

**RANCANG BANGUN SISTEM PENENTUAN TEMPERATUR  
NONKONTAK BERDASARKAN HUKUM PERGESERAN WIEN**

**SKRIPSI**

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



Oleh:  
Saparullah  
NIM 13306141038

**PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA  
2017**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi yang berjudul “**Rancang Bangun Sistem Penentuan Temperatur Nonkontak Berdasarkan Hukum Pergeseran Wien**” yang disusun oleh Saparullah, NIM 13306141038 ini telah memenuhi syarat dan disetujui oleh pembimbing untuk diujikan.



Yogyakarta, 19 Desember 2017

Disetujui,

Dosen Pembimbing,

A handwritten signature in black ink, appearing to be "Agus Purwanto", is written over a faint rectangular stamp area.

**Agus Purwanto, M.Sc**

**NIP. 19650813 199512 1 001**

## **HALAMAN PERNYATAAN**

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Saparullah

NIM : 13306141038

Program Studi : Fisika

Judul TAS : Rancang Bangun Sistem Penentuan Temperatur  
Nonkontak Berdasarkan Hukum Pergeseran Wien

menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Yogyakarta, 28 Desember 2017

Yang menyatakan,

Saparullah  
NIM. 13306141038

**HALAMAN PENGESAHAN**

Tugas Akhir Skripsi

**RANCANG BANGUN SISTEM PENENTUAN TEMPERATUR  
NONKONTAK BERDASARKAN HUKUM PERGESERAN WIEN**

Disusun oleh:

Saparullah  
NIM 13306141038

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi Program Studi  
Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri

Yogyakarta

Pada tanggal 28 Desember 2017

**TIM PENGUJI**

Nama/Jabatan

Tanda Tangan

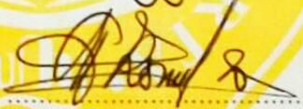
Tanggal

Agus Purwanto, M.Sc.  
Ketua Penguji/Pembimbing



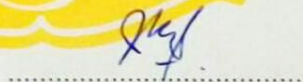
3-1-2018

Dr. Warsono, M.Si.  
Sekretaris Penguji



03-01-2018

Sumarna, M.Si., M.Eng.  
Penguji Utama



03-01-2018

Yogyakarta, 10 Januari 2018

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Universitas Negeri Yogyakarta

Dekan,

**Dr. Hartono**

NIP. 19620329 198702 1 002

**HALAMAN *MOTTO***

**“AKU PEMALAS, MAKA AKU KERJAKAN”**

## PERSEMBAHAN

Karya ini penulis persembahkan untuk Bapak Saharuddin dan Ibu Husni selaku Ayah dan Ibu penulis yang doa keduanya tidak pernah terputus untuk kesuksesan penulis, yang memberi dorongan moril dan materil paling besar dalam penyusunan karya ini. Kepada saudara-saudara penulis, Amrullah & Yuris Iis, Rabiah, Saenab, Fajar dan Husain yang sangat tulus mendukung penyusunan karya ini. Kepada keponakan penulis yang sangat menggemaskan, Chaca, yang sudah sangat membantu menyusun ulang *mood* penulis setiap kali runtuh. Kepada keluarga 87 “aku ngene amargo koe” yang telah mengajarkan cara ‘bertahan’ dan ‘menyerang’ paling absurd dan memberi dorongan dalam arti sebenarnya serta motivasi begitu ikhlas berbalut celaan dan senda gurau. Kepada teman-teman seperjuangan Fisika E 2013 yang telah membantu mengerjakan laporan-laporan praktikum, yang ajaibnya meski terkadang penulis masih tertidur pulas, namun laporan-laporan tersebut sudah tersusun rapi dan... *submitted*. Kepada keluarga IMM Bulaksumur dan Karangmalang yang telah berjasa menjadi koridor untuk penulis dalam bermuamalah hingga penulis tetap pada jalur ‘mengerjakan skripsi’. Kepada keluarga KSR UNY yang entah mengapa mereka sangat senang bertanya “sudah bab berapa mas?”, mungkin begitulah cara mereka memberi motivasi. Kepada calon pendamping hidup penulis, yang penulis pun belum tahu siapa gerangan, yang secara tidak langsung memberi motivasi secara kontinyu untuk segera menyelesaikan karya ini. Dan yang terakhir kepada seluruh pihak yang telah memberi dorongan, doa yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

# **RANCANG BANGUN SISTEM PENENTUAN TEMPERATUR NONKONTAK BERDASARKAN HUKUM PERGESERAN WIEN**

Oleh:

Saparullah  
NIM 13306141038

## **ABSTRAK**

Tujuan penelitian ini adalah (1) merancang kamera termal untuk pengukuran temperatur secara nonkontak, (2) mengetahui penerapan hukum pergeseran Wien pada gelombang inframerah, dan (3) membangun program pada Matlab untuk mengolah gambar hasil tangkapan kamera inframerah.

Pengukuran temperatur didasarkan pada pengukuran distribusi intensitas sinar inframerah yang dipancarkan oleh obyek ukur. Berkas inframerah dilewatkan kisi difraksi dan selanjutnya ditangkap oleh kamera inframerah. Citra inframerah kemudian diolah menggunakan Matlab untuk memperoleh spektrum inframerah. Berdasarkan hukum Stefan-Boltzman dan hukum pergeseran Wien dapat ditentukan temperatur obyek yang memancarkan radiasi inframerah. Inframerah yang ditangkap oleh kamera terdiri dari tiga lapis warna yaitu *red layer*, *green layer* dan *blue layer*.

Temperatur dapat ditentukan dengan sistem nonkontak melalui analisis spektrum inframerah. Hasil penelitian menunjukkan pergeseran panjang gelombang intensitas maksimum dengan konstanta pergeseran pada *red layer* sebesar  $(10 \pm 3) \times 10^4$  nmK, pada *green layer* sebesar  $(11 \pm 4) \times 10^4$  nmK dan pada *blue layer* sebesar  $(81 \pm 4) \times 10^3$  nmK. Berkaitan dengan teori Stefan-Boltzmann, didapatkan nilai konstanta untuk *red layer* sebesar  $(42 \pm 2) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup>, *green layer*  $(37 \pm 1) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup>, dan *blue layer* sebesar  $(54 \pm 3) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup>.

Kata kunci: spektrum inframerah, hukum Stefan-Boltzman, hukum pergeseran Wien, temperatur

# **DESIGN OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM BASED ON WIEN'S DISPLACEMENT LAW**

By:

Saparullah  
SIDN 13306141038

## **ABSTRACT**

The objectives of this study were (1) to design a thermal camera to measure temperature using non-contact method, (2) to study the application of Wien's displacement law in infrared spectrum, and (3) to build a Matlab program to process images captured by infrared camera.

Temperature measurement was based on the measurement of the intensity distribution of infrared rays emitted by the measured object. Infrared rays passed through diffraction grating was captured by infrared camera. The infrared images were processed using Matlab to obtain infrared spectrum. According to Stefan-Boltzmann law and Wien's displacement law, the temperature of object emitting infrared radiation could be determined. The infrared rays captured by camera consisted of red layer, green layer and blue layer.

The temperature could be determined using non-contact method by doing infrared spectrum analysis. The study shows the displacement of maximum intensity wavelength with a displacement constant of  $(10 \pm 3) \times 10^4$  nmK for red layer,  $(11 \pm 4) \times 10^4$  nmK for green layer, and  $(81 \pm 4) \times 10^3$  nmK for blue layer. Related to Stefan-Boltzmann law, a constant was obtained of  $(42 \pm 2) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup> for red layer,  $(37 \pm 1) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup> for green layer, and  $(54 \pm 3) \times 10^{-8}$  nm/K<sup>4</sup> for blue layer.

Keyword: infrared spectrum, Stefan-Boltzmann law, Wien's displacement law, temperature

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillahilladzi an'amana bini'matil islam wal iman wa anzala rasulahu  
bilhud wa diinil haqq.*

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas berkat nikmat-Nya, Tugas Akhir Skripsi dalam rangka untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains dengan judul **“Rancang Bangun Sistem Penentuan Temperatur Nonkontak Berdasarkan Hukum Pergeseran Wien”** dapat disusun sesuai dengan harapan. Tugas Akhir Skripsi ini dapat diselesaikan tidak lepas dari bantuan dan kerjasama dengan pihak lain. Berkenaan dengan hal tersebut, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang terhormat:

1. Dr. Hartono selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam yang memberikan persetujuan pelaksanaan Tugas Akhir Skripsi.
2. Yusman Wiyatmo, M.Si. dan Drs. Nur Kadarisman, M.Si. selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika dan Ketua Program Studi Fisika beserta dosen dan staf yang telah memberikan bantuan dan fasilitas selama proses penyusunan pra proposal sampai dengan selesainya Tugas Akhir Skripsi ini.
3. Agus Purwanto, S.Si., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir Skripsi yang telah banyak memberikan semangat, dorongan, dan bimbingan selama penyusunan Tugas Akhir Skripsi ini.
4. Semua pihak, secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu atas bantuan dan perhatiannya selama penyusunan Tugas Akhir Skripsi ini.

Akhirnya, semoga segala bantuan yang telah diberikan semua pihak di atas menjadi amalan yang bermanfaat dan mendapatkan balasan dari Allah SWT dan Tugas Akhir Skripsi ini menjadi informasi bermanfaat bagi pembaca atau pihak lain yang membutuhkan.

Yogyakarta, 28 Desember 2017

Penulis,

Saparullah  
NIM. 13306141038

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
HALAMAN <i>MOTTO</i> .....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	3
C. Batasan Masalah.....	4
D. Rumusan masalah.....	4
E. Tujuan penelitian.....	4
F. Manfaat Penelitian.....	5
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
A. Panas ( <i>Heat</i> ).....	6
B. Radiasi.....	8
1. <i>Blackbody Radiation</i> .....	8
2. Emisivitas.....	41
C. Inframerah.....	42
D. Pixel.....	45
1. Pixel Sensor.....	46
2. Pixel Tampilan.....	49
E. Sensor Gambar.....	49
1. Jenis-jenis Sensor Gambar.....	50
2. Fungsi Sensor Gambar.....	57
3. <i>Parallelism</i> .....	64
F. Nikel.....	70
G. Kisi Difraksi.....	71
H. Gambar.....	71
1. <i>Grayscale</i> .....	71
2. Biner.....	72
3. Berwarna.....	72
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>73</b>

A. Tempat dan Waktu Penelitian .....	73
B. Variabel Penelitian .....	73
C. Jenis penelitian .....	74
D. Alat dan Bahan .....	74
E. Spesifikasi Alat-alat Penelitian .....	75
F. Prosedur Penelitian.....	76
G. Diagram Alir .....	78
H. Teknik Analisis Data.....	79
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>81</b>
A. Citra Tangkapan Sensor Kamera .....	81
B. Pergeseran Titik Puncak Panjang Gelombang Intensitas Maksimum..	84
C. Menghitung Luas di bawah Kurva Distribusi .....	92
D. Hubungan Temperatur Nikel dan Luas di bawah Kurva Distribusi.....	92
E. Menentukan Konstanta Wien.....	97
F. Menentukan Konstanta Wien Terkoreksi.....	99
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>101</b>
A. Kesimpulan .....	101
B. Saran.....	103
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>104</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>106</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Data iterasi untuk mendapatkan solusi $x$ .....	40
<b>Tabel 2.</b> Perbandingan sensor CCD, MOS dan CMOS.....	56
<b>Tabel 3.</b> Panjang Gelombang (pixel) sebagai Fungsi Arus .....	90
<b>Tabel 4.</b> Panjang Gelombang (nm) sebagai Fungsi Arus .....	90
<b>Tabel 5.</b> Arus (A) dan Luas di bawah Kurva Distribusi (nm).....	92
<b>Tabel 6.</b> Data Konversi Arus Menjadi Temperatur.....	93
<b>Tabel 7.</b> Data $T^4$ dan Luas di bawah Kurva Distribusi .....	94
<b>Tabel 8.</b> Perbandingan data temperatur riil dan ideal sampel .....	100

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Ilustrasi <i>Blackbody</i> .....	9
<b>Gambar 2.</b> Ilustrasi Intensitas $I_\lambda$ .....	12
<b>Gambar 3.</b> Sudut Bidang dan Sudut Ruang.....	13
<b>Gambar 4.</b> Ilustrasi $dA$ .....	14
<b>Gambar 5.</b> Medan Radiasi dalam Kubus $a^3$ .....	18
<b>Gambar 6.</b> Pemisalan Jumlah Titik Yang Mungkin .....	20
<b>Gambar 7.</b> Ilustrasi Osilator Harmonik .....	24
<b>Gambar 8.</b> Ilustrasi Ruang Fase Elips .....	25
<b>Gambar 9.</b> Distribusi Planck.....	32
<b>Gambar 10.</b> Distribusi Planck (Matlab).....	33
<b>Gambar 11.</b> Area Spektral Inframerah .....	43
<b>Gambar 12.</b> Area Spektral Beberapa Filter .....	43
<b>Gambar 13.</b> Area Spektral Temperatur Kaca dan Filter SP-LP .....	44
<b>Gambar 14.</b> Bentuk Fisik Pixel.....	46
<b>Gambar 15.</b> Area Peka Cahaya pada Pixel .....	47
<b>Gambar 16.</b> Grafik Panjang Gelombang vs Respon Relatif.....	48
<b>Gambar 17.</b> Bentuk Pixel pada CCD.....	51
<b>Gambar 18.</b> Kapasitor MOS .....	52
<b>Gambar 19.</b> Proses <i>Read Out</i> pada Sensor CCD .....	53
<b>Gambar 20.</b> Model Pixel pada Sensor MOS .....	54
<b>Gambar 21.</b> Proses <i>Addressing</i> pada Sensor MOS.....	55
<b>Gambar 22.</b> Penyerapan Cahaya Pada Silikon .....	59
<b>Gambar 23.</b> Fotodiode Bias Mundur .....	60
<b>Gambar 24.</b> Fotodiode MOS Bias Mundur .....	61
<b>Gambar 25.</b> Skema Susunan <i>Scanning</i> Gambar .....	62
<b>Gambar 26.</b> Operasi <i>Timing</i> .....	63
<b>Gambar 27.</b> Skema Deteksi Muatan .....	63
<b>Gambar 28.</b> Arsitektur Model Serial .....	66
<b>Gambar 29.</b> Arsitektur Model <i>Column-Parallel</i> .....	68

<b>Gambar 30.</b> Arsitektur Model <i>Pixel-Parallel</i> .....	69
<b>Gambar 31.</b> Ilustrasi Susunan Alat.....	76
<b>Gambar 32.</b> Citra Hasil Tangkapan Kamera Inframerah.....	82
<b>Gambar 33.</b> Ilustrasi Citra Dari Sebuah Matriks .....	85
<b>Gambar 34.</b> Kurva distribusi rata-rata nilai pixel .....	87
<b>Gambar 35.</b> Kurva distribusi nilai pixel fungsi panjang gelombang.....	89
<b>Gambar 36.</b> Pergeseran panjang gelombang intensitas maksimum .....	91
<b>Gambar 37.</b> Karakteristik termokopel .....	93
<b>Gambar 38.</b> Grafik luas di bawah kurva sebagai fungsi $T^4$ .....	96
<b>Gambar 39.</b> Grafik panjang gelombang sebagai fungsi $T^{-1}$ .....	99
<b>Gambar 40.</b> Ilustrasi rancangan alat pengukur temperatur nonkontak.....	102

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Citra hasil tangkapan kamera inframerah .....	107
<b>Lampiran 2.</b> Bagian citra yang dianalisis dari lampiran.....	108
<b>Lampiran 3.</b> Data Karakteristik Termokopel .....	110
<b>Lampiran 4.</b> Data Temperatur Sampel yang Dipanaskan.....	110
<b>Lampiran 5.</b> Alat dan bahan .....	110

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Termometer digunakan untuk mengukur dan mengetahui temperatur suatu bahan. Ada berbagai macam termometer yang dapat dijumpai sehari-hari seperti termometer alkohol yang bersifat analog hingga beberapa jenis termometer digital yang memanfaatkan semikonduktor sebagai sensor temperatur yang dapat dikonversi menjadi tegangan. Dari berbagai jenis termometer tersebut, metode penggunaannya mengharuskan pengguna untuk menempatkan termometer sebagai pengukur temperatur pada bahan uji yang akan diukur derajat panasnya, sehingga beberapa contoh termometer tersebut tidak dapat digunakan untuk pengukuran bahan-bahan pada temperatur tertentu.

Dalam dua dekade terakhir, dunia industri telah mengembangkan metode baru dalam pengukuran temperatur dengan mengolah citra termal (*thermal imaging*) dari radiasi inframerah. Metode tersebut sering juga disebut sebagai *thermography*. Aplikasi dari metode ini kemudian banyak digunakan dalam dunia riset dan pengembangan serta industri sebagai uji nondestruktif, monitoring, uji jenis gas dan lain sebagainya (Vollmer and Mollmann, 2010:1). Citra termal memiliki kemampuan sebagai pengukur jarak jauh (*remote measurer*) sehingga metode ini dapat menggantikan peran termometer konvensional dalam pengukuran temperatur suatu bahan.

Kamera termal sudah banyak diproduksi dan dipasarkan oleh beberapa perusahaan. Harga jual sebuah kamera termal dengan merk Fluke bisa mencapai USD 10.000 (alibaba.com) atau setara dengan Rp 130.000.000. Jika dibandingkan dengan sebuah kamera digital yang hanya dijual dengan harga Rp 100.000, harga sebuah kamera termal terbilang sangat mahal.

Kamera digital selalu dilengkapi dengan sensor yang dibangun dari bahan semikonduktor yang peka terhadap foton dengan panjang gelombang tertentu. Sensor yang dibangun dengan bahan silikon akan peka terhadap foton dengan panjang gelombang dibawah  $1,1 \mu\text{m}$  (termasuk cahaya tampak):  $(0,4 - 0,8) \mu\text{m}$  (Maitre, 2015:92). Oleh karena itu, setiap kamera digital dilengkapi dengan filter yang hanya meloloskan cahaya tampak. Pada dasarnya setiap kamera digital dapat digunakan sebagai detektor inframerah (inframerah gelombang pendek) dengan melepas filter yang hanya meloloskan cahaya tampak dan memasang filter yang hanya meloloskan inframerah.

Sensor pada kamera termal peka terhadap tiga interval panjang gelombang inframerah yaitu panjang gelombang  $(0,8 - 1,7) \mu\text{m}$  untuk inframerah gelombang pendek,  $(3 - 5) \mu\text{m}$  untuk inframerah gelombang sedang, dan  $(7 - 14) \mu\text{m}$  untuk inframerah gelombang panjang. Tiga interval panjang gelombang tersebut merupakan *range* panjang gelombang yang digunakan dalam dunia termografi (Vollmer and Mollmann, 2010:9).

Citra inframerah yang diradiasikan oleh kawat (nikel) yang telah dialiri arus listrik akan didifraksikan untuk mengetahui nilai panjang gelombang

puncak intensitas sebagai fungsi posisi pixel. Hukum *blackbody* Planck menyatakan bahwa setiap kurva (mewakili temperatur tertentu,  $T$ ) memiliki nilai maksimum pada panjang gelombang tertentu pula ( $\lambda_{peak}$ ). Wien kemudian menyatakan hubungan nilai  $\lambda_{peak}$  dan  $T$  dengan sebuah konstanta yang disebut konstanta Wien dalam hukum pergeseran Wien.

Pengolahan citra termal dapat memanfaatkan inframerah gelombang pendek sehingga siapapun dapat membuat kamera termalnya sendiri menggunakan kamera digital biasa dengan melepas filter inframerah dan memasang filter cahaya tampak. Pengolahan citra hasil tangkapan kamera digital yang difungsikan sebagai kamera inframerah dapat dilakukan dengan menggunakan aplikasi Matlab. Matlab sangat fleksibel untuk pengolahan data berbentuk matriks sehingga pengolahan citra menggunakan Matlab pun sangat relevan dilakukan karena data yang diterima sensor pada kamera yang tersusun sebagai pixel, dapat dinyatakan sebagai matriks dalam Matlab. Meski begitu Matlab tidak dilengkapi program khusus untuk mengolah citra termal sehingga harus dibangun program yang mendukung proses pengolahan citra termal hasil tangkapan kamera.

## **B. Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan, dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

1. Harga kamera termal yang sangat tinggi.

2. Penerapan hukum pergeseran Wien untuk mengetahui hubungan temperatur dengan radiasi inframerah.
3. Matlab belum memiliki program khusus untuk mengolah citra termal.

### **C. Batasan Masalah**

Masalah dalam penelitian ini dibatasi pada rancang bangun alat ukur temperatur nonkontak menggunakan kamera dengan menerapkan hukum pergeseran Wien untuk menentukan temperatur suatu bahan.

### **D. Rumusan Masalah**

Berdasarkan identifikasi masalah yang ada, masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang kamera termal untuk pengukuran temperatur secara nonkontak?
2. Bagaimana menerapkan hukum pergeseran Wien pada gelombang inframerah?
3. Bagaimana membangun program pada Matlab untuk mengolah gambar hasil tangkapan kamera inframerah?

### **E. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang kamera termal untuk pengukuran temperatur secara nonkontak.
2. Mengetahui penerapan hukum pergeseran Wien pada gelombang inframerah.
3. Membangun program pada Matlab untuk mengolah gambar hasil tangkapan kamera inframerah.

#### **F. Manfaat Penelitian**

Berdasarkan tujuan penelitian, manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan metode pengukuran temperatur dengan sistem nonkontak.
2. Memahami hukum pergeseran Wien melalui eksperimen.
3. Memahami penggunaan dan pemanfaatan aplikasi pemrograman Matlab dalam pengolahan citra.

## **BAB II**

### **KAJIAN TEORI**

#### **A. Panas (*Heat*)**

Panas adalah transfer energi dari suatu objek ke objek lain. Proses transfer ini diamati dengan mengukur temperatur dari objek tersebut. Panas mengalir dari benda yang lebih panas menuju benda yang lebih dingin. Pada waktu  $t$  tertentu temperatur akan mencapai kesetimbangan yang disebut kesetimbangan termal (*thermal equilibrium*).

Pada umumnya ada kesalahan dalam penggunaan kata ‘panas’ (*heat*). Tidakkah benar apabila sebuah objek dikatakan mengandung panas. Ketika sebuah oven diset 200°C, ini menunjukkan ‘temperatur’ (*temperature*) bukan panas. Ketika sebuah pemanas dihidupkan dalam sebuah ruangan, yang terjadi adalah proses transfer panas dari pemanas pada ruangan.

Panas tak bisa diraba namun dapat dirasakan. Panas tak bisa langsung diukur, yang bisa diukur adalah perubahan temperatur. Jumlah panas yang dibutuhkan untuk mengubah temperatur tergantung pada kapasitas panas suatu materi.

Ada tiga satuan umum dari panas, gram-kalori, kilogram-kalori, dan *British Thermal Unit* (BTU). Satu kilogram-kalori adalah jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur satu derajat Celsius dari satu kilogram air. Begitu juga untuk satuan BTU, akan tetapi dalam satuan British:

satu BTU adalah jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur satu derajat Fahrenheit dari satu pound air.

Penggunaan kalori dalam menyatakan energi pada makanan memiliki makna yang sama dengan kilogram-kalori yang telah dijelaskan sebelumnya. Satuan SI dari panas adalah joule. Satu kilokalori (kcal) sama dengan 4,186 joule (J).

Transfer panas terbagi menjadi tiga yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Temperatur dari suatu objek tergantung pada sifat-sifat fisis dari material penyusun objek tersebut, termasuk di dalamnya kapasitas panas dan panas jenis.

### **Kapasitas Panas dan Kapasitas Panas Jenis**

Setiap bahan berbeda dalam jumlah panas yang dibutuhkan untuk memperoleh kenaikan temperatur. Jumlah panas tersebut tergantung pada kapasitas panas yang dinyatakan dengan

$$\text{kapasitas panas} = Q / (T_2 - T_1) \quad (1)$$

dimana  $Q$  adalah jumlah panas yang disalurkan dan  $T_2 - T_1$  adalah kenaikan temperatur. Kapasitas panas jenis (sering disebut panas jenis) didefinisikan sebagai kapasitas panas per satuan massa

$$c = \frac{\text{kapasitas panas}}{\text{massa}} = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

Panas jenis adalah jumlah panas yang harus disalurkan pada satu satuan massa suatu bahan untuk menaikkan temperatur satu derajat. Nilai  $c$  berbeda-

beda untuk setiap material. Jumlah panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur dari  $T_1$  menjadi  $T_2$  adalah

$$Q = mc(T_2 - T_1) \quad (3)$$

Nilai  $c$  yang tinggi artinya memerlukan lebih banyak panas untuk menaikkan temperatur sebesar satu derajat setiap satuan massa dibanding nilai  $c$  yang lebih rendah.

## **B. Radiasi**

Transfer panas dengan radiasi terjadi pada kecepatan cahaya sedangkan konduksi dan konveksi tergantung pada material rambatnya. Radiasi merupakan emisi energi yang bersifat kontinyu dari sebuah permukaan objek. Radiasi dapat terjadi di ruang hampa, sedangkan konduksi dan konveksi tidak. Artinya, radiasi tidak memerlukan media sebagai penghantar panas. Contoh riilnya adalah tubuh dapat merasakan panas dari matahari meskipun melewati ruang hampa sebelum mencapai atmosfer bumi (Holst, 2000: 34).

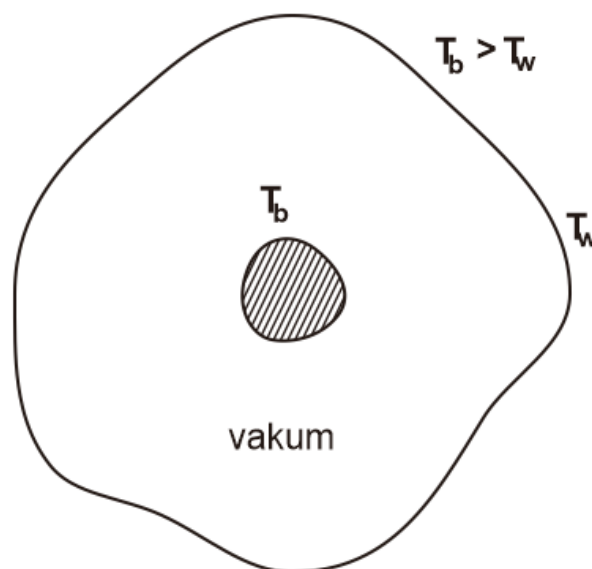
Dalam ilmu *thermal imaging*, digunakan alat pengukur non-kontak. Alat tersebut menangkap radiasi yang dipancarkan dari suatu permukaan objek. Energi yang diemisikan tergantung pada temperatur dan karakteristik permukaan objek.

### **1. Blackbody Radiation**

Setiap objek memancarkan radiasi sebagai hasil dari temperatur objek tersebut. Istilah ini pertama kali dikemukakan oleh fisikawan berkebangsaan Jerman bernama Gustav Robert Kirchoff (1824-1887). Ia

mengemukakan peran *blackbody* untuk mengetahui emisi radiasi suatu objek. *Blackbody* didefinisikan sebagai *body* atau objek yang mampu menyerap radiasi termal yang datang pada objek tersebut (Stewart and Johnson, 2017: 3). Dalam literatur lain, dikatakan bahwa sebuah *blackbody* mampu menyerap (*absorbing*) sekaligus memancarkan (*emitting*) radiasi dalam jumlah yang sama besar (Balaji, 2014: 14).

Untuk ilustrasi, sebuah *blackbody* berukuran kecil dengan temperatur  $T_b$  diletakkan di dalam sebuah wadah tertutup dengan temperatur di sekeliling wadah adalah  $T_w$  dan  $T_b > T_w$ . Transfer panas berupa konduksi dan konveksi dianggap tidak terjadi karena *blackbody* dan wadah disusun sedemikian sehingga *blackbody* tidak menyentuh dinding wadah dan ruang wadah merupakan ruang hampa (*vacuum*).



**Gambar 1.** Ilustrasi *blackbody* sebagai pemancar radiasi (*emitter*)

Setelah beberapa saat, *blackbody* akan mencapai kesetimbangan termal dengan temperatur lingkungan. Objek *blackbody* di atas menyerap dan memancarkan radiasi dalam jumlah yang sama. Jika jumlah penyerapan dan emisi berbeda, akan terjadi laju *net* dari perubahan entalpi; sebagai konsekuensinya *blackbody* mengalami perubahan temperatur (naik-turun) pada saat tercapai kesetimbangan termal yang bertentangan dengan hukum kedua termodinamika. Dengan demikian, *blackbody* harus menyerap dan memancarkan radiasi dengan jumlah yang sama (Balaji, 2014: 14).

Radiasi tidak tergantung pada ukuran dan bentuk. Jika dua buah *blackbody*, ukuran dan bentuk yang berbeda, masing-masing memiliki temperatur  $T_b$  dan temperatur lingkungan  $T_w$  dan dengan menganggap bahwa tidak terjadi konduksi dan konveksi, maka kedua *blackbody* suatu saat akan memiliki temperatur yang sama dengan  $T_w$ . Selama tertutup rapat, *blackbody* akan terus memancarkan radiasi yang sama (*isotropic*), dan hanya tergantung pada temperatur dari *blackbody* tersebut (Balaji, 2014:18).

*Blackbody radiation* mula-mula diajukan oleh Josef Stefan dan Ludwig Boltzmann pada akhir abad ke-19 yang menyatakan bahwa radiasi yang diemisikan oleh *blackbody* sebanding dengan pangkat empat dari temperatur *body*.

## 1.1 Rapat Energi (*Energy Density*)

Pemancaran radiasi oleh *blackbody* mengakibatkan timbulnya medan radiasi (*radiation field*) yang disebut sebagai *black radiation*. Medan radiasi ini merupakan gelombang elektromagnetik dengan rapat energi,  $u$ , yang selalu sama pada setiap arah (isotropis) saat tercapai keadaan kesetimbangan (*equilibrium*). Rapat energi didefinisikan dengan jumlah energi yang diserap atau diradiasikan per satuan volum yang dilewati oleh energi tersebut.

Intensitas,  $I$ , secara umum merepresentasikan daya,  $P$ , per satuan luas,  $A$ , sehingga daya merupakan hasil kali intensitas dan satuan luas. Jika dituliskan secara matematis menjadi

$$I = \frac{P}{A} \quad (4)$$

$$P = I \cdot A \quad (5)$$

Daya merupakan laju perubahan energi per satuan waktu ( $P = Q/t$ ) sehingga energi adalah hasil kali daya dengan waktu ( $Q = P \cdot t$ ). Maka dapat dituliskan

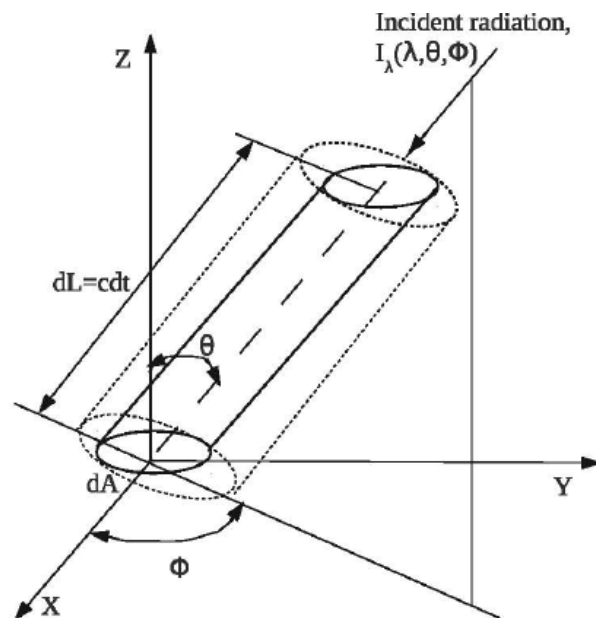
$$Q = I \cdot A \cdot t \quad (6)$$

Berbicara tentang *blackbody* (sesuai dengan Gambar 2), total energi yang dipancarkan atau diradiasikan dapat dinyatakan dengan

$$dQ = I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) dA \cos\theta d\omega d\lambda dt \quad (7)$$

dengan notasi  $dQ$  merepresentasikan energi, notasi  $I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi)$  menunjukkan intensitas dalam koordinat bola pada arah  $(\theta, \phi)$  dan  $dA$  menunjukkan area yang dilewati oleh radiasi. Radiasi *blackbody*

bersifat *diffuse emitter* atau pemancar ke segala arah dengan nilai yang sama (*isotropic*) sehingga meskipun dikatakan sebelumnya bahwa intensitas radiasi memancar dalam arah  $(\theta, \phi)$ , namun intensitas bukan merupakan fungsi arah  $(\theta, \phi)$ . Garis normal bidang  $dA$  sejajar dengan sumbu  $Z$  (koordinat kartesian) sehingga fluks radiasi akan maksimum saat radiasi melewati  $dA$  sejajar dengan sumbu  $Z$  dan minimum saat tegak lurus dengan sumbu  $Z$ . Oleh karena itu  $dA$  harus dikalikan dengan  $\cos\theta$  untuk menyatakan fluks yang menembus bidang  $dA$ .

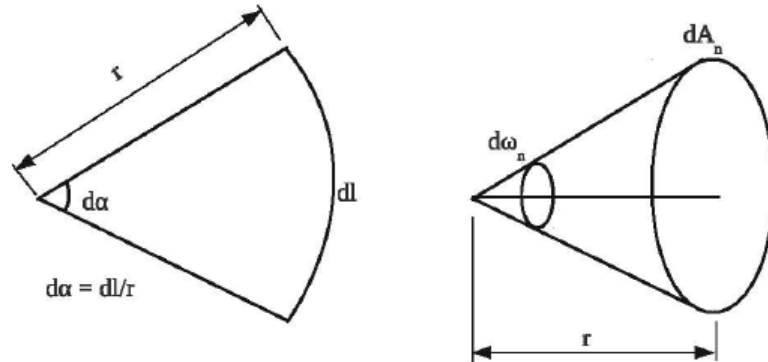


**Gambar 2.** Ilustrasi dari intensitas,  $I_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$ , datang pada permukaan  $dA$  (Balaji, 2014: 32)

Notasi  $d\lambda$  diikutkan ke dalam persamaan yang menunjukkan bahwa intensitas radiasi *blackbody* merupakan fungsi panjang gelombang.

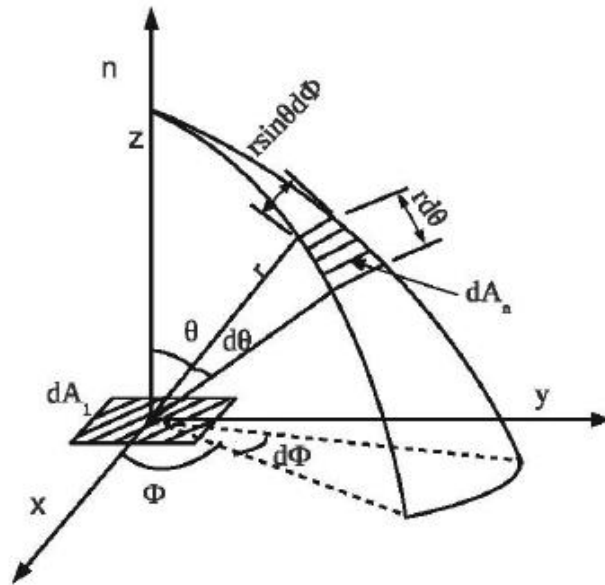
### Sudut Ruang

Radiasi *blackbody* perlu dinyatakan untuk seluruh arah ( $\theta, \phi$ ). Untuk itu digunakan istilah sudut ruang (*solid angle*) atau dinotasikan dengan  $d\omega$  yang dikenal dalam koordinat bola.



**Gambar 3.** Sudut bidang (kiri) dan sudut ruang (kanan) (Balaji, 2014: 19)

Untuk memudahkan pemahaman, sudut ruang dapat dianalogikan dengan sudut bidang (*plane angle*). Besar sudut bidang  $d\alpha$  sama dengan panjang busur  $dl$  dibagi jari-jari  $r$  atau dapat dinyatakan  $d\alpha = dl/r$ . Analog dengan sudut bidang, sudut ruang (*solid angle*)  $d\omega$  sama dengan luas pada permukaan bola  $dA$  dibagi dengan kuadrat jari-jari bola  $r^2$  atau dapat dinyatakan  $d\omega = dA/r^2$ .



**Gambar 4.** Ilustrasi  $dA$  untuk menentukan sudut ruang ( $d\omega$ )  
(Balaji, 2014: 22)

Karena  $dA$  sangat kecil maka luasannya dianggap persegi panjang sehingga luas dari  $dA$  adalah hasil kali sisi-sisinya. Panjang sisi pertama adalah  $r \sin \theta d\phi$  dan panjang sisi kedua  $r d\theta$ . Maka luas  $dA$  dapat dinyatakan

$$dA = (r \sin \theta d\phi)(r d\theta)$$

$$dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (8)$$

dan sudut ruang  $d\omega$  dapat dinyatakan

$$d\omega = \frac{dA}{r^2}$$

$$d\omega = \frac{r^2 \sin \theta d\theta d\phi}{r^2}$$

$$d\omega = \sin \theta d\theta d\phi \quad (9)$$

Dengan mensubstitusikan  $d\omega$  (9) ke dalam persamaan energi radiasi  $dQ$  (7) maka diperoleh

$$dQ = I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) dA \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi d\lambda dt \quad (10)$$

Mengingat kembali definisi rapat energi (diberi notasi  $du_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$ ) yang telah disebutkan di atas maka dapat dituliskan

$$du_\lambda(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dQ}{dV} \quad (11)$$

dengan  $dV$  adalah volume lintasan yang dilewati radiasi dan dinyatakan

$$dV = dA dL$$

Dengan alasan yang sama dengan yang telah disebutkan sebelumnya, maka  $dA$  harus dikalikan dengan  $\cos\theta$ , sehingga

$$dV = dA \cos\theta dL$$

dan

$$dL = c dt$$

dengan  $dL$  adalah panjang lintasan radiasi,  $c$  adalah laju gelombang elektromagnetik dan  $dt$  adalah waktu tempuh. Maka

$$\begin{aligned} du_\lambda(\lambda, \theta, \phi) &= \frac{I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) dA \cos\theta d\omega d\lambda dt}{c dt dA \cos\theta} \\ du_\lambda(\lambda, \theta, \phi) &= \frac{I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) d\omega d\lambda}{c} \\ du_\lambda(\lambda, \theta, \phi) &= \frac{I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi d\lambda}{c}. \end{aligned} \quad (12)$$

$du_\lambda(\lambda, \theta, \phi)$  menunjukkan rapat energi pada panjang gelombang  $\lambda$  dan arah  $(\theta, \phi)$  tertentu, sehingga untuk mendapatkan nilai rapat energi dari suatu *blackbody* secara umum, persamaan di atas harus diintegrasikan terhadap  $\theta, \phi$  dan  $\lambda$ . Mengingat *blackbody* merupakan

*perfect absorber* dan *perfect emitter* maka nilai rapat energi harus menjadi dua kalinya, sehingga dapat dituliskan

$$u_b = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{2 I_\lambda(\lambda, \theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi d\lambda}{c}$$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_\lambda \sin\theta d\theta d\phi d\lambda \quad (13)$$

Telah disebutkan sebelumnya bahwa *blackbody* bersifat *diffuse emitter* sehingga intensitas radiasi  $I_\lambda$  tidak tergantung pada arah dengan konsekuensi intensitas bukan merupakan fungsi arah  $(\theta, \phi)$ . Oleh karenanya  $I_\lambda$  dapat dikeluarkan dari operasi integral terhadap  $\theta$  dan  $\phi$ .

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta d\theta d\phi d\lambda$$

Integral paling dalam merupakan integral terhadap  $\theta$ , lalu  $\phi$  dan  $\lambda$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda \int_0^{2\pi} [-\cos\theta]_0^{\frac{\pi}{2}} d\phi d\lambda$$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda \int_0^{2\pi} 1 d\phi d\lambda$$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda \int_0^{2\pi} d\phi d\lambda$$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda [\phi]_0^{2\pi} d\lambda$$

$$u_b = \frac{2}{c} \int_0^\infty I_\lambda 2\pi d\lambda$$

$$u_b = \frac{4\pi}{c} \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (14)$$

$\int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda$  menunjukkan bahwa radiasi yang dipancarkan atau diserap, dijumlahkan untuk seluruh panjang gelombang sehingga tidak hanya tergantung pada panjang gelombang tertentu ( $d\lambda$ ). Hasil integral  $I_{\lambda}d\lambda$  sama dengan  $I_b$  (indeks  $b$  mengisyaratkan intensitas radiasi *blackbody*) yang menunjukkan intensitas untuk seluruh panjang gelombang. Hal ini penting untuk mendapatkan distribusi intensitas sebagai fungsi panjang gelombang. Dengan demikian diperoleh

$$u_b = \frac{4\pi I_b}{c} \quad (15)$$

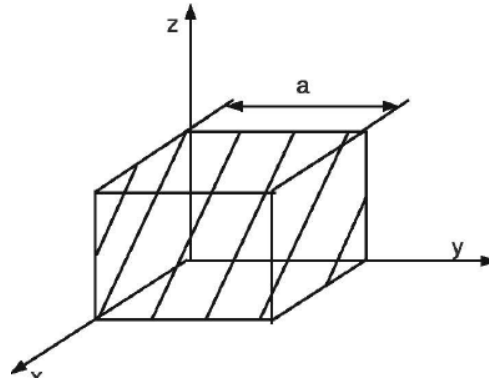
dan jika dituliskan dalam domain frekuensi menjadi

$$u_{b,\nu} = \frac{4\pi I_{b,\nu}}{c}. \quad (16)$$

Persamaan (16) merupakan persamaan yang menyatakan rapat energi untuk panjang gelombang  $\lambda = 0$  sampai dengan  $\lambda = \infty$ . Notasi  $I_b$  menunjukkan intensitas radiasi yang diemisikan atau diserap oleh *blackbody*. Namun persamaan ini belum memberikan gambaran rinci mengenai intensitas radiasi,  $I_b$ , dan distribusinya. Persoalan ini, yakni menentukan definisi intensitas radiasi  $I_b$ , dapat dipecahkan setidaknya dengan mencari solusi lain dari persamaan rapat energi.

Rayleigh dan Jeans mengajukan penurunan persamaan rapat energi radiasi dalam domain frekuensi,  $u_{b,\nu}$ , untuk menentukan

distribusi intensitas  $I_{b,\nu}$ . Keduanya mengemukakan medan radiasi pada sebuah kotak kubus tertutup pada koordinat kartesian  $(x, y, z)$  dengan volume  $a^3$ .



**Gambar 5.** Medan radiasi dalam kubus  $a^3$  (Balaji, 2014: 39)

Rayleigh menyatakan bahwa rapat energi radiasi adalah jumlah gelombang yang mungkin terdapat dalam kubus dalam rentang frekuensi  $(\nu)$  dan  $(\nu + d\nu)$  yang dikalikan dengan rata-rata energi dari setiap gelombang atau rata-rata energi setiap frekuensi dan dibagi dengan volume kubus dari medan radiasi tersebut. Maka  $u_{b,\nu}$  dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned}
 u_{b,\nu} &= \frac{\text{jumlah gelombang antara } (\nu \text{ dan } \nu + d\nu) \times (\text{energi rata-rata})}{a^3} \\
 u_{b,\nu} &= \frac{\text{jumlah gelombang antara } (\nu \text{ dan } \nu + d\nu)}{a^3} \times \bar{E} = \frac{N \bar{E}}{a^3}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Berdasarkan pernyataan yang dikemukakan oleh Rayleigh di atas, rapat energi radiasi dapat ditentukan dengan cara mengetahui jumlah

gelombang dalam rentang  $\nu$  dan  $\nu + d\nu$  dan mengetahui besar energi rata-rata setiap gelombang.

### **Menentukan Jumlah Gelombang dalam Rentang $\nu$ dan $\nu + d\nu$**

Persamaan umum gelombang dari gelombang tegak adalah sebagai berikut

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

$\psi$  merepresentasikan medan listrik atau medan magnet. Persamaan gelombang di atas dapat diselesaikan dengan menggunakan metode separasi variabel. Diasumsikan bahwa

$$\psi = T(t)X(x)Y(y)Z(z)$$

Untuk persamaan  $\psi$  di atas, diperlukan dua syarat dalam domain waktu dan enam syarat dalam domain ruang,

$$\psi = 0 \text{ untuk } x = 0 \text{ dan } x = a$$

$$\psi = 0 \text{ untuk } y = 0 \text{ dan } y = a$$

$$\psi = 0 \text{ untuk } z = 0 \text{ dan } z = a$$

Solusi umum yang diperoleh adalah

$$\psi_n = (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t) \sin\left(\frac{n_1 \pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n_2 \pi y}{a}\right) \sin\left(\frac{n_3 \pi z}{a}\right)$$

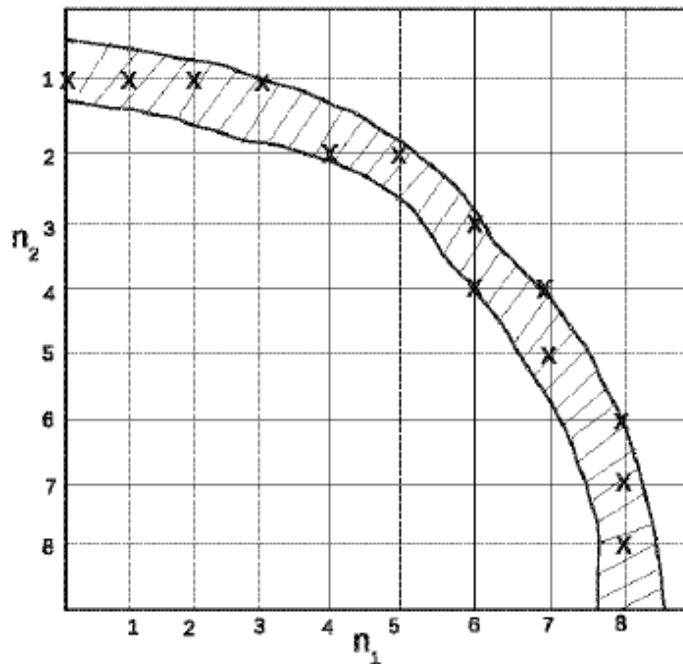
dengan  $n_1$ ,  $n_2$  dan  $n_3$  adalah bilangan bulat dan  $\omega_n$  adalah frekuensi sudut (*circular*) dan dinyatakan dengan

$$\omega_n^2 = \frac{\pi^2 c^2}{a^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) \quad (18)$$

$$\omega = 2\pi\nu \quad (19)$$

$$\nu_n = \frac{c}{2a} \sqrt{(n_1^2 + n_2^2 + n_3^2)} \quad (20)$$

Persamaan di atas (20) memerlukan solusi untuk jumlah gelombang yang diperbolehkan dalam interval frekuensi  $\nu$  dan  $\nu + d\nu$ . Sebagai analogi, dalam bidang dua dimensi kuadran pertama, diasumsikan sumbu x sebagai  $n_1$  dan sumbu y sebagai  $n_2$  (meskipun persoalan jumlah gelombang yang akan diselesaikan adalah tiga dimensi). Luas area yang diarsir dinyatakan dengan  $2\pi r dr/4$  (dibagi 4 karena hanya satu kuadran). Lebar persegi,  $dr = 1$ , dan  $r_n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$ .



**Gambar 6.** Pemisalan jumlah titik yang mungkin dalam bidang dua dimensi (Balaji, 2014: 42)

Luas area yang diarsir adalah 12,6 dan jumlah bilangan bulat yang mungkin dalam area tersebut (yang direpresentasikan dengan titik-titik potong *grid* atau *lattice*) adalah 13. Artinya jumlah titik (dalam dimensi dua) dapat dinyatakan dengan luas area yang diarsir itu sendiri, sehingga

$$dA = dN = \frac{2\pi r_n dr}{4} \quad (21)$$

dengan

$$r_n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \quad (22)$$

Untuk kasus dimensi tiga, ruang pada satu kuadran dinyatakan dengan  $4\pi r^2 dr/8$  (dibagi 8 karena 1 oktan). Dan apabila dianalogikan dengan bidang dimensi dua sebelumnya, maka

$$r_n = \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2}, \quad (23)$$

sehingga

$$dN = \frac{4\pi r^2 dr}{8}. \quad (24)$$

Apabila

$$v_n = \left(\frac{c}{2a}\right) \sqrt{n_1^2 + n_2^2 + n_3^2} \quad (25)$$

$$v_n = \left(\frac{c}{2a}\right) r_n \quad (26)$$

$$r_n = \frac{v_n}{\left(\frac{c}{2a}\right)} \quad (27)$$

$$dr_n = \frac{dv_n}{\left(\frac{c}{2a}\right)} \quad (28)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (27) dan (28) ke dalam persamaan (24), diperoleh

$$dN = \frac{4\pi r^2 dr}{8}$$

$$dN = \frac{4\pi \left(\frac{v_n}{\left(\frac{c}{2a}\right)}\right)^2 \frac{dv_n}{\frac{c}{2a}}}{8}$$

$$dN_v = \frac{4\pi v_n^2 dv_n}{8 \left(\frac{c}{2a}\right)^3}$$

$$dN_v = \frac{4\pi a^3}{c^3} v^2 dv \quad (29)$$

Penjelasan geometris yang diberikan sebelumnya (menghitung jumlah perpotongan *grid* atau *lattice* pada bidang) harus memiliki nilai  $dr = 1$  agar jumlah *lattice*,  $N$ , sebanding dengan luas bidang. Begitupun pada ruang dimensi tiga juga harus memiliki nilai  $dr = 1$  agar jumlah *lattice*,  $N$ , sebanding dengan volume ruang (dalam koordinat bola), sehingga dengan alasan yang sama,  $dv$  harus

memiliki nilai  $d\nu = 1$  agar jumlah frekuensi yang mungkin berada dalam ruang koordinat bola pada interval  $\nu$  dan  $\nu + d\nu$  sebanding dengan volume ruang untuk menghitung jumlah *lattice* yang mungkin berada dalam ruang dimensi tiga (koordinat bola). Dengan demikian diperoleh

$$N_\nu = \frac{4\pi a^3}{c^3} \nu^2. \quad (30)$$

Oleh karena persamaan densitas radiasi spektral,  $u_{b,\nu} = N_\nu \bar{E} / a^3$ , maka secara umum persamaan tersebut dapat dinyatakan dengan

$$u_{b,\nu} = \frac{4\pi \nu^2}{c^3} \bar{E}. \quad (31)$$

Untuk gelombang elektromagnetik, terdapat dua polarisasi yang disebut polarisasi vertikal dan polarisasi horisontal atau  $E_{sejajar}$  dan  $E_{tegak\ lurus}$ , sehingga

$$\begin{aligned} u_{b,\nu} &= (2) \frac{4\pi \nu^2}{c^3} \bar{E} \\ u_{b,\nu} &= \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \bar{E} \end{aligned} \quad (32)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (16) ke dalam persamaan (32) maka nilai intensitas radiasi *blackbody* dapat dituliskan

$$\frac{4\pi I_{b,\nu}}{c} = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} \bar{E}$$

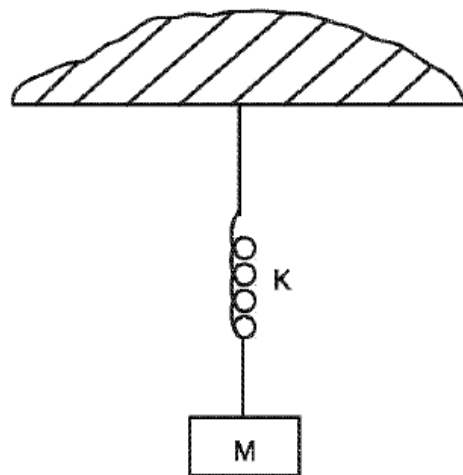
$$I_{b,\nu} = \frac{2\nu^2}{c^2} \bar{E} \quad (33)$$

Persamaan di atas masih menyisakan misteri nilai rata-rata energi setiap gelombang. Nilai energi ini,  $\bar{E}$ , harus diketahui untuk memberikan nilai distribusi intensitas radiasi dari *blackbody*.

## 1.2 Nilai Energi Rata-Rata Setiap Gelombang

Osilator harmonik dinyatakan dalam energi kinetik  $E_k$  dan energi potensial  $E_p$ . Energi rata-rata setiap gelombang  $\bar{E}$  memiliki nilai  $kT$  ( $E_k = \frac{1}{2}kT$  dan  $E_p = \frac{1}{2}kT$ ) yang diperoleh dari statistik Boltzmann. Namun Planck menganggap ada yang salah dengan  $\bar{E} = kT$ . Planck mengajukan pendekatan yang berbeda namun tetap menggunakan osilator harmonik.

Osilator harmonik yang diajukan Planck adalah ekuivalen dengan sebuah sistem pegas dan massa dengan kekakuan (*stiffness*)  $K$  dan massa  $M$ .



**Gambar 7.** Ilustrasi osilator harmonik dengan sistem pegas dan massa (Balaji, 2014: 45)

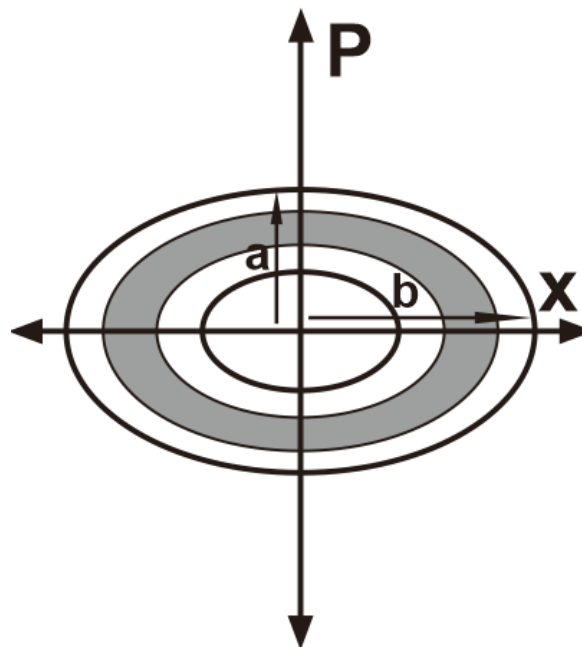
Osilator ini dianggap berada dalam kesetimbangan termal dan osilator ini dapat berinteraksi dengan gelombang elektromagnetik.

Energi total dari satu osilator dengan massa  $M$  dan konstanta pegas  $K$  adalah

$$e' = EK + EP = \frac{P^2}{2M} + \frac{1}{2} Kx^2 \quad (34)$$

dengan  $P$  adalah momentum dan  $x$  adalah regangan.

Ilustrasi energi yang dikemukakan Planck pada dasarnya berupa ruang fase elips (*elliptic phase space*) dimana garis-garisnya merupakan kontur iso-energi.



**Gambar 8.** Ilustrasi ruang fase elips dalam penurunan persamaan distribusi Planck

Dari gambar tersebut bisa terjadi beberapa kombinasi momentum dan peregangan yang dapat memberi besaran energi yang sama besar. Setiap garis elips menyatakan setiap energi tertentu (*particular*). Setiap garis merepresentasikan satu tingkat energi  $e'$  dan garis selanjutnya dinotasikan  $e' + \Delta e'$ . Rata-rata energi dari setiap osilator adalah jumlah total dari seluruh osilator dibagi jumlah seluruh osilator ( $\bar{E} = \frac{E}{N}$ ) sehingga energi total dari seluruh osilator antara dua tingkat energi ( $e'$  dan  $e' + \Delta e'$ ) dibagi jumlah seluruh osilator antara dua tingkat energi tersebut, memberikan nilai rata-rata energi dari osilator,  $\bar{E}$ , yang berada pada  $e'$  dan  $e' + \Delta e'$ . Notasi  $\int \int dx dP$  digunakan untuk menunjukkan luas bidang elips yang diarsir. Bidang tersebut dinotasikan  $\Delta A$ . Keseluruhan luas dari bidang yang diarsir dinyatakan dengan  $A = \pi ab$ . Dalam ruang fase elips, luas elips dinyatakan dengan  $A = \pi x_{max} P_{max}$ .

$$\int \int dx dP = \Delta A \quad (35)$$

$$x_{max} = \sqrt{\frac{2e'}{K}} \quad (36)$$

$$P_{max} = \sqrt{2Me'} \quad (37)$$

maka

$$A = 2\pi e' \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (38)$$

Frekuensi dari sebuah osilator atom adalah

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (39)$$

sehingga

$$A = \frac{e'}{\nu} \quad (40)$$

$$\Delta A = \frac{\Delta e'}{\nu} \quad (41)$$

Planck berhipotesa; anggap ruang fase elips dibagi dengan luasan pita  $h$ . Setiap garis elips dinyatakan dengan bilangan bulat  $n = 0, 1, \dots$ . Planck mengajukan bahwa energi dari sebuah osilator terdapat di dalam batas (*boundary*) dari cincin elips tertentu dan dinyatakan dengan  $e' = A\nu = nh\nu$ .

Peluang ditemukan osilator pada rentang energi  $e'$  dan  $e' + \Delta e'$  dalam statistik Boltzmann dinyatakan dengan

$$N_n = C e^{-\beta e'} \quad (42)$$

dengan  $\beta = \frac{1}{kT}$  dan  $e^{-\beta e'}$  disebut sebagai faktor Boltzmann (Reif, 1965: 203).

Jumlah energi total dari keseluruhan osilator merupakan perkalian peluang ditemukannya osilator pada rentang  $e'$  dan  $e' + \Delta e'$  dengan energinya dan tergantung pada  $n$ . Energi total dinotasikan

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} N_n e'_n$$

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} C e^{-\frac{nhv}{kT}} nhv$$

$$E = C e^{-\frac{hv}{kT}} hv \left[ 1 + 2e^{-\frac{hv}{kT}} + 3e^{-\frac{2hv}{kT}} + \dots \right] \quad (43)$$

Persamaan (43) dapat diselesaikan dengan menggunakan aturan deret binomial. Boas (2006: 28) menyatakan aturan deret binomial sebagai berikut

$$(1+x)^p = 1 + px + \frac{p(p-1)}{2!}x^2 + \frac{p(p-1)(p-2)}{3!}x^3 + \dots + \frac{p(p-1)(p-2)\dots(p-n+1)}{n!}x^n$$

Aturan di atas berlaku untuk deret konvergen sehingga harus memenuhi  $|x| < 1$ . Untuk deret  $(1-x)^{-2}$  memiliki solusi

$$\begin{aligned} (1-x)^{-2} &= 1 + (-2)(-x) + \frac{(-2)(-3)(-x)^2}{2!} + \\ &\frac{(-2)(-3)(-4)(-x)^3}{3!} + \dots + \frac{p(p-1)(p-2)\dots(p-n+1)}{n!}x^n \\ &= 1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + \dots + nx^{n-1} \end{aligned}$$

Dengan demikian solusi untuk  $\left[ 1 + 2e^{-\frac{hv}{kT}} + 3e^{-\frac{2hv}{kT}} + \dots \right]$  adalah

$\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]^{-2}$  dengan  $x = e^{-\frac{hv}{kT}}$ , sehingga dapat dituliskan

$$E = \frac{C hve^{-\frac{hv}{kT}}}{\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]^2} \quad (44)$$

**Menentukan jumlah osilator pada rentang  $e'$  dan  $e' + \Delta e'$**

Jumlah total osilator  $N$  adalah

$$N = \sum_{n=0}^{\infty} N_n$$

$$N = \sum_{n=0}^{\infty} C e^{-\frac{nhv}{kT}}$$

$$N = C \left[ 1 + e^{-\frac{hv}{kT}} + \dots \right]$$

dengan menggunakan aturan deret binomial, nilai  $\left[ 1 + e^{-\frac{hv}{kT}} + \dots \right]$

memiliki solusi  $\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]^{-1}$ , sehingga dapat dituliskan

$$N = \frac{C}{\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]} \quad (45)$$

Rata-rata energi dari setiap osilator adalah dari jumlah energi total dari seluruh osilator dibagi jumlah seluruh osilator, sehingga

$$\bar{E} = \frac{E}{N}$$

$$\bar{E} = \frac{\frac{C h v e^{-\frac{hv}{kT}}}{\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]^2}}{C \left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]}$$

$$\bar{E} = \frac{\cancel{C} e^{-\frac{hv}{kT}} h v \left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]}{\left[ 1 - e^{-\frac{hv}{kT}} \right]^2 \cancel{C}}$$

$$\bar{E} = h v / (e^{\frac{hv}{kT}} - 1) \quad (46)$$

Planck menyatakan bahwa nilai  $h$  tidak boleh nol, nilainya kecil tapi tidak nol. Dengan metode eksperimen, Planck mendapatkan nilai

$h = 6,67 \times 10^{-34}$  Js. Konstanta tersebut kemudian disebut sebagai konstanta Planck sebagai penghormatan atas jasanya dalam bidang fisika.

### 1.3 Menentukan Distribusi Intensitas Radiasi *Blackbody* $I_b$

Sebelumnya telah diketahui nilai distribusi intensitas radiasi dari *blackbody* dan nilai energi rata-rata setiap gelombang. Jika persamaan (46) disubstitusikan ke dalam persamaan (33), maka nilai distribusi intensitas radiasi dapat dituliskan

$$I_{b,\nu} = \frac{2h\nu^3}{c^2 [e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1]} \quad (47)$$

Hubungan frekuensi dan panjang gelombang dinyatakan dengan persamaan

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (48)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (48) ke dalam persamaan (47), maka didapatkan

$$I_{b,\nu} = \frac{2h \left(\frac{c}{\lambda}\right)^3}{c^2 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]}$$

$$I_{b,\nu} = \frac{2hc}{\lambda^3 [e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1]} \quad (49)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan distribusi intensitas radiasi *blackbody* dalam fungsi panjang gelombang  $\lambda$ . Perlu diingat

bahwa  $I_b$  merupakan hasil integral intensitas untuk seluruh panjang gelombang dan frekuensi sehingga dapat dituliskan

$$I_b = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} I_{\nu} d\nu$$

$$I_{\nu} = \frac{dI_b}{d\nu}$$

$$I_{\nu} = \frac{\partial I_b}{\partial \lambda} \frac{d\lambda}{d\nu}$$

$$I_{\nu} d\nu = I_{\lambda} d\lambda \quad (50)$$

Dengan menggunakan persamaan (48), maka dapat dituliskan

$$d\nu = -(c/\lambda^2)d\lambda$$

$$I_{\lambda} = I_{\nu}(c/\lambda^2)$$

$$I_{b,\lambda} = I_{b,\nu} \left( \frac{c}{\lambda^2} \right) \quad (51)$$

Jika intensitas dinyatakan sebagai fungsi panjang gelombang ( $\lambda$ ), dapat dituliskan

$$I_{b,\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right]} \quad (52)$$

Jika

$$C_1 = 2hc^2$$

$$C_2 = \frac{hc}{k}$$

maka

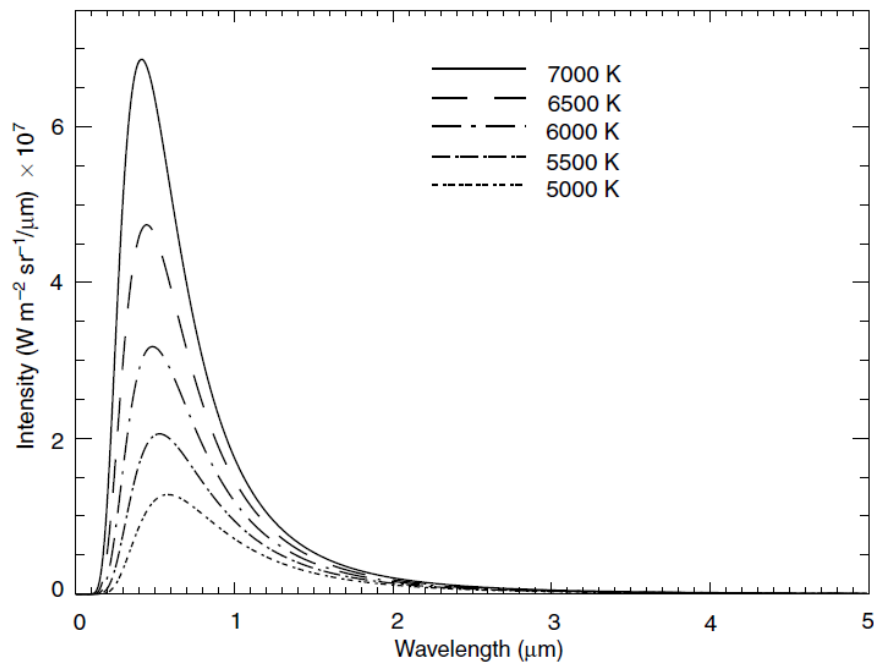
$$I_{b,\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left[ \frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (53)$$

Persamaan di atas adalah persamaan yang diajukan oleh Planck pada tahun 1901 yang mendapat hadiah nobel pada tahun 1918.  $C_1$  dan  $C_2$  merupakan konstanta dengan nilai

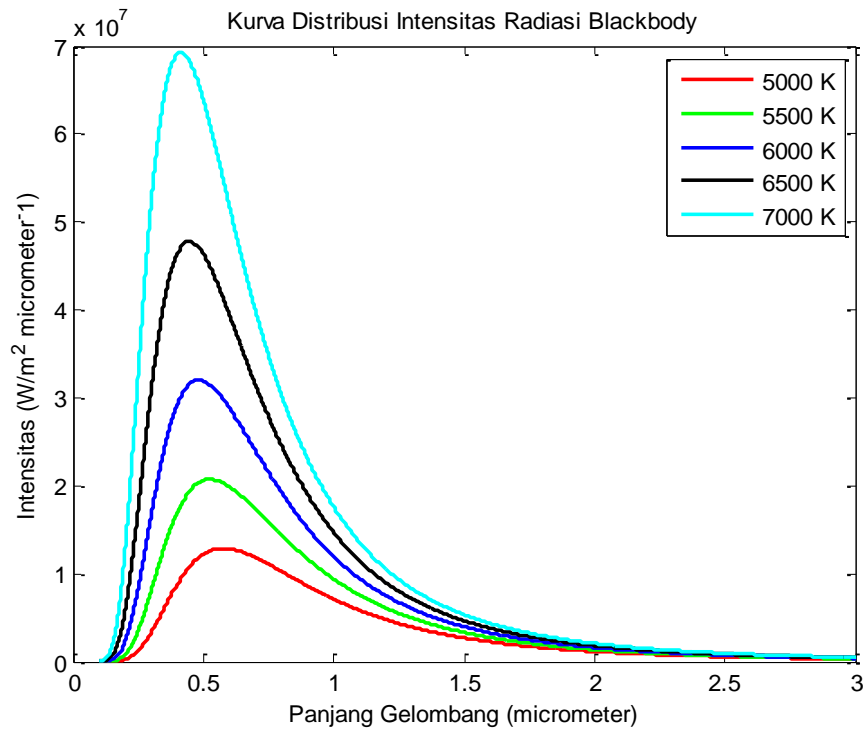
$$C_1 = 2hc^2 = 2 \times 6,627 \times 10^{-34} \times (2,998 \times 10^8)^2$$

$$C_1 = 1,198 \times 10^8 \frac{\text{W}\mu\text{m}^4}{\text{m}^2} \quad (54)$$

$$C_2 = \frac{hc}{k} = \frac{6,62 \times 10^{-34} \times 2,998 \times 10^8}{1,38 \times 10^{-23}} = 14388 \mu\text{mK} \quad (55)$$



**Gambar 9.** Distribusi Planck (Liou, 2002: 12)



**Gambar 10.** Distribusi Planck (Matlab)

#### 1.4 Hubungan Hukum Stefan-Boltzmann, Wien dan Planck

##### Planck

Planck hadir (1901) dengan persamaan distribusi intensitasnya yang menjawab permasalahan *blackbody* mengenai hubungan intensitas  $I_b$ , panjang gelombang  $\lambda$  dan temperatur  $T$ .

Meski ketiga pernyataan (Planck, Stefan-Boltzmann dan Wien) terhadap *blackbody* dinyatakan secara terpisah namun ketiganya memiliki hubungan yang tak bisa dipisahkan. Secara historis, Stefan-Boltzmann (1879) menyatakan total intensitas yang diradiasikan atau diemisikan *blackbody* di bawah kurva distribusi (yang saat itu belum pernah dinyatakan) pada suhu tertentu. Kemudian hadir Wien (1896)

yang menyatakan panjang gelombang pada intensitas maksimal ( $\lambda_m$ ) pada setiap temperatur  $T$  tertentu. Dua pernyataan awal ini menghadirkan *gap* dalam menyatakan hukum radiasi *blackbody*.

Anggap ada sebuah kurva dengan fungsi  $f(x)$ . Jika kurva tersebut diintegalkan dengan batas  $a$  dan  $b$ , maka nilai yang diperoleh merepresentasikan total luasan di bawah kurva dengan batas  $a$  dan  $b$ . Jika kurva tersebut diderivatikan sama dengan nol terhadap  $x$ , maka diperoleh nilai yang merepresentasikan nilai maksimum. Fenomena ini yang kemudian terdapat dalam memahami hubungan persamaan yang telah dinyatakan oleh Stefan-Boltzmann, Wien dan Planck. Stefan-Boltzmann menyatakan hasil integral kurva, sedangkan Wien menyatakan hasil derivatif kurva. *Gap* yang dimaksud penulis adalah kurva yang ‘ditinggalkan’ oleh Stefann-Boltzmann dan Wien yang kemudian oleh Planck hadir dan menyatakan kurva yang ‘ditinggalkan’ tersebut sebagai persamaan distribusi intensitas radiasi *blackbody*  $I_b$  dalam fungsi panjang gelombang  $\lambda$  dan temperatur  $T$ .

$$\int \text{Hukum Plack} = \text{Hukum Stefan} - \text{Boltzmann}$$

$$\frac{d}{d\lambda} (\text{Hukum Planck}) = \text{Hukum pergeseran Wien}$$

### **Stefan-Boltzmann**

Secara historis, Stefan-Boltzmann hadir terlebih dahulu dalam menyatakan hukum *blackbody*. Keduanya mengajukan pernyataan (secara terpisah) bahwa nilai intensitas dari radiasi *blackbody* adalah

setara dengan pangkat empat dari suhu *blackbody* tersebut. Secara matematis dinyatakan dengan

$$M_b = \sigma T^4 .$$

Hasil penurunan persamaan yang diperoleh Stefan-Boltzmann ini merepresentasikan total radiasi yang diserap atau diemisikan oleh *blackbody* di bawah kurva distribusi pada suhu tertentu. Persamaan yang diajukan Stefan-Boltzmann di atas dapat diperoleh dengan mengintegalkan persamaan distribusi yang diajukan oleh Planck.

Bila persamaan Planck diintegalkan

$$M_b = \int_0^{\infty} I_{b,\lambda} d\lambda$$

$$M_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left[ \frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1 \right]} d\lambda .$$

Anggap  $x = C_2/\lambda T$  , maka

$$M_b = C_1 \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{-5}}{[e^x - 1]} d\lambda$$

$$dx = -\frac{C_2}{\lambda^2 T} d\lambda$$

$$d\lambda = -\frac{\lambda^2 T}{C_2} dx$$

$$M_b = -C_1 \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{-5}}{[e^x - 1]} \frac{\lambda^2 T}{C_2} dx$$

$$\begin{aligned}
M_b &= \frac{-C_1}{C_2} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{-5}}{[e^x - 1]} \lambda^2 T dx \\
M_b &= \frac{-C_1}{C_2} \int_0^{\infty} \frac{\lambda^{-3}}{[e^x - 1]} T dx \\
M_b &= \frac{-C_1}{C_2} \int_0^{\infty} \frac{T}{[e^x - 1]} \frac{1}{\lambda^3} dx \\
M_b &= \frac{-C_1}{C_2^4} \int_0^{\infty} \frac{x^3 T^4}{[e^x - 1]} dx \\
M_b &= \frac{-C_1}{C_2^4} T^4 \int_0^{\infty} \frac{x^3}{[e^x - 1]} dx \tag{56}
\end{aligned}$$

Jika

$$\int_0^{\infty} \frac{x^3}{[e^x - 1]} = C_3,$$

maka

$$M_b = \frac{-C_1 C_3}{C_2^4} T^4.$$

Jika

$$\frac{-C_1 C_3}{C_2^4} = \sigma,$$

maka

$$M_b = \sigma T^4. \tag{57}$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa teori yang diajukan Stefan-Boltzmann bahwa total radiasi *blackbody* sebanding dengan

pangkat empat dari suhunya, sesuai dengan total radiasi dari pengintegralan distribusi Planck.

### **Wien**

Wien menyatakan teorinya pada tahun 1896 yang menunjukkan solusi untuk permasalahan dari *blackbody* (Stewart and Johnson, 2017: 9). Wien ingin menyempurnakan permasalahan *blackbody* Stefan-Boltzmann yang belum memberikan hubungan intensitas  $I_b$  dengan panjang gelombang  $\lambda$  (distribusi intensitas). Dengan metode numerik yang dilakukan pada era pra-Planck, Wien mengajukan sebuah teori yang dikenal dengan hukum pergeseran Wien. Hukum tersebut menyatakan bahwa panjang gelombang dari intensitas maksimum sebuah radiasi *blackbody* berbanding terbalik dengan temperatur (Liou, 2002: 12).

Planck (1914: 85) menyatakan bahwa Wien pada awalnya mengajukan persamaan

$$M_b(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^5} F\left(\frac{\lambda T}{c}\right) \quad (58)$$

Persamaan di atas menjadi point penting dalam sejarah radiasi *blackbody* karena persamaan tersebut yang mengilhami Planck dalam menyatakan teorinya yang kelak menjadi capaian luar biasa di akhir abad ke-19 yang dikenal dengan istilah *quantum* (Balaji, 2014: 39).

Wien menyatakan bahwa hasil kali panjang gelombang pada intensitas maksimum dengan suhunya selalu bernilai konstan

$$\lambda_m T = b . \quad (59)$$

Dengan adanya kenaikan temperatur, nilai maksimum dari radiasi bergeser (*displaced*) dengan arah menuju panjang gelombang yang lebih pendek (Planck, 1914: 86). Fakta ini menunjukkan bahwa setiap temperatur mengalami peningkatan, puncak dari kurva dari *spectral radiant exitance*,  $M_b$ , ketika diplot sebagai fungsi gelombang, akan bergeser menuju panjang gelombang yang lebih pendek (Stewart and Johnson, 2017: 7).

Notasi  $b$  inilah yang disebut dengan konstanta Wien dan nilai ini menjadi bentuk khas dari hukum pergeseran Wien. Nilai konstanta Wien,  $b$ , adalah

$$b = 0,294 \text{ cmK} \quad (60)$$

yang dikemukakan oleh Lummer dan Pringsheim dengan menggunakan metode numerik (Planck, 1914: 86). Apabila argumen  $b$  diturunkan dari persamaan distribusi Planck maka diperoleh nilai  $b = 0,2898 \text{ cmK}$  (Balaji, 2014: 54). Nilai ini diperoleh dengan menurunkan persamaan distribusi Planck terhadap panjang gelombang dan dengan menganggap nilai turunan tersebut sama dengan nol,

$$\frac{dI_{b,\lambda}}{d\lambda} = 0$$

Dengan penurunan ini, maka akan didapatkan nilai panjang gelombang dari intensitas maksimum.

$$\frac{dI_{b,\lambda}}{d\lambda} = 0$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \right) = 0$$

Anggap  $u = C_1 \lambda^{-5}$  dan  $v = \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]$

$$u' = -5C_1 \lambda^{-6}$$

$$v' = -e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \frac{C_2}{\lambda^2 T}$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left( \frac{u}{v} \right) = \frac{(u'v - uv')}{v^2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\lambda} \left( \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \right) \\ &= \frac{-5C_1 \lambda^{-6} \left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right] - C_1 \lambda^{-5} \left( -e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \frac{C_2}{\lambda^2 T} \right)}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]^2} = 0 \end{aligned}$$

$$-\frac{5C_1 \lambda^{-6}}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} + \frac{C_1 \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \frac{C_2}{\lambda^2 T} \right)}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]^2} = 0$$

$$-\frac{5C_1 \lambda^{-6}}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} = -\frac{C_1 \lambda^{-5} \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \frac{C_2}{\lambda^2 T} \right)}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]^2}$$

$$5 = \frac{\left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} \frac{C_2}{\lambda T} \right)}{\left[ e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \tag{61}$$

Anggap  $x = \frac{C_2}{\lambda T}$ , maka

$$\frac{xe^x}{e^x - 1} = 5 \quad (62)$$

Solusi dari persamaan di atas akan diselesaikan dengan metode numerik. Dengan mengubah persamaan menjadi

$$x = \frac{5(e^x - 1)}{e^x}$$

$x$  kemudian dijalankan dalam iterasi  $i$  dan dihentikan saat selisih  $x_{i+1}$  dan  $x_i$  kurang dari atau sama dengan  $10^{-6}$  ( $|x_{i+1} - x_i| \leq 10^{-6}$ )

$$x_{i+1} = \frac{5(e^{x_i} - 1)}{e^{x_i}}$$

Dari iterasi di atas didapatkan nilai  $x$  dalam tabel seperti berikut:

**Tabel 1.** Data iterasi untuk mendapatkan solusi  $x$

Iterasi ke-	$x_i$	$x_{i+1}$
1	3,16060279	4,78799913
2	4,78799913	4,95835447
3	4,95835447	4,96487761
4	4,96487761	4,96510598
5	4,96510598	4,96511394
6	4,96511394	4,96511422
7	4,96511422	4,96511423

Berdasarkan tabel iterasi di atas, maka nilai  $x = 4,96511423$ , sehingga

$$x = \frac{C_2}{\lambda T} = 4,96511423$$

Panjang gelombang pada persamaan di atas merupakan panjang gelombang pada intensitas maksimum

$$x = \frac{C_2}{\lambda_{max}T} = 4,96511423$$

$$\lambda_{max}T = \frac{C_2}{4,96511423}$$

$$\lambda_{max}T = \frac{1,4388 \times 10^4}{4,96511423}$$

$$\lambda_{max}T = 2897,82 \mu\text{mK} \quad (63)$$

Nilai di atas adalah nilai konstanta dari hukum pergeseran Wien yang diturunkan dari persamaan distribusi Planck.

## 2. Emisivitas

Hukum benda hitam yang dibahas sebelumnya adalah teori ideal. Dalam kenyataannya tidak ada objek yang mengemisikan panas maksimum sesuai dengan hukum benda hitam. Bila dibandingkan antara emisi riil dan emisi teori, maka akan dihasilkan sebuah angka yang berbeda-beda untuk setiap objek. Perbandingan inilah yang disebut sebagai emisivitas. Secara definitif emisivitas adalah perbandingan dari jumlah radiasi yang dipancarkan oleh sebuah objek dengan yang dipancarkan benda hitam pada temperatur yang sama,

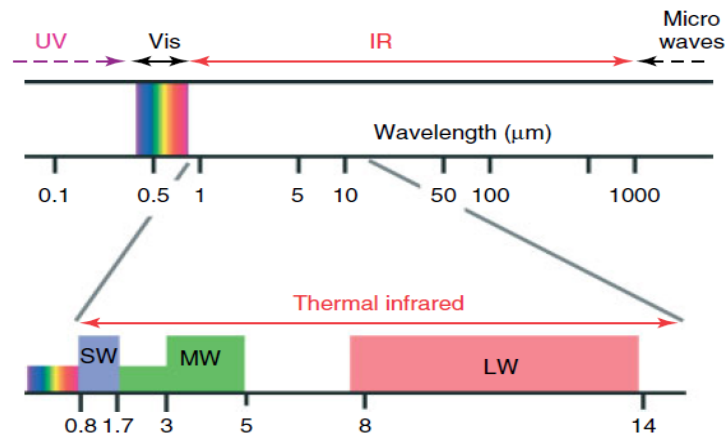
$$\varepsilon = \frac{M_{riil}}{M_{benda\ hitam}} \quad (64)$$

dengan  $M_{riil}$  adalah jumlah radiasi yang dipancarkan suatu objek (riil) dan  $M_{benda\ hitam}$  adalah jumlah radiasi yang dipancarkan benda hitam (ideal).

### C. Inframerah

Inframerah adalah gelombang elektromagnetik dengan rentang panjang gelombang  $(0,7 - 1000) \mu\text{m}$ . Inframerah disebut juga dengan cahaya inframerah. Panjang gelombang cahaya inframerah lebih besar dari panjang gelombang cahaya tampak, sehingga meskipun disebut sebagai “cahaya”, inframerah tidak bisa terlihat oleh mata telanjang. Cahaya inframerah memiliki sifat yang sama dengan cahaya tampak seperti dapat difokuskan, dipantulkan dan juga dapat dipolarisasikan (Farace, 2010:15).

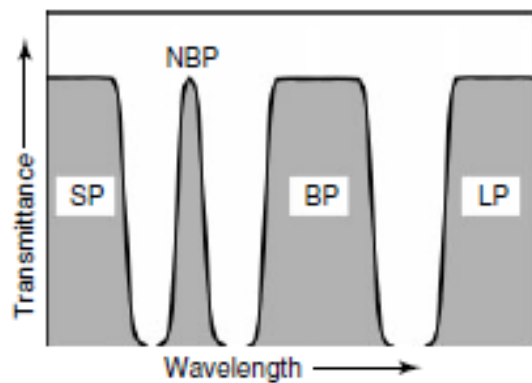
Dalam ilmu termografi, cahaya inframerah yang digunakan adalah cahaya dengan rentang panjang gelombang  $(0,8 - 14) \mu\text{m}$ . Rentang ini dibedakan menjadi tiga jenis. Jenis pertama disebut *shortwave* (SW) dengan rentang  $(0,8 - 1,7) \mu\text{m}$ , jenis kedua disebut *midwave* (MW) dengan rentang  $(3 - 5) \mu\text{m}$  dan jenis ketiga adalah *longwave* (LW) dengan rentang  $(7 - 14) \mu\text{m}$ . Kamera digital biasa peka terhadap ketiga jenis inframerah tersebut. Rentang-rentang panjang gelombang tersebut dibuat berdasarkan pertimbangan jumlah radiasi panas yang dibutuhkan, bentuk dari detektor, dan sifat hantar udara.



**Gambar 11.** Area spektral inframerah dan batas-batas spektral dari inframerah termal (Vollmer and Mollmann, 2010: 10).

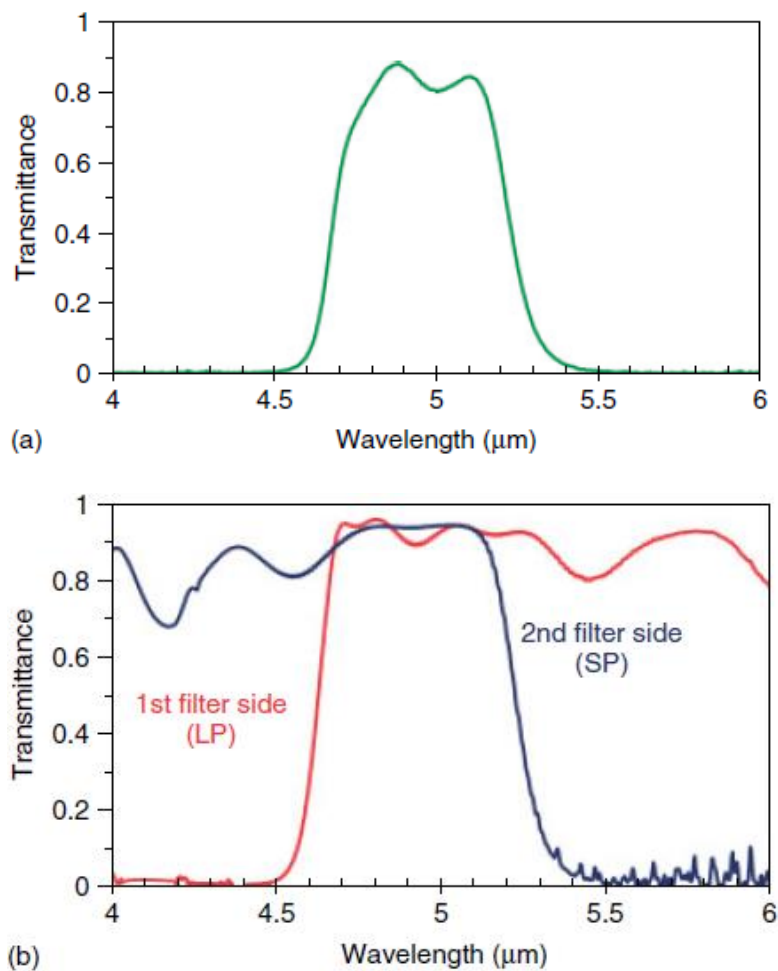
Farace (2010: 15) menyatakan bahwa sensor pada kamera digital sangat peka pada rentang gelombang (0,7 – 1)  $\mu\text{m}$ . Rentang ini sering disebut sebagai *near infrared* (NIR), artinya infrared pada rentang ini dekat dengan rentang gelombang cahaya tampak.

Ada beberapa metode dalam menyaring (*filtering*) diantaranya adalah *shortpass* (SP), *narrowbandpass* (NBP), *bandpass* (BP), dan *longpass* (LP).



**Gambar 12.** Area spektral beberapa filter (Vollmer and Mollmann, 2010: 127)

Contoh penggunaan metode filter tersebut adalah pada pengukuran temperatur (oleh radiasi inframerah) kaca. Area spektral yang akan diloloskan adalah pada panjang gelombang 4,5  $\mu\text{m}$  - 5,5  $\mu\text{m}$  maka digunakan dua buah filter



**Gambar 13.** (a) Area spektral untuk pengukuran temperatur kaca (b) penggunaan filter SP dan LP untuk meloloskan radiasi pada area spektral yang diinginkan (Vollmer and Mollmann, 2010: 127)

yaitu filter SP yang dapat meloloskan panjang gelombang kurang dari 5,5  $\mu\text{m}$  dan filter LP yang meloloskan panjang gelombang lebih dari 4,5  $\mu\text{m}$ . Hasil gabungan dua buah filter ini disebut filter NBP.

*Filtering* dilakukan berdasarkan kemampuan reflektansi dan transmitansi dan tidak berdasar pada kemampuan absorpsi filter. Kemampuan absorpsi filter mengakibatkan kenaikan temperatur pada filter. Berdasarkan hukum Kirchoff, kemampuan absorpsi dari filter sebanding dengan kemampuan emisinya. Jika filter yang digunakan saat *filtering* memiliki kemampuan absorpsi, maka akan mengakibatkan kesalahan pengukuran pada sensor (Vollmer and Mollmann, 2010: 128).

Filter inframerah adalah filter yang dapat melewatkan gelombang elektromagnetik pada area spektral inframerah dan mampu menahan gelombang untuk area spektral lainnya. Label filter inframerah diberi indeks R. Jika pada filter tertulis R72, maka filter tersebut mampu melewatkan cahaya dengan panjang gelombang lebih dari 720 nm (Sandidge, 2009: 10).

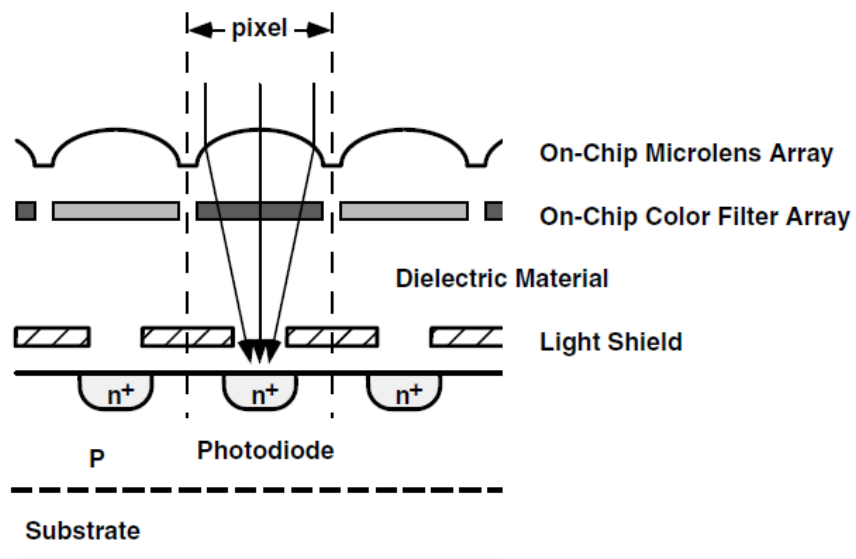
#### **D. Pixel**

Pixel adalah singkatan dari 'picture element'. Pixel diberi indeks (x,y) atau dinyatakan dengan kolom dan baris (c,r) yang merepresentasikan bagian terkecil, terpenting dalam sebuah gambar digital dan berisi nilai yang menjadi acuan dasar informasi resolusi dari gambar tersebut (Solomon and Breckon, 2011: 49). Dalam tulisan ini, penulis menguraikan arti pixel dalam 2 bagian.

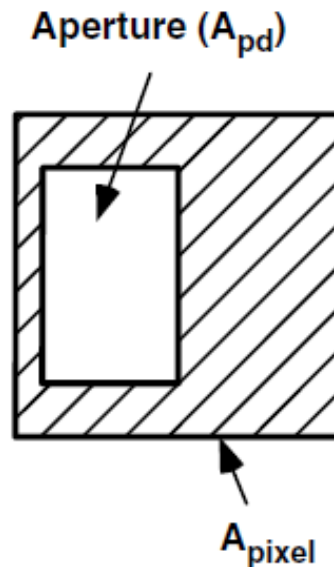
## 1. Pixel Sensor

Sensor gambar setidaknya harus memiliki beberapa bagian. Pertama, bagian yang mengubah cahaya datang menjadi sinyal muatan (*charge*). Kedua, bagian pemindai (*scanner*) yang mampu mengidentifikasi setiap pixel dengan masing-masing sinyalnya. Ketiga, bagian yang mengukur jumlah sinyal muatan menjadi sinyal elektrik (Kuroda, 2015: 51).

Sensor gambar ada tiga jenis yaitu *charge-coupled device* (CCD), *metal oxide semiconductor* (MOS) dan *complementary-metal oxide semiconductor* (CMOS). Ketiga jenis sensor ini dibedakan dari arsitektur *parallelism* saja, sedangkan bentuk fisik dari pixel tetap sama (Nakamura, 2005: 61). Berikut adalah gambar bentuk fisik dari pixel sensor gambar:



**Gambar 14.** Bentuk fisik pixel secara umum (Nakamura, 2005: 61)



**Gambar 15.** Area peka cahaya pada permukaan pixel (Nakamura, 2005: 61)

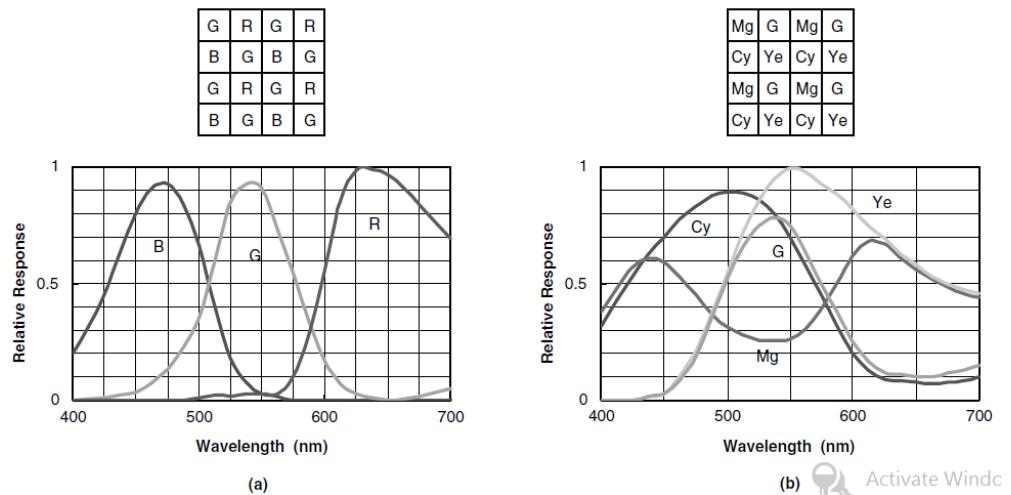
Sebuah pixel tidak seluruhnya menangkap cahaya, hanya beberapa persen dari luas pixel tersebut yang peka terhadap cahaya. Persentase area peka dengan luas pixel ini disebut sebagai *fill factor* (FF) dan dinyatakan dengan

$$fill\ factor = (A_{pd}/A_{pix}) \times 100\ (\%)$$

dengan  $A_{pd}$  adalah area peka cahaya dan  $A_{pix}$  adalah area total pixel.

Area pixel yang tidak peka terhadap cahaya adalah area yang tertutup oleh *shield* (lapisan pelindung) yang berfungsi untuk menutup komponen-komponen lain yang ada pada pixel (seperti transistor). Pada permukaan pixel diberi *microlens* (lensa mikro) untuk mengarahkan cahaya yang datang tepat memasuki area pixel yang peka terhadap cahaya  $A_{pd}$  (Nakamura, 2005: 62).

Tepat di bawah lapisan *microlens*, terdapat lapisan filter warna yang disebut *color filter array* (CFA). Pada dasarnya, sensor gambar merupakan sensor monokrom yang peka terhadap rentang panjang gelombang tertentu. Untuk mendapatkan citra warna dibutuhkan metode pemisahan warna. Pada sensor kamera, khususnya *digital still camera* (DSC), digunakan filter warna *red, green, dan blue* (RGB) untuk memisahkan warna yang ditangkap sensor. RGB CFA memiliki hasil warna yang sangat baik karena memiliki kemampuan selektivitas panjang gelombang yang sangat baik.



**Gambar 16.** Grafik panjang gelombang vs respon relatif pada (a) RGB (b) CMYK (Nakamura: 2005: 62)

Konfigurasi dari RGB CFA di atas memiliki jumlah ‘G’ dua kali lebih banyak daripada ‘R’ ataupun ‘B’. Hal ini, menurut Bayer, karena sistem penglihatan manusia mengambil detail gambar dari spektrum hijau. Artinya, perbedaan luminans dari sebuah objek dibangun oleh spektrum

hijau sedangkan persepsi warna dibangun oleh spektrum merah dan biru (Nakamura, 2005: 63). Literatur lain mengatakan bahwa mata manusia memiliki sensitivitas paling tinggi pada hijau (Kuroda, 2015: 6).

## 2. Pixel Tampilan

Operasi pixel pada suatu gambar menggunakan operasi aritmatika atau logika. Kedua operasi menunjukkan penjumlahan dua gambar  $I_A$  dan  $I_B$  atau antara sebuah gambar dan sebuah konstanta  $C$ .

$$I_{output} = I_A + I_B \quad (65)$$

$$I_{output} = I_A + C \quad (66)$$

Pada kedua kasus, nilai dari setiap pixel  $(x,y)$  pada *output* gambar dipetakan sebagai berikut

$$I_{output}(x, y) = I_A(x, y) + I_B(x, y) \quad (67)$$

$$I_{output}(x, y) = I_A(x, y) + C \quad (68)$$

Untuk menjalankan operasi dengan dimensi  $i \times j$ , dapat digunakan iterasi pada indeks gambar untuk  $(x, y) = \{0 \dots i - 1, 0 \dots j - 1\}$ , atau pada kasus lain (Matlab), indeks pixel dapat dinyatakan  $(x, y) = \{1 \dots i, 1 \dots j\}$  (Solomon and Breckon, 2011: 50)

## E. Sensor Gambar

Nakamura (2005: 54) menyatakan bahwa sensor gambar berupa *solid-state*, juga disebut *imager*, adalah perangkat semikonduktor yang dapat mengubah gambar optik menjadi sinyal elektronik. Sensor gambar dapat

mendeteksi sinar dengan jangkauan spektral yang luas, dari wilayah panjang gelombang sinar-x sampai inframerah dengan menyetting struktur detektor dan atau penggunaan material yang sensitif pada wilayah panjang gelombang yang diinginkan. Sensor yang digunakan untuk deteksi cahaya tampak pada kamera konvensional adalah menggunakan bahan silikon. Bahan ini dipilih karena memiliki *band gap energy* atau energi celah pita yang sesuai dengan panjang gelombang cahaya tampak. Untuk menghasilkan sebuah gambar dengan resolusi yang baik, dibutuhkan jumlah pixel yang cukup dan disusun dalam baris dan kolom. Pixel inilah yang kemudian mengubah sinar yang datang menjadi sinyal muatan (elektron atau *hole*, tergantung pada struktur pixel).

Semua sensor gambar menggunakan fotodiode sambungan *pn* (*pn-junction photodiode*). Sensor gambar setidaknya memiliki tiga komponen dasar: pertama, bagian sensor yang menghasilkan dan menyimpan sinyal muatan; kedua, bagian *scanning* yang mengidentifikasi setiap titik koordinat pixel; ketiga, bagian pengukur sinyal dan pengkonversi dalam sinyal listrik (Kuroda, 2015: 9).

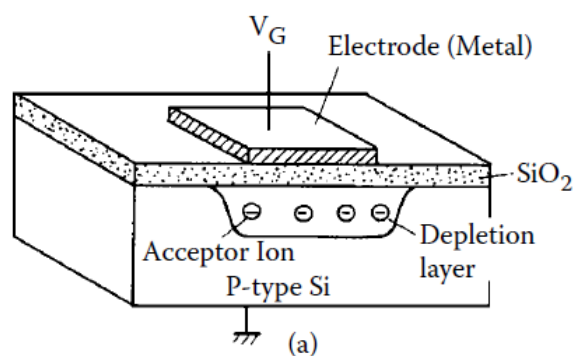
## **1. Jenis-jenis Sensor Gambar**

### **1.1 Sensor CCD**

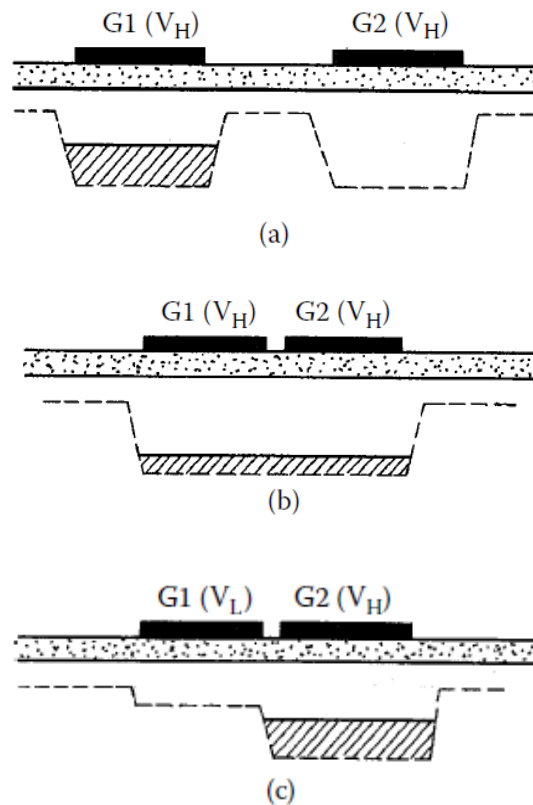
Sensor *charged-couple device* (CCD) menggunakan CCD sebagai bagian *scannernya*. CCD sebenarnya adalah nama dari model transfer, bukan nama dari sebuah sensor. Konsep dari CCD meliputi penyimpanan dan transfer elektron (juga *hole*) sebagai paket muatan

dalam sebuah semikonduktor. Rancang bangun dari CCD adalah sebuah kapasitor *metal-oxide-semiconductor* (MOS). Ketika elektroda metal diberikan tegangan positif, maka mayoritas pembawa *hole* pada silikon tipe-*p* akan digiring dari area permukaan silikon sehingga terbentuk area pengosongan (*depletion layer*) pada permukaan tersebut.

CCD merupakan metode transfer dari sensor. Interaksi dari dua buah kapasitor MOS yang berpasangan ditempatkan terpisah, dimana kedua elektroda dari kapasitor, G1 dan G2 tersebut diberi tegangan positif. Sumur potensial terbentuk di bawah G1 dan menyimpan sebuah paket elektron; di bawah G2 kosong. Pada kasus ini kedua kapasitor belum saling berhubungan. Saat kedua elektroda, G1 dan G2, mulai berdekatan, kedua sumur potensial sekarang berpasangan sehingga paket elektron yang mula-mula berada di bawah G1 menyebar di bawah G1 dan G2. Proses transfer selesai saat paket elektron yang mula-mula berada di bawah G1 berada di bawah G2 dengan cara menurunkan tegangan pada G1.



**Gambar 17.** Bentuk pixel pada CCD (Nakamura, 2005: 96)

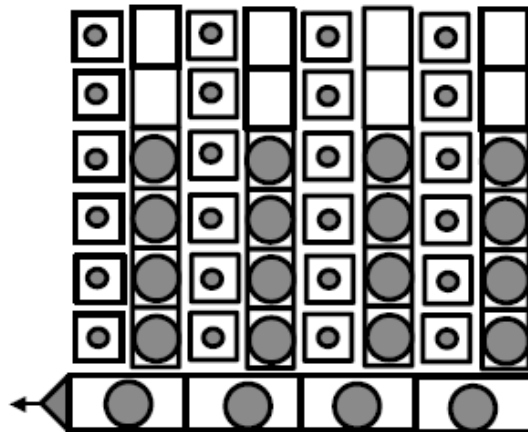


**Gambar 18.** Dua buah kapasitor MOS (a) yang terpisah jauh (b) saling mendekat, terjadi penyebaran paket muatan (c) paket muatan ditransfer seluruhnya pada G2 (Nakamura, 2005: 97)

Jika digunakan banyak kapasitor MOS, paket muatan dapat ditransfer bebas dengan mengatur sumur potensial. Pada bagian ini CCD berperan sebagai register geser analog (*analog shift register*) dimana sinyal dinyatakan dengan jumlah elektron dalam paket muatan. Point penting transfer muatan pada sensor CCD adalah pada proses transfer seluruh elektron yang tersimpan di sumur potensial menuju sumur berikutnya secara menyeluruh. Proses ini disebut *complete charge transfer mode*. Artinya semua elektron yang ada pada

gerbang kiri (posisi awal muatan) ditransfer menuju gerbang kanan (jalur *register*, sebelah kanan posisi awal muatan) secara menyeluruh (Kuroda, 2015: 55). Hal ini menjadikan sensor CCD sebagai arsitektur terbaik untuk sensor gambar karena jumlah elektron pada sebuah sumur potensial terjaga dari fluktuasi tegangan dan arus (Nakamura, 2005: 97).

Proses pembacaan (*read out*) terjadi saat sinyal berupa muatan yang dihasilkan fotodiode ditransfer menuju *vertical CCD* (VCCD). Sinyal yang berada pada VCCD tersebut kemudian ditransfer menuju *horizontal CCD* (HCCD).



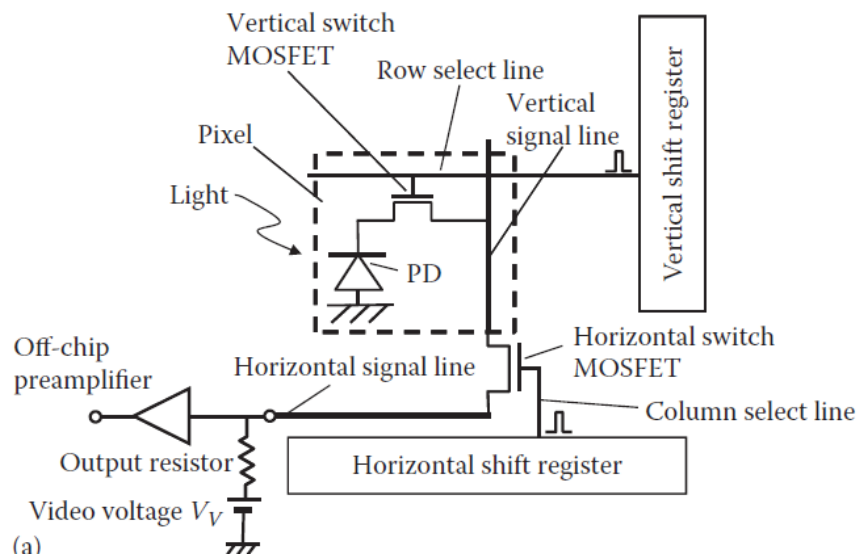
**Gambar 19.** Proses *read out* pada sensor CCD (Nakamura, 2005: 125)

Proses pembacaan sinyal tiap pixel ini disebut juga dengan *addressing*. Seluruh proses transfer sinyal dari fotodiode menuju VCCD lalu menuju HCCD berlangsung secara *complete charge*

*transfer mode* atau transfer sinyal secara menyeluruh. Amplifikasi sinyal pada sensor CCD berada pada akhir HCCD.

## 1.2 Sensor MOS

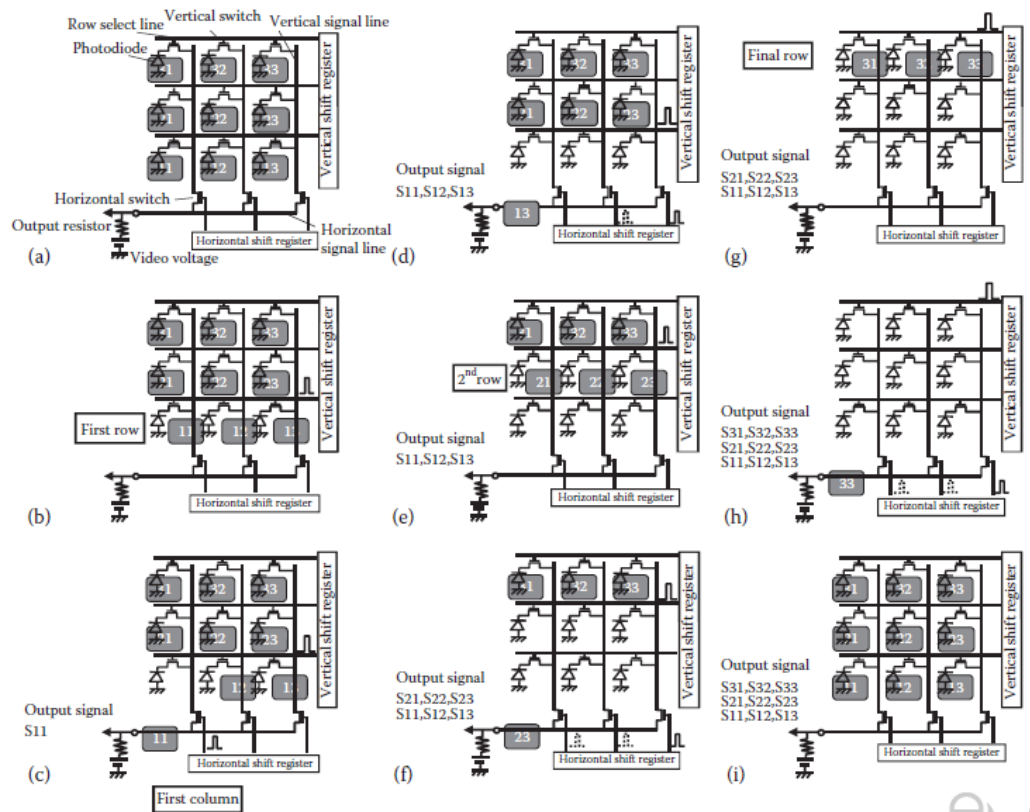
Jika pada sensor CCD *addressing* selesai saat muatan telah ditransfer dari pixel menuju VCCD dan HCCD, sensor *metal-oxide semiconductor* (MOS) melewati saklar-saklar MOSFET (*metal-oxide semiconductor field effect transistor*) vertikal dan horisontal sehingga sinyal muatan mengalir melalui barisan *metal signal* menuju bagian luar sebagai sinyal arus. Amplifikasi pada sensor ini juga berlangsung di ujung lajur horisontal layaknya sensor CCD.



**Gambar 20.** Model pixel pada sensor MOS (Kuroda, 2015: 77)

Proses pembacaan sinyal pada sensor MOS adalah hampir sama dengan sensor CCD. Sinyal pada setiap pixel ditransfer menuju area vertikal lalu ditransfer menuju area horisontal. Baris data yang akan

diakses ditentukan oleh *vertical shift register* (VSR) dan ditempatkan pada *vertical signal line* (VSL) lalu baris yang berisi deretan sinyal tersebut diseleksi oleh *horizontal shift register* (HSR) dan disimpan pada *horizontal signal line* (HSL).



**Gambar 21.** Proses *addressing* pada sensor MOS (Kuroda, 2015: 79)

Proses ini menempatkan VSR dan HSR sebagai pemilih (selector) sekaligus alat angkut sinyal, sedangkan VSL dan HSL berperan sebagai jalur angkutan. MOSFET berperan sebagai saklar yang memberi instruksi kepada SR (*shift register*) dan SL (*signal line*).

### 1.3 Sensor CMOS

Sensor *complementary metal-oxide semiconductor* (CMOS) adalah merupakan hasil pengembangan dari sensor MOS. Perbedaan mendasar bila dibandingkan dengan sensor MOS adalah setiap pixel pada sensor ini telah dilengkapi dengan *amplifier* sehingga bisa dikatakan bahwa sensor CMOS adalah sensor MOS yang dilengkapi dengan *amplifier* di setiap pixelnya.

**Tabel 2.** Perbandingan sensor CCD, MOS dan CMOS

No	Tipe Sensor	Bagian Sensor	Bagian <i>Scanner</i>	Bagian Pengukur Jumlah Muatan
1	CCD	Fotodioda sambungan- <i>pn, photogate</i>	CCD	( <i>Floating difussion amplifier</i> ) FDA/ sensor <i>chip</i>
2	MOS	Fotodioda sambungan- <i>pn, photogate</i>	Register geser/ dekoder dan saklar MOSFET	Penguat JFET ( <i>off-chip amplifier</i> )
3	CMOS	Fotodioda sambungan- <i>pn, photogate</i>	Register geser/ dekoder dan saklar MOSFET	FDA/ pixel

Kesamaan dari CMOS dan CCD adalah keduanya menggunakan FDA untuk mengukur jumlah muatan dari sensor. Bedanya FDA pada CCD terpasang pada chip pada ujung HCCD dan digunakan bersama-

bersama, sedangkan pada CMOS setiap FDA dipasang di dalam setiap pixel.

## 2. Fungsi Sensor Gambar

### 2.1 *Photoconversion*

Saat sebuah flux dari foton menumbuk semikonduktor pada suatu tingkat energi,  $E_{\text{photon}}$ , yang melebihi energi celah pita semikonduktor,  $E_g$ , dapat dinyatakan

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq E_g \quad (69)$$

dengan  $h$ ,  $c$ ,  $\nu$ , dan  $\lambda$  berturut-turut adalah tetapan Planck, kecepatan cahaya, frekuensi cahaya, dan panjang gelombang cahaya. Jumlah foton yang diserap pada sebuah bagian dari semikonduktor dengan ketebalan  $dx$  adalah sebanding dengan intensitas dari flux foton  $\Phi(x)$ , dengan  $x$  menyatakan kedalaman dari permukaan semikonduktor. Sebagai contoh, silikon memiliki energi celah pita 1,1 eV sehingga cahaya dengan panjang gelombang kurang dari 1100 nm mampu diserap. Konversi foton menjadi muatan kemudian berlangsung seiring terjadinya penyerapan foton pada semikonduktor. Cahaya dengan panjang gelombang lebih dari 1100 nm akan melewati silikon tanpa terjadi penyerapan.

Keberlanjutan dari penyerapan flux foton menghasilkan hubungan

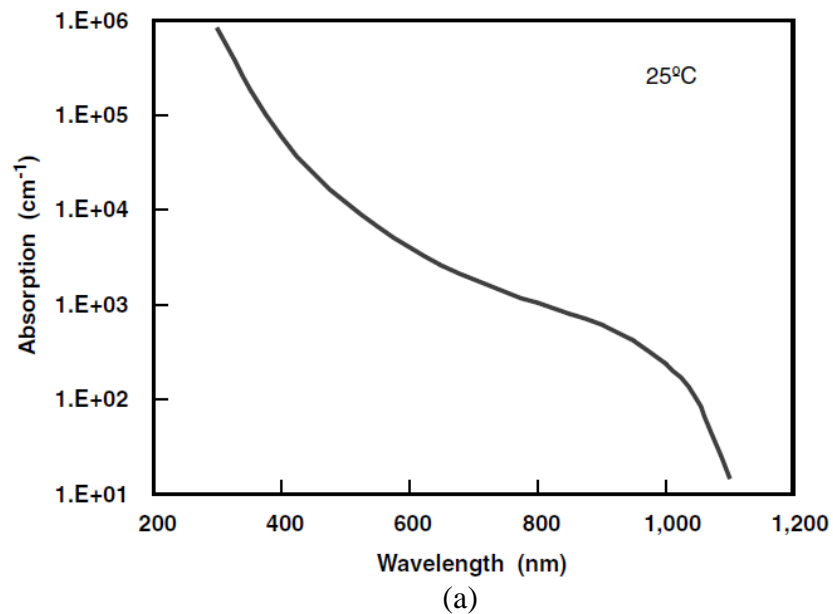
$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\alpha \cdot \Phi(x) \quad (70)$$

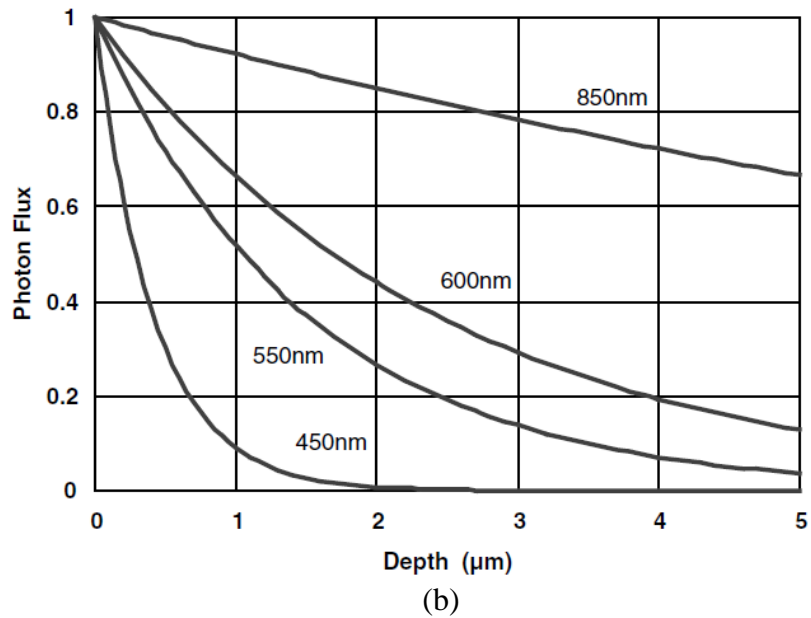
dengan  $\alpha$  menyatakan koefisien penyerapan dan tergantung pada panjang gelombang. Penyelesaian dari persamaan ini menggunakan syarat batas  $\Phi(x = 0) = \Phi_0$ , menghasilkan

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (71)$$

Dengan demikian, flux foton meluruh secara eksponensial sebanding dengan kedalaman semikonduktor dari permukaan. Foton yang terserap menghasilkan pasangan elektron-hole pada semikonduktor dengan densitas (flux) yang dinyatakan oleh persamaan (71).

Apabila dinyatakan dalam grafik maka akan didapatkan kedalaman sebesar  $1/\alpha$ , kedalaman dimana flux meluruh sebesar  $1/e$ . Kedalaman untuk cahaya biru ( $\lambda = 450$  nm) hanya  $0,42 \mu\text{m}$ , sedangkan cahaya merah ( $\lambda = 600$  nm) mencapai  $2,44 \mu\text{m}$  (Nakamura, 2005: 56).





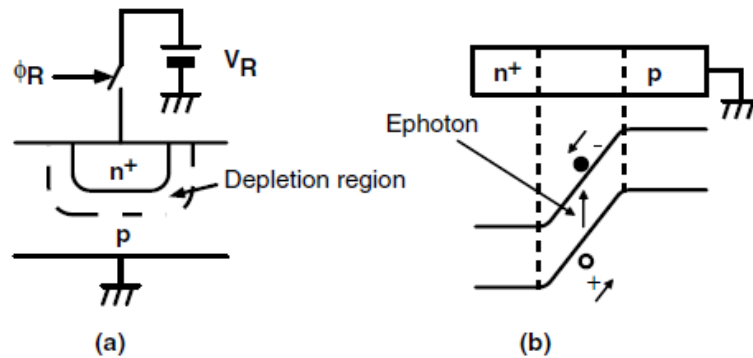
**Gambar 22.** Penyerapan cahaya pada silikon (a) koefisien serapan; (b) intensitas vs kedalaman (Nakamura, 2005: 57)

Grafik (a) dan (b) di atas dapat diartikan bahwa penyerapan cahaya pada silikon dengan panjang gelombang 450 nm (biru) lebih tinggi daripada cahaya dengan panjang gelombang 600 nm (merah). Cahaya dengan panjang gelombang lebih dari 1100 nm akan melewati silikon sebagai material yang ‘transparan’ sehingga tidak terjadi penyerapan (Nakamura, 2005: 55).

## 2.2 Pengumpulan Muatan dan Akumulasi

Pengumpulan muatan dan area akumulasi dari sebuah pixel dapat dicontohkan dengan sebuah fotodiode sederhana. Wilayah  $p$

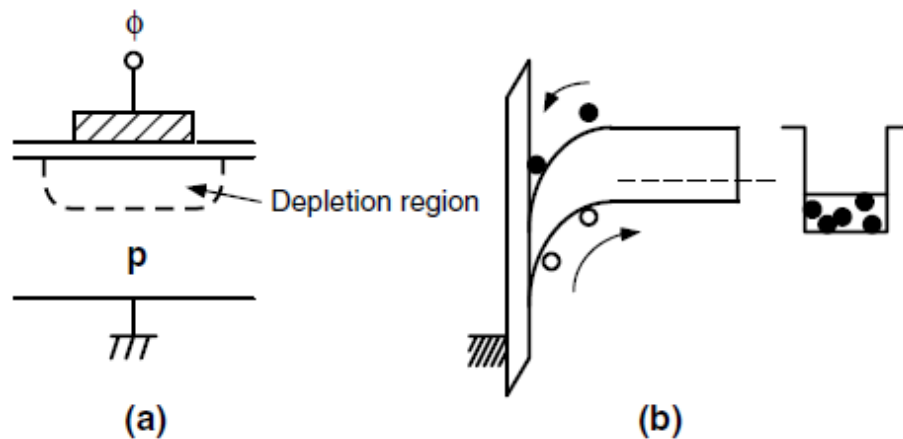
dihubungkan dengan *ground* dan  $n^+$  mula-mula dihubungkan dengan tegangan positif,  $V_R$ .



**Gambar 23.** Fotodiode bias mundur (a) penampang melintang (b) diagram pita energi (Nakamura, 2005: 58)

Proses ini kemudian menjadi mengambang secara elektrik dengan mempertahankan kondisi bias mundur. Elektron yang tereksitasi oleh foton cenderung berkumpul pada daerah  $n^+$ , sehingga menurunkan potensial dari daerah ini; *hole* mengalir menuju *ground*. Dalam kasus ini, elektron adalah merupakan sinyal yang berupa muatan. Semua model sensor kamera baik *charged-coupled device* (CCD) maupun *complementary metal-oxide semiconductor* (CMOS) untuk *digital still camera* (DSC) bekerja dengan prinsip *integrating-charged*.

Sedikit perbedaan pada MOS, ketika tegangan positif dihubungkan dengan gerbang elektroda, pita energi akan melengkung ke bawah, dan mayoritas dari *carrier* (*hole*) akan dikosongkan. Bagian yang kosong ini kemudian siap untuk mengumpulkan muatan bebas.



**Gambar 24.** Fotodiode MOS bias mundur (a) penampakan melintang (b) diagram pita energi (Nakamura, 2005: 58)

Pada kedua kasus di atas (bias mundur fotodiode dan MOS), elektron dihasilkan pada area pengosongan yang keseluruhannya dimanfaatkan sebagai muatan yang dibaca sebagai sinyal.

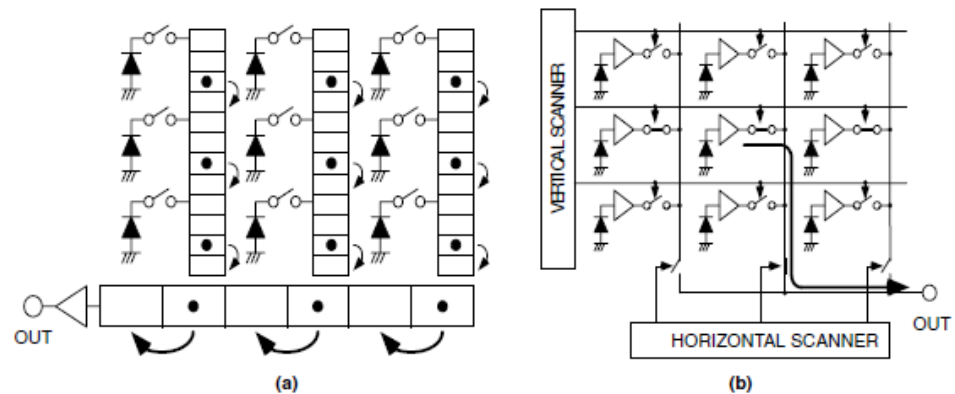
### 2.3 Scanning Pada Sensor Gambar

Muatan yang terakumulasi atau sinyal tegangan atau arus harus dibaca di luar pixel dari sebuah sensor gambar. Sinyal-sinyal tersebut didistribusikan dalam bidang dua dimensi yang harus ditransformasikan secara berurutan sesuai dengan sinyal waktu (*clock*). Proses ini disebut dengan *scanning*. Ada dua jenis *scanning* yaitu *interlaced scan* dan *progressive scan*.

Ada beberapa jenis arsitektur dari model CCD namun dalam tulisan ini hanya akan dipaparkan model *interline transfer* (ITCCD). Setiap sinyal pada model ini disimpan pada fotodiode dari pixel. Sinyal-sinyal tadi lalu ditransfer menuju CCD vertikal (V-CCD) yang secara simultan memenuhi seluruh susunan sensor kemudian ditransfer dari

V-CCD menuju CCD horisontal (H-CCD). Sinyal yang berada pada H-CCD lalu dikirim ke penguat untuk mendapatkan tegangan yang dapat diubah menjadi sinyal digital.

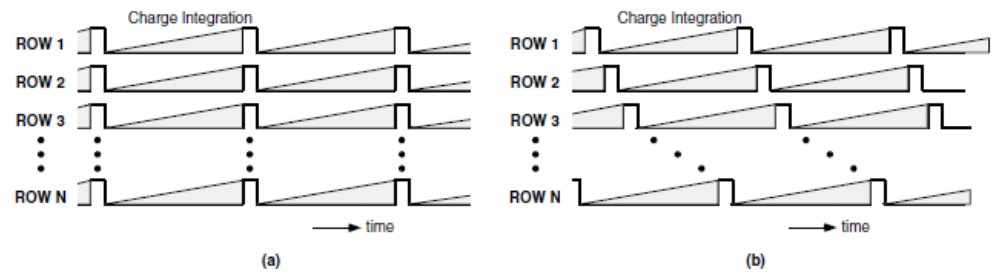
Pada model CMOS, pembacaan sinyal dilakukan dengan model *X-Y addressing*. Sinyal muatan yang dihasilkan dari sensor langsung dikonversi menjadi tegangan atau arus dengan menggunakan transistor aktif yang berada di dalam pixel. Sesuai namanya, *X-Y addressing*, sinyal pixel diberi alamat oleh *vertical scanner* (sebuah *shift register* atau dekode) yang berada pada baris (*Y*) dan *horizontal scanner* yang berada pada kolom (*X*) untuk dibaca.



**Gambar 25.** Skema susunan *scanning* gambar (a) skema transfer muatan (b) skema *X-Y address* (Nakamura, 2005: 58)

Karena sensor CCD dan CMOS bekerja dengan prinsip *charge-integrating*, sinyal muatan dari sebuah pixel harus direset sebelum memulai pemaduan muatan (*charge integrating*). Perbedaan dalam skema *scanning* terjadi pada *timing operational*. Pada sensor CCD, proses reset telah terjadi saat muatan ditransfer dari fotodiode menuju

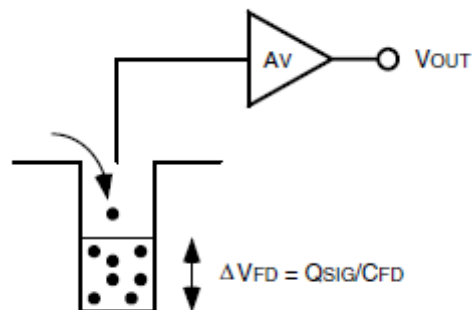
V-CCD. Proses ini terjadi satu waktu pada setiap susunan pixel. Sebaliknya, proses reset dan pembacaan sinyal pada CMOS terjadi berurutan baris per baris. Berikut diagram *timing* dari kedua model:



**Gambar 26.** Operasi *timing* dari (a) CCD dan (b) CMOS (Nakamura, 2005: 59)

## 2.4 Deteksi Muatan

Deteksi muatan pada CCD dan CMOS memiliki karakter masing-masing. Sensor CCD mendeteksi muatan pada keluaran penguat (*output amplifier*) sedangkan sensor CMOS mendeteksi muatan saat masih di dalam pixel. Diagram berikut menggambarkan bagaimana terjadinya proses deteksi muatan.



**Gambar 27.** Skema deteksi muatan (Nakamura, 2005: 60)

Sinyal muatan,  $Q_{sig}$ , jatuh ke dalam sumur potensial, yang ditangkap oleh penyangga tegangan (*voltage buffer*). Perubahan tegangan,  $\Delta V_{fd}$ , yang disebabkan oleh muatan memenuhi persamaan

$$\Delta V_{fd} = \frac{Q_{sig}}{C_{fd}} \quad (72)$$

dimana  $C_{fd}$  adalah kapasitansi yang terhubung pada sumur potensial dan berperan sebagai kapasitansi pengubah muatan menjadi tegangan. Sinyal keluarannya memenuhi persamaan

$$\Delta V_{out} = A_V \cdot \Delta V_{fd} \quad (73)$$

dengan  $A_V$  menyatakan penguatan dari penyangga tegangan (*voltage buffer*) (Nakamura, 2005: 60).

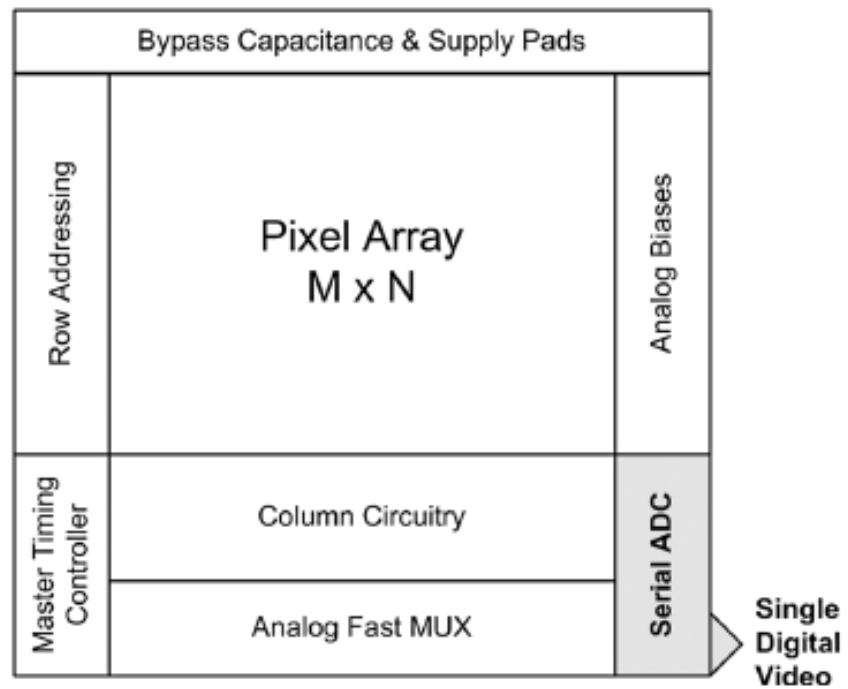
### 3. *Parallelism*

Sensor gambar merepresentasikan *chip* tunggal yang sangat besar dengan sistem komunikasi berupa *parallel-channel*. Pada sensor modern, konversi dari miliaran jalur optik paralel dalam hitungan detik dari foton menjadi bit adalah proses yang luar biasa dan dicapai dengan *parallelism*. Konversi *Analog-to-digital* (ADC) pada sebuah sensor gambar dapat dibuat dengan memvariasi tingkatan *parallelism*. Pada kasus ini, yang dimaksud dengan *parallelism* adalah sistem yang terdiri dari banyak *device* yang bekerja secara simultan untuk melakukan fungsi yang sama dari beberapa aspek yang berbeda pada suatu kejadian.

Ada beberapa jenis arsitektur *parallelism* yang dibangun untuk memaksimalkan kinerja sensor dan meminimalkan resiko kerusakan dan biaya pembuatan.

### **3.1 Serial Architecture**

*Serial architecture* merupakan susunan yang hanya menggunakan *chip* ADC tunggal berkecepatan tinggi. Arsitektur dari model ini biasanya hanya menggunakan beberapa ADC yang dipasang di sisi sensor. Model serial merupakan model dengan konverter berkecepatan paling tinggi dimana model ini harus bekerja pada *pixel rate* (kecepatan tertentu untuk mengkonversi *array* pixel) dari sensor. Untuk contoh, sebuah serial ADC tunggal harus bekerja pada kecepatan 125 MSps (*mega-samples per second*) untuk mengkonversi sensor berukuran 1920 x 1080 yang beroperasi pada kecepatan 60 fps (*frame per second*).



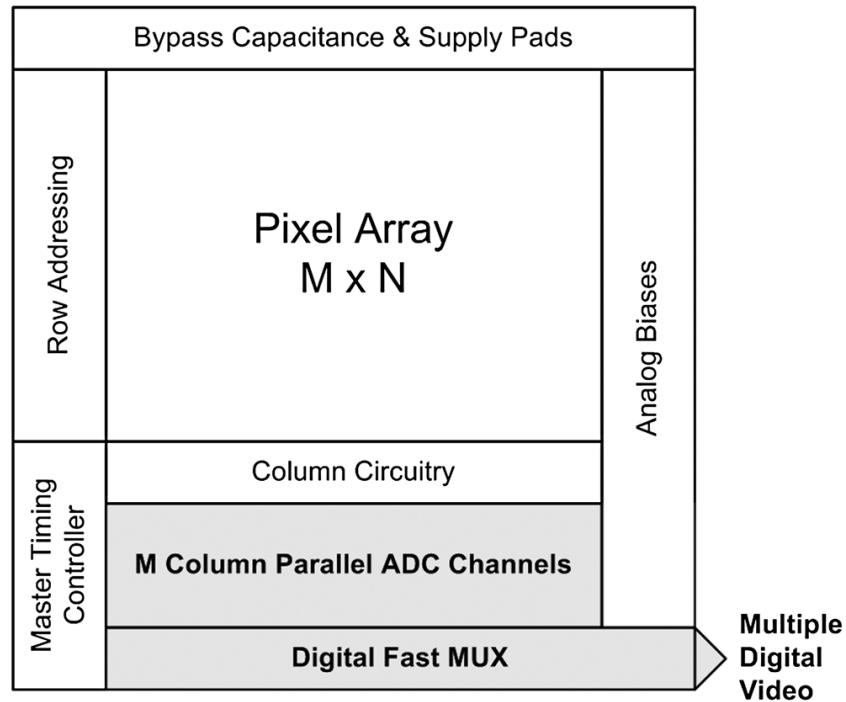
**Gambar 28.** Arsitektur model serial untuk sensor berukuran M x N dengan ADC yang terletak pada bagian bawah sebelah kanan (Veeder, 2015: 6)

Keuntungan dari model ini adalah memudahkan perusahaan silikon karena arsitektur yang benar-benar memisahkan antara ADC dan sensor. Keuntungan lain adalah bahwa arsitektur pada model ini dapat menempatkan ADC jauh dari sensor. Ini membantu mengurangi *noise* dan menjaga daya tinggi dan komponen yang memanas jauh dari sensor yang juga peka terhadap panas. Model ini sangat baik digunakan untuk menangkap inframerah gelombang panjang (*long-wave infrared*). Rancangan sensor seperti ini menghindari penggunaan daya yang besar karena hanya memiliki satu ADC.

Kekurangan dari model ini adalah karena hanya menggunakan satu jalur ADC, dapat mengakibatkan terjadinya *data bottleneck* atau kemacetan data. Terlebih saat terjadi peningkatan resolusi. Konverter dengan resolusi yang lebih tinggi tidak dapat bekerja secepat sebelumnya oleh karena adanya penyesuaian internal. Penyesuaian ini juga dapat memakan lebih besar daya pada konverter.

### **3.2 Column-Parallel Architecture**

*Column-parallel architecture* merupakan model yang menempatkan ADC pada tiap-tiap kolom dari sensor. Terkadang menggunakan satu ADC untuk beberapa kolom dan terkadang juga menggunakan beberapa ADC untuk satu kolom. Semuanya termasuk dalam model *column-parallel*. Model ini dikategorikan sebagai susunan medium karena menggunakan ratusan hingga ribuan jalur ADC untuk menghasilkan data. Kecepatan dari model ini berada di bawah model serial yaitu 10 kSps (*kilo-samples persecond*) hingga 1 MSps. Jika kita menggunakan contoh sensor dengan ukuran 1920x1080 dan bekerja pada kecepatan 60 fps dan diasumsikan bahwa ada satu ADC untuk tiap kolom dari sensor, maka akan didapatkan 1920 ADC yang akan bekerja dengan kecepatan 65 kSps.



**Gambar 29.** Arsitektur model *column-parallel* untuk sensor berukuran  $M \times N$  dengan ADC yang terletak pada tiap kolom (Veeder, 2015: 7)

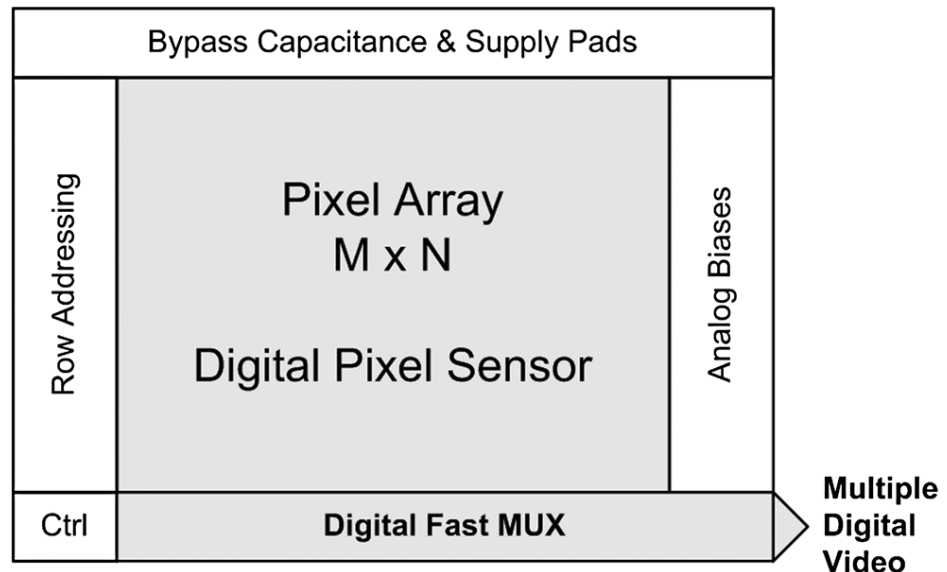
Keuntungan dari model ini adalah kabel penghubung (*bus*) berkecepatan tinggi tidak dibutuhkan lagi sehingga dapat mengurangi penggunaan daya untuk bekerja pada resolusi tinggi. Hal ini juga dapat melewati *bandwidth* yang jauh lebih lebar dibandingkan yang dapat dibaca oleh *chip* analog dan model serial.

Kekurangan dari model ini adalah batasan area dari tiap ADC karena ADC dipasang pada tiap-tiap kolom. Kekurangan lain adalah diperlukan *clock* yang bercabang untuk mengeksekusi data sehingga dibutuhkan *driver* berdaya tinggi untuk mendukung model ini terlebih saat digunakan untuk mengeksekusi data beresolusi tinggi. Selain itu, *cross talk* atau komunikasi antar ADC dapat juga menjadi masalah

pada model ini. Bagaimanapun, model ini adalah model yang baik untuk digunakan pada sensor modern yang dioperasikan pada kecepatan video (*video rate*) atau yang lebih tinggi.

### 3.3 *Pixel-Parallel*

*Pixel-parallel* merupakan model sensor yang menggunakan sebuah ADC untuk tiap pixel atau kelompok kecil dari pixel. Model ini disebut juga *digital pixel sensor* (DPS). Model ini menggunakan *parallelism* atau susunan yang sangat banyak dengan jumlah ADC yang sama dengan jumlah pixel yang ada. Setiap konverter memiliki kecepatan yang rendah yang bekerja pada tingkat *frame rate*. Dengan contoh sensor berukuran 1920x1080 yang bekerja pada kecepatan 60 fps maka akan ada 2,1 juta jalur ADC yang bekerja pada kecepatan 60 sps (*samples per second*).



**Gambar 30.** Arsitektur model *pixel-parallel* untuk sensor berukuran M x N dengan ADC yang terletak pada setiap pixel (Veeder, 2015: 9)

Model DPS ini lebih banyak digunakan dan telah hadir setidaknya pada akhir tahun 1980-an. Model ini merupakan model dengan *bandwidth* yang paling tinggi dari berbagai macam model *image-sensing*. Model ini juga merupakan model pengaturan tingkat tinggi (*very modular*) sehingga dapat dengan cepat dikonfigurasi ulang dengan ukuran sensor yang berbeda selama ukurannya tidak lebih besar dari ukuran sebelumnya.

Kekurangan dari model ini adalah terbatasnya area untuk ADC (hanya sebatas luas pixel). ADC yang dipasang pada tiap pixel juga memerlukan daya yang lebih banyak dibandingkan dengan model *column parallel*. Setiap pixel memakan daya aktif (*active power*) atau setidaknya memerlukan daya statis yang proporsional dengan intensitas cahaya. Ukuran *arrays* yang besar juga dapat menyebabkan persoalan pada pengaturan daya. Ratusan, ribuan hingga jutaan pixel juga dapat menghambat distribusi sinyal pada bagian analog dan digital. ADC yang sangat banyak juga menyebabkan terjadinya ketidakseragaman konversi (*nonuniformity*) (Veeder, 2015:4).

## **F. Nikel**

Nikel (Ni) adalah logam berwarna putih keabu-abuan yang banyak ditemukan pada sulfida dan arsenik. Nikel diekstrak dari pembakaran nikel oksida (NiO) yang kemudian direduksi menggunakan karbon. Nikel murni merupakan logam dengan sifat lunak dan elastis serta tahan terhadap korosi

baik di udara maupun di air, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai pelapis suatu bahan seperti nikel-krom (*nichrom*) (<http://www.goodfellow.com/E/Nickel.html>, 2/11/2017: 21:14).

Selain digunakan sebagai pelapis, nikel juga dimanfaatkan dalam alat-alat instrumen dan kontrol untuk mengukur dan mengatur kelistrikan serta dimanfaatkan sebagai penghasil panas (Braunovic et.al, 2007: 80).

## G. Kisi Difraksi

Kisi difraksi adalah sekumpulan celah transparan yang berbentuk pola garis pada sebuah layar tak tembus pandang. Kisi juga dapat berupa sekumpulan pola garis pemantul (*reflecting grooves*) pada sebuah layar (Palmer, 2002: 12).

Persamaan difraksi dinyatakan dengan  $n\lambda = d \sin\theta$  dengan  $n$  menyatakan orde terang pola difraksi,  $d$  menyatakan lebar celah kisi, dan  $\theta$  adalah sudut antara terang pusat dan terang orde  $n$ . Jarak antara terang pusat dan terang orde satu dinotasikan sebagai  $P$  dan jarak sensor dengan kisi dinotasikan dengan  $L$  sehingga dapat dituliskan  $\sin\theta = \frac{P}{\sqrt{P^2+L^2}}$ .

## H. Gambar (Citra)

### 1. *Grayscale*

Data pada gambar *grayscale* hanya memiliki data tunggal yang merepresentasikan intensitas, kecerahan, atau densitas dari suatu gambar. Nilai pixel pada gambar *grayscale* selalu positif dengan rentang{

$0 \dots 2^k - 1$ }. Untuk tipe gambar ini nilai  $k = 8$  bit (1 byte) per pixel sehingga nilai pixel memiliki rentang  $\{0 \dots 255\}$ , dengan 0 menunjukkan nilai kecerahan minimum (hitam) dan 255 menunjukkan nilai kecerahan maximum (putih).

## 2. Biner

Gambar biner adalah tipe gambar yang hanya memiliki dua nilai pada pixelnya, hitam atau putih. Kode nilai dari gambar ini menggunakan 1 bit  $\{0/1\}$  setiap pixelnya. Gambar biner biasanya digunakan untuk representasi garis, grafik, fax, dan tentunya pada percetakan elektronik.

## 3. Warna

Kebanyakan gambar didasarkan pada tiga warna pokok yaitu *red*, *green*, dan *blue* (RGB). Setiap warna memiliki *depth* 8 bit sehingga setiap pixel mencakup  $3 \times 8 = 24$  bit untuk menyatakan kode dari tiap komponen pixel dan range dari setiap warna adalah  $\{0 \dots 255\}$ . Selain warna yang berbasis pada tiga warna pokok, gambar dengan basis warna lain juga digunakan dalam beberapa aplikasi seperti model gambar jenis CMYK (*Cyan-Magenta-Yellow-Black*) (Burger and Burge, 2009:11).

Metode RGB dan CMYK memiliki hubungan sebagai berikut

$$Ye = R + G = W - B \quad (74)$$

$$Mg = R + B = W - G \quad (75)$$

$$Cy = G + B = W - R \quad (76)$$

dimana  $Ye$  adalah kuning,  $Mg$  adalah *magenta*,  $Cy$  adalah *cyan*,  $R$  adalah merah,  $G$  adalah hijau  $B$  adalah biru dan  $W$  adalah putih.

## **BAB III**

### **METODE PENELITIAN**

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

##### **1. Tempat Penelitian**

Penelitian dilakukan di Laboratorium Spektroskopi lantai 2 Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta (FMIPA, UNY).

##### **2. Waktu Penelitian**

Penelitian dilakukan pada bulan Januari 2017 sampai dengan Juli 2017.

#### **B. Variabel Penelitian**

##### **1. Variabel Bebas**

Variabel bebas adalah variabel yang menjadi sebab berubahnya suatu variabel lain yaitu variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah temperatur sampel (kawat nikel).

##### **2. Variabel Terikat**

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh akibat adanya variabel lain yaitu variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah intensitas inframerah yang dipancarkan oleh sampel yang dipanaskan.

### **3. Variabel Kontrol**

Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat sama sehingga tidak mempengaruhi variabel terikat. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah lebar celah kisi, sampel (kawat nikel), jarak sensor dengan kisi dan cahaya ruangan.

### **C. Jenis Penelitian**

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui pergeseran panjang gelombang puncak intensitas berdasarkan perubahan temperatur dari kawat nikel yang dipanaskan. Data yang diperoleh diplot pada grafik untuk menentukan konstanta pergeseran Wien.

### **D. Alat dan Bahan**

1. Nikel
2. Power Supply
3. Termokopel
4. Webcam
5. Kisi difraksi
6. Kolimator
7. Laptop
8. Aplikasi Pengolah Citra
9. Furnace

## **E. Spesifikasi Alat-alat Penelitian**

### **1. Nikel**

Nikel yang digunakan merupakan nikel murni tanpa paduan logam lain dan dibuat lilitan dengan jumlah 17 lilitan dan diameter lilitan 9 mm. Nikel digunakan sebagai sumber radiasi inframerah.

### **2. Power Supply**

*Power supply* yang digunakan memiliki output maksimum 20 V dan 6,5 A (AC dan DC). *Power supply* digunakan sebagai sumber tegangan untuk memanaskan nikel.

### **3. Termokopel**

Termokopel yang digunakan mengubah panas menjadi tegangan dengan nilai konversi  $T = \frac{V+6,14}{0,05}$  dengan  $V$  adalah tegangan pada ujung-ujung termokopel. Termokopel digunakan untuk mengukur temperatur nikel yang dipanaskan.

### **4. Webcam**

Webcam digunakan sebagai sensor inframerah. Pixel pada webcam diposisikan sebagai layar untuk mengamati pola difraksi gelombang inframerah. Webcam yang digunakan memiliki pixel dengan *array* 1280x720 dengan dimensi 6x3,4 mm.

### **5. Kisi difraksi**

Kisi difraksi digunakan untuk mendifraksikan gelombang inframerah dari sumber radiasi (nikel). Kisi yang digunakan memiliki 600 garis/cm.

## 6. Kolimator

Kolimator digunakan untuk mengubah berkas sinar dari sampel yang berpencah menjadi berkas sejajar. Kolimator dibuat dari dua buah silet yang kedua tepinya didekatkan sehingga terbentuk celah dengan lebar celah 0,4 mm.

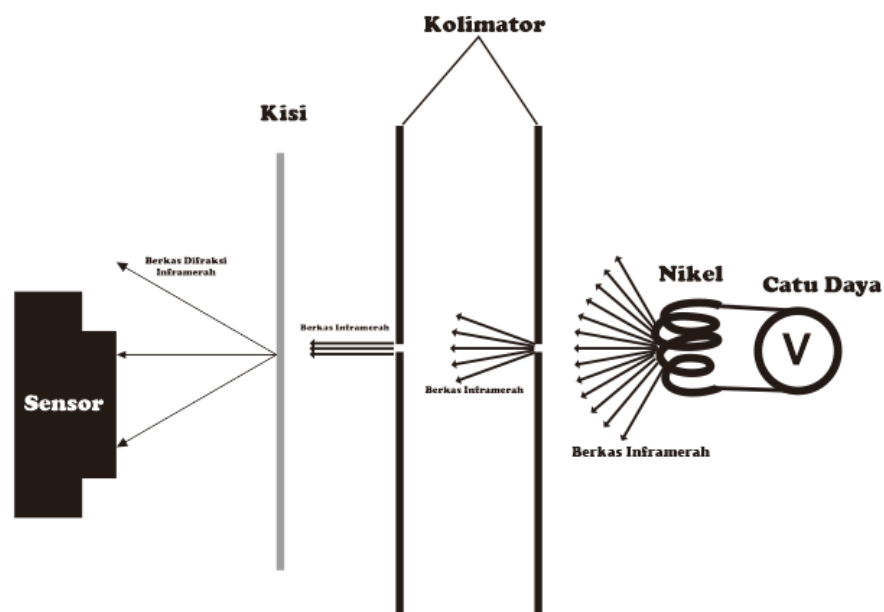
## 7. Furnace

Furnace yang digunakan mampu menghasilkan panas hingga  $1000^{\circ}\text{C}$  dan dilengkapi display digital penunjuk temperatur serta sistem kontrol untuk mengatur temperatur furnace. Tegangan input 220-240 Volt (50-60 Hz), arus input 4,2 A, daya 1000 watt. Furnace digunakan untuk mengkarakterisasi termokopel.

## F. Prosedur Penelitian

### 1. Penentuan Rentang Panjang Gelombang Terang Orde Pertama

1.1 Menyusun alat seperti gambar di bawah



**Gambar 31.** Ilustrasi susunan alat

- 1.2 Mengaktifkan catu daya.
- 1.3 Menghubungkan kamera pada laptop.
- 1.4 Mengamati orde terang pertama pada layar laptop.
- 1.5 Mengubah temperatur dengan mengubah arus pada nikel.
- 1.6 Mengambil sampel gambar pada layar dengan variasi temperatur.
- 1.7 Mengukur jarak antara terang pusat dengan terang orde pertama setiap temperatur berdasarkan posisi pixel.
- 1.8 Mengubah satuan pixel ke dalam panjang gelombang.
- 1.9 Menyajikan data hasil pengukuran dalam grafik sebagai grafik distribusi intensitas sebagai fungsi panjang gelombang orde pertama.

## **2. Penentuan Konstanta Pergeseran Wien**

- 2.1 Menyusun data titik puncak intensitas dengan panjang gelombang untuk setiap temperatur.
- 2.2 Menyajikan data dalam bentuk grafik panjang gelombang (titik puncak intensitas) sebagai fungsi  $T^{-1}$ .
- 2.3 Menentukan konstanta pergeseran Wien dari gradien grafik dengan melakukan *linear fitting*.

## **3. Penentuan Luas (Pixel) di bawah Kurva Distribusi Intensitas**

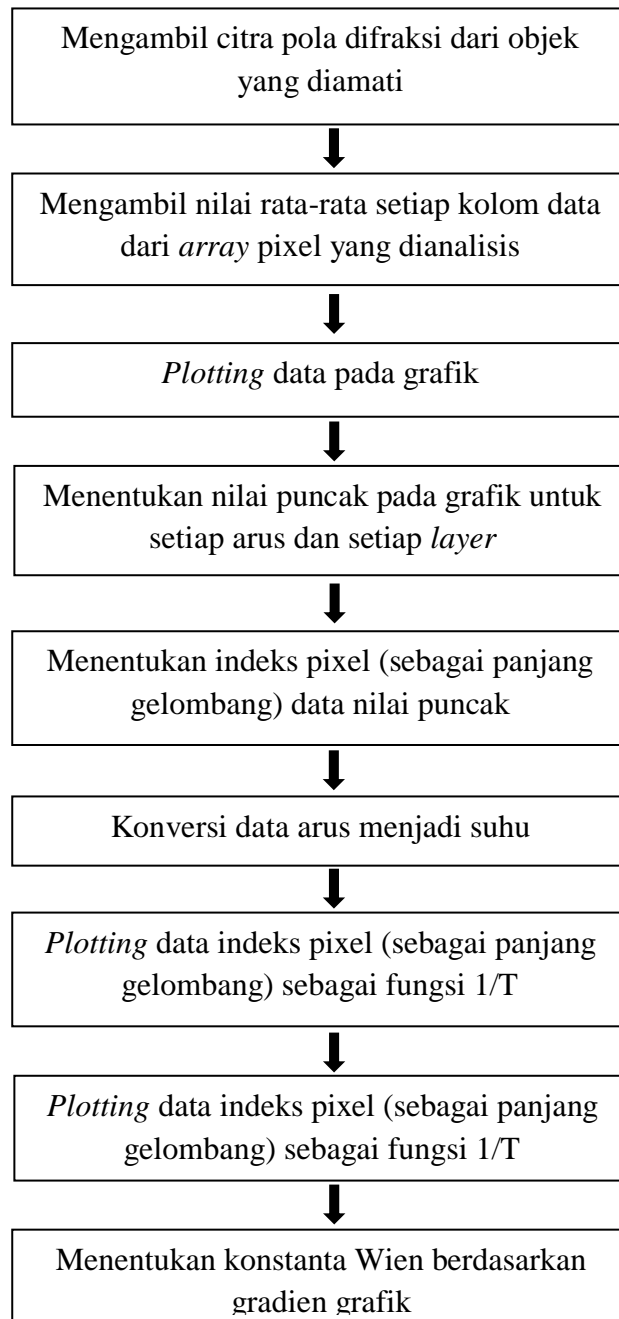
- 3.1 Menjumlahkan seluruh pixel di bawah kurva distribusi intensitas untuk setiap temperatur.
- 3.2 Menyajikan data dalam tabel.

## **4. Penentuan Konstanta Boltzmann**

4.1 Menyajikan data dalam bentuk grafik luas di bawah kurva (nm) sebagai fungsi  $T^4$ .

4.2 Menentukan nilai konstanta Boltzmann dari gradien grafik.

### G. Diagram Alir



## H. Teknik Analisis Data

### 1. Menentukan Terang Pusat

Terang pusat,  $t_p$ , ditentukan dari pixel dengan nilai paling besar. Indeks pixel terang pusat ditentukan dari titik tengah dari rentang indeks pixel dengan nilai pixel paling besar.

### 2. Menentukan Terang Orde Pertama

Terang orde pertama,  $t_1$ , ditentukan dari rentang indeks pixel yang teramati membentuk pola pita (*band*).

### 3. Menentukan Jarak Terang Pusat dengan Terang Orde Pertama

Jarak terang pusat dengan terang orde pertama,  $P$ , ditentukan dari selisih index pixel terang pusat dan terang orde pertama. Satuan jarak terang pusat dan terang orde pertama adalah pixel. Bila dinyatakan secara matematis maka  $P = |t_p - t_1|$ . Untuk mengubah satuan pixel menjadi nanometer maka  $P$  harus dikalikan dengan lebar pixel,  $\delta_p$ , dalam satuan nanometer. Lebar pixel dalam nanometer ditentukan dengan lebar sensor,  $\delta_s$  dibagi jumlah pixel,  $k$ , sehingga dapat dinyatakan dengan  $\delta_p = \delta_s/k$ . nilai  $P$  dalam satuan nanometer  $P_n$  ditentukan dengan  $P_n = P \times \delta_p$ .

### 4. Konversi Satuan Panjang Gelombang

Rentang panjang gelombang ditentukan dengan menerapkan persamaan  $n\lambda = d \sin\theta$  dengan  $\sin\theta = \frac{P_n}{(P_n^2 + L^2)^{\frac{1}{2}}}$  dengan  $n = 1$  (terang orde pertama), sehingga secara matematis panjang gelombang dinyatakan dengan  $\lambda = d \frac{P_n}{(P_n^2 + L^2)^{\frac{1}{2}}}$ .

## 5. Menghitung Jumlah Emisi dari Kurva Distribusi

Jumlah emisi ditentukan dari integral kurva distribusi dengan batas indeks pixel yang dianalisis (indeks pixel terang orde pertama). Hasil integral ditentukan dengan menjumlahkan nilai-nilai pixel,  $I$ , yang berada dalam batas integral. Apabila dinyatakan secara matematis maka

$$M = \sum_a^b I x \Delta x$$

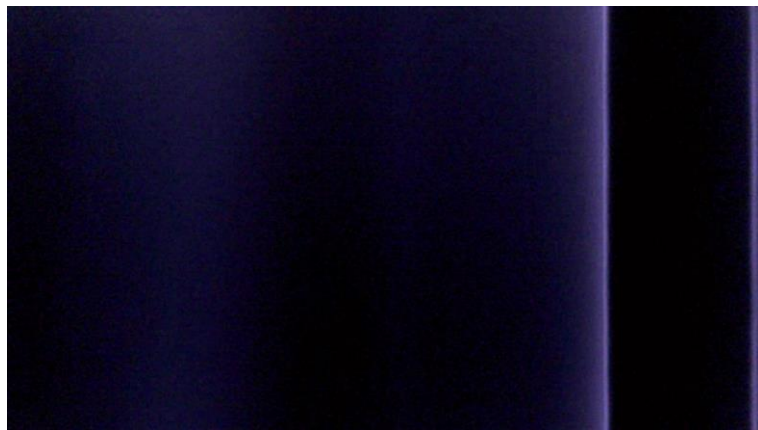
dengan  $a$  dan  $b$  adalah batas indeks pixel terang orde pertama,  $I$  adalah nilai pixel dan  $\Delta x = 1 \text{ pixel} = \delta_p$ .

## BAB IV

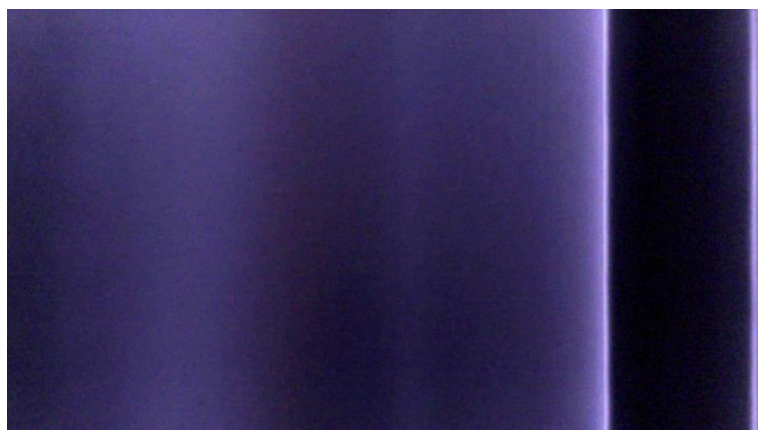
### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### A. Citra Tangkapan Sensor Kamera

Citra tangkapan sensor kamera disimpan sebagai citra *red green blue* (RGB) dalam format jpg. Berikut adalah hasil citra hasil tangkapan sensor kamera:



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Gambar 32.** Citra hasil tangkapan kamera inframerah (a) 4,5 A (b) 5,0 A (c) 5,5 A (d) 6,0 A (e) 6,5 A

Gambar 32 menunjukkan pola difraksi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh kawat yang dipanaskan menggunakan aliran listrik. Dari citra tersebut dapat diamati pola terang pusat pada sisi kanan citra dan pola terang orde pertama pada sisi kiri citra. Pola terang pusat ditutupi untuk mengontrol fitur AGC (*automatic gain control*) secara manual sehingga tampak menyerupai gerhana matahari.

Telah dijelaskan pada bab sebelumnya bahwa sensor yang digunakan merupakan sensor kamera dengan ukuran *array* 1280x720. Ukuran *array* ini menunjukkan bahwa sensor kamera memiliki panjang 1280 pixel dan lebar 720 pixel. Dalam penelitian ini indeks pixel dengan panjang 1280 digunakan sebagai ‘mistar’ pengukur jarak terang pusat dan terang orde pertama untuk menghitung nilai panjang gelombang yang dihasilkan oleh kawat. Namun satuan panjang gelombang yang didapatkan adalah pixel. Untuk mengubah satuan pixel menjadi meter dengan, maka dilakukan pengukuran panjang 1280 pixel dalam satuan meter dengan cara mengukur panjang sensor menggunakan jangka sorong. Hasil pengukuran panjang 1280 pixel adalah  $6 \times 10^{-3}$  meter atau setara dengan  $6 \times 10^6$  nanometer, sehingga setiap pixel memiliki panjang  $4,6875 \times 10^3$  nanometer. Kisi yang digunakan adalah kisi dengan 600 garis per milimeter. Angka ini menunjukkan bahwa lebar celah pada kisi adalah 1,67 nanometer.

Terang pusat pada penelitian ini berada pada pixel dengan indeks 1139 dan terang orde pertama berada pada pixel dengan rentang indeks 80

hingga 500. Sedangkan jarak sensor dengan kisi adalah 6,7 mm. Dengan menggunakan persamaan  $d \frac{P}{\sqrt{P^2+L^2}} = n\lambda$ , maka panjang gelombang pada rentang pixel 80 sampai 500 adalah 680,2 nm sampai 992,2 nm.

## B. Pergeseran Titik Puncak Panjang Gelombang Intensitas Maksimum

Citra hasil tangkapan sensor kamera di atas terdiri dari tiga *layer*. *Layer* pertama merupakan *red layer*, lalu yang kedua adalah *green layer* dan yang ketiga adalah *blue layer*. Data setiap *layer* dari citra tersebut kemudian dianalisis. Intensitas dari citra di atas direpresentasikan dalam nilai setiap pixel dengan rentang 0-255 (8 bit). Karena ukuran sensor kamera adalah 1280x720 pixel, maka nilai dari setiap pixel disajikan dalam data berbentuk matriks dengan ukuran yang sama dengan ukuran pixel. Untuk memudahkan pemahaman, berikut adalah contoh matriks 4x4 yang disajikan dalam citra: sebuah matriks

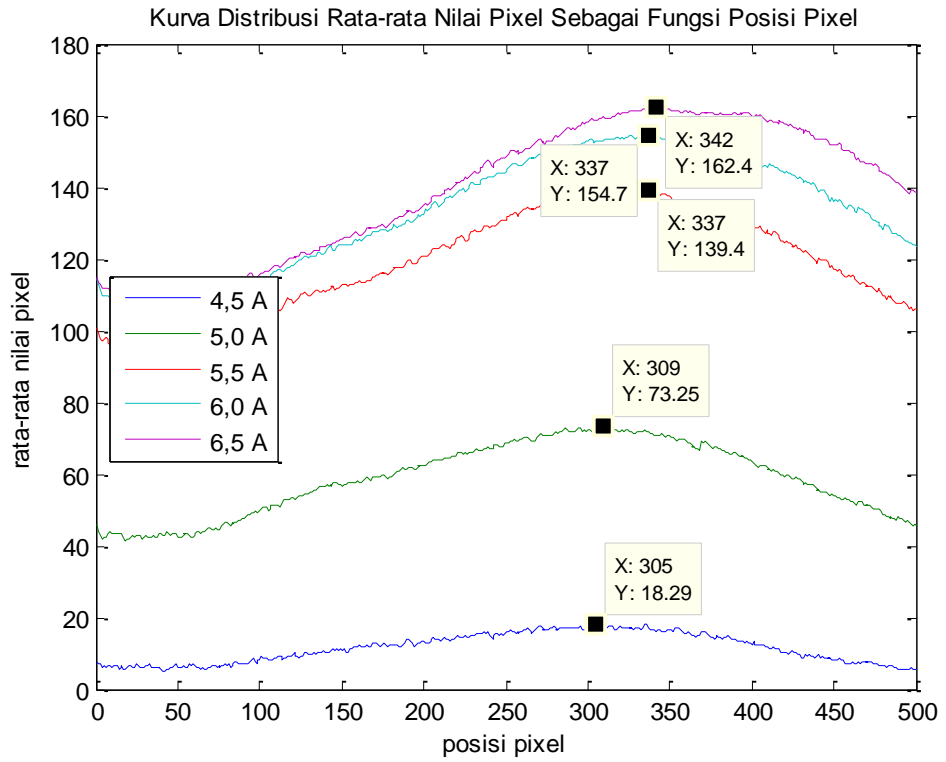
$$k = \begin{matrix} 1 & 4 & 9 & 16 \\ 4 & 16 & 36 & 64 \\ 9 & 36 & 81 & 144 \\ 16 & 64 & 144 & 255 \end{matrix}$$

Bila disajikan dalam bentuk citra, akan tampak seperti berikut

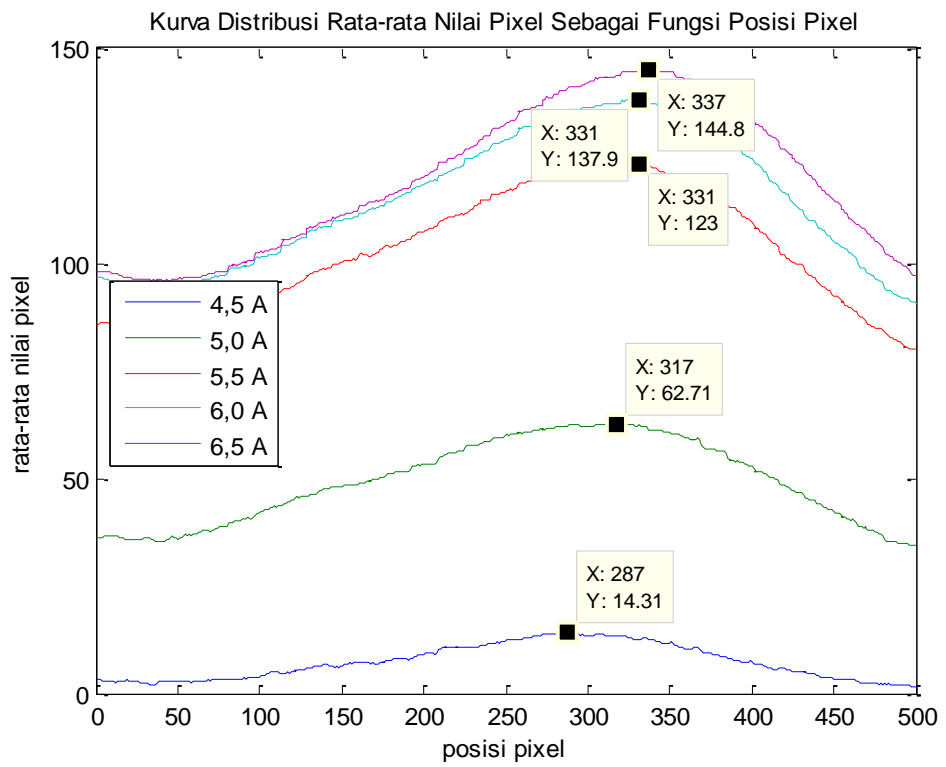


**Gambar 33.** Ilustrasi citra dari sebuah matriks

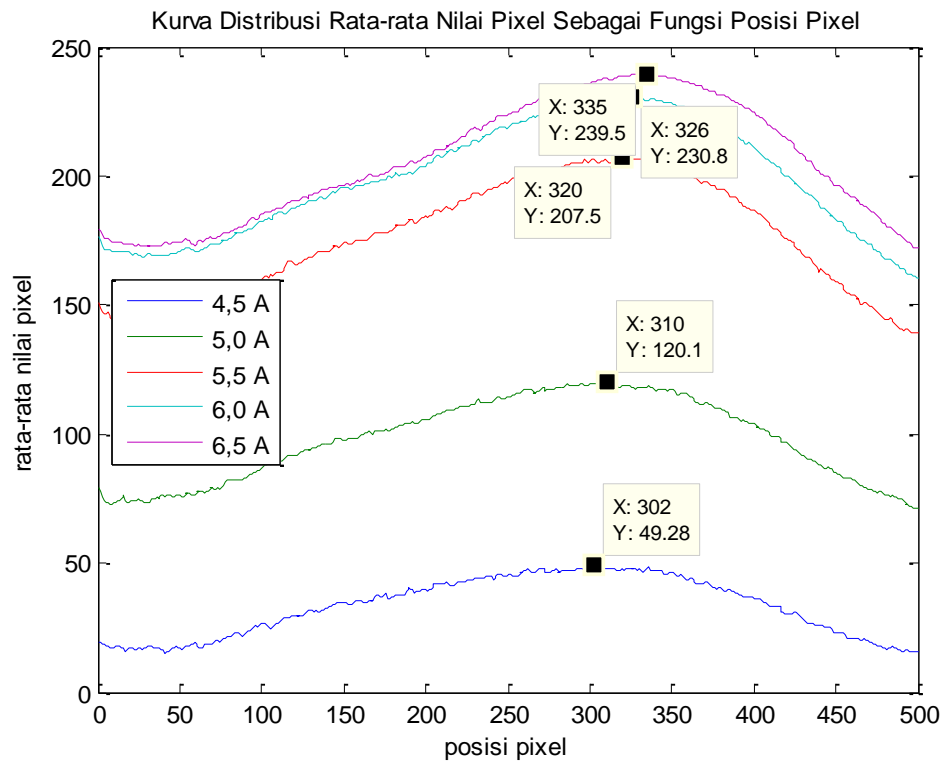
Data nilai pixel (kolom) pada citra hasil tangkