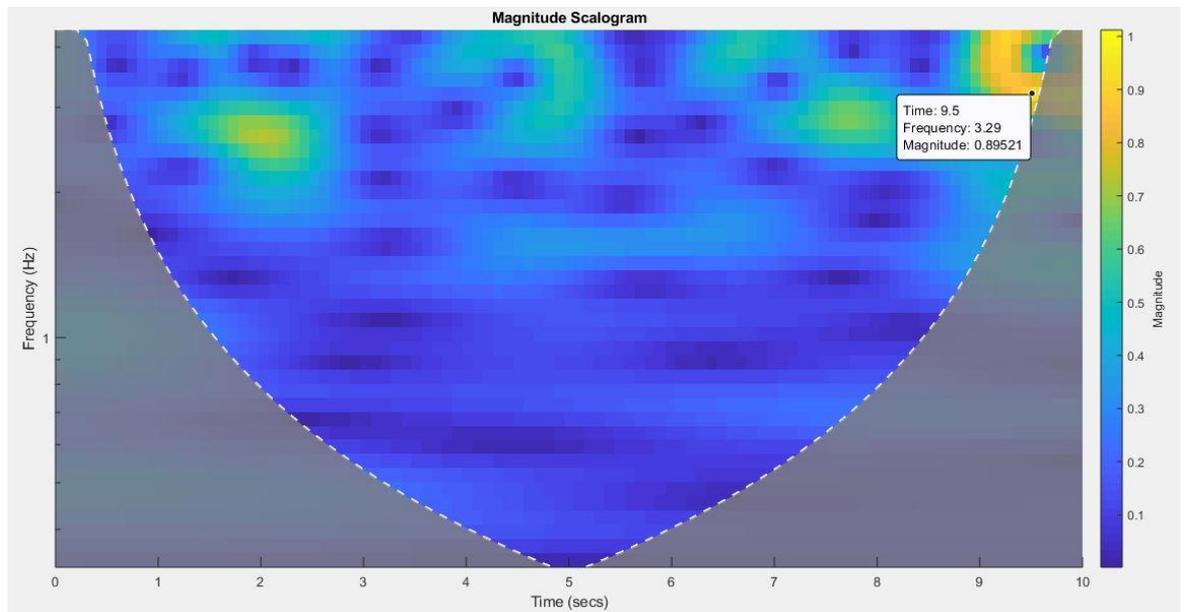
Specification	Symbol	Min	Typical	Max
Lasing Wavelength*	λ_p	775 nm	785 nm	795 nm
Optical Power	P_o	-	90 mW	100 mW
Threshold Current*	I_{th}	-	35 mA	60 mA
Operating Current*	I_{op}	-	120 mA	160 mA
Operating Voltage*	V_{op}	1.5 V	2.0 V	2.3 V
Slope Efficiency*	η	0.7 W/A	1.1 W/A	1.4 W/A
Astigmatism	A_s	-	-	15 μ m
Monitor Current	I_m	0.3 mA	0.5 mA	1.0 mA
Beam Divergence*	$\theta_{//}$	8°	9°	10°
	θ_{\perp}	15°	16°	20°
Beam Angle Deviation*	$\theta_{//}$	-2°	-	2°
	θ_{\perp}	-2°	-	2°
Emission Point Accuracy	ΔX	-80 μ m	-	80 μ m
	ΔY	-80 μ m	-	80 μ m
	ΔZ	-80 μ m	-	80 μ m

