

**PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK  
PENENTUAN KETEBALAN BAHAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE  
MIKRO**

**SKRIPSI**

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Negeri Yogyakarta  
Untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains



Oleh :

Widhi Mahardi Darma

NIM. 13306144017

**PROGRAM STUDI FISIKA  
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
2018**

**PERSETUJUAN**

Skripsi yang berjudul "**PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK PENENTUAN KETEBALAN BAHAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE MIKRO**" yang disusun oleh Widhi Mahardi Darma, NIM 13306144017 ini telah memenuhi syarat dan disetujui oleh pembimbing untuk diujikan.



Yogyakarta, 27 Maret 2018

Dosen Pembimbing,

Agus Purwanto, M.Sc.

NIP. 19650813 199512 1 001

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi

### PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK PENENTUAN KETEBALAN BAHAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE MIKRO

Disusun oleh:

Widhi Mahardi Darma

NIM. 13306144017

Telah dipertahankan di depan TIM Penguji Akhir Skripsi Program Studi Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta  
Yogyakarta pada tanggal 11 April 2018.

#### TIM PENGUJI

Nama/ Jabatan

Agus Purwanto, S.Si.,M.Sc.

Ketua Penguji/Pembimbing

Sumarna, M.Si., M.Eng.

Sekretaris

Dr. Restu Widiatmono, M.Si.

Penguji

Tanda Tangan

Tanggal

4/6/2018

4/6/2018

4/6/2018

Yogyakarta, 6 Juni 2018

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,

Dr. Hartono

NIP. 19620329 198702 1 002

## **SURAT PERNYATAAN**

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Widhi Mahardi Darma

NIM : 13306144017

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK PENENTUAN KETEBALAN BAHAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE MIKRO**" ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata tulis karya ilmiah yang telah lazim.

Yogyakarta, 27 Maret 2018

Yang menyatakan,

Widhi Mahardi Darma

NIM. 13306144017

## **MOTTO**

Yang terpenting adalah kamu tidak boleh menyerah. Jangan takut untuk memperlambat gerakmu; yang harus kamu takutkan adalah jika kamu mulai berhenti (Kim, 2010).

## **PERSEMBAHAN**

**Karya ini kupersembahkan untuk Bapak dan Ibuku, terima kasih atas kesabaran, kasih sayang dan doanya. Kakakku beserta istrinya, terima kasih atas berbagai pengalaman. Teman-temanku dari SD sampai kuliah yang telah memberiku semangat untuk terus berjuang.**

**PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK  
PENENTUAN BAHAN KETEBALAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE  
MIKRO**

**Oleh**  
**Widhi Mahardi Darma**  
**NIM 13306144017**

**ABSTRAK**

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan pengolahan citra digital. pergeseran pola frinji interferensi untuk menentukan ketebalan mica transparan. Pada penelitian ini hasil pengukuran ketebalan bahan tipis akan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari pengukuran menggunakan mikrometer sekrup.

Bahan yang digunakan adalah mica transparan yang secara umum digunakan sebagai sampul pada penjilidan makalah. Pola frinji diperoleh dari pola interferensi yang dihasilkan interferometer Michelson. Mica transparan diletakkan di salah satu lengan interferometer Michelson, kemudian sampel tersebut diputar perlahan dengan variasi sudut  $1^\circ$  sampai  $7^\circ$ . Hal ini mengakibatan pergeseran pola frinji akibat perubahan panjang lintasan optik. Hasil pergeseran pola frinji direkam, kemudian dengan bantuan pengolahan citra digital citra pola frinji diubah menjadi citra *greyscale* (keabuan) untuk memudahkan analisis jumlah pergeseran pola frinji untuk setiap variasi sudut. Setelah didapatkan pergeseran pola frinji ( $N$ ), maka ketebalan mica transparan ( $t$ ) dapat ditentukan.

Hasil perbandingan pengukuran ketebalan mica transparan pada orde mikro menggunakan metode inteferensi dengan bantuan pengolahan citra digital dan dengan mikrometer sekrup tidak jauh berbeda. Pengukuran dengan metode interferometer menghasilkan tebal mica transparan  $(0,067 \pm 0,003)$  mm, sedangkan dengan menggunakan mikrometer sekrup diperoleh  $(0,07 \pm 0,01)$  mm. Pengolahan citra digital pada frinji pola interferensi terbukti dapat meningkatkan ketelitian pengukuran dibandingkan hasil mikrometer sekrup.

Kata kunci: mica transparan, interferometer Michelson, pola frinji, pengolahan citra digital.

**DIGITAL IMAGE PROCESSING OF FRINGE INTERFERENCE PATTERN TO  
DETERMINE THE THICKNESS OF TRANSPARENT MICA IN MICRO ORDER**

**By**

**Widhi Mahardi Darma**

**NIM 13306144017**

**ABSTRACT**

The objective of this study was to utilize digital image processing to examine the shifting of interference patterns in order to determine the thickness of transparent mica. In this study the result of measurement of mica thickness will be compared with the result obtained from measurement using screw micrometer.

Transparent mica was used as that was generally used a cover on binding paper. The fringe pattern was derived from the interference pattern generated by the Michelson's interferometer. A sheet of transparent mica was placed in one of Michelson's interferometer arms, then the sample was rotated slowly with angle variations of  $1^\circ$  to  $7^\circ$ . The results of the fringe pattern shift were recorded, then by help of digital image processing, the image of the fringe pattern was transformed into a greyscale image to facilitate the analysis of the number of fringe patterns shifts for each angle variation. Having obtained the fringe shift ( $N$ ), the transparent mica thickness ( $t$ ) could be determined.

The comparison result of measurement of transparent mica thickness in micro order using interference method by help of digital image processing and by screw micrometer is not much different. Measurements using interferometer method resulted in a transparent mica thickness of  $(0.067 \pm 0.003)$  mm, while by using a screw micrometer obtained transparent mica thickness of  $(0.07 \pm 0.01)$  mm. Digital image processing on fringe interference patterns was proved could improve the precision of measurements compared with micrometers.

**Keywords:** transparent mica, Michelson interferometer, fringe pattern, digital image processing.

## KATA PENGANTAR

Alhamdulilah segala puji bagi Allah SWT atas segala rahmat, kekuatan dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul **“PENGOLAHAN CITRA DIGITAL FRINJI POLA INTERFERENSI UNTUK PENENTUAN KETEBALAN BAHAN MICA TRANSPARAN PADA ORDE MIKRO”**. Skripsi ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta.

Penulis menyadari sepenuhnya penelitian skripsi ini tidak dapat terlaksana dengan baik tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Hartono, selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta atas waktu dan perhatiannya.
2. Bapak Nur Kadarisman, M.Si, selaku Ketua Program Studi Fisika, Universitas Negeri Yogyakarta atas waktu dan perhatiannya.
3. Bapak Agus Purwanto, M.Sc, selaku dosen pembimbing yang telah memberi nasehat dan bimbingan secara intensif dalam proses penyusunan skripsi.
4. Ibu Laila Katriani, M.Si, selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberi nasehat, petunjuk, arahan serta bimbingan selama kuliah.

5. Teman-teman di Lab Elins yang telah memberi solusi dan bantuan dalam penyusunan skripsi.
6. Teman-teman Fisika E angkatan 2013 dan sahabat-sahabat seperjuangan atas bantuan do'a dan dorongan semangatnya.
7. Teman-teman semasa SMA (Faris, Faisal, Wischa, Oyin, Hudi) yang telah memberi candaan, semangat dan dukungannya.

Semoga kebaikan yang telah diberikan mendapat balasan yang setimpal dari Allah SWT, Amin. Penulis menyadari masih banyak kekurangan, untuk itu kiranya pembaca sudi memberikan kritik dan saran. Akhirnya, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Yogyakarta, Maret 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>PERSETUJUAN.....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	Error! Bookmark not defined.
<b>SURAT PERNYATAAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>v</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
A.Latar Belakang Masalah.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	3
C.Batasan Masalah .....	4
D.Rumusan Masalah.....	4
E.Tujuan Penelitian .....	5
F. Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
A.Indeks Bias.....	6
B. Interferensi .....	8
C. Interferometer Michelson .....	17
D. Kisi Difraksi.....	22
E. Laser.....	24

<b>F. Kamera.....</b>	<b>25</b>
<b>G.Citra Digital.....</b>	<b>27</b>
<b>H.Konversi RGB ke <i>GreyScale</i> .....</b>	<b>28</b>
<b>I. MATLAB .....</b>	<b>30</b>
<b>J. Kerangka Berfikir .....</b>	<b>33</b>
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>34</b>
<b>A.Waktu dan Tempat Penelitian.....</b>	<b>34</b>
<b>B.Penentuan Panjang Gelombang Laser HeNe .....</b>	<b>34</b>
<b>1. Variabel Penelitian.....</b>	<b>34</b>
<b>2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian .....</b>	<b>34</b>
<b>3. Prosedur Kerja .....</b>	<b>35</b>
<b>4. Teknik Analisis Data .....</b>	<b>36</b>
<b>C.Penentuan Indeks Bias Mica Transparan .....</b>	<b>37</b>
<b>1. Variabel Penelitian.....</b>	<b>37</b>
<b>2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian.....</b>	<b>38</b>
<b>3. Prosedur Kerja .....</b>	<b>38</b>
<b>4. Teknik Analisis Data .....</b>	<b>39</b>
<b>D.Penentuan Tebal Mica Transparan .....</b>	<b>39</b>
<b>1. Variabel Penelitian.....</b>	<b>39</b>
<b>2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian.....</b>	<b>40</b>
<b>3. Prosedur Kerja .....</b>	<b>41</b>
<b>4. Teknik Analisis Data .....</b>	<b>42</b>
<b>E.Diagram Alir .....</b>	<b>44</b>
<b>BAB IV PEMBAHASAN .....</b>	<b>45</b>
<b>A.Penentuan Panjang Gelombang Laser HeNe .....</b>	<b>45</b>
<b>B.Penentuan Indeks Bias Mica Transparan .....</b>	<b>47</b>
<b>C.Penetuan Ketebalan Mica Transparan.....</b>	<b>49</b>
<b>1. Pengambilan Citra Pola Frinji .....</b>	<b>50</b>
<b>2. Penentuan Ketebalan Mica Transparan.....</b>	<b>52</b>
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>60</b>

<b>A.Kesimpulan.....</b>	<b>60</b>
<b>B.Saran .....</b>	<b>61</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>62</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>64</b>

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 2.1 Beberapa indeks bias.....	8
Tabel 4.1. Hasil penentuan panjang gelombang laser HeNe.....	46
Tabel 4.2. Data hasil penentuan indeks bias mica transparan.....	48
Tabel 4.3 Data hasil jumlah pergeseran pola frinji pada mica transparan.....	56

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sinar yang melewati medium yang berbeda akan dibiaskan menjahui atau mendekati garis normal.....	6
Gambar 2.2. Intensitas pola interferensi sebagai fungsi beda fase.....	16
Gambar 2.3. Interferometer Michelson.....	18
Gambar 2.4. Beda lintasan pada mica transparan.....	19
Gambar 2.5. Difraksi gelombang cahaya.....	23
Gambar 2.6. Laser HeNe.....	25
Gambar 2.7. Diagram sketsa kamera.....	26
Gambar 2.8. Ruang koordinat 2-D dari citra digital $m \times n$ .....	27
Gambar 2.9. Ilustrasi dari warna RGB berbentuk kubus.....	28
Gambar 2.10. Perubahan jenis citra (a) citra RGB dan (b) citra <i>greyscale</i> .....	29
Gambar 2.11. Hasil dua fungsi untuk menampilkan citra pada Matlab (a) dengan fungsi <i>imshow</i> dan (b) dengan fungsi <i>imagesc</i> .....	31
Gambar 2.12. Contoh hasil fungsi <i>impixelinfo</i> pada matlab yang memperlihatkan informasi titik koordinat dan nilai pixel pada gambar frinji .....	31
Gambar 2.13. Hasil fungsi <i>impixelregion</i> .....	32

Gambar 3.1. Rangkaian alat untuk mengukur panjang gelombang laser HeNe.....	35
Gambar 3.2. Sudut $\theta$ yang dibentuk dari jarak kisi ke layar ( $L$ ) dan garis miring ( $x$ ) yang merupakan jarak antara pusat kisi ke difraksi orde- $n$ . .....	36
Gambar 3.3. Rangkaian alat untuk menentukan indeks bias.....	38
Gambar 3.4. Rangkaian alat interferometer Michelson untuk mendapatkan pola frinji.....	41
Gambar 4.1. Grafik hubungan antara $d \sin \theta$ dengan orde ke- $n$ .....	46
Gambar 4.2. Grafik antara $\sin \theta_r$ sebagai fungsi $\sin \theta_i$ hasil analisis <i>fitting linear</i> .....	48
Gambar 4.3. Pergeseran pola frinji dari sampel yang diputar $0^\circ$ - $5^\circ$ (a) waktu frame 1 (b) frame 2 (c) frame 3 dan (d) frame 4.....	50
Gambar 4.4. Citra <i>greyscale</i> pola frinji.....	53
Gambar 4.5. Nilai pixel pada waktu 1 fps di titik dengan koordinat (578,208).....	54
Gambar 4.6. Grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar $0^\circ$ sampai $5^\circ$ .....	55
Gambar 4.5. (a) Grafik untuk menentukan ketebalan mica transparan (b) hasil analisis <i>fitting linear</i> .....	57

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **A. Latar Belakang Masalah**

Perkembangan teknologi saat ini sangat pesat, banyak ilmuwan berlomba untuk membuat inovasi baru. Salah satunya dalam bidang fisika, karena teknologi berawal dari bidang fisika. Bidang fisika merupakan cabang ilmu pengetahuan alam yang mempelajari gejala atau fenomena alam. Fenomena alam diamati dengan melakukan pengukuran, sehingga dibutuhkan alat ukur untuk mengetahui ukuran suatu variabel fisika seperti panjang benda. Pada pengukuran panjang atau tebal ada berbagai jenis alat ukur yang sering digunakan seperti mikrometer sekrup atau jangka sorong. Berbagai jenis alat ukur tersebut mempunyai batasan jangkauan ukur dan ketelitian dalam pengukuran benda yang sangat tipis.

Salah satu cabang ilmu fisika adalah optik yang menjelaskan teori gelombang cahaya seperti fenomena interferensi. Cahaya mempunyai besaran amplitudo, panjang gelombang, fase dan kecepatan. Apabila cahaya melewati suatu medium maka kecepatannya akan mengalami perubahan. Jika perubahan kecepatan tersebut diukur, maka dapat diperoleh informasi tentang keadaan medium yang bersangkutan misal indeks bias, tebal medium dari bahan yang dilewatinya dan panjang gelombang sumbernya (Falah, 2006). Informasi tersebut didapatkan dari pengamatan pergeseran pola interferensi. Pola interferensi dapat diperoleh dari berbagai jenis interferometer, seperti interferometer Michelson, interferometer Twyman-Green dan interferometer Fabry-Perot. Pola interferensi yang terbentuk

pada interferometer Michelson lebih tajam dan lebih jelas dibanding hasil interferometer yang lain, baik interferometer Fabry-Perot maupun Twyman-Green (Halliday dkk, 2011: 456). Interferometer Michelson disusun oleh sumber cahaya yang koheren, dua buah cermin, dan pemecah berkas (*beam splitter*) (Nguyen and Kim, 2012: 2). Pola interferensi berbentuk rumbai-rumbai cerah dan gelap pada layar yang disebut dengan pola frinji. Pergeseran pola frinji disebabkan oleh perubahan panjang lintasan optik yang dipengaruhi oleh adanya sisipan bahan tipis pada perangkat interferometer Michelson. Interferometer adalah alat yang digunakan untuk mengukur panjang atau perubahan panjang lintasan optik berdasarkan garis-garis interferensi dengan sumber cahaya laser. Penggunaan interferometer memungkinkan untuk mengukur ketebalan sebuah benda yang tipis dengan ketelitian tinggi sampai dengan orde nano. Pergeseran pola frinji akan berpengaruh pada ketelitian dalam pengukuran bahan tipis, akan tetapi pola frinji sulit teramat dengan mata telanjang. Bantuan pengolahan citra digital dari rekaman pola frinji dapat mengurangi kesalahan dalam pengamatan pergeseran pola frinji.

Perkembangan pengolahan citra digital memberikan kemudahan dalam menyelesaikan permasalahan dalam bidang pengolahan gambar. Pengolahan citra digital dalam bidang fisika banyak digunakan untuk menganalisis deteksi tepi sebuah citra, memperbaiki noise, dan mengetahui informasi tentang nilai pixel. Jika pengolahan citra digital dimanfaatkan untuk membantu pengamatan pergeseran frinji, maka kesalahan pengamatan pergeseran pola frinji dapat diminimalisir

dengan memanfaatan pengolahan citra digital menggunakan perangkat lunak pengolah data numerik seperti Matlab. Data tersebut berupa sebuah citra digital yang berasal dari rekaman pergeseran pola frinji. Pada penelitian ini pengolahan citra digital digunakan untuk mengetahui pergeseran pola frinji pada metode interferensi untuk menentukan ketebalan bahan tipis. Bahan tipis tersebut diukur dengan menggunakan interferometer kemungkinan jangkuan ukurnya sampai dengan orde nano, karena sumber cahaya yang digunakan pada interferometer berukuran nanometer.

## B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dapat diidentifikasi berbagai permasalahan sebagai berikut:

1. Pengukuran ketebalan bahan tipis menggunakan pola interferensi membutuhkan set alat yang baik untuk interferometer Michelson, agar didapatkan pola frinji yang baik.
2. Pengamatan dan penentuan pergeseran pola frinji memerlukan hasil perekaman pola frinji yang baik dan konversi hasil rekaman menjadi citra pola frinji yang baik.
3. Tingkat ketelitian ketebalan bahan tipis dengan pengolahan citra pergeseran pola frinji perlu ditentukan.

### **C. Batasan Masalah**

Agar masalah yang muncul dapat diselesaikan dengan baik dan penelitian ini mencapai tujuan, maka diperlukan batasan masalah yang meliputi:

1. Sampel bahan yang diukur ketebalannya harus bahan yang transparan berwarna putih, karena cahaya harus dapat melewati sebuah medium untuk mendapatkan pola interferensi.
2. Bahan yang akan diukur adalah mica transparan yang biasa digunakan sebagai sampul pada pernjilidan makalah.
3. Sumber cahaya yang digunakan berasal dari laser gas HeNe.

### **D. Rumusan Masalah**

Sesuai dengan identifikasi masalah dan batasan masalah di atas, diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana set alat interferometer Michelson yang baik agar dapat digunakan pada pengukuran ketebalan mica transparan dengan pengolahan citra digital pola frinji?
2. Bagaimana cara mendapatkan hasil perekaman pola frinji yang baik dan konvensi hasil rekaman menjadi citra pola frinji?
3. Berapakah besar ketelitian pengukuran ketebalan mica transparan dengan menggunakan pengolahan citra pergeseran pola frinji?

## **E. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian adalah:

1. Mengeset alat interferometer Michelson yang baik agar dapat digunakan pada pengukuran ketebalan mica transparan dengan pengolahan citra digital pola frinji.
2. Mendapatkan hasil perekaman pola frinji yang baik dan konvensi hasil rekaman menjadi citra pola frinji.
3. Menentukan ketelitian pengukuran ketebalan mica transparan dengan menggunakan pengolahan citra pergeseran pola frinji

## **F. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan pengetahuan tentang pemanfaatan pengolahan citra digital untuk mengukur bahan tipis pada orde mikro.
2. Meningkatkan manfaat interferometer Michelson pada pengukuran besaran fisika.
3. Mengetahui cara mendapatkan pola frinji yang baik dengan menggunakan interferometer Michelson.

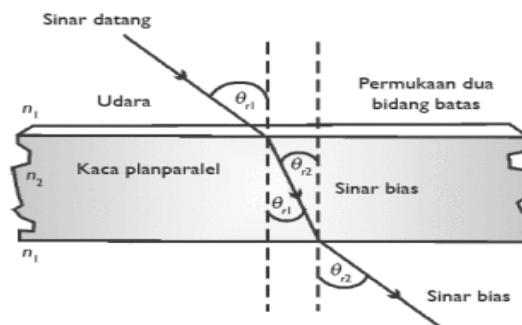
## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### A. Indeks Bias

Indeks biasa ( $n$ ) adalah perbandingan antara kecepatan cahaya dalam vakum (medium pertama) dengan kecepatan cahaya dalam medium kedua. Ketika sebuah berkas cahaya mengenai permukaan bidang batas yang memisahkan dua medium berbeda, seperti misalnya sebuah permukaan kaca, cahaya tersebut ada yang sebagian dipantulkan kembali dengan sudut yang sama dengan sudut datang dan sebagian cahaya akan dibiaskan masuk medium kedua. Perubahan arah dari sinar yang memasuki medium kedua disebut pembiasan (Tipler, 2001: 446). Pembiasan merupakan perubahan kecepatan cahaya akibat perbedaan medium yang menyebabkan perubahan lintasan cahaya (Hidayat dkk, 2011: 377).

Peristiwa pembiasan cahaya disebabkan oleh perbedaan dua medium yang memiliki indeks bias yang berbeda.



**Gambar 2.1.** Sinar yang melewati medium yang berbeda akan dibiaskan menjauhi atau mendekati garis normal (Karim dkk, 2008: 291).

Ketika seberkas cahaya bergerak dari suatu medium dengan indeks bias  $n_1$  ke dalam medium lain dengan indeks bias  $n_2$ , sinar akan berbelok mendekati garis normal ketika  $n_1$  lebih kecil dari  $n_2$  dan menjauhi garis normal ketika  $n_1$  lebih besar dari  $n_2$ . Seberkas sinar yang terefraksi terletak di dalam bidang datang dan memiliki sudut bias  $\theta_r$  yang berhubungan dengan sudut datang  $\theta_i$  (Halliday dkk, 2010: 378). Hasil ini ditemukan secara eksperimen di tahun 1621 oleh Willebrod Snell, seorang ilmuwan Belanda dan dikenal sebagai hukum Snellius (Snell) atau hukum pembiasan (Tipler, 2001: 448). Hukum Snellius dinyatakan dengan persamaan

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r \quad (2.1)$$

Persamaan di atas berlaku pada semua jenis gelombang cahaya yang mengenai sebuah permukaan bidang batas yang memisahkan dua medium,  $n_i$  dan  $n_r$  adalah konstanta tak berdimensi yang disebut indeks bias (Halliday dkk, 2010: 378). Untuk ruang hampa  $n_i = 1$ , maka nilai indeks medium 2 dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$n_r = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (2.2)$$

Indeks bias sebuah medium (kaca)  $n = n_r$  adalah perbandingan laju cahaya dalam ruang hampa  $c$  terhadap laju cahaya di dalam medium tersebut  $v$  (Tipler, 2001: 446):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

Indeks bias dari beberapa medium ditunjukkan pada Tabel 2.1

**Tabel 2.1.** Beberapa indeks bias (Halliday dkk, 2010: 379).

No	Medium	Indeks bias
1	Vakum	1 (tepat)
2	Udara	1,00029
4	Kaca krona ( <i>crown glass</i> )	1,52
5	Kaca flinta ( <i>flint glass</i> ) berat	1,65
6	Batu nilam	1,77
7	Kaca flinta ( <i>flint glass</i> ) paling berat	1,89

## B. Interferensi

Salah satu fenomena alam yang berhubungan dengan cahaya adalah interferensi dan difraksi. Interferensi ialah penggabungan secara superposisi dua gelombang atau lebih yang bertemu dalam satu titik di ruang. Sedangkan difraksi adalah pembelokan gelombang di sekitar sudut yang terjadi apabila sebagian muka gelombang dipotong oleh halangan atau rintangan (Tipler, 2001: 537).

Fenomena interferensi akan teramatii jika sumbernya koheren, atau perbedaan fase di antara gelombang konstan terhadap waktu. Karena berkas cahaya pada umumnya adalah hasil dari jutaan atom yang memancar secara bebas, dua sumber cahaya biasanya tidak koheren. Koheren dalam optika sering dicapai dengan membagi cahaya dari sumber tunggal menjadi dua berkas atau lebih, yang kemudian dapat

digabungkan untuk menghasilkan pola interferensi. Pembagian ini dapat dicapai dengan memantulkan cahaya dari dua permukaan yang terpisah (Tipler, 2001: 539).

Terdapat gelombang elektromagnetik ketika gelombang cahaya melawati dua celah yang berdekatan. Gelombang tersebut dibagi menjadi dua berkas gelombang dan akan berinterferensi saat kedua gelombang bergabung kembali. Dua gelombang cahaya diwakili oleh medan listrik  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$ , dan gelombang tersebut berosilasi pada frekuensi anguler ( $\omega$ ) yang sama. Fungsi dua gelombang tersebut diberikan oleh persamaan berikut:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \quad (2.4)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2.5)$$

$\omega$  adalah frekuensi sudut dari gelombang dan  $\phi$  adalah konstanta fase dari gelombang  $\vec{E}$  (Halliday dkk, 2010: 443). Pada suatu titik P, kedua gelombang tersebut berinterferensi sehingga menghasilkan  $\vec{E}_p$ , yang merupakan hasil resultan dari superposisi  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$ :

$$\vec{E}_p = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (2.6)$$

Karena  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$  berfluktuasi dengan cepat (sekitar  $10^{14}$  sampai  $10^{15}$  Hz), maka yang dapat terdeteksi adalah nilai rata – rata  $\vec{E}_p$  terdapat waktu (*time average*). Secara fisis efek tersebut adalah intensitas gelombang ( $\vec{I}$ ) yang sebanding dengan kuadrat amplitudo  $\vec{E}$ .

$$\vec{I} = \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}^2 \rangle \quad (2.7)$$

Maka intensitas pada titik P adalah:

$$\begin{aligned}\vec{I} &= \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_p^2 \rangle \\ \vec{I} &= \epsilon_0 \vec{c} \langle (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \rangle \\ \vec{I} &= \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2 + 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \end{aligned} \quad (2.8)$$

dimana  $\epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_1^2 \rangle$  dan  $\epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_2^2 \rangle$  merupakan intensitas dari gelombang  $\vec{I}_1$  dan  $\vec{I}_2$ .

Sedangkan  $\epsilon_0 \vec{c} \langle 2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle$  adalah nilai intensitas yang tergantung pada interaksi kedua gelombang yang dapat disebut juga dengan intensitas interferensi  $\vec{I}_{12}$ . Maka persamaan (2.8) menjadi:

$$\begin{aligned}\vec{I} &= \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \\ &\quad \vec{I}_{12} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Untuk intensitas interferensi dapat ditulis:

$$\vec{I}_{12} = 2\epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle \quad (2.10)$$

$\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$  adalah seperti pada persamaan (2.4) dan (2.5), maka nilai *dot product* keduanya adalah:

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega t + \phi_1) \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega t + \phi_2) \quad (2.11)$$

Persamaan di atas dapat disederhanakan dengan menggunakan indentitas trigonometri:

$$\alpha \equiv \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \phi_1 \text{ dan } \beta \equiv \vec{k}_2 \cdot \vec{r}_2 + \phi_2 \quad (2.12)$$

sehingga

$$2\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 = 2\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cos(\alpha - \omega t) \cos(\beta - \omega t) \quad (2.13)$$

Dengan bantuan rumus perkalian trigonometri  $2 \cos(A) \cos(B) = \cos(A + B) + \cos(B - A)$ , maka

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} [\langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle + \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle] \quad (2.14)$$

*Time average* pada persamaan (2.14) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \langle \cos(\beta - \alpha) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\beta - \alpha) dt \\ &= \cos(\beta - \alpha) \frac{1}{T} \int_0^T dt \\ &= \cos(\beta - \alpha) \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} \langle \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos(\alpha + \beta - 2\omega t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [\cos(\alpha + \beta) \cdot \cos 2\omega t + \sin(\alpha + \beta) \cdot \sin 2\omega t] dt \\ &= \frac{1}{T} \left[ \cos(\alpha + \beta) \int_0^T \cos 2\omega t dt + \sin(\alpha + \beta) \int_0^T \sin 2\omega t dt \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{T} \left[ \cos(\alpha + \beta) \left[ \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right]_0^T + \sin(\alpha + \beta) \left[ -\frac{1}{2\omega} \cos 2\omega t \right]_0^T \right] \\
&= \frac{1}{T} \left[ \cos(\alpha + \beta) \left( \frac{1}{2\omega} \right) \left[ \sin \frac{4\pi}{T} T - \sin 0 \right] \right. \\
&\quad \left. + \sin(\alpha + \beta) \left( -\frac{1}{2\omega} \right) \left[ \cos \frac{4\pi}{T} T - \cos 0 \right] \right] \\
&= \frac{1}{T} \left[ \cos(\alpha + \beta) \left( \frac{1}{2\omega} \right) [0 - 0] + \sin(\alpha + \beta) \left( -\frac{1}{2\omega} \right) [1 - 1] \right] \\
&= \frac{1}{T} [0 + 0] = 0
\end{aligned}$$

sehingga

$$2\langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cdot \cos(\beta - \alpha) = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cdot \cos(\vec{k} \cdot (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) + \phi_2 - \phi_1) \quad (2.15)$$

dimana  $(\vec{k} \cdot (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) + \phi_2 - \phi_1)$  adalah beda fase antara  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$ , seperti pada persamaan (2.4) dan (2.5). Jika didefinisikan

$$\delta = (\vec{k} \cdot (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) + \phi_2 - \phi_1), \quad (2.16)$$

$$\vec{I}_{12} = \epsilon_0 \vec{c} \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cdot \cos \delta. \quad (2.17)$$

Karena

$$\vec{I}_1 = \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_1^2 \rangle = \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \rangle \quad (2.18)$$

dan

$$\vec{I}_2 = \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_2^2 \rangle = \epsilon_0 \vec{c} \langle \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_2 \rangle \quad (2.19)$$

dengan mensubtitusikan persamaan (2.4) dan (2.5) ke persamaan (2.18) dan (2.19), maka

$$\vec{I}_1 = \epsilon_0 \vec{c} E_{01}^2 \langle \cos^2(\alpha - \omega t) \rangle \quad (2.20)$$

dan

$$\vec{I}_2 = \epsilon_0 \vec{c} E_{02}^2 \langle \cos^2(\beta - \omega t) \rangle \quad (2.21)$$

*Time average* pada persamaan (2.20) dan (2.21) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \langle \cos^2(\alpha - \omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\alpha - \omega t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T [\cos(\alpha - \omega t) \cdot \cos(\alpha - \omega t)] dt \end{aligned}$$

Dengan bantuan rumus perkalian trigonometri  $2 \cos(A) \cos(B) = \cos(A + B) + \cos(B - A)$ , maka

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} [\cos((\alpha - \omega t) + (\alpha - \omega t)) + \cos((\alpha - \omega t) - (\alpha - \omega t))] dt \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \int_0^T \cos(2\alpha - 2\omega t) dt + \int_0^T \cos(0) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \int_0^T [\cos 2\alpha \cdot \cos 2\omega t + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\omega t] dt + \int_0^T 1 dt \right] \\ &= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\alpha \int_0^T \cos 2\omega t dt + \sin 2\alpha \int_0^T \sin 2\omega t dt + \int_0^T 1 dt \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\alpha \left[ \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right]_0^T + \sin 2\alpha \left[ -\frac{1}{2\omega} \cos 2\omega t \right]_0^T + [t]_0^T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\alpha \left( \frac{1}{2\omega} \right) \left[ \sin \frac{4\pi}{T} T - \sin 0 \right] \right. \\
&\quad \left. + \sin 2\alpha \left( -\frac{1}{2\omega} \right) \left[ \cos \frac{4\pi}{T} T - \cos 0 \right] + T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\alpha \left( \frac{1}{2\omega} \right) [0 - 0] + \sin 2\alpha \left( -\frac{1}{2\omega} \right) [1 - 1] + T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \cdot [0 + 0 + T] \\
&= \frac{1}{2}
\end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned}
\langle \cos^2(\beta - \omega t) \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(\beta - \omega t) dt \\
&= \frac{1}{T} \int_0^T [\cos(\beta - \omega t) \cdot \cos(\beta - \omega t)] dt \\
&= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} [\cos((\beta - \omega t) + (\beta - \omega t)) + \cos((\beta - \omega t) - (\beta - \omega t))] dt \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \int_0^T \cos(2\beta - 2\omega t) dt + \int_0^T \cos(0) dt \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \int_0^T [\cos 2\beta \cdot \cos 2\omega t + \sin 2\beta \cdot \sin 2\omega t] dt + \int_0^T 1 dt \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\beta \int_0^T \cos 2\omega t dt + \sin 2\beta \int_0^T \sin 2\omega t dt + \int_0^T 1 dt \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\beta \left[ \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right]_0^T + \sin 2\beta \left[ -\frac{1}{2\omega} \cos 2\omega t \right]_0^T + [t]_0^T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\beta \left( \frac{1}{2\omega} \right) \left[ \sin \frac{4\pi}{T} T - \sin 0 \right] \right. \\
&\quad \left. + \sin 2\beta \left( -\frac{1}{2\omega} \right) \left[ \cos \frac{4\pi}{T} T - \cos 0 \right] + T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \left[ \cos 2\beta \left( \frac{1}{2\omega} \right) [0 - 0] + \sin 2\beta \left( -\frac{1}{2\omega} \right) [1 - 1] + T \right] \\
&= \frac{1}{T} \cdot \frac{1}{2} \cdot [0 + 0 + T] \\
&= \frac{1}{2}
\end{aligned}$$

Dari hasil *time average* di atas, maka persamaan (2.20) dan (2.21) menjadi

$$\vec{I}_1 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{c} E_{01}^2 \quad (2.22)$$

dan

$$\vec{I}_2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{c} E_{02}^2 \quad (2.23)$$

Jika diasumsikan  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$  tegak lurus ( $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$ ), maka  $\vec{I}_{12}$  pada persamaan (2.17) adalah sama dengan nol (0), karena sudut antara dua gelombang adalah

$90^\circ$ . Tetapi jika  $\vec{E}_1$  dan  $\vec{E}_2$  sejajar ( $\vec{E}_1 \parallel \vec{E}_2$ ), maka hasil dari perkalian *dot* pada persamaan (2.17) menjadi:

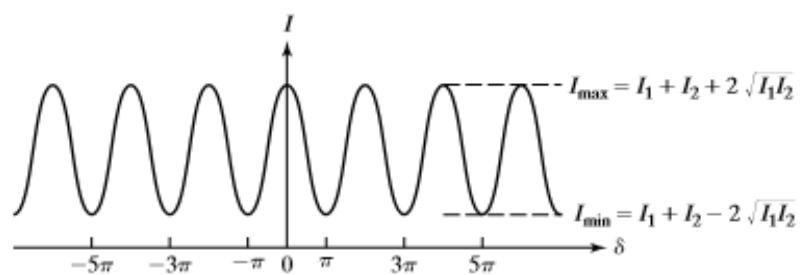
$$\vec{I}_{12} = 2\sqrt{\vec{I}_1 \vec{I}_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2.24)$$

Sehingga akhirnya dapat ditulis:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + 2\sqrt{\vec{I}_1 \vec{I}_2} \langle \cos \delta \rangle \quad (2.25)$$

Jadi besarnya intensitas gelombang hasil interferensi tergantung pada intensitas masing-masing gelombang dan tergantung pada beda fase kedua gelombang tersebut.

Intensitas ini memiliki nilai maksimum  $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + 2\sqrt{\vec{I}_1 \vec{I}_2}$  apabila  $\cos \delta = 1$ . Intensitas memiliki nilai minimum  $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 - 2\sqrt{\vec{I}_1 \vec{I}_2}$  apabila  $\cos \delta = -1$  (Pedrotti and Pedrotti, 1993:167).



**Gambar 2.2.** Intensitas pola interferensi sebagai fungsi beda fase (Pedrotti and Pedrotti, 1993:168).

### C. Interferometer Michelson

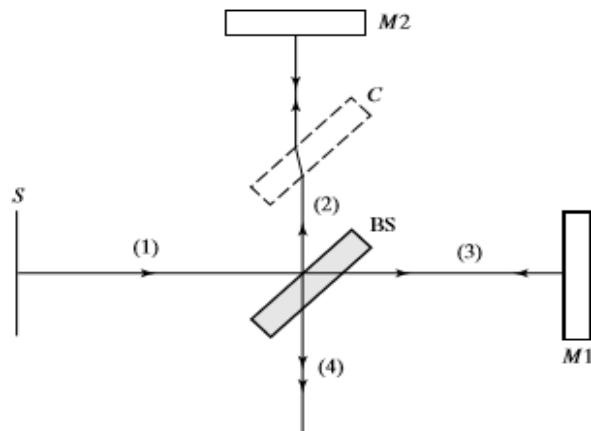
Alat yang digunakan untuk menghasilkan pola interferensi dari perbedaan panjang lintasan optik disebut interferometer. Alat ini dapat dipergunakan untuk mengukur panjang gelombang atau perubahan panjang gelombang dengan ketelitian sangat tinggi berdasarkan penentuan garis-garis interferensi, walaupun pada awal mula dibuat, alat ini dipergunakan untuk membuktikan ada tidaknya eter (Halliday and Resnick, 1978: 1013).

Interferometer itu sendiri berasal dari kata interferensi dan meter yang berarti suatu alat yang digunakan untuk mengukur panjang atau perubahan panjang dengan ketelitian yang sangat tinggi berdasarkan penentuan garis-garis interferensi (Halliday and Resnick, 1978: 1013).

Prinsip interferensi adalah kenyataan bahwa beda lintasan optik ( $D$ ) akan membentuk suatu frinji (Halliday dkk, 2010: 438). Pola interferensi tersebut dapat terbentuk dengan menggunakan interferometer. Interferometer memiliki berbagai macam susunan seperti interferometer Michelson, Fabry Perot dan Mach Zehnder (Falah, 2006). Interferometer Michelson memiliki susunan paling sederhana dan memiliki akurasi yang sangat tinggi diantara interferometer yang lain (Nugraheni, 2012). Interferometer Michelson disusun oleh sumber cahaya yang koheren, dua cermin, *beam splitter* dan detektor (Nguyen and Kim, 2012: 1).

Interferometer yang dikembangkan oleh A.A. Michelson pada tahun 1881 menggunakan prinsip pembagi amplitudo gelombang cahaya menjadi dua bagian yang berintensitas sama. Pembelahan amplitudo gelombang menjadi dua bagian dilakukan

dengan menggunakan pemecah berkas, yaitu *beam splitter*. Pola interferensi yang terbentuk pada interferometer Michelson lebih tajam, lebih jelas dan jarak antar frinjinya lebih sempit dibanding interferometer yang lain, baik interferometer Fabry-Perot maupun Twymwn-Green (Halliday and Resnick, 1999: 845).

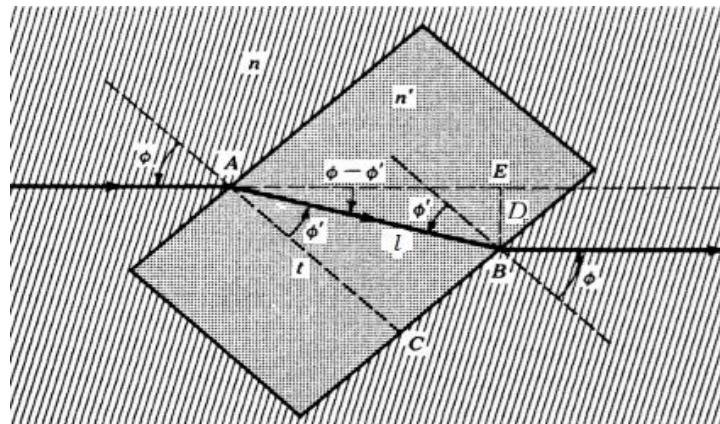


**Gambar 2.3.** Interferometer Michelson (Pedrotti and Pedrotti, 1993: 193).

Cahaya dari sumber mengenai plat BS, sebagian cahaya dipantulkan dan sebagian lagi diteruskan. Berkas yang diteruskan dari BS akan merambat ke cermin M1 dan dipantulkan kembali ke layar. Berkas yang dipantulkan oleh BS merambat ke plat C, terus ke cermin M2 dan dipantulkan kembali ke plat C dan kemudian ke layar. Plat C adalah kaca transparan yang dapat ditembus oleh cahaya. Cermin M1 dipasang tetap, tetapi cermin M2 dapat digerakkan maju-mundur. Kedua berkas bergabung di layar dan membentuk pola interferensi gelap terang (Tipler, 2001: 544).

Jika pada salah satu lengan interferometer disisipkan plat atau bahan tipis, maka akan mengakibatkan perubahan panjang lintasan optik yang ditempuh oleh berkas

cahaya dari sumber. Perubahan panjang lintasan optik dapat diketahui dari pergeseran hasil pola frinji yang terbentuk. Menurut Jenkins and White (1976:28), penentuan jumlah pergeseran pola frinji dapat dilakukan dengan memutar sampel sebesar  $\phi$  secara perlahan sehingga perubahan panjang lintasan optik merupakan fungsi tebal sampel. Beda lintasan optik ( $D$ ) dinyatakan sebagai selisih panjang lintasan optik antara posisi sampel sebelum diputar dan setelah diputar.



**Gambar 2.4.** Beda lintasan pada mica transparan (Jenkins and White, 1976: 29).

Pada Gambar 2.4 dapat dianalisis beda lintasan optik yang disebabkan karena pemutaran sampel. Dimulai dari segitiga  $ABE$  dapat diperoleh

$$D = l \sin(\theta) ; \theta = \phi - \phi'$$

$$D = l \sin(\phi - \phi')$$

$$D = l(\sin \phi \cos \phi' - \sin \phi' \cos \phi) \quad (2.26)$$

Dari segitiga  $ABC$  dapat diperoleh

$$l = \frac{t}{\cos \phi'} .$$

Subtitusi  $l$  ke persamaan (2.26), menghasilkan

$$D = t \left( \frac{\sin \phi \cos \phi'}{\cos \phi'} - \frac{\sin \phi' \cos \phi}{\cos \phi'} \right) \quad (2.27)$$

Dari hukum Snellius diperoleh

$$\sin \phi' = \frac{n_u}{n_m} \sin \phi$$

Subtitusi  $\sin \phi'$  ke persamaan (2.27) menghasilkan

$$D = t \left( \sin \phi - \frac{\cos \phi}{\cos \phi'} \frac{n_u}{n_m} \sin \phi \right)$$

$$D = t \sin \phi \left( 1 - \frac{n_u}{n_m} \frac{\cos \phi}{\cos \phi'} \right) \quad (2.28)$$

(Jenkins and White, 1976: 28-29)

Perbedaan fase keseluruhan dari lintasan sinar adalah  $180^\circ$  (dipantulkan dari cermin) dan ditambah dengan perbedaan fase akibat dari perbedaan lintasan optik. Interferensi destruktif terjadi apabila perbedaan lintasan ( $2D$ ) sama dengan nol atau kelipatan bulat dari panjang gelombang  $\lambda'$  (dalam sampel). Interferensi konstruktif terjadi jika perbedaan lintasan merupakan kelipatan ganjil dari setengah panjang gelombang.

Interferensi destruktif

$$N = \frac{2D}{\lambda'} \quad N = 0,1,2,3,\dots \quad (2.29)$$

Interferensi konstruktif

$$N + \frac{1}{2} = \frac{2D}{\lambda'} \quad N = 0,1,2,3,\dots \quad (2.30)$$

(Tipler, 2001: 540).

Saat sampel diputar perlahan sebesar  $\phi$  akan terjadi perubahan panjang lintasan optik, sehingga pada layar akan terlihat pergeseran frinji yang diakibatkan oleh peningkatan beda fase dari pemutaran sampel secara perlahan. Pada persamaan (2.29), hubungan antara peningkatan jumlah frinji gelap dengan beda lintasan optik diakibatkan pemutaran sampel sebesar  $\phi$ , ditunjukkan dengan persamaan:

$$N = \frac{2D}{\lambda'} \quad (2.31)$$

dimana

$$\lambda' = \frac{\lambda}{n_m}$$

Maka

$$N = \frac{2 n_m}{\lambda} \left( t \sin\phi \left( 1 - \frac{n_u}{n_m} \frac{\cos\phi}{\cos\phi'} \right) \right)$$

atau

$$t = \frac{N\lambda}{2 n_m \sin\phi \left(1 - \frac{n_u}{n_m} \frac{\cos\phi}{\cos\phi'}\right)} \quad (2.32)$$

Keterangan:

- $n_u$  = indeks bias udara
- $n_m$  = indeks bias mica transparan
- $N$  = pergeseran pola frinji
- $t$  = ketebalan bahan
- $\lambda$  = panjang gelombang laser

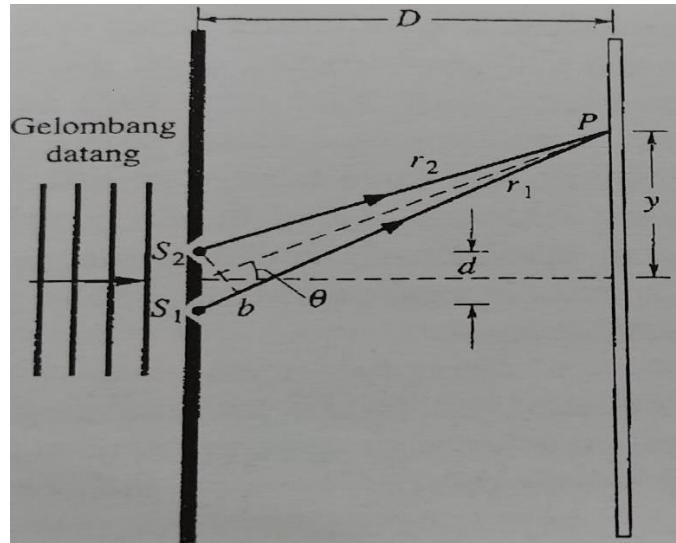
Persamaan (2.32) digunakan untuk menentukan tebal mica transparan saat sampel diputar perlahan sebesar  $\phi$ .

#### D. Kisi Difraksi

Difraksi adalah penyimpangan atau pembelokan arah rambat cahaya di sekitar tepi celah (Tipler, 2001: 434). Efek difraksi adalah karakteristik dari fenomena gelombang, yang dapat berupa cahaya atau bunyi dimana muka gelombang dibelokkan (Hecht, 2002: 443). Efek difraksi dapat digunakan untuk menentukan panjang gelombang dari berbagai warna dalam spektrum cahaya tampak.

Kisi difraksi terdiri dari sejumlah besar garis atau celah yang berjarak sama pada permukaan datar. Kisi dapat dibuat dengan memotong alur-alur berjarak sama pada kaca atau plat logam dengan mesin penggaris (Tipler, 2001: 565). Apabila cahaya monokromatik dilewatkan melalui celah-celah kisi akan terbentuk rumbai interferensi

yang dapat dianalisis untuk menentukan panjang gelombang cahaya (Halliday dkk, 2010: 481-482).



**Gambar 2.5.** Difraksi gelombang cahaya (Halliday dkk, 2010: 439).

Jarak antara celah pada kisi disebut tetapan kisi. Jumlah celah atau goresan tiap satuan panjang (cm) dinyatakan  $M$ , maka  $d = 1/M$ . Jika seberkas sinar dilewatkan kisi difraksi, berkas yang keluar dari celah kisi akan saling bertumpang-tindih pada titik P dan menghasilkan pola interferensi pada layar. Beda lintasan gelombang dari dua celah yang berdekatan adalah  $d \sin \theta$ , seperti pada Gambar 2.5. Dengan demikian interferensi maksimum pada suatu sudut  $\theta$  memenuhi:

$$d \sin \theta = n\lambda$$

Dari persamaan di atas dapat ditentukan panjang gelombang sebagai berikut

$$\lambda = \frac{d \sin \theta}{n} \quad (2.33)$$

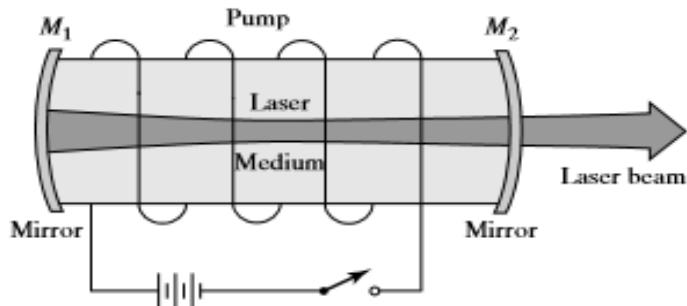
dengan  $n$  adalah orde difraksi,  $n = 1$  menyatakan maksimum orde ke-1 atau garis terang pertama,  $n = 2$  menyatakan maksimum orde ke-2 atau garis terang kedua, dan seterusnya. Kisi difraksi digunakan untuk mengukur panjang gelombang laser melalui peristiwa difraksi.

## E. Laser

LASER adalah singkatan dari *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, yang artinya penguatan intensitas cahaya oleh pancaran terangsang. Laser merupakan sumber cahaya koheren yang monokromatik dan lurus. Laser merupakan perkembangan dari MASER, huruf M berasal dari *microwave*. Cara kerja laser mencakup optika dan elektronika. Laser berada pada spektrum warna infra merah (750 nm) sampai warna ungu (380 nm), sedangkan maser memancarkan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang jauh lebih panjang (Pikatan, 1991:1).

Laser gas adalah jenis laser dimana campuran gas digunakan sebagai medium aktif laser. Salah satu laser gas yang sering digunakan adalah laser HeNe. Laser HeNe pertama kali ditemukan oleh Javan, Bennet dan Herriott pada tahun 1961. Laser HeNe merupakan laser gas pertama yang spektrumnya kontinu. Dalam laser helium-neon ada 3 bagian konstruksi yang penting, yaitu;

1. Bahan aktif laser
2. Sumber pompa (*power supply* tegangan tinggi)
3. Resonator (cermin pantul dan cermin pantul sebagian)



**Gambar 2.6.** Laser HeNe (Pedrotti and Pedrotti, 1993:146).

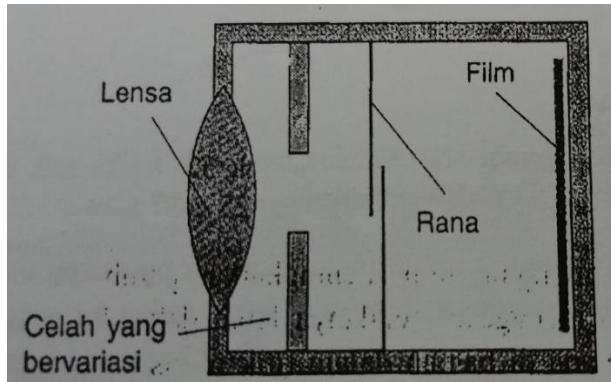
Bahan aktif laser terdiri dari gas helium dan neon yang terkandung dalam tabung kaca dengan tekanan rendah. Campuran gas sebagian besar terdiri dari 90% gas helium dan 10% gas neon (Laud, 1988: 105). Untuk menghasilkan sinar laser, sangat penting untuk mencapai inversi populasi. Mekanisme inversi populasi meliputi kombinasi dari tumbukan elektron dan dengan mentransfer elektron dari helium ke neon.

Inversi populasi dapat dicapai dengan memberi sumber daya ke elektroda yang berada pada *gain medium*. Cahaya yang dihasilkan akan dipantulkan oleh cermin-cermin dalam laser secara berulang-ulang dengan arah yang sama. Terdapat dua buah cermin, salah satu cermin memantulkan berkas foton secara sempurna dan yang lainnya memantulkan sebagian. Pemantulan dari cermin berfungsi untuk memperkuat cahaya laser yang akan membuat cahaya dapat keluar dari resonator (Laud, 1988: 105). Laser HeNe digunakan sebagai sumber cahaya yang koheren.

## F. Kamera

Kamera sederhana terdiri atas lensa positif, bukaan yang dapat berubah, rana yang dapat dibuka untuk waktu singkat yang dapat divariasikan, kotak kedap cahaya,

dan film seperti Gambar 2.7. Pemfokusan dilakukan dengan menvariasikan jarak lensa ke film dengan menggerakkan lensa lebih dekat atau lebih jauh dari film.



**Gambar 2.7.** Diagram sketsa kamera (Tipler, 2001: 520).

Jumlah cahaya yang mengenai film dapat dikendalikan dengan mengubah waktu pembukaan rana dan dengan mengubah-ubah ukuran bukaan. Untuk jenis film tertentu, terdapat jumlah optimum cahaya yang akan memberikan gambar dengan kekontrasan yang bagus. Cahaya yang terlalu sedikit akan menghasilkan gambar yang gelap; cahaya yang terlalu banyak akan menghasilkan gambar yang pucat dengan kontras yang kurang (Tipler, 2001: 520).

Ketika teknologi berkembang sangat pesat metode perekaman analog mulai digantikan digital, karena perkembangan sensor penangkap cahaya, maka revolusi digital dalam film dan fotografi tidak terelakan. Kamera SLR analog berubah menjadi DSLR (*digital single-lens reflex*). DSLR saat ini berevolusi menjadi kamera hybrid, yang mampu merekam foto dan video sekaligus (Riyadi, 2010: 921). Hasil pengambilan citra atau gambar dengan menggunakan kamera DSLR akan disimpan dalam berbagai macam format. Beberapa format gambar digital yang banyak

digunakan adalah BMP, JPEG, GIF, PNG dan lain-lain. Kamera DSLR dalam penelitian ini digunakan untuk merekam pergeseran pola frinji pada layar.

## G. Citra Digital

Citra digital dapat dianggap sebagai data representasi diskret yang memiliki informasi *spasial* (tata letak) dan tingkat kecerahan atau intensitas. Secara matematis, citra adalah fungsi kontinu dari intensitas cahaya pada bidang dua dimensi. Citra digital adalah citra  $I(m,n)$ , dimana indeks  $m$  dan  $n$  masing-masing menunjukkan baris dan kolom pada gambar.  $I(m,n)$  menunjukkan nilai pixel yang terletak di baris ke- $m$  dan kolom ke- $n$  yang dimulai dari pojok kiri atas pada gambar. Gambar 2.8 meperlihatkan koordinat 2-D citra digital  $m \times n$  (Solomon and Breckon, 2011: 1-2).

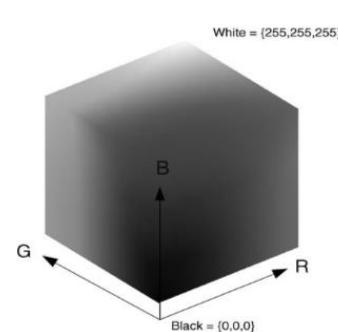


**Gambar 2.8.** Ruang koordinat 2-D dari citra digital  $m \times n$  (Solomon and Breckon, 2011: 2).

### 1. Colour image atau RGB

Pada *colour image* masing-masing pixel memiliki warna tertentu, warna tersebut adalah merah (*Red*), hijau (*Green*) dan biru (*Blue*). Rentang nilai paling kecil

adalah 0 dan paling besar adalah 255. Skala ini digunakan untuk mengungkapkan 8 digit bilangan biner, maka untuk RGB totalnya adalah  $255^3 = 16.581.375$  (16 K) variasi warna berbeda pada gambar, dimana variasi ini cukup untuk gambar apapun. *Colour image* terdiri dari 3 matriks yang mewakili nilai merah, hijau dan biru untuk setiap pixelnya, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



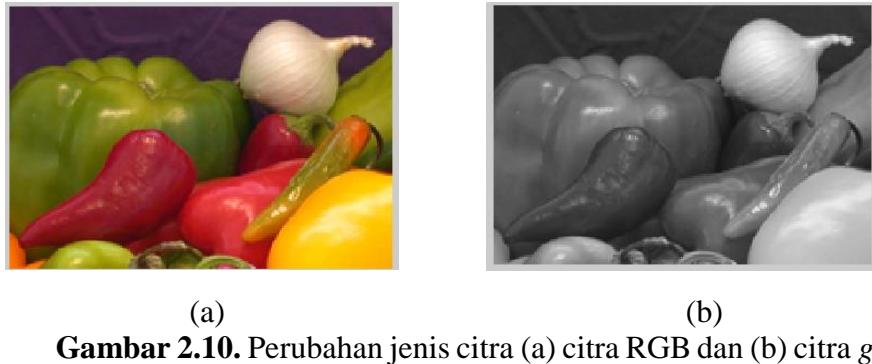
**Gambar 2.9.** Ilustrasi dari warna RGB berbentuk kubus (Solomon and Breckon, 2011: 11).

## H. Konversi RGB ke *GreyScale*

Citra *greyscale* adalah citra yang nilai pixelnya merepresentasikan derajat keabuan atau intensitas warna putih. Nilai intensitas paling rendah merepresentasikan warna hitam dan paling tinggi merepresentasikan warna putih. Citra *greyscale* hanya memiliki satu nilai kanal pada setiap pixelnya, dengan kata lain nilai bagian merah, hijau dan blue adalah sama. Citra *greyscale* memiliki kedalaman pixel 8 bit (256 kombinasi warna keabuan).

Konversi RGB ke citra *greyscale* adalah langkah awal dalam analisis citra, karena dari 3 nilai warna merah, hijau dan biru diubah menjadi 1 nilai warna keabuan untuk setiap pixelnya. Meskipun citra *greyscale* mengandung lebih sedikit informasi

dari pada citra RGB, tapi dalam menganalisis nilai pixel citra *greyscale* lebih mudah dan akurat. Perubahan citra RGB ke citra *greyscale* dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 2.10.** Perubahan jenis citra (a) citra RGB dan (b) citra *greyscale*.

Gambar di atas adalah jenis citra RGB yang diubah ke citra *greyscale* dengan menggunakan fungsi *rgb2grey* pada Matlab. Citra RGB ( $I_{colour}$ ) diubah menjadi citra *greyscale* ( $I_{greyscale}$ ) dengan menggunakan transformasi berikut:

$$I_{greyscale}(n, m) = \alpha I_{colour}(n, m, r) + \beta I_{colour}(n, m, g) + \gamma I_{colour}(n, m, b) \quad (2.34)$$

Pada persamaan (2.34), citra *greyscale* pada dasarnya adalah rata-rata berbobot dari nilai pixel merah, hijau dan biru. Koefisien pembobotan ( $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$ ) ditetapkan sebanding dengan respon mata manusia terhadap masing-masing warna merah, hijau, dan biru ( $\alpha = 0.2989$ ,  $\beta = 0.5870$  dan  $\gamma = 0.1140$ ). Karena mata manusia secara alami lebih sensitif terhadap cahaya warna merah dan hijau, maka warna merah dan hijau diberi bobot yang lebih tinggi dari pada warna biru untuk memastikan bahwa keseimbangan intensitas relatif dalam citra *greyscale* yang dihasilkan serupa dengan citra RGB (Solomon and Breckon, 2011: 11-12).

## I. MATLAB

MATLAB berasal dari kata Matrix dan Laboratory karena didasarkan pada penggunaan matriks. MATLAB merupakan produk MathWorks, dan versi pertama dari MATLAB dirilis pada tahun 1984. Pertama kali diadopsi oleh sistem kontrol untuk teknik dan matematika terapan, namun seiring berjalananya waktu, banyak fungsi tertanam pada MATLAB, sehingga MATLAB berguna bagi ilmuwan dan insinyur dari berbagai disiplin ilmu. Sebagai contoh, MATLAB dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti telekomunikasi, pemrosesan sinyal dan gambar, sistem kontrol, matematika, pemodelan keuangan, bioteknologi, aeronautika, dan masih banyak lagi (Palamides and Veloni, 2011: 1).

Dalam bidang pemrosesan sinyal dan gambar, MATLAB sering digunakan sebagai tempat atau wadah untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik dari sebuah citra 2-D ataupun 3-D. Pada MATLAB tersedia beberapa fungsi yang dapat langsung digunakan untuk membantu proses analisis citra, seperti *imread*, *imwrite*, *imshow* dan lain-lain.

### 1. Menampilkan citra pada MATLAB

MATLAB menyediakan dua fungsi dasar untuk tampilan gambar, yaitu *imshow* dan *imagesc*. *imshow* berfungsi untuk menampilkan citra 2-D sesuai dengan data pada citra, misalnya nilai intensitas atau warna dengan rentang nilai 0-1 atau 0-255, sedangkan *imagesc* berfungsi menampilkan citra data dan menambah info skala luas pixel pada citra. Perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11.** Hasil dua fungsi untuk menampilkan citra pada MATLAB  
 (a) dengan fungsi *imshow* dan (b) dengan fungsi *imagesc*.

Jika ingin menampilkan banyak citra secara bersamaan, maka dapat dengan menggunakan fungsi *subplot*. Fungsi ini menciptakan sumbu dimana beberapa citra atau plot dapat ditampilkan (Solomon and Breckon, 2011: 15).

## 2. Mengakses nilai pixel

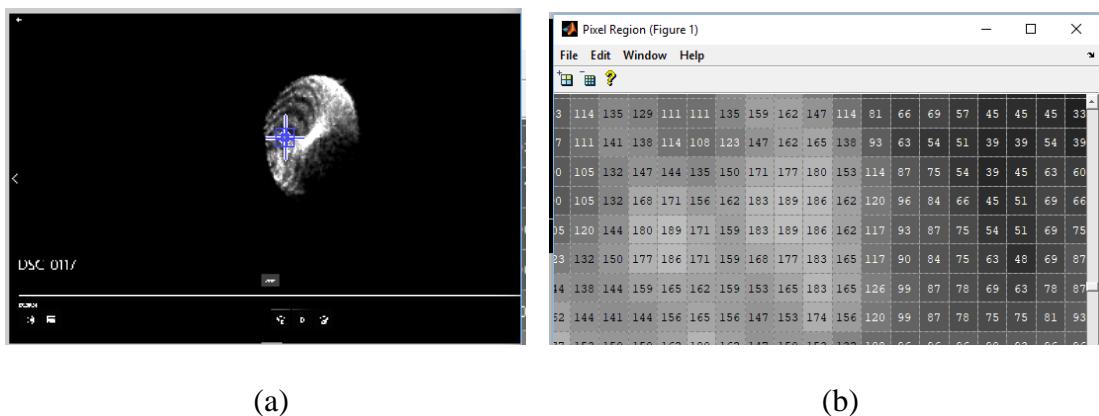
MATLAB menyediakan fungsi untuk mengetahui nilai pixel pada sebuah citra, yaitu dengan fungsi *impixelinfo*. *impixelinfo* dapat menampilkan informasi tentang nilai pixel pada citra di MATLAB. Sebagai contoh untuk citra *greyscale*, seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 2.12.** Contoh hasil fungsi *impixelinfo* pada matlab yang memperlihatkan informasi titik koordinat dan nilai pixel pada gambar frinji.

(706, 266) adalah titik koordinat dan 135 adalah nilai pixelnya. Informasi tersebut akan bervariasi, jika pointer pada citra dipindahkan pada titik koordinat yang berbeda-beda.

Fungsi *impixelinfo* memiliki kelemahan pada saat mencari nilai pixel dengan koordinat yang sangat luas, karena pointer sangat sensitif yang membuat titik koordinat berubah-ubah yang mempengaruhi untuk melihat nilai pixelnya. Kelemahan dari *impixelinfo* dapat diatasi dengan fungsi *impixelregion*. Fungsi *impixelregion* dapat menampilkan gambar *close-up* dari bagian lokasi pixel terkecil, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 2.13.** (a) Tampilan titik koordinat yang akan diamati nilai pixelnya (b) tampilan hasil fungsi *impixelregion* pada titik koordinat.

*Pixel region* adalah area target yang akan di-*close-up*. Untuk melihat lebih dekat piksel yang ditampilkan, dapat digunakan *zoom* pada *toolbar tool* di *pixel region*.

## J. Kerangka Berfikir

Pada penelitian ini pola frinji didapatkan dari alat interferometer Michelson karena pola frinji yang dihasilkan lebih jelas dan tajam. Prinsip interferensi menyatakan bahwa perubahan panjang lintasan optik akan menyebabkan pergeseran pola frinji. Panjang lintasan optik dapat dipengaruhi oleh adanya sisipan bahan tipis pada salah satu lengan interferometer Michelson. Pergeseran pola frinji dapat menghasilkan informasi tentang tebal bahan tipis, karena setiap penambahan sudut putar pada sampel akan mempengaruhi jumlah pergeseran pola frinji yang disebabkan oleh penambahan panjang lintasan optik. Pergeseran pola frinji yang terjadi sulit diamati dengan mata telanjang, maka pergeseran pola frinji direkam dengan kamera digital dan hasil rekaman dianalisis dengan melihat perubahan nilai pixel pada titik koordinat yang sama.

Bahan tipis yang ukur adalah mica transparan yang disisipkan pada salah satu lengan interferometer Michelson. Pergeseran pola frinji diperoleh dengan memutar sudut sampel secara perlahan-lahan sehingga membuat perubahan panjang lintasan optik. Hasil pergeseran pola frinji direkam lalu hasil rekaman diubah menjadi citra dengan bantuan *adobe premier*, kemudian citra RGB diubah menjadi citra *greyscale* (keabuan) untuk dianalisis jumlah pergeseran pola frinji untuk setiap variasi sudut dengan melihat nilai pixelnya. Setelah didapatkan pergeseran pola frinji ( $N$ ), maka akan didapatkan ketebalan mica transparan ( $t$ ). Hasil penentuan ketebalan mica transparan dengan menggunakan metode interferensi dengan bantuan pengolahan citra digital akan dibandingkan dengan mikrometer sekrup.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

#### **A. Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian dilakukan di laboratorium spektroskopi, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta. Penelitian dimulai dari bulan Februari 2017 sampai dengan Februari 2018.

#### **B. Penentuan Panjang Gelombang Laser HeNe**

##### **1. Variabel Penelitian**

Pada penentuan panjang gelombang laser HeNe, variabel bebas adalah orde difraksi ke- $n$  ( $n$ ), variabel kontrolnya adalah konstanta kisi difraksi ( $d$ ), jarak antara kisi difraksi dengan layar ( $L$ ) dan mica transparan, dan variabel terikatnya adalah sudut difraksi ( $\theta$ ).

##### **2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian**

###### **1. Laser HeNe**

Laser HeNe bermerk Shimadzu yang digunakan untuk sebagai sumber cahaya. Panjang gelombang dari laser HeNe adalah 632,8 nm.

###### **2. Kisi difraksi**

Kisi difraksi adalah alat yang digunakan untuk menganalisis panjang gelombang dari berbagai warna dalam spektrum cahaya tampak. Kisi difraksi yang digunakan adalah merk PUDAK Scientific yang mempunyai

3 macam garis atau celah yaitu 600 garis/mm, 300 garis/mm dan 100 garis/mm.

### 3. Penggaris

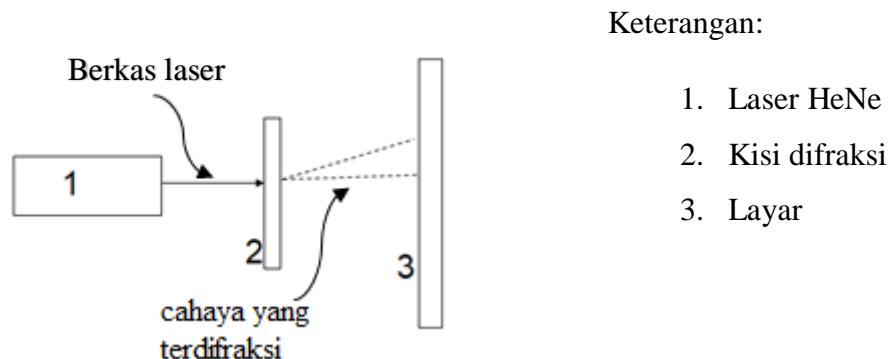
Penggaris digunakan untuk mengukur jarak antara layar dengan kisi dan orde ke- $n$  dengan orde ke-0 (terang pusat). Penggaris yang digunakan mempunyai skala terkecil sebesar 0,1 cm dan jangkauan ukur adalah 30 cm.

### 4. Layar

Layar digunakan untuk menampilkan orde difraksi dari percobaan kisi difraksi. Layar yang digunakan adalah dinding di Laboratorium Spektroskopi yang.

## 3. Prosedur Kerja

### 1. Mengatur alat seperti Gambar 3.1



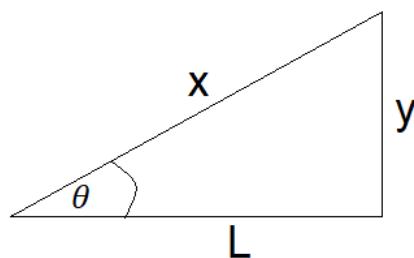
**Gambar 3.1.** Rangkaian alat untuk mengukur panjang gelombang laser HeNe.

### 2. Menyalakan laser (1) dan mengatur fokus sinar.

3. Mengarahkan laser pada kisi difraksi (2) yang memiliki ukuran kisi 600 garis/mm.
4. Mengukur jarak antara kisi difraksi (2) dengan layar (3).
5. Mengukur jarak antara orde ke-0 dengan orde ke- $n$  menggunakan penggaris.
6. Mengulangi langkah 3 sampai 5 dengan memvariasi kisi difraksi 300 garis/mm dan 100 garis/mm

#### 4. Teknik Analisis Data

Panjang gelombang laser dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.33). Pada persamaan tersebut terdapat variabel  $\theta$  yang sulit untuk didapatkan dalam percobaan, karena  $\theta$  merupakan sudut yang terbentuk dari jarak kisi ke layar dan garis miring ( $x$ ) yang merupakan jarak antara pusat kisi ke difraksi orde- $n$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2



**Gambar 3.2.** Sudut  $\theta$  yang dibentuk dari jarak kisi ke layar ( $L$ ) dan garis miring ( $x$ ) yang merupakan jarak antara pusat kisi ke difraksi orde- $n$ .

Pada Gambar 3.2.  $y$  adalah jarak antara orde ke-0 (terang pusat) dengan orde ke- $n$  yang dihubungkan oleh sudut  $\theta$ .  $L$  merupakan jarak dari kisi sampai ke layar. Untuk sudut  $\theta$ , dapat diperoleh

$$\sin \theta = \frac{y}{x}$$

$$\sin \theta = \frac{y}{\sqrt{(L^2 + y^2)}}$$

sehingga  $d \sin \theta$  adalah

$$d \sin \theta = d \frac{y}{\sqrt{(L^2 + y^2)}} \quad (3.1)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (3.1) ke dalam persamaan (2.33), maka diperoleh

$$\lambda = \frac{d \frac{y}{\sqrt{(L^2 + y^2)}}}{n}$$

atau

$$d \frac{y}{\sqrt{(L^2 + y^2)}} = \lambda n \quad (3.2)$$

Dari persamaan (3.2) dapat dibuat grafik hubungan antara  $d \sin \theta$  dengan orde ke- $n$  untuk memperoleh panjang gelombang ( $\lambda$ ) laser dan nilai ketidakpastian panjang gelombang dengan analisis *fitting linear*.

## C. Penentuan Indeks Bias Mica Transparan

### 1. Variabel Penelitian

Pada penelitian indeks bias mica transparan, variabel bebas adalah sudut datang ( $\theta_i$ ) dan variabel terikatnya adalah sudut bias ( $\theta_r$ ).

## **2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian.**

### **1. Laser HeNe**

Laser HeNe bermerk Shimadzu yang digunakan untuk sebagai sumber cahaya. Panjang gelombang dari laser HeNe adalah  $(674 \pm 9)$  nm yang diperoleh dari percobaan. Pada ujung laser terdapat lensa positif yang dapat digunakan untuk mengatur ukuran berkas laser.

### **2. Mica transparan**

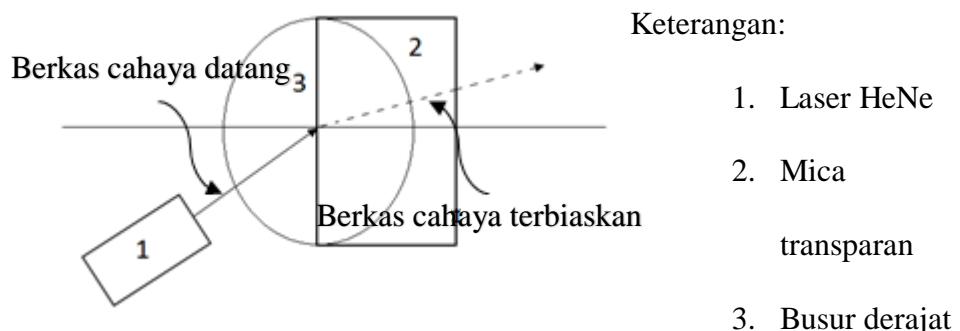
Mica transparan ini digunakan untuk bahan penelitian dan akan ditentukan nilai indeks biasnya. Mica transparan yang secara umum digunakan sebagai sampul pada saat penjilidan makalah.

### **3. Busur derajat**

Busur digunakan untuk mengukur sudut datang dan sudut bias. Busur memiliki skala terkecil 1 derajat.

## **3. Prosedur Kerja**

### **1. Mengatur posisi alat seperti Gambar 3.3.**



**Gambar 3.3.** Rangkaian alat untuk menentukan indeks bias.

2. Menyalakan laser dan mengatur fokus lensanya agar berkas laser sesuai tebal dari mica transparan.
3. Menembakkan laser pada mica transparan yang akan diukur indeks biasnya.
4. Mencatat sudut datang ( $\theta_i$ ) dan sudut bias ( $\theta_r$ ) dengan menggunakan busur.
5. Mengulangi langkah 4 dengan memvariasi sudut datangnya.

#### **4. Teknik Analisis Data**

Nilai indeks bias mica transparan dapat dihitung dengan menggunakan hukum Snellius (persamaan (2.2)). Karena indeks bias udara  $n_1 = 1$ , serta sudut datang dan sudut bias sudah diketahui dari percobaan, maka indeks bias mica transparan dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.2) dengan bantuan grafik. Sumbu  $x$  adalah  $\sin \theta_i$  sebagai variabel bebasnya dan sumbu  $y$  adalah  $\sin \theta_r$  sebagai variabel terikatnya. Grafik tersebut dianalisis dengan *fitting linear* untuk mendapatkan nilai indeks bias mica transparan dan nilai ketidakpastiannya.

### **D. Penentuan Tebal Mica Transparan**

#### **1. Variabel Penelitian**

Pada penentuan tebal mica transparan, variabel bebas adalah perubahan sudut sampel ( $\emptyset$ ), variabel kontrolnya adalah panjang gelombang laser HeNe ( $\lambda$ ),

jarak antara interferometer dengan layar, dan indeks bias mica transparan ( $n$ ), dan variabel terikatnya adalah jumlah pergeseran pola frinji ( $N$ ).

## **2. Spesifikasi Alat dan Bahan Penelitian.**

### **1. Laser HeNe**

Laser HeNe bermerk Shimadzu yang digunakan untuk sebagai sumber cahaya. Panjang gelombang dari laser HeNe adalah  $(674 \pm 9)$  nm yang diperoleh dari percobaan. Pada ujung laser terdapat lensa positif yang dapat digunakan untuk mengatur ukuran berkas laser.

### **2. Mica transparan**

Mica transparan yang secara umum digunakan sebagai sampul pada saat penjilidan makalah.

### **3. Kamera digital**

Kamera digital bermerk Nikon D3100 yang digunakan untuk merekam pergeseran frinji pada setiap perubahan sudut sampel.

### **4. Seperangkat alat interferometer**

Seperangkat alat interferometer terdiri dari:

#### **a. Cermin geser**

Cermin geser ini dapat digeser ke depan atau ke belakang.

#### **b. Cermin putar**

Cermin putar ini dapat diputar ke segala arah: kanan, kiri, depan dan belakang.

c. Mikrometer

Mikrometer ini diputar untuk menggeser cermin geser.

d. *Beam splitter*

*Beam splitter* berfungsi untuk membagi sinar dari laser menjadi dua, yang diteruskan dan dipantulkan ke cermin geser dan cermin putar.

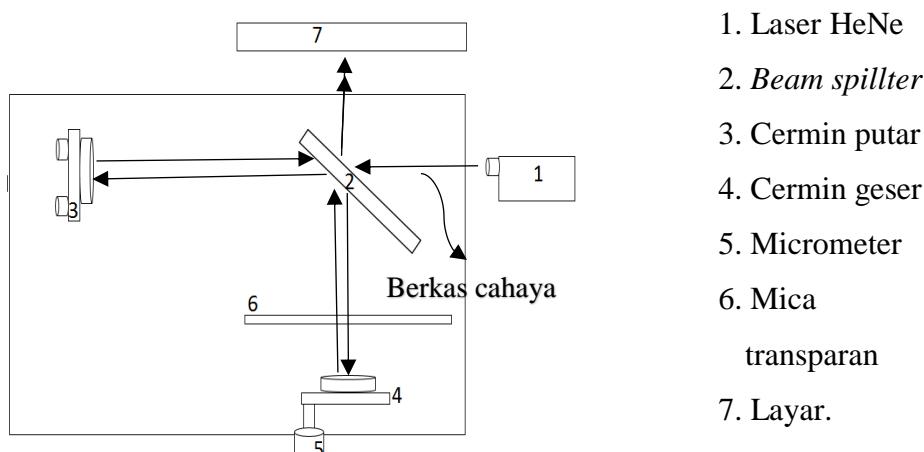
5. Tripod

Tripod berfungsi untuk tempat kamera agar saat pengambilan gambar kamera tidak goyang.

### 3. Prosedur Kerja

1. Mengatur posisi alat seperti pada Gambar 3.4.

Keterangan:



**Gambar 3.4.** Rangkaian alat interferometer Michelson untuk mendapatkan pola frinji.

2. Menyalakan laser (1) dan menembakkan pada *beam splitter* (2) pada interferometer.

3. Mengatur *beam splitter* (2) agar dua berkas sinar jatuh pada cermin geser (4) dan cermin putar (3).
4. Meletakkan sampel diantara *beam splitter* (2) dan cermin geser (4).
5. Mengatur cermin putar (3) sehingga dua berkas sinar dapat bertumpang tindih pada layar (7), sehingga pada layar akan tampak pola frinji gelap terang.
6. Memutar sudut dari sampel (6)  $0^\circ$  sampai  $1^\circ$  secara perlahan-lahan.
7. Merekam pergeseran pola frinji di layar saat sampel diputar dengan menggunakan kamera digital.
8. Merubah rekaman menjadi citra dengan menggunakan *adobe premiere*.
9. Memasukkan hasil citra pola frinji ke dalam perangkat lunak Matlab.
10. Mengulangi langkah percobaan 6 sampai 9 dengan variasi sudut putar sampel  $2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ$  dan  $7^\circ$ .

#### **4. Teknik Analisis Data**

Setelah diperoleh pola frinji untuk setiap variasi sudut sampel, maka hasil citra akan diolah dengan Matlab. Semua citra pola frinji diubah menjadi citra *greyscale* (keabuan).

Setelah citra RGB diubah ke *greyscale*, lalu ditentukan titik koordinat pada citra *greyscale* yang akan diamati nilai pixelnya. Dari titik koordinat tersebut akan terlihat pergeseran frinjinya yang dibuktikan oleh perubahan nilai pixel untuk setiap waktu putaran sampel. Maka akan didapatkan grafik

hubungan antara nilai pixel terhadap waktu perekaman saat sampel yang diputar.

Setelah didapatkan nilai indeks bias mica transparan, panjang gelombang laser dan jumlah pergeseran pola frinji untuk setiap variasi, maka ketebalan mica transparan dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.32).

$$t = \frac{N\lambda}{2 n_m \sin\phi \left(1 - \frac{n_u \cos\phi}{n_m \cos\phi'}\right)} \quad (2.32)$$

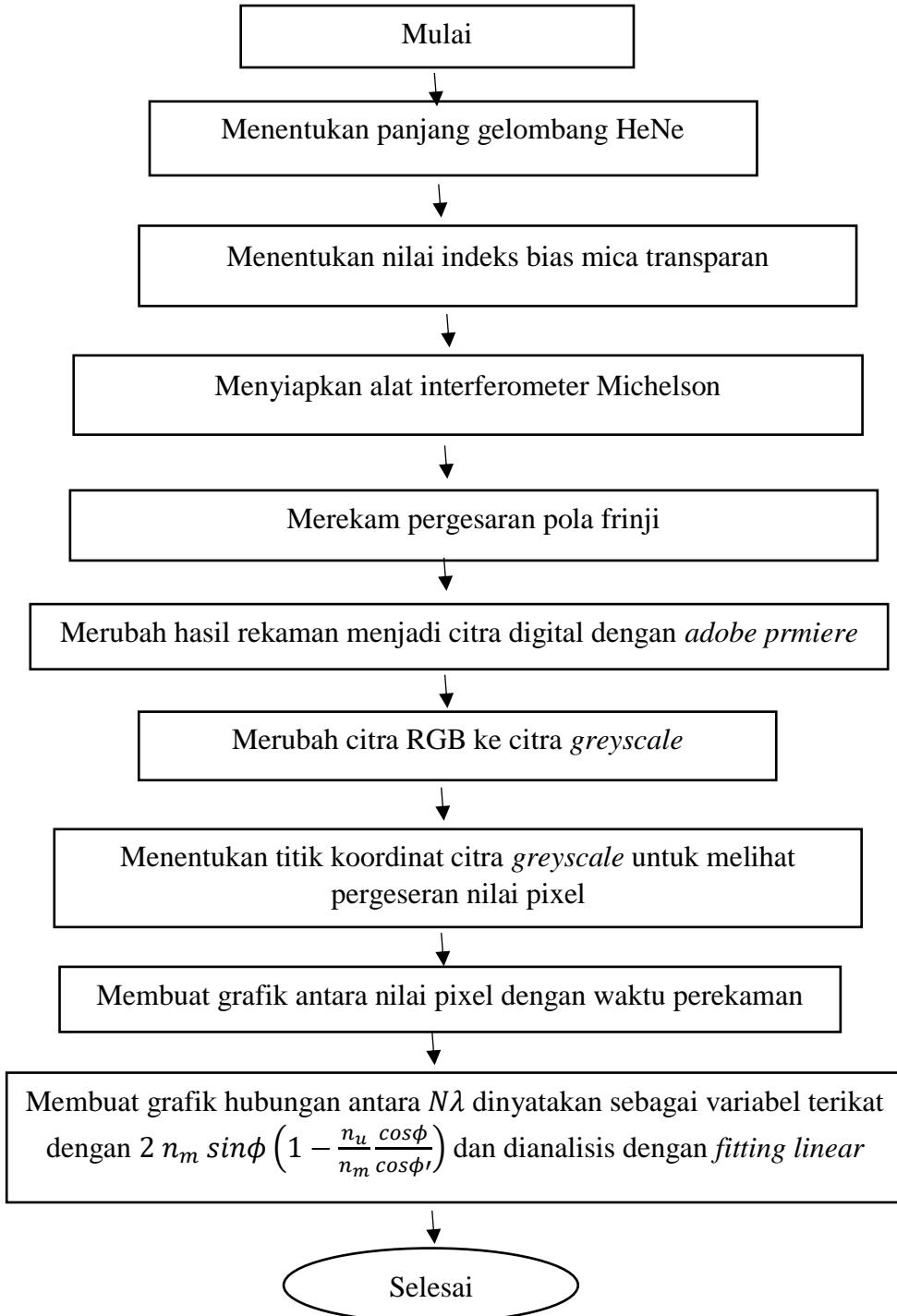
Karena pada persamaan (2.32)  $\phi'$  tidak dapat diketahui dari percobaan, maka  $\phi'$  diperoleh dari

$$\sin\phi' = \frac{n_u}{n_m} \sin\phi$$

$$\phi' = \arcsin\left(\frac{n_u}{n_m} \sin\phi\right)$$

Dari persamaan (2.32) dapat dibuat grafik hubungan antara  $N\lambda$  dinyatakan sebagai variabel terikat dengan  $2 n_m \sin\phi \left(1 - \frac{n_u \cos\phi}{n_m \cos\phi'}\right)$  dinyatakan sebagai variabel bebasnya, maka dengan analisis *fitting linear* didapatkan gradien grafik sebagai ketebalan mica transparan ( $t$ ).

### E. Diagram Alir



**Gambar 3.5.** . Diagram alir penentuan nilai ketebalan mica transparan menggunakan pengolahan citra digital pola frinji.

## **BAB IV**

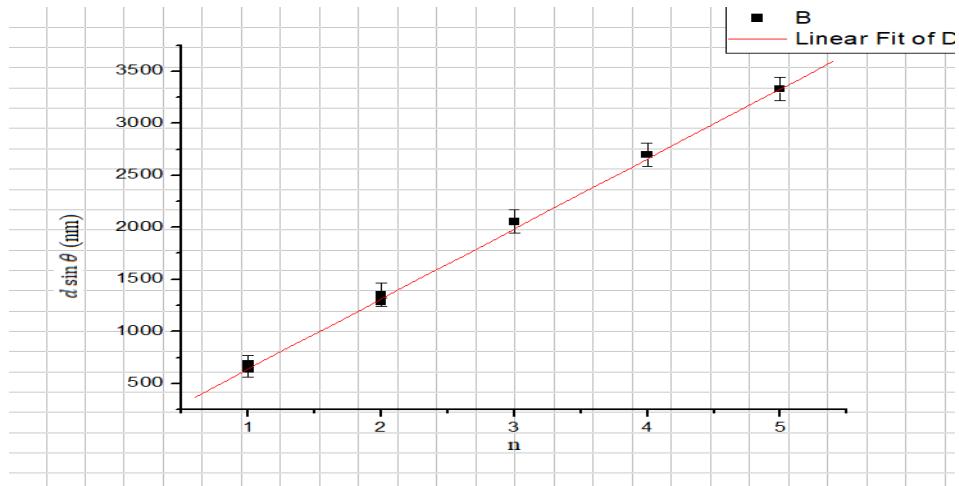
### **PEMBAHASAN**

#### **A. Penentuan Panjang Gelombang Laser HeNe**

Pada penelitian ini laser HeNe digunakan sebagai sumber koheren. Karena pengukuran ketebalan mica transparan tergantung pada nilai panjang gelombang laser HeNe, maka panjang gelombang laser HeNe harus diketahui. Berdasarkan konsep difraksi, panjang gelombang laser dapat ditentukan dengan persamaan (2.33). Dari percobaan yang telah dilakukan, diperoleh jarak antara kisi ke layar, tetapan kisi dan jarak antara orde-0 sampai orde- $n$  seperti pada Tabel 4.1. Penentuan nilai panjang gelombang laser HeNe dilakukan dengan bantuan grafik.

**Tabel 4.1.** Data jarak antara kisi ke layar ( $L$ ), tetapan kisi ( $d$ ) dan jarak antara orde-0 sampai orde- $n$  ( $y$ ).

$d$ (mm)	$N$	$(y \pm 0,05)$ cm	$(L \pm 0,05)$ cm	$(d \sin \theta \pm \Delta d \sin \theta)$ nm
$\frac{1}{600}$	1	12,30	30,00	$632 \pm 20$
$\frac{1}{300}$	1	6,30	30,00	$685 \pm 40$
$\frac{1}{300}$	2	12,50	30,00	$1282 \pm 40$
$\frac{1}{100}$	1	2,00	30,00	$665 \pm 100$
$\frac{1}{100}$	2	4,10	30,00	$1354 \pm 100$
$\frac{1}{100}$	3	6,30	30,00	$2055 \pm 100$
$\frac{1}{100}$	4	8,40	30,00	$2696 \pm 100$
$\frac{1}{100}$	5	10,60	30,00	$3331 \pm 100$



**Gambar 4.1.** Grafik hubungan antara  $d \sin \theta$  dengan orde ke- $n$ .

Gambar 4.1. adalah grafik hubungan antara  $d \sin \theta$  dengan orde ke- $n$  untuk mendapatkan nilai panjang gelombang laser HeNe dengan menggunakan analisis *fitting linear*. Nilai panjang gelombang laser HeNe dan nilai ketidakpastiannya yang didapatkan dari grafik sebesar  $(670 \pm 20)$  nm.

## B. Penentuan Indeks Bias Mica Transparan

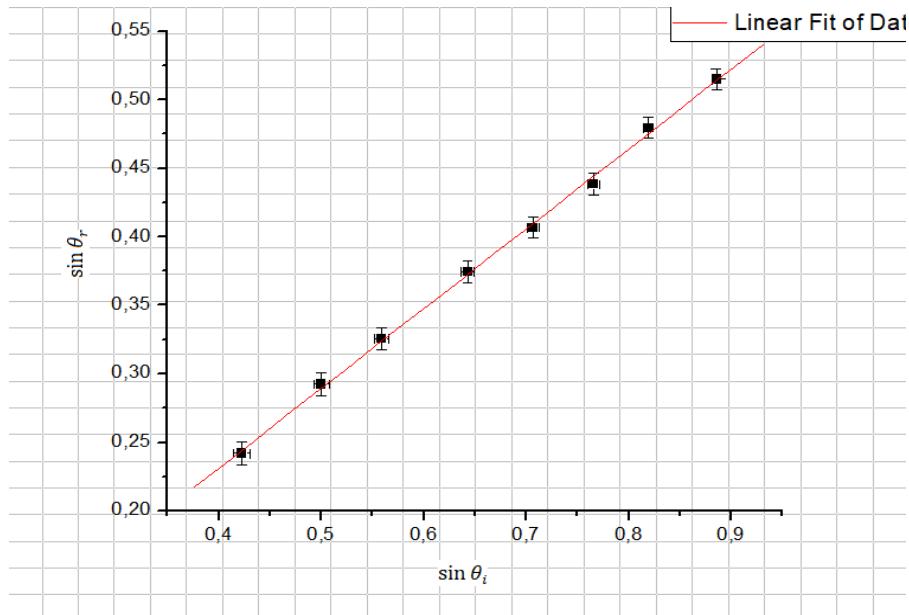
Penentuan indeks bias dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti dengan menggunakan alat refraktometer atau dengan konsep hukum Snellius. Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah mica transparan. Mica transparan memiliki struktur bahan yang keras dan transparan, maka untuk menentukan indeks biasnya digunakan konsep hukum Snellius.

Keluaran seberkas sinar laser harus disesuaikan dengan tebal sampel. Jika laser ditembakkan dari posisi mana pun indeks bias mica transparan akan tetap sama, karena mica transparan diasumsikan termasuk bahan isotropis. Hasil

pengukuran dengan metode hukum Snellius untuk penentuan indeks bias mica transparan ditunjukkan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2.** Data hasil pengukuran sudut datang ( $\theta_i$ ) dan sudut bias ( $\theta_r$ ).

$(\theta_i \pm 0,5)$ (dalam derajat)	$(\theta_r \pm 0,05)$ (dalam derajat)
25,0	14,00
30,0	17,00
35,0	19,00
40,0	22,00
45,0	24,00
50,0	26,00
55,0	28,00
60,0	31,00



**Gambar 4.2.** Grafik antara  $\sin \theta_r$  sebagai fungsi  $\sin \theta_i$ .

Gambar 4.2. adalah grafik hubungan antara  $\sin \theta_r$  dengan  $\sin \theta_i$  untuk mendapatkan nilai indeks bias sampel dengan menggunakan analisis *fitting linear*. Nilai indeks bias dan ketidakpastiannya adalah sebesar  $(1,70 \pm 0,05)$ .

### C. Penetuan Ketebalan Mica Transparan

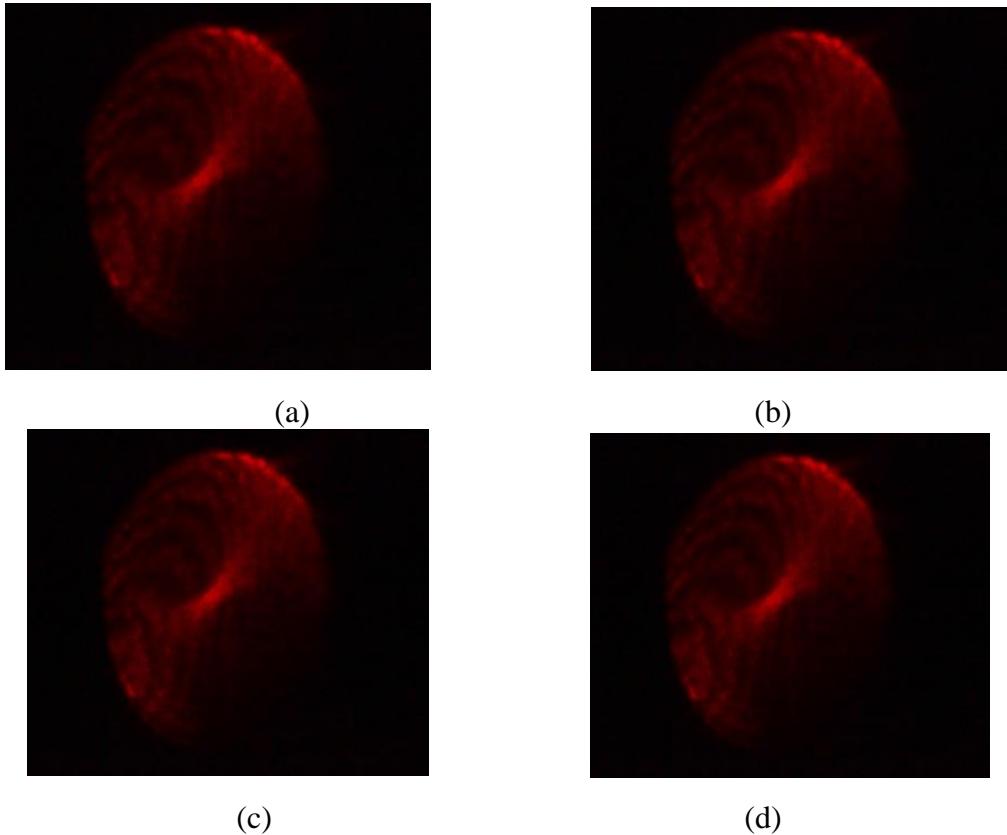
Penentuan ketebalan mica transparan dilakukan menggunakan metode interferensi dengan melihat pergeseran pola frinji. Pola frinji diperoleh dengan menggunakan alat interferometer Michelson dan sumber koheren yang berasal dari laser HeNe dengan panjang gelombang  $(673 \pm 20)$  nm (berwarna merah).

Dari persamaan (2.32) tebal bahan tipis dapat ditentukan dengan menganalisis hubungan antara pergeseran pola frinji terhadap perubahan sudut

pada sampel. Perubahan sudut pada sampel dilakukan dengan variasi sudut  $1^\circ$  sampai  $7^\circ$ . Perbedaan panjang lintasan optik adalah karena salah satu berkas dari laser melewati sampel mica transparan. Panjang lintasan optik dipengaruhi oleh indeks bias ( $n$ ) dan ketebalan bahan ( $t$ ). Pada saat sampel diputar akan terjadi perubahan panjang lintasan optik yang dilewati oleh laser. Setiap penambahan sudut putar pada sampel akan mempengaruhi jumlah pergeseran pola frinji, karena semakin besar sudut sampel akan semakin panjang lintasan optiknya. Karena pergeseran pola frinji sulit teramati dengan mata telanjang dan mata peneliti digunakan untuk melihat perubahan sudut pada sampel, maka pergeseran pola frinji direkam dengan kamera DSLR. Analisis pergeseran pola frinji dilakukan dengan bantuan pengolahan citra digital.

## 1. Pengambilan Citra Pola Frinji

Pengambilan citra pergeseran pola frinji dilakukan dengan menggunakan kamera Nikon D3100. Kamera tersebut dapat merekam video HD 720x576 pixel dengan *frame rate* 30 fps. Jika terjadi sentuhan ataupun getaran yang mengubah posisi kamera, maka hasil citra dinyatakan tidak valid dan harus diulang dari awal. Hasil perekam diubah menjadi sebuah gambar atau citra dengan cara mencacah *frame rate* dari hasil rekaman pola frinji dengan bantuan *Adobe Premiere*. Hasil perubahan rekaman ke citra pergeseran pola frinji dapat lihat pada Gambar 4.3.



**Gambar 4.3.** Pergeseran pola frinji dari sampel yang diputar  $0^\circ$ - $5^\circ$  (a) waktu frame 1 (b) frame 2 (c) frame 3 dan (d) frame 4.

Gambar 4.3.a memperlihatkan citra pola frinji yang diakibatkan karena adanya sampel yang disisipkan pada lengan interferometer Michelson.

Gambar 4.3 (b, c dan d) adalah hasil pola frinji dengan sampel diputar  $0^\circ$  sampai  $5^\circ$  (hanya ditampilkan beberapa citra pergeseran pola frinji yang didapatkan dari percobaan). Gambar 4.3. memperlihatkan bahwa semua citra hampir mirip dan tidak terdeteksi adanya pergeseran frinji. Namun, hasil tersebut akan berbeda jika pengamatan pola frinji dilakukan dengan batuan pengolahan citra digital.

## 2. Penentuan Ketebalan Mica Transparan

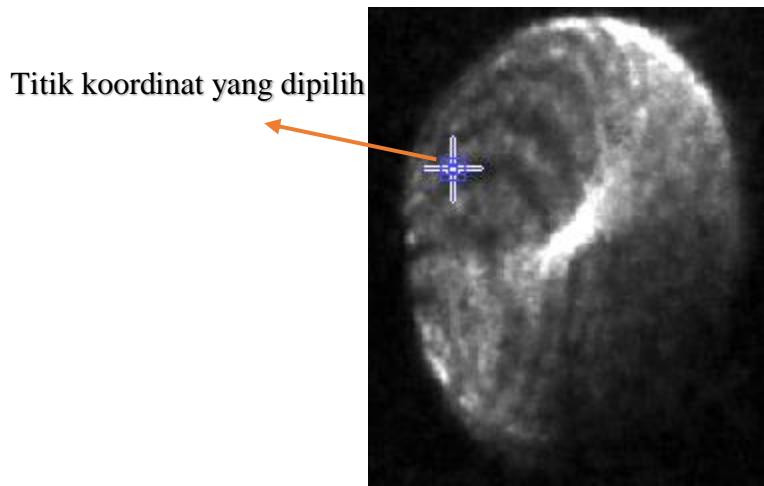
Dalam pemanfaatan pengolahan citra digital perangkat lunak yang digunakan adalah Matlab. Matlab adalah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik. Dengan menggunakan metode ini pergeseran pola frinji dapat dibuktikan oleh perubahan nilai pixel untuk setiap waktu putaran sampel.

Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisis citra pola frinji adalah:

```
A=imread('1'); Langkah 1  
for m=1:1:1280; Langkah 2  
    for n=1:1:720; Langkah 3  
        Q(n,m)=2*A(n,m,1)+0*A(n,m,2)+0*A(n,m,3); Langkah 4  
    end  
end  
subplot(2,2,1) Langkah 5  
imshow(Q) Langkah 6  
U=imcrop(Q,[634 256 0 0]); Langkah 7  
subplot(2,2,2) Langkah 8  
imshow(U) Langkah 9  
impixelinfo Langkah 10  
impixelregion Langkah 11
```

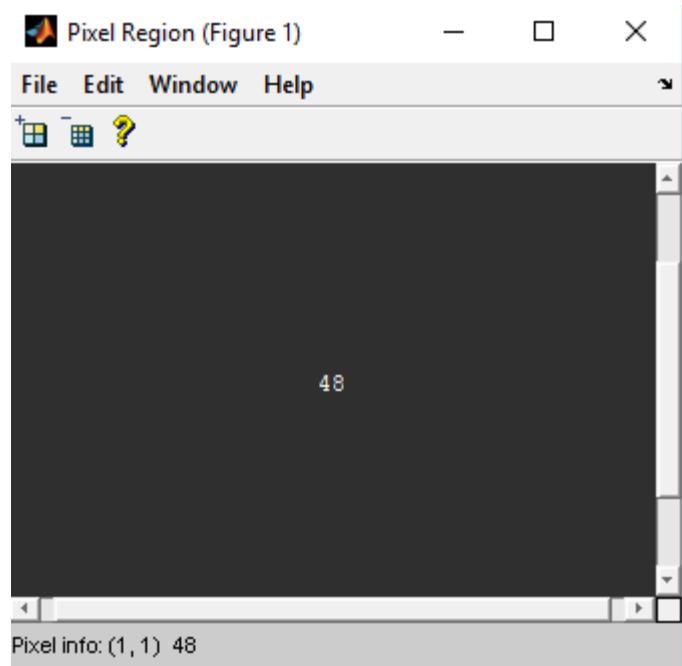
Langkah 1 adalah fungsi untuk membaca file citra yang nantinya akan dianalisis untuk melihat pergeseran pola frinji. Gambar 4.3. adalah citra pola frinji RGB yang memiliki 3 informasi untuk setiap pixelnya. Agar analisis informasi citra lebih mudah dan akurat, maka dilakukan penyederhanaan jumlah informasi dengan mengubah citra RGB ke citra *greyscale*.

Langkah 2 sampai 4 adalah fungsi untuk mengkonversi citra RGB ke *greyscale*. Ukuran citra pola frinji dapat diketahui dengan fungsi *size* (A). Sebenarnya pada Matlab terdapat fungsi *rgb2grey* yang dapat langsung mengubah citra RGB ke *greyscale* yang didasari oleh persamaan (2.9), tetapi fungsi *rgb2grey* tidak dapat dimodifikasi atau nilai  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$  sudah ditetapkan dari Matlab. Oleh karena itu peneliti menggunakan persamaan (2.9) pada Langkah 4, agar nilai  $\alpha$ ,  $\beta$  dan  $\gamma$  dapat diubah sesuai dengan warna yang dominan pada pola frinji, dan diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.4.



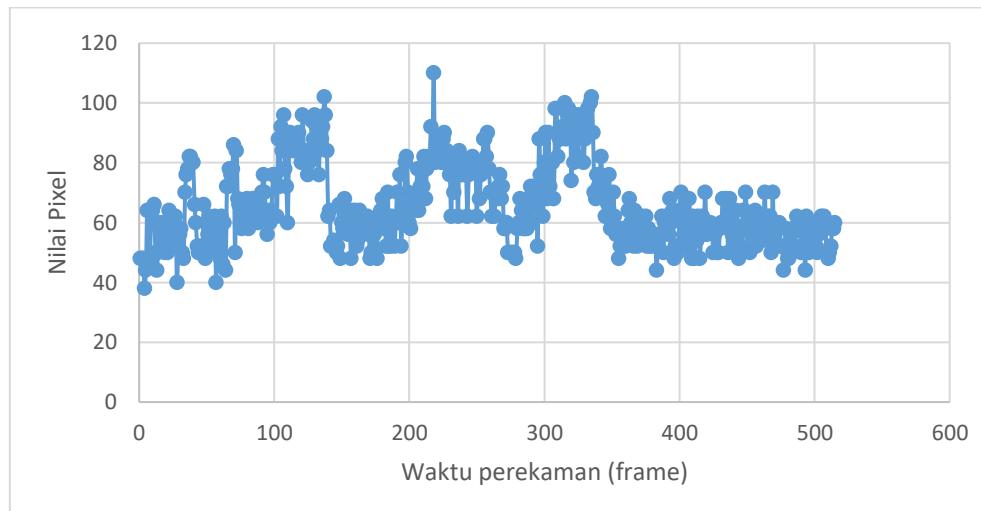
**Gambar 4.4.** Citra *greyscale* pola frinji.

Gambar 4.4. adalah perubahan citra RGB ke *greyscale*. Karena pola frinji dominan pada warna merah, maka koefisien pembobotan  $\alpha$  lebih besar dari pada  $\beta$  dan  $\gamma$ . Hasil citra *greyscale* terlihat sangat kontras, karena nilai  $\alpha$  yang besar akan mempermudah untuk melihat informasi perubahan nilai pixel. Langkah selanjutnya adalah memilih satu titik koordinat yang akan diamati perubahan nilai pixelnya untuk setiap variasi sudut sampel. Untuk sampel yang diputar  $0^\circ$ - $5^\circ$ , peneliti memilih titik koordinat (578,208) yang pertanda biru pada Gambar 4.4, karena nilai pixelnya mendekati nol (0) yaitu 48. Untuk menunjukkan nilai pixel digunakan fungsi *impixelregion*.



**Gambar 4.5.** Nilai pixel pada waktu frame 1 di titik dengan koordinat (578,208).

Gambar 4.5. adalah nilai pixel dari sudut putar  $0^\circ$ - $5^\circ$  untuk waktu perekaman frame 1. Mengulangi langkah tersebut dengan waktu perekaman yang berbeda akan menghasilkan grafik antara nilai pixel sebagai fungsi waktu perekaman.



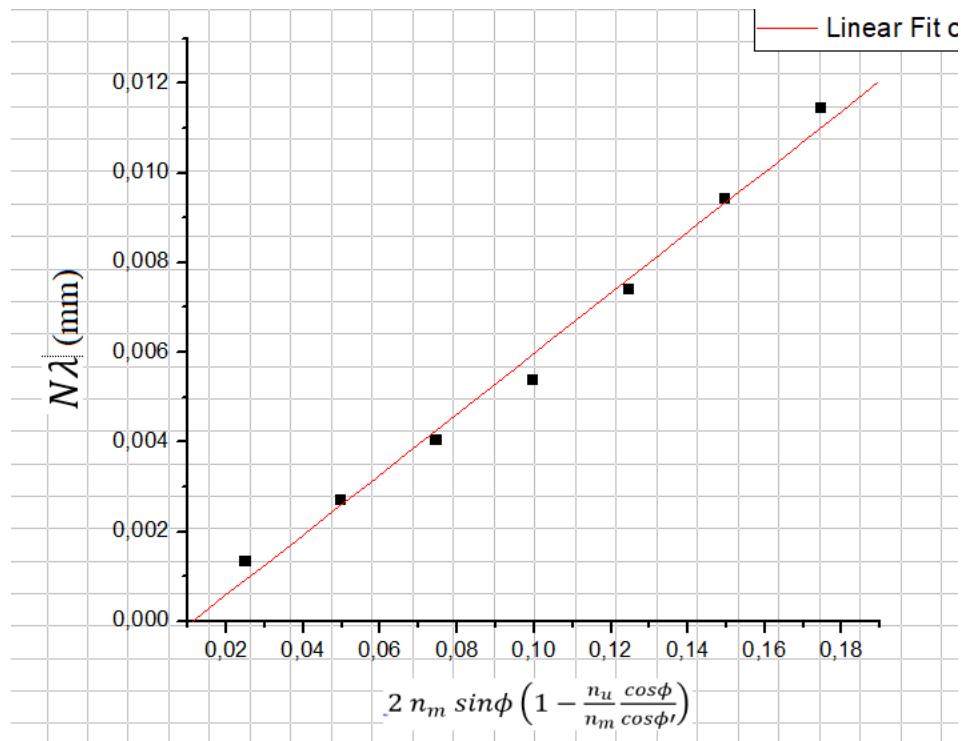
**Gambar 4.6.** Grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $5^\circ$ .

Pergeseran pola frinji pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $5^\circ$  dapat dibuktikan pada grafik. Pada grafik terdapat 5 puncak dan 6 lembah (1 lembah sebagai titik awal) yang berarti pola frinji bergeser sebanyak 10 kali. Saat waktu perekaman frame 211-259 didapatkan nilai pixel yang hampir sama, kemungkinan disebabkan saat peneliti memutar sampel terkadang berhenti sejenak, tetapi waktu rekaman tidak berpengaruh terhadap jumlah pergeseran pola frinji, hanya dapat memperhalus grafik atau memberikan ketelitian yang lebih. Langkah tersebut juga dilakukan untuk setiap variasi sudut putar sampel  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ , dan  $7^\circ$ , sehingga diperoleh jumlah pergeseran pola frinji untuk setiap variasi sudut putar sampel seperti ditunjukkan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Data hasil jumlah pergeseran pola frinji pada mica transparan.

No	Sudut putar ( $^{\circ}$ )	Jumlah Frinji
1	1	2
2	2	4
3	3	6
4	4	8
5	5	10
6	6	14
7	7	17

Dari Tabel 4.3. terlihat bahwa semakin besar sudut putar sampel, maka jumlah pergeseran pola frinji semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena saat sampel diputar, panjang lintasan optik dalam sampel akan bertambah yang menyebabkan beda fase pada kedua gelombang yang berinterferensi akan meningkat. Pertambahan panjang lintasan optik terhadap sudut putar sampel dapat dihitung dengan persamaan (2.28). Penentuan ketebalan mica transparan dilakukan dengan menggunakan grafik antara  $N\lambda$  sebagai fungsi  $2 n_m \sin\phi \left(1 - \frac{n_u}{n_m} \frac{\cos\phi}{\cos\phi'}\right)$ .



**Gambar 4.7.** Grafik untuk menentukan ketebalan mica transparan.

Dari Gambar 4.7. didapatkan nilai ketebalan mica transparan dan nilai ketidakpastiannya dengan menggunakan analisis *fitting linear*. Perbandingan hasil antara antara hasil pengukuran ketebalan bahan tipis menggunakan metode interferensi dengan bantuan pengolahan citra digital dan dengan mikrometer sekrup adalah sebagai berikut:

1. Interferometer :  $(t \pm \Delta t) = (0,067 \pm 0,003)$  mm
2. Mikrometer sekrup :  $(t \pm \Delta t) = (0,07 \pm 0,01)$  mm

Hasil pengukuran ketebalan bahan tipis tersebut didapatkan nilai yang berbeda, maka perbedaan hasil ukur itu harus diuji dengan dikripansi. Uji dikripansi adalah perbedaan antara dua nilai hasil pengukuran dari besaran

yang sama. Jika nilai  $\delta$  memenuhi fungsi dari  $\delta \leq \Delta t_1 + \Delta t_2$  dan  $\delta$  didapatkan dari  $\delta = |t_1 - t_2|$ , maka hasil uji diskripansi dinyatakan valid. Karena nilai  $\delta$  didapatkan  $0,003 \leq 0,013$  mm, maka dari uji dikrepansi kedua pengukuran yang berbeda tersebut dinyatakan valid atau dianggap sama. Metode interferometer lebih teliti dari pada metode mikrometer sekrup, karena interferometer dapat mengukur 3 angka dibelakang koma.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **A. Kesimpulan**

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Mica transparan diletakkan antara cermin geser dengan *beam splitter*.  
Cermin pada salah satu ujung lengan interferometer digeser agar berkas sinar berinterferensi membentuk pola frinji. Setelah pola friji diperoleh, maka mica transparan dapat divariasi sudutnya. Karena pola frinji sangat sensitive terhadap getaran, maka dalam melakukan pengamatan diusahakan untuk mengurangi getaran seminimal mungkin.
2. Perekaman pergeseran pola frinji dilakukan dengan menggunakan kamera DSLR bermerk Nikon D3100 dengan 30 *fps*. Agar posisi kamera tidak berubah-ubah, maka dibutuhkan tripod untuk menyangga kamera. Karena untuk menganalisis pergeseran pola frinji harus sebuah citra atau gambar, maka hasil rekaman tersebut diubah menjadi citra dengan mencacah *frame per second* video tersebut dengan bantuan *adobe premier*.
3. Perbandingan hasil pengukuran ketebalan mica transparan menggunakan metode interfeferensi dengan bantuan pengolahan citra digital dan dengan mikrometer sekrup adalah sebagai berikut :
  - a. Interferometer :  $(t \pm \Delta t) = (0,067 \pm 0,003)$  mm
  - b. Mikrometer sekrup :  $(t \pm \Delta t) = (0,07 \pm 0,01)$  mm

Metode interferometer lebih teliti dari pada metode mikrometer sekrup.

## **B. Saran**

Dari penelitian yang telah dilakukan, peneliti menyarankan untuk:

1. Dapat memanfaatkan pengolahan citra digital dalam segala bidang pengukuran seperti pengukuran bahan tipis, deteksi tepi dan bidang optik lainnya.
2. Pengambilan data pergeseran pola frinji dilakukan di tempat yang minim getaran.

## DAFTAR PUSTAKA

- Falah, Masrofatul. 2006. *Analisis Pola Interferensi pada Interferometer Michelson untuk Menentukan Panjang Gelombang Sumber Cahaya*. Semarang: Undip.
- Halliday, D. and Resnick. 1999. *Physics*, Jilid 2, Edisi 7 (terjemahan Pantur Silaban dan Erwin Sucipto). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Halliday, D. Resnick and Walker. 2010. *Fisika Dasar*, Jilid 2, Edisi 7 (terjemahan). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hariharan, P. 2007. *Basic of Interferometry*. Sydney: Academic Press.
- Hecht, E. 2002. *Optics, 4 edition*. San Fransisco: Addison Wesley.
- Hidayat, W., Drajat, dan Setiyono, B. 2011. *Simulasi Fenomena Difraksi Cahaya Pada Celah Tunggal dan Celah Ganda*. Semarang: Tugas Akhir. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.
- Jenkins, F. A., and White, H. E. 1976. *Fundamentals of Optics*, 4th ed, New York: McGraw-Hill, Inc.
- Karim, Saeful, dkk. 2008. *Belajar IPA Membuka Cakrawala Alam Sekitar*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.
- Laud, B. B. 1988. *Laser and non-linear optic*. (Terjemahan Sutanro). Jakarta: UI.
- Nguyen, C., and Kim, S. 2012. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. London: Springer.

Nugraheni, F. A. 2012. *Perancangan Sistem Pengukuran Konsentrasi Larutan Gula Dengan Menggunakan Interferometer Michelson*. Surabaya: ITS.

Palamides, A. dan Veloni, A. 2011. *Signals and Systems Laboratory with MATLAB*. London: Taylor & Francis Group, LLC.

Pedrotti, F.L dan Pedrotti, L.S. 1993. *Introduction to Optics*, 2nd ed. New Jersey: Prentince Hall.

Pikatan, Sugata. 1991. *Laser*. Jurnal Kristal No. 4 Juni 1991: 1-2.

Riyadi, Tunjung. 2014. *Sinematografi Dengan Kamera DSLR*. Jurnal Humaniora Vol. 5 No. 2 Oktober 2014: 919-929. Jakarta: BINUS University.

Sears, F. W. and Zemansky, M. W. 1972. Optik dan Atom. Jakarta: Bina Tjipta.

Solomon, C. and Breckon, T. 2011. *Fundamentals of Digital Image Processing*. West Sussex: John Willey & Sons.

Tipler, P. A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik*, jilid 2 (alih Bahasa Dr.Bambang Soegijono).Jakarta: Penerbit Erlangga.

## LAMPIRAN 1

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $1^\circ$  dengan titik koordinat (321, 217).

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
1	48
2	60
3	60
4	72
5	42
6	63
7	60
8	60
9	66
10	54
11	63
12	60
13	66
14	63
15	60
16	66
17	66
18	72
19	54
20	66

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
21	63
21	63
22	60
23	60
24	66
25	66
26	72
27	78
28	66
29	64
30	66
31	54
32	78
33	63
34	72
35	60
36	66
37	63
38	54
39	54

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
40	54
41	75
42	66
43	48
44	54
45	54
46	63
47	45
48	63
49	66
50	60
51	36
52	75
53	63
54	63
55	54
56	72
57	63
58	60
59	54
60	75
61	72
62	84
63	98

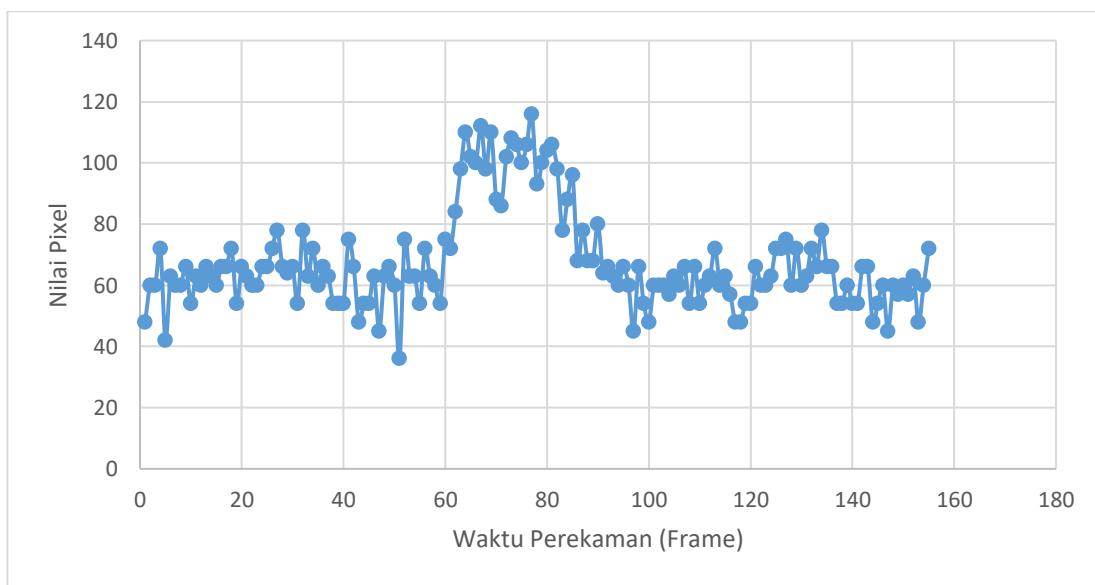
Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
64	110
65	102
66	100
67	112
68	98
69	110
70	88
71	86
72	102
73	108
74	106
75	100
76	106
77	116
78	93
79	100
80	104
81	106
82	98
83	78
84	88
85	96
86	68
87	78

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
88	68
89	68
90	80
91	64
92	66
93	63
94	60
95	66
96	60
97	45
98	66
99	54
100	48
101	60
102	60
103	60
104	57
105	63
106	60
107	66
108	54
109	66
110	54
111	60

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
112	63
113	72
114	60
115	63
116	57
117	48
118	48
119	54
120	54
121	66
122	60
123	60
124	63
125	72
126	72
127	75
128	60
129	72
130	60
131	63
132	72
133	66
134	78
135	66

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
136	66
137	54
138	54
139	60
140	54
141	54
142	66
143	66
144	48

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
145	54
146	60
147	45
148	60
149	57
150	60
151	57
152	63
153	48
154	60



## LAMPIRAN 2

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $2^\circ$  dengan titik koordinat (566, 264).

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
1	44
2	48
3	48
4	56
5	44
6	44
7	58
8	56
9	52
10	56
11	58
12	54
13	48
14	68
15	62
16	68
17	62
18	72
19	78
20	70

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
21	72
22	64
23	64
24	66
25	52
26	68
27	78
28	88
29	80
30	84
31	90
32	90
33	110
34	102
35	108
36	108
37	102
38	98
39	108
40	102

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
41	100
42	100
43	98
44	98
45	88
46	72
47	100
48	108
49	112
50	102
51	102
52	104
53	118
54	102
55	98
56	98
57	104
58	87
59	98
60	100
61	80
62	84
63	86

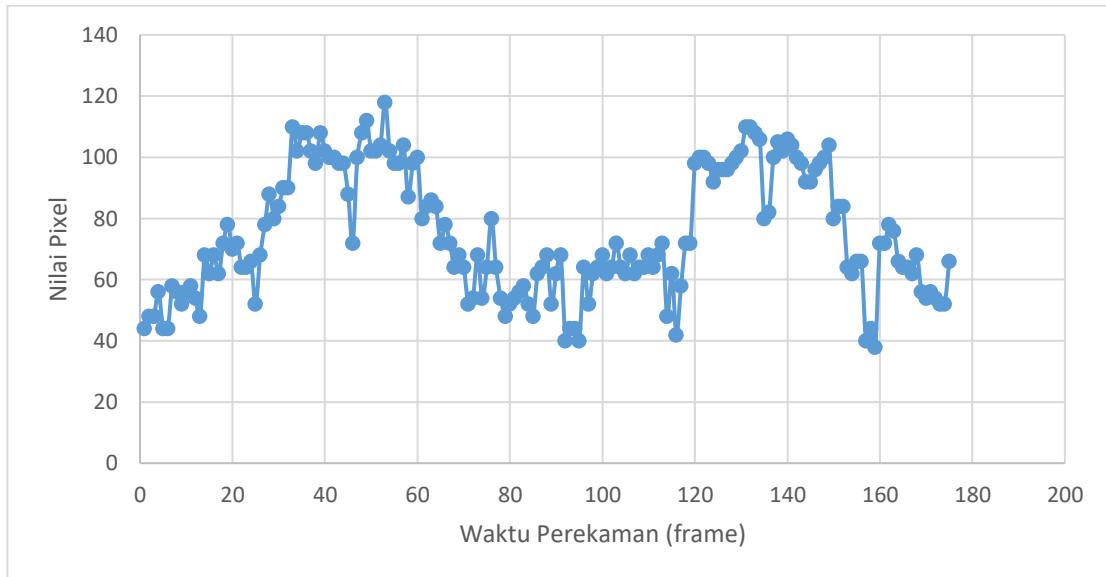
Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
64	84
65	72
66	78
67	72
68	64
69	68
70	64
71	52
72	54
73	68
74	54
75	64
76	80
77	64
78	54
79	48
80	52
81	54
82	56
83	58
84	52
85	48
86	62

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
87	64
88	68
89	52
90	62
91	68
92	40
93	44
94	44
95	40
96	64
97	52
98	62
99	64
100	68
101	62
102	64
103	72
104	64
105	62
106	68
107	62
108	64
109	64

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
110	68
111	64
112	68
113	72
114	48
115	62
116	42
117	58
118	72
119	72
120	98
121	100
122	100
123	98
124	92
125	96
126	96
127	96
128	98
129	100
130	102
131	110
132	110

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
133	108
134	106
135	80
136	82
137	100
138	105
139	102
140	106
141	104
142	100
143	98
144	92
145	92
146	96
147	98
148	100
149	104
150	80
151	84
152	84
153	64

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
154	62
155	66
156	66
157	40
158	44
159	38
160	72
161	72
162	78
163	76
164	66
165	64
166	64
167	62
168	68
169	56
170	54
171	56
172	54
173	52
174	52
175	66



### LAMPIRAN 3

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $3^\circ$  dengan titik koordinat (460, 213).

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
1	44
2	56
3	68
4	54
5	52
6	69
7	70
8	66
9	68
10	60
11	65
12	60
13	44
14	55
15	48
16	50
17	66
18	65
19	66
20	50
21	52

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
22	50
23	48
24	52
25	48
26	48
27	50
28	52
29	52
30	56
31	60
32	62
33	50
34	50
35	56
36	54
37	50
38	50
39	56
40	60
41	62
42	63

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
43	64
44	65
45	60
46	66
47	66
48	68
49	68
50	68
51	62
52	58
53	64
54	68
55	64
56	60
57	60
58	58
59	54
60	48
61	50
62	50
63	52
64	54
65	60
66	54

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
67	56
68	58
69	58
70	68
71	60
72	68
73	68
74	64
75	64
76	68
77	68
78	64
79	64
80	56
81	56
82	58
83	68
84	70
85	70
86	72
87	78
88	78
89	76
90	80

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
91	82
92	100
93	112
94	98
95	88
96	98
97	92
98	100
99	102
100	100
101	112
102	88
103	98
104	82
105	78
106	76
107	78
108	68
109	70
110	72
111	66
112	68
113	78
114	88

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
115	88
116	78
117	70
118	68
119	70
120	68
121	58
122	68
123	66
124	58
125	78
126	68
127	66
128	72
129	74
130	80
131	76
132	72
133	58
134	58
135	56
136	56
137	48
138	46

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
139	46
140	50
141	52
142	50
143	48
144	48
145	52
146	52
147	50
148	48
149	44
150	52
151	58
152	58
153	52
154	54
155	60
156	64
157	64
158	58
159	68
160	70
161	68
162	68

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
163	70
164	70
165	72
166	78
167	76
168	88
169	82
170	108
171	102
172	98
173	108
174	108
175	88
176	98
177	108
178	108
179	102
180	108
181	104
182	108
183	112
184	110
185	104
186	98

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
187	98
188	100
189	108
190	112
191	112
192	114
193	102
194	104
195	96
196	98
197	94
198	100
199	102
200	100
201	104
202	104
203	102
204	98
205	98
206	98
207	96
208	100
209	110
210	120

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
211	110
212	120
213	112
214	114
215	104
216	102
217	102
218	98
219	94
220	94
221	96
222	90
223	88
224	70
225	70
226	72
227	78
228	76
229	72
230	72
231	72
232	78
233	78
234	76

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
235	68
236	68
237	58
238	56
239	58
240	40
241	40
242	40
243	44
244	46
245	66
246	56
247	58
248	48
249	48
250	64
251	56
252	56
253	58
254	58
255	56
256	56
257	60
258	62

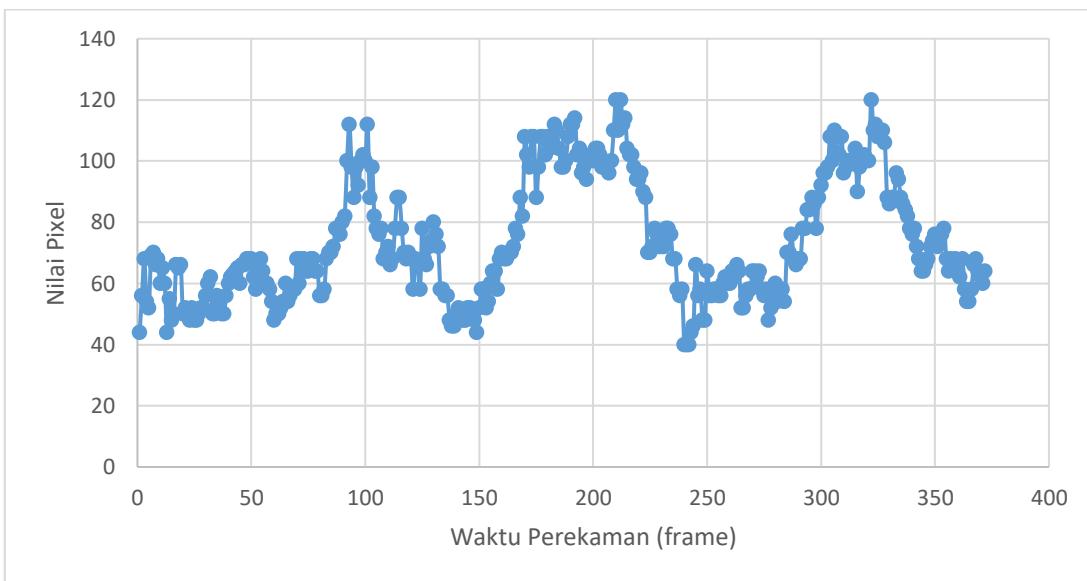
Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
259	60
260	60
261	64
262	62
263	66
264	64
265	52
266	52
267	56
268	58
269	58
270	64
271	64
272	62
273	64
274	58
275	56
276	58
277	48
278	52
279	56
280	60
281	54
282	56

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
283	58
284	54
285	70
286	70
287	76
288	68
289	66
290	68
291	68
292	78
293	78
294	84
295	84
296	88
297	86
298	78
299	88
300	92
301	96
302	96
303	98
304	108
305	100
306	110

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
307	102
308	102
309	108
310	96
311	98
312	100
313	100
314	100
315	104
316	90
317	98
318	100
319	102
320	100
321	100
322	120
323	110
324	112
325	108
326	108
327	110
328	106
329	88
330	86

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
331	88
332	88
333	96
334	94
335	88
336	86
337	84
338	82
339	78
340	76
341	78
342	72
343	68
344	64
345	64
346	66
347	68
348	72
349	74
350	76

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
351	72
352	74
353	76
354	78
355	68
356	64
357	68
358	66
359	68
360	64
361	62
362	68
363	58
364	54
365	54
366	58
367	66
368	68
369	64
370	62
371	60



#### LAMPIRAN 4

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $4^\circ$  dengan titik koordinat (470, 215).

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
1	48
2	53
3	58
4	52
5	66
6	54
7	72
8	64
9	66
10	62
11	64
12	66
13	44
14	66
15	68
16	64
17	62
18	60
19	44
20	56

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
21	68
22	54
23	52
24	69
25	70
26	66
27	62
28	68
29	58
30	54
31	54
32	58
33	66
34	68
35	64
36	62
37	60
38	64
39	78
40	78

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
41	64
42	62
43	60
44	88
45	88
46	86
47	80
48	80
49	96
50	118
51	112
52	112
53	112
54	114
55	114
56	110
57	110
58	112
59	108
60	102
61	98
62	110
63	112
64	112

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
65	108
66	102
67	106
68	102
69	98
70	98
71	88
72	98
73	80
74	86
75	86
76	98
77	78
78	80
79	80
80	78
81	76
82	68
83	80
84	64
85	64
86	62
87	50
88	56

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
89	58
90	56
91	58
92	56
93	54
94	52
95	52
96	58
97	48
98	48
99	44
100	68
101	66
102	64
103	64
104	72
105	72
106	68
107	66
108	58
109	66
110	78
111	78
112	76

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
113	68
114	60
115	78
116	76
117	80
118	86
119	86
120	88
121	90
122	90
123	98
124	98
125	92
126	98
127	94
128	102
129	102
130	104
131	98
132	98
133	110
134	112
135	114
136	112

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
137	114
138	120
139	116
140	118
141	114
142	110
143	108
144	98
145	98
146	96
147	100
148	102
149	110
150	110
151	108
152	102
153	108
154	102
155	120
156	120
157	118
158	110
159	98
160	88

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
161	58
162	68
163	87
164	76
165	60
166	65
167	60
168	44
169	55
170	48
171	50
172	66
173	65
174	66
175	50
176	52
177	50
178	48
179	52
180	48
181	48
182	50
183	80
184	88

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
185	86
186	96
187	100
188	100
189	120
190	112
191	112
192	112
193	110
194	118
195	108
196	98
197	96
198	96
199	96
200	96
201	98
202	118
203	100
204	122
205	112
206	112
207	118
208	116

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
209	120
210	120
211	124
212	124
213	108
214	100
215	130
216	131
217	131
218	120
219	122
220	108
221	110
222	98
223	94
224	80
225	80
226	82
227	78
228	80
229	88
230	82
231	78
232	78

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
233	74
234	76
235	68
236	58
237	48
238	48
239	48
240	52
241	52
242	58
243	58
244	56
245	68
246	62
247	78
248	78
249	68
250	78
251	72
252	62
253	64
254	58
255	58
256	52

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
257	52
258	62
259	68
260	64
261	64
262	68
263	66
264	70
265	74
266	74
267	72
268	48
269	52
270	52
271	50
272	78
273	80
274	80
275	82
276	82
277	58
278	58
279	48
280	44

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
281	48
282	46
283	46
284	68
285	68
286	64
287	64
288	80
289	72
290	68
291	56
292	52
293	52
294	76
295	79
296	80
297	82
298	92
299	90
300	88
301	84
302	82
303	82
304	84

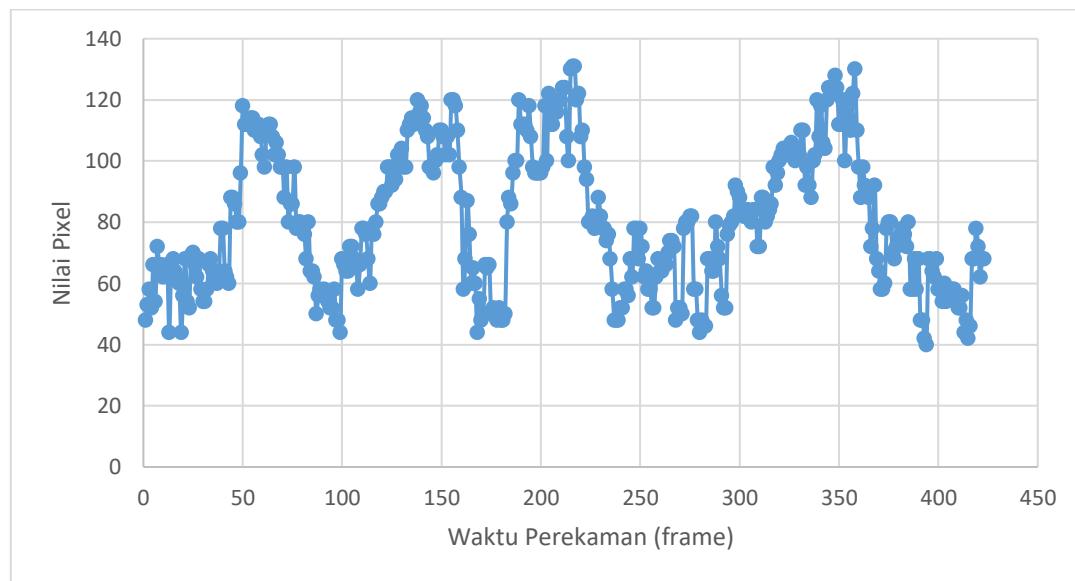
Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
305	82
306	80
307	84
308	84
309	72
310	72
311	88
312	88
313	80
314	82
315	84
316	86
317	98
318	92
319	96
320	100
321	102
322	104
323	104
324	102
325	104
326	106
327	102
328	100

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
329	104
330	102
331	110
332	110
333	92
334	98
335	92
336	88
337	100
338	102
339	120
340	108
341	118
342	106
343	104
344	120
345	124
346	122
347	122
348	128
349	124
350	112
351	112
352	120

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
353	100
354	120
355	114
356	110
357	122
358	130
359	110
360	98
361	88
362	98
363	92
364	90
365	88
366	72
367	78
368	92
369	68
370	64
371	58
372	58
373	60
374	78
375	80
376	80

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
377	70
378	68
379	72
380	74
381	76
382	78
383	76
384	72
385	80
386	58
387	58
388	68
389	58
390	68
391	48
392	48
393	42
394	40
395	68
396	68
397	64

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
398	62
399	68
400	58
401	58
402	54
403	60
404	54
405	56
406	56
407	58
408	58
409	54
410	52
411	52
412	56
413	44
414	48
415	42
416	46
417	68
418	68
419	58



## LAMPIRAN 5

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $5^\circ$  dengan titik koordinat (578, 208).

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
1	48
2	48
3	48
4	38
5	44
6	64
7	48
8	48
9	64
10	64
11	66
12	50
13	44
14	50
15	60
16	58
17	52
18	60
19	50
20	58

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
21	50
22	64
23	52
24	52
25	52
26	62
27	62
28	40
29	52
30	56
31	58
32	50
33	48
34	70
35	76
36	78
37	82
38	82
39	80
40	80

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
41	66
42	60
43	52
44	50
45	52
46	50
47	52
48	66
49	48
50	60
51	56
52	62
53	50
54	58
55	60
56	62
57	40
58	58
59	52
60	48
61	62
62	46
63	60
64	44

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
65	72
66	72
67	78
68	76
69	78
70	86
71	50
72	84
73	68
74	66
75	60
76	58
77	64
78	62
79	62
80	68
81	58
82	64
83	64
84	68
85	68
86	64
87	68
88	60

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
89	68
90	64
91	70
92	76
93	70
94	62
95	56
96	64
97	60
98	64
99	76
100	76
101	76
102	62
103	88
104	72
105	92
106	84
107	96
108	78
109	72
110	60
111	84
112	90

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
113	88
114	84
115	84
116	88
117	88
118	90
119	84
120	80
121	96
122	84
123	82
124	84
125	76
126	80
127	84
128	94
129	88
130	96
131	92
132	84
133	76
134	90
135	88
136	92

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
137	102
138	96
139	84
140	62
141	64
142	52
143	52
144	54
145	52
146	50
147	52
148	66
149	48
150	60
151	58
152	68
153	64
154	62
155	56
156	56
157	48
158	64
159	60
160	64

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
161	52
162	54
163	64
164	58
165	60
166	58
167	60
168	60
169	62
170	56
171	48
172	50
173	60
174	56
175	50
176	48
177	62
178	58
179	64
180	68
181	62
182	58
183	52
184	70

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
185	52
186	52
187	62
188	60
189	52
190	60
191	70
192	60
193	76
194	52
195	64
196	60
197	80
198	82
199	70
200	60
201	58
202	68
203	64
204	64
205	68
206	78
207	64
208	72

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
209	78
210	72
211	82
212	68
213	78
214	82
215	80
216	92
217	80
218	110
219	80
220	86
221	86
222	82
223	88
224	80
225	88
226	90
227	80
228	84
229	80
230	76
231	62
232	80

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
233	70
234	76
235	82
236	62
237	84
238	76
239	78
240	76
241	80
242	76
243	62
244	76
245	78
246	80
247	82
248	80
249	78
250	62
251	80
252	68
253	76
254	80
255	88
256	88

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
257	82
258	90
259	78
260	70
261	62
262	70
263	62
264	70
265	68
266	72
267	76
268	68
269	72
270	58
271	58
272	60
273	50
274	50
275	50
276	50
277	50
278	50
279	48
280	58

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
281	60
282	68
283	64
284	58
285	58
286	58
287	58
288	68
289	60
290	72
291	60
292	72
293	68
294	70
295	52
296	88
297	76
298	68
299	62
300	80
301	90
302	68
303	90
304	72

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
305	80
306	80
307	68
308	98
309	98
310	82
311	88
312	88
313	92
314	98
315	100
316	88
317	96
318	98
319	96
320	74
321	92
322	80
323	90
324	96
325	82
326	96
327	90
328	92

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
329	80
330	88
331	94
332	98
333	90
334	100
335	102
336	90
337	70
338	68
339	76
340	72
341	76
342	82
343	72
344	68
345	62
346	68
347	66
348	76
349	58
350	62
351	70
352	62

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
353	56
354	58
355	48
356	52
357	52
358	58
359	54
360	52
361	58
362	64
363	68
364	60
365	56
366	52
367	64
368	60
369	52
370	60
371	62
372	62
373	56
374	56
375	62
376	52

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
377	58
378	52
379	56
380	52
381	56
382	56
383	44
384	52
385	56
386	56
387	62
388	50
389	60
390	62
391	58
392	56
393	68
394	60
395	64
396	48
397	52
398	52
399	50
400	64

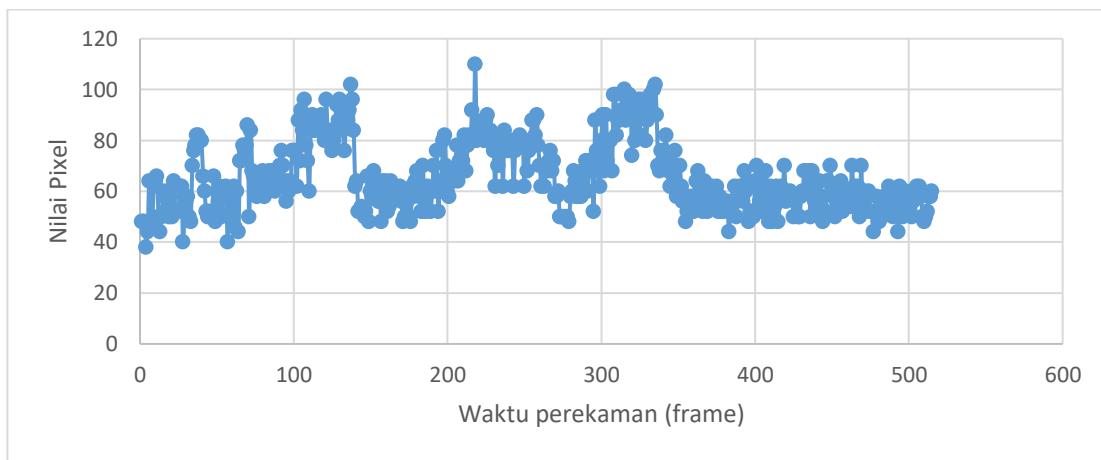
Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
401	70
402	64
403	56
404	52
405	60
406	56
407	68
408	60
409	48
410	62
411	48
412	56
413	54
414	62
415	48
416	56
417	62
418	60
419	70
420	56
421	58
422	58
423	60
424	58

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
425	50
426	56
427	58
428	50
429	50
430	58
431	60
432	68
433	60
434	68
435	68
436	50
437	68
438	58
439	56
440	60
441	52
442	64
443	58
444	48
445	52
446	52
447	64
448	64

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
449	70
450	60
451	58
452	50
453	56
454	60
455	62
456	64
457	52
458	60
459	60
460	58
461	58
462	54
463	70
464	60
465	62
466	56
467	62
468	50
469	70
470	52
471	60
472	52

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
473	58
474	60
475	52
476	52
477	44
478	52
479	58
480	48
481	48
482	56
483	50
484	58
485	52
486	57
487	62
488	58
489	60
490	50
491	52
492	58
493	44

Waktu Perekaman (frame)	Nilai Pixel
494	62
495	55
496	50
497	60
498	60
499	58
500	56
501	52
502	50
503	56
504	58
505	62
506	60
507	62
508	58
509	50
510	48
511	50
512	52
513	58
514	58
515	60



## LAMPIRAN 6

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar 0° sampai 6° dengan titik koordinat (634,256).

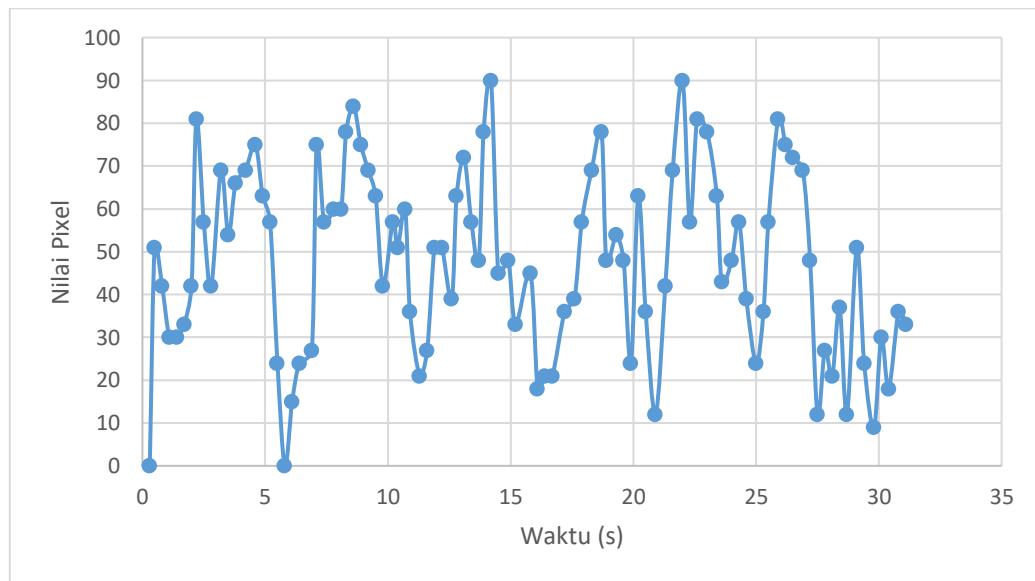
Waktu (s)	Nilai Pixel
0,3	0
0,5	51
0,8	42
1,1	30
1,4	30
1,7	33
2	42
2,2	81
2,5	57
2,8	42
3,2	69
3,5	54
3,8	66
4,2	69
4,6	75
4,9	63
5,2	57
5,5	24
5,8	0
6,1	15
6,4	24
6,9	27
7,1	75
7,4	57
7,8	60
8,1	60
8,3	78
8,6	84
8,9	75
9,2	69
9,5	63

Waktu (s)	Nilai Pixel
9,8	42
10,2	57
10,4	51
10,7	60
10,9	36
11,3	21
11,6	27
11,9	51
12,2	51
12,6	39
12,8	63
13,1	72
13,4	57
13,7	48
13,9	78
14,2	90
14,5	45
14,9	48
15,2	33
15,8	45
16,1	18
16,4	21
16,7	21
17,2	36
17,6	39
17,9	57
18,3	69
18,7	78
18,9	48
19,3	54
19,6	48

Waktu (s)	Nilai Pixel
19,9	24
20,2	63
20,5	36
20,9	12
21,3	42
21,6	69
22	90
22,3	57
22,6	81
23	78
23,4	63
23,6	43
24	48
24,3	57
24,6	39
25	24
25,3	36
25,5	57
25,9	81
26,2	75
26,5	72
26,9	69
27,2	48
27,5	12
27,8	27
28,1	21
28,4	37
28,7	12
29,1	51
29,4	24
29,8	9

Waktu (s)	Nilai Pixel
30,1	30
30,4	18

Waktu (s)	Nilai Pixel
30,8	36
31,1	33



## LAMPIRAN 7

Data dan grafik hubungan antara nilai pixel terhadap waktu pada sampel yang diputar  $0^\circ$  sampai  $7^\circ$  dengan titik koordinat (610, 278).

Waktu (s)	Nilai Pixel
0,5	14
0,8	21
1,1	35
1,4	18
1,7	32
2,1	18
2,6	28
2,9	39
3,3	98
3,6	130
3,9	53
4,2	25
4,5	49
4,9	46
5,2	35
5,5	49
5,9	105
6,1	105
6,4	158
6,8	126
7,2	126
7,6	32
7,9	67
8,3	109
8,6	116
8,9	81
9,2	102
9,6	109
9,9	137
10,2	101
10,4	123
10,7	158

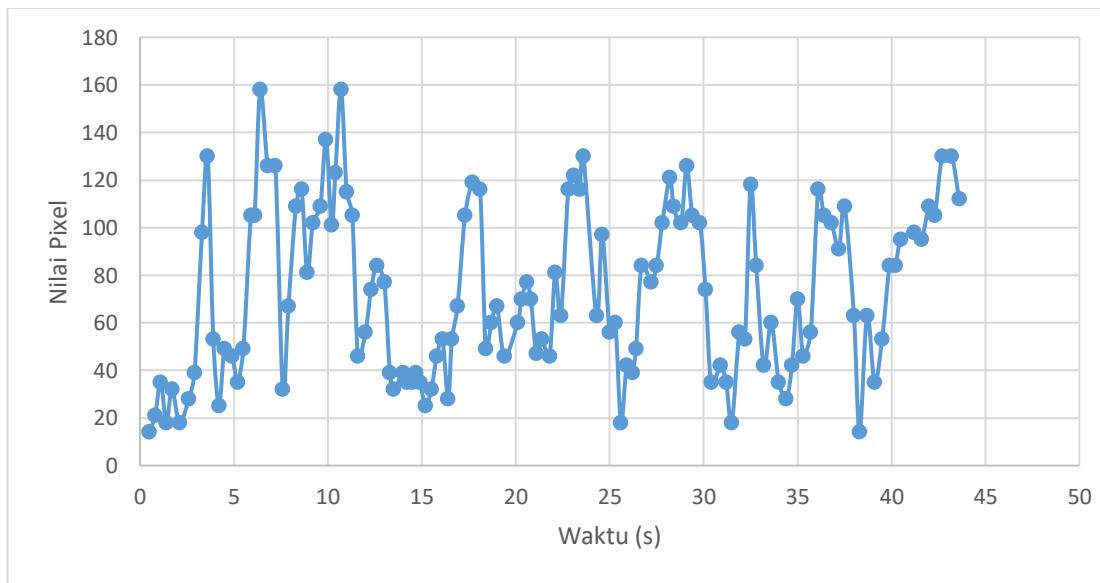
Waktu (s)	Nilai Pixel
11	115
11,3	105
11,6	46
12	56
12,3	74
12,6	84
13	77
13,3	39
13,5	32
14	39
14,2	35
14,5	35
14,7	39
14,9	35
15,2	25
15,5	32
15,8	46
16,1	53
16,4	28
16,6	53
16,9	67
17,3	105
17,7	119
18,1	116
18,4	49
18,7	60
19	67
19,4	46
20,1	60
20,3	70
20,6	77
20,8	70

Waktu (s)	Nilai Pixel
21,1	47
21,4	53
21,8	46
22,1	81
22,4	63
22,8	116
23,1	122
23,4	116
23,6	130
24,3	63
24,6	97
25	56
25,3	60
25,6	18
25,9	42
26,2	39
26,4	49
26,7	84
27,2	77
27,5	84
27,8	102
28,2	121
28,4	109
28,8	102
29,1	126
29,4	105
29,8	102
30,1	74
30,4	35
30,9	42
31,2	35
31,5	18

Waktu (s)	Nilai Pixel
31,9	56
32,2	53
32,5	118
32,8	84
33,2	42
33,6	60
34	35
34,4	28
34,7	42
35	70
35,3	46

Waktu (s)	Nilai Pixel
35,7	56
36,1	116
36,4	105
36,8	102
37,2	91
37,5	109
38	63
38,3	14
38,7	63
39,1	35
39,5	53

Waktu (s)	Nilai Pixel
39,9	84
40,2	84
40,5	95
41,2	98
41,6	95
42	109
42,3	105
42,7	130
43,2	130
43,6	112

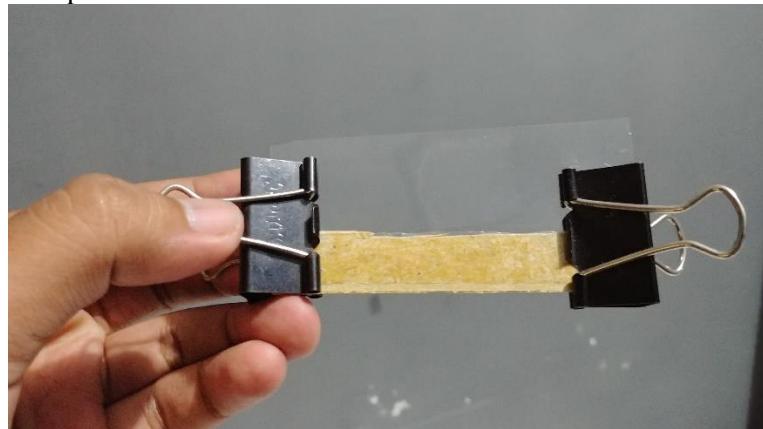


## LAMPIRAN 8

1. Instrumen interferometer Michelson



2. Mica Transparan







CX