* $P_o = 90$ mW

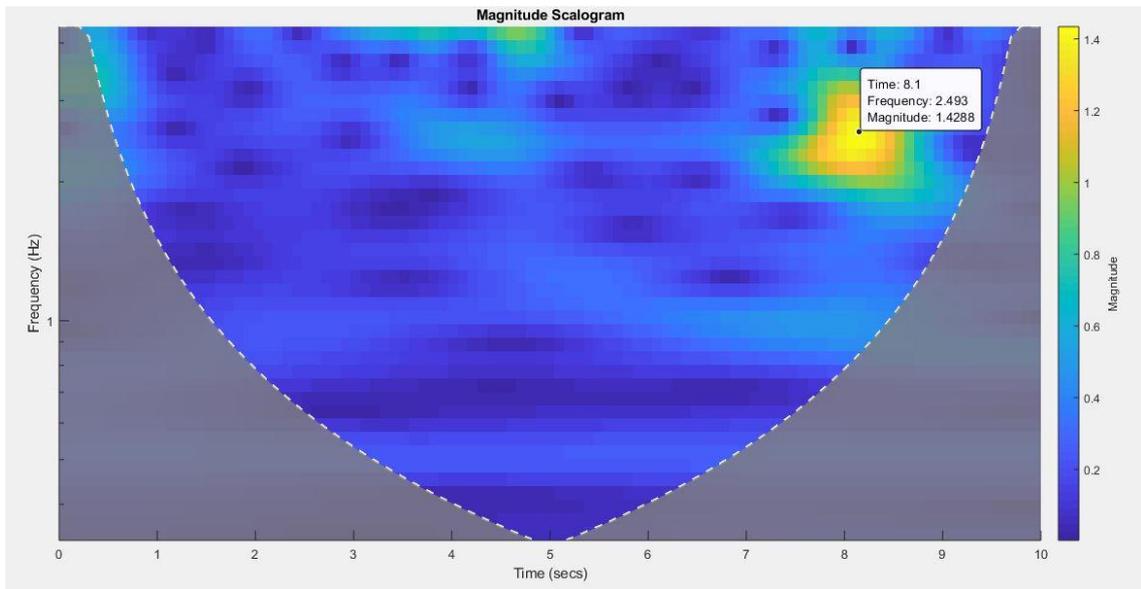
LAMPIRAN B
HASIL PENGOLAHAN SINYAL SMI MENGGUNAKAN *CONTINUOUS*
***WAVELET TRANSFORM* PADA MATLAB**



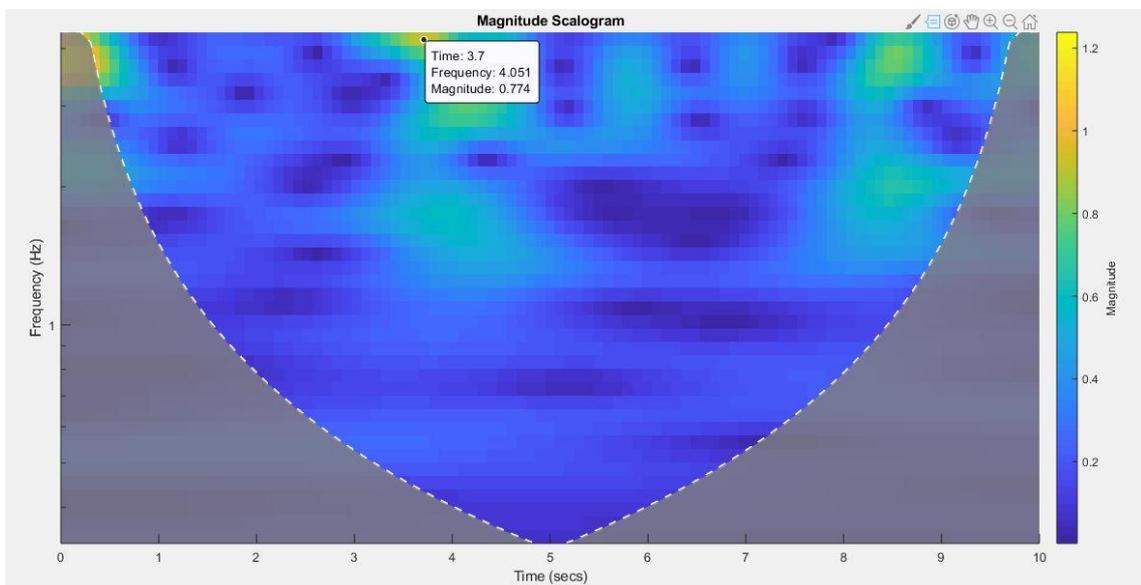
Gambar B.1 Hasil pengolahan sinyal SMI tanpa objek pengulangan ke 2



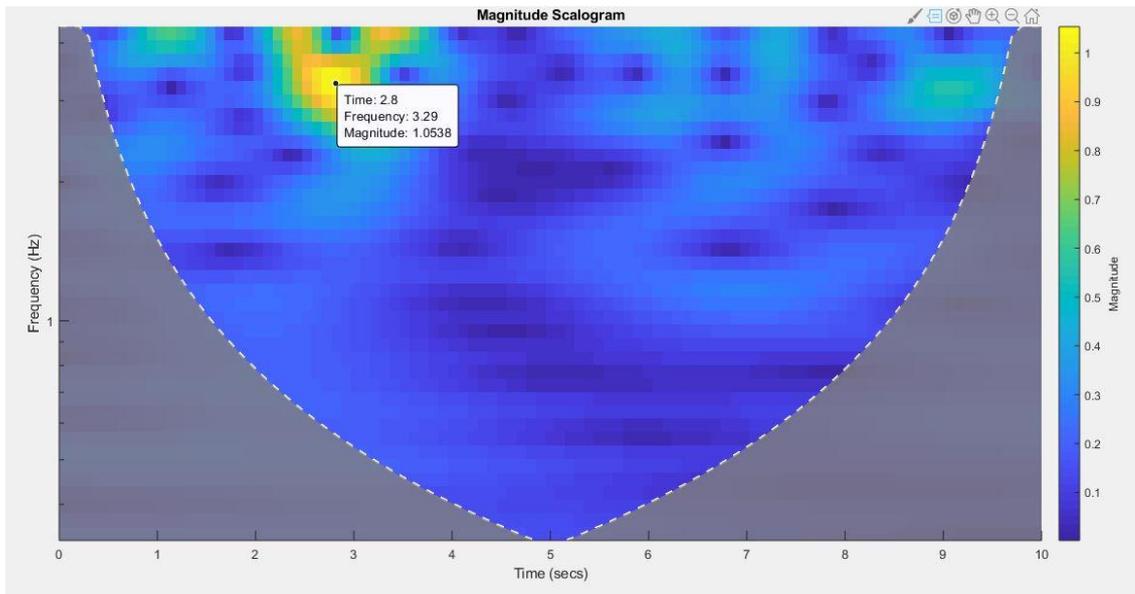
Gambar B.2 Hasil pengolahan sinyal SMI tanpa objek pengulangan ke 3



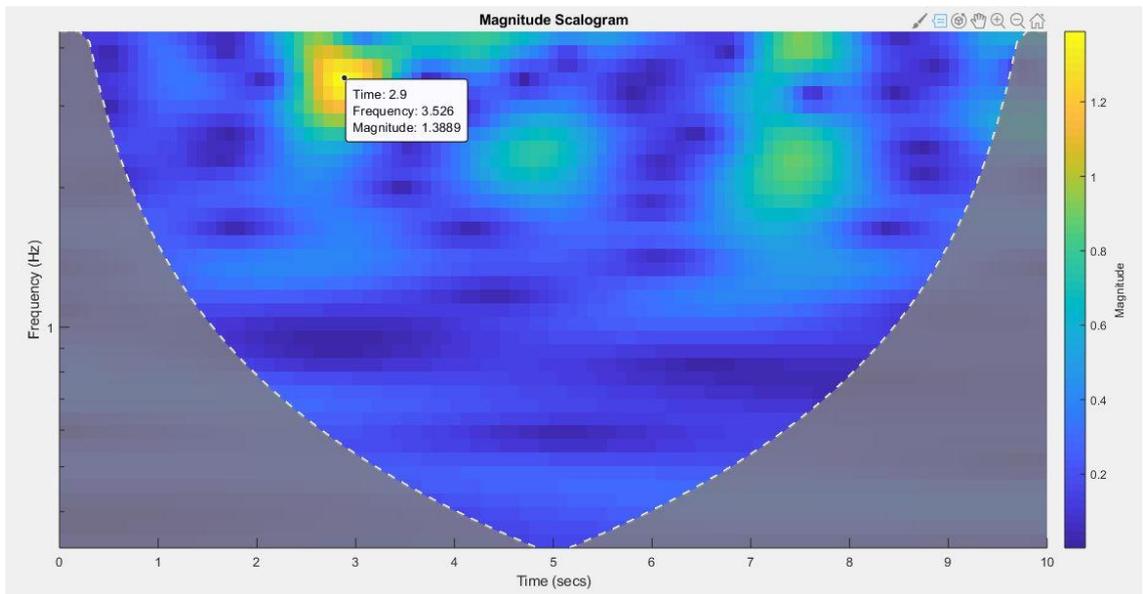
Gambar B.3 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-2



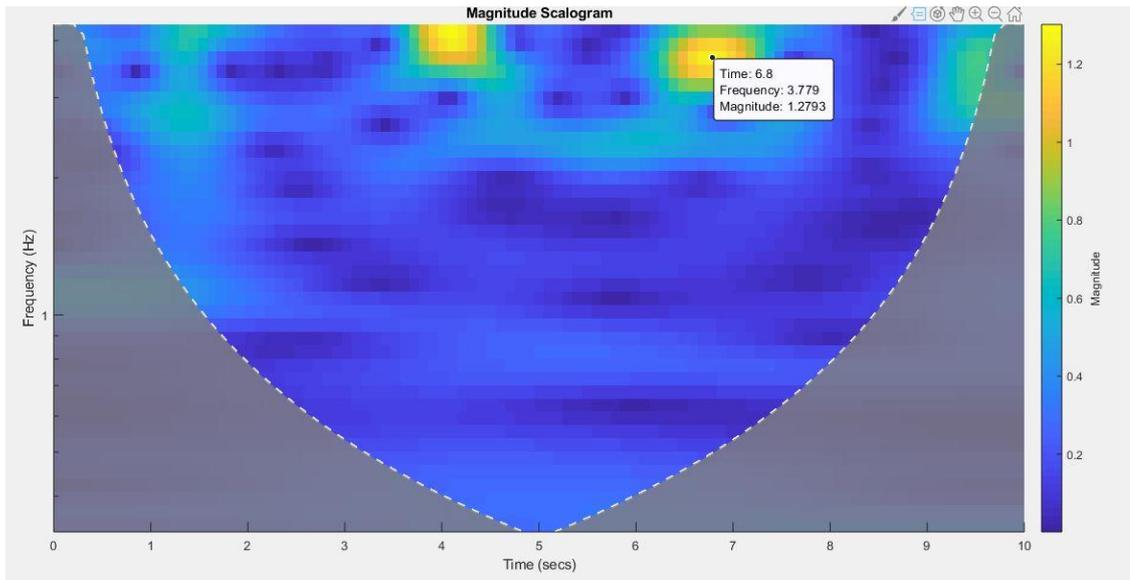
Gambar B.4 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 2



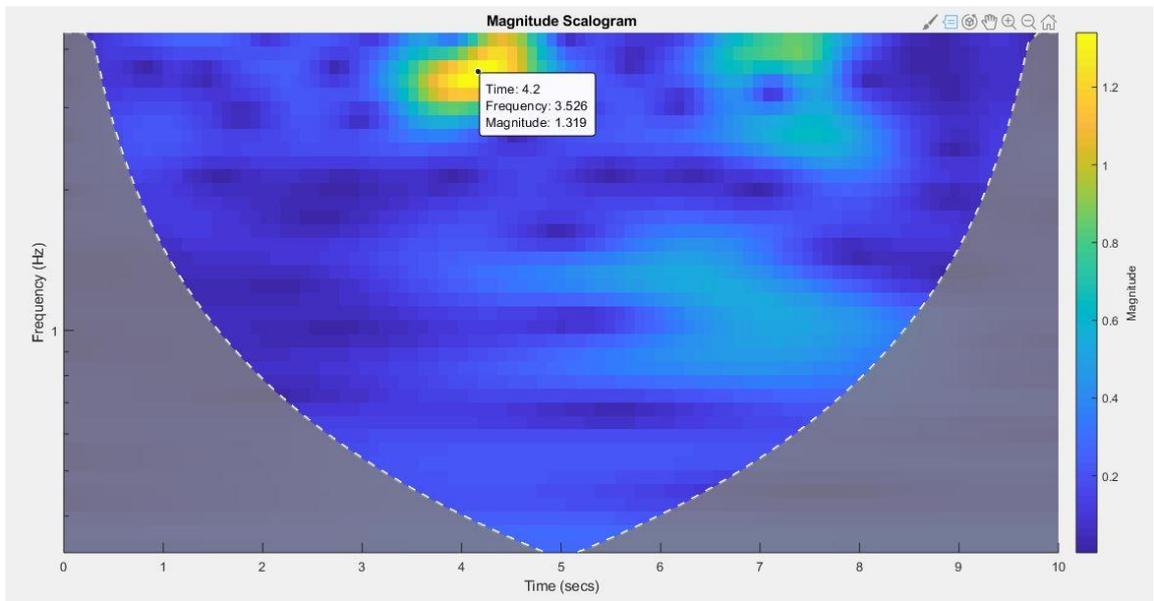
Gambar B.5 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 2



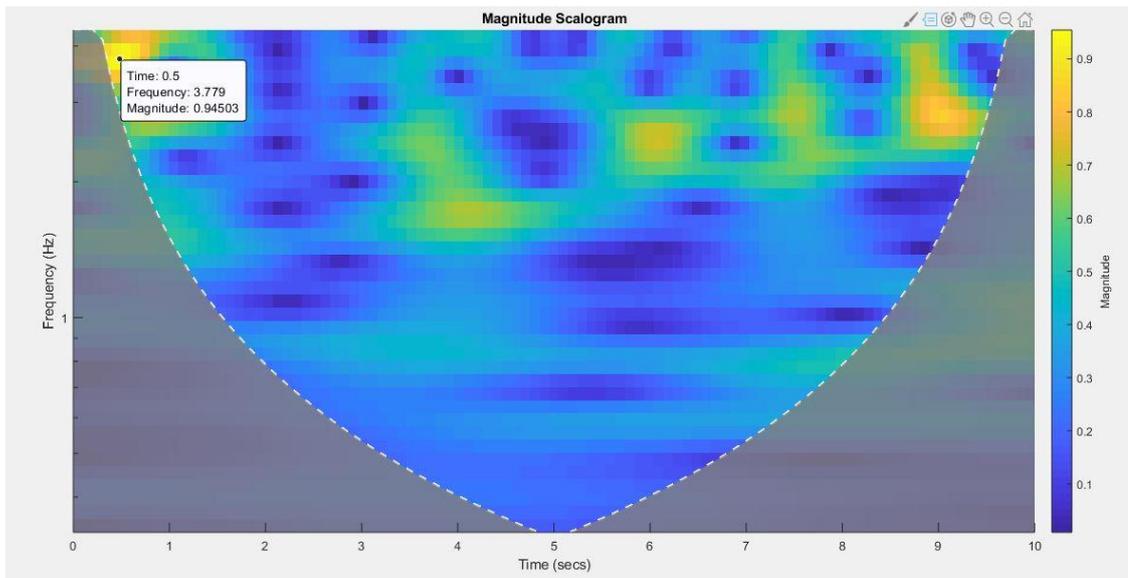
Gambar B.6 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-3



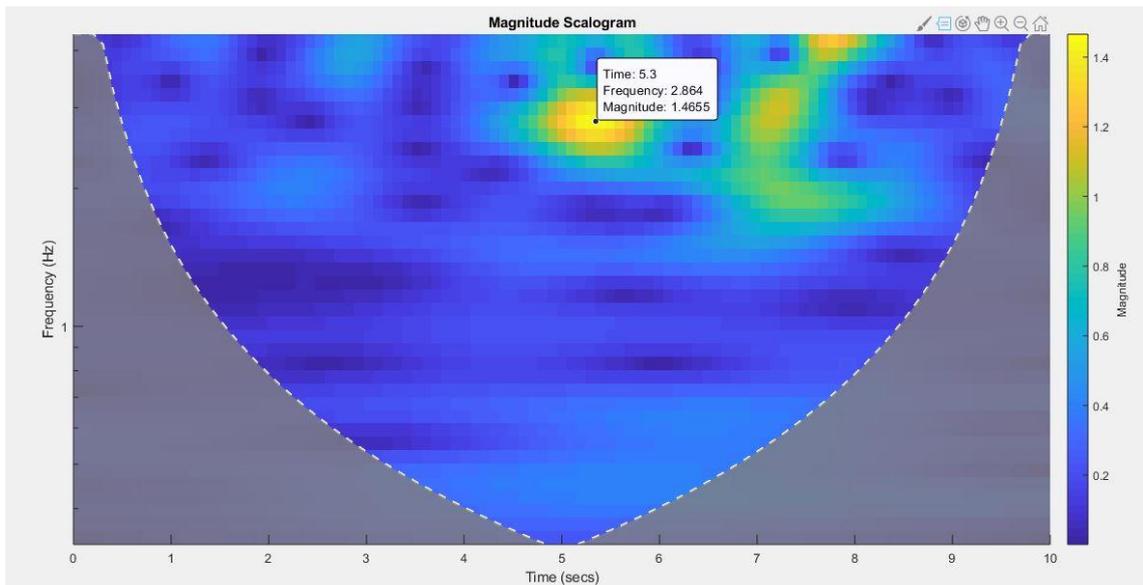
Gambar B.7 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 3



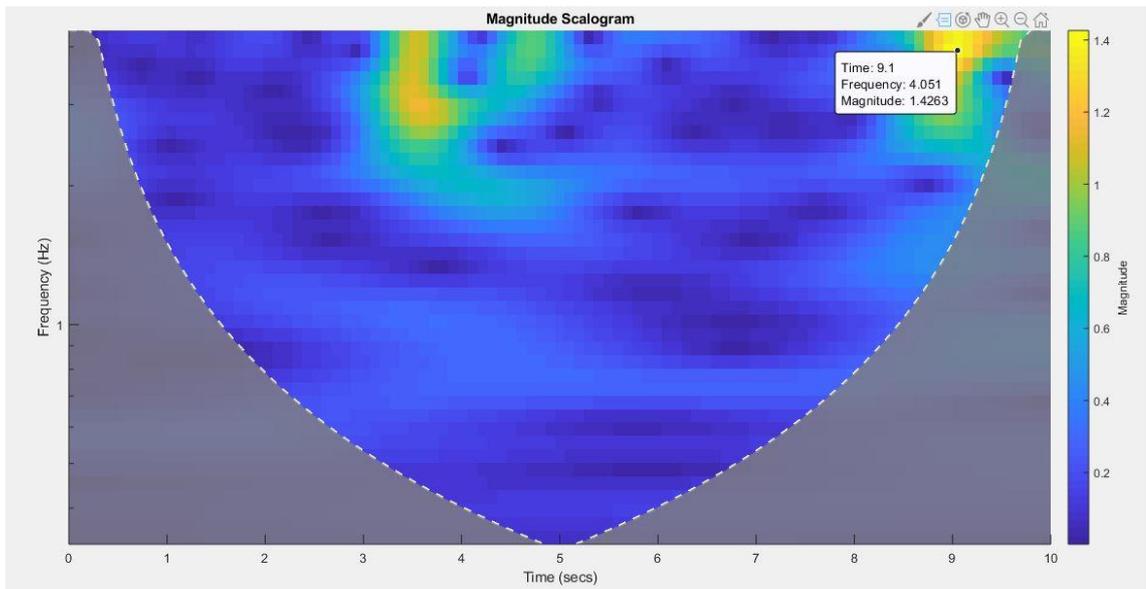
Gambar B.8 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 1 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 3



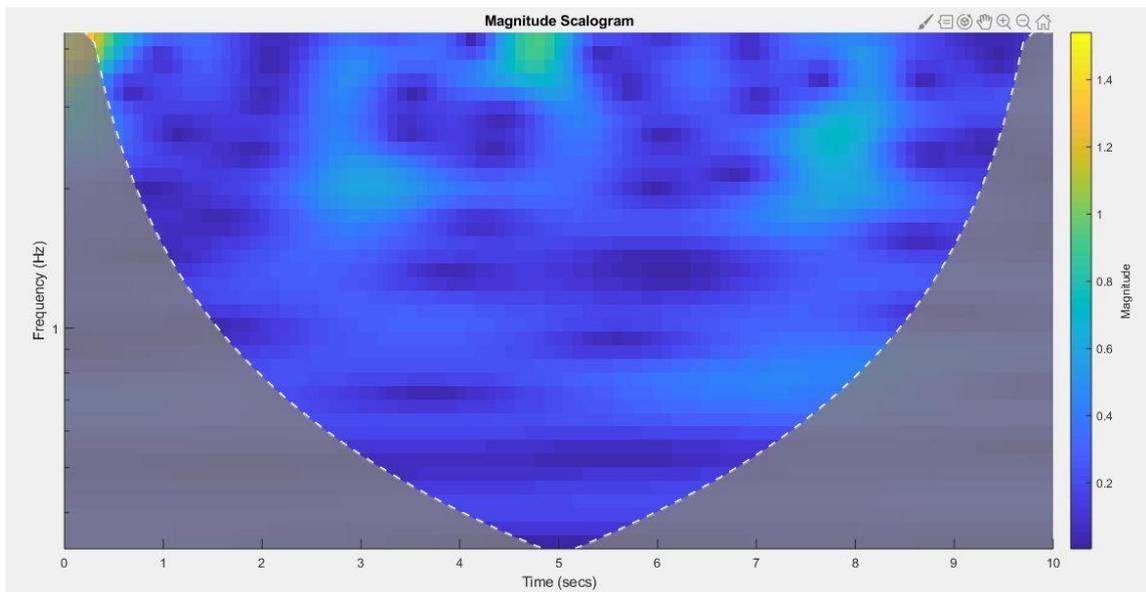
Gambar B.9 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-2



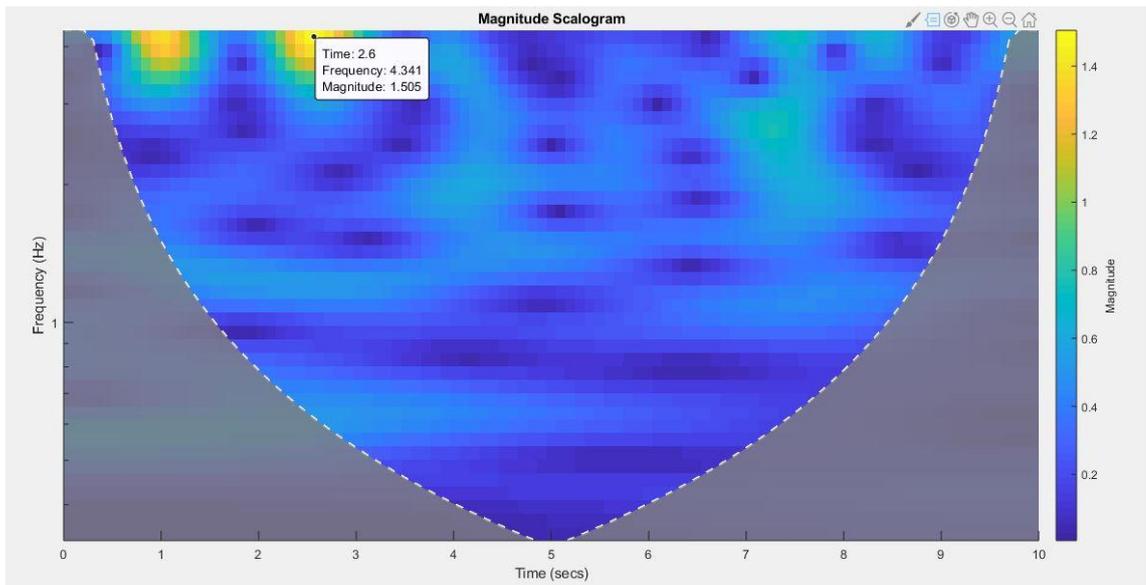
Gambar B.10 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 2



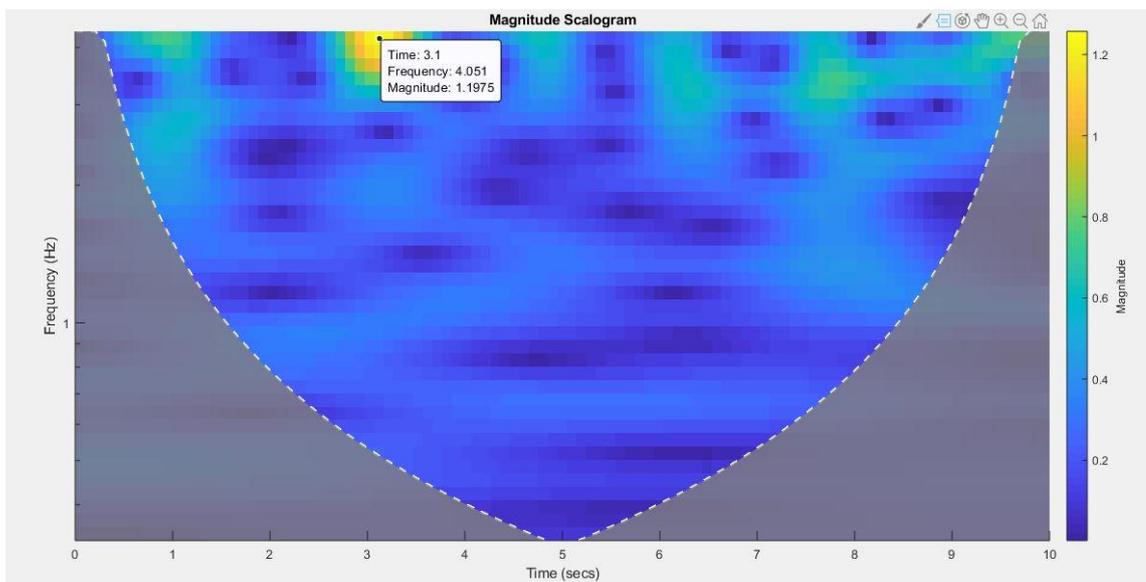
Gambar B.11 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 2



Gambar B.12 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 tanpa pemberian tekanan pengulangan ke-3



Gambar B.13 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat pemberian tekanan 200 mmHg pengulangan ke 3



Gambar B.14 Hasil pengolahan sinyal SMI objek telunjuk pada subjek 2 saat tekanan dilepaskan pengulangan ke 3

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Rahmi Intan Yunifar, lahir di Surabaya 16 Juni 1993. Anak pertama dari 3 bersaudara. Pendidikan formal ditempuh di MI Tarbiyatus Syarifah Sidoarjo, SMPN 2 Taman Sidoarjo, dan SMAN 1 Taman Sidoarjo tahun 2008-2011. Melalui jalur SNMPTN Undangan, pada tahun 2011 pendidikan dilanjutkan ke Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Di jurusan ini, penulis mengambil bidang minat Fisika Optik.

Setelah menyelesaikan program sarjana, penulis aktif mengajar siswa SD, SMP, SMA mata pelajaran IPA dan Matematika. Penulis juga pernah aktif mengikuti pelatihan membaca Al-quran metode Ummi hingga lulus sertifikasi guru Al-Quran pada tahun 2017. Tahun 2018, penulis melanjutkan program Pascasarjana di jurusan yang sama, yaitu Fisika Fakultas Ilmu Alam dengan bidang minat Fisika Medis dan Biofisika. Selama menjalani kuliah S2, penulis tetap aktif dalam dunia mengajar.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna, untuk itu penulis mengharapkan adanya saran, kritik serta masukan yang dapat disampaikan via email (rahmi.intan11@gmail.com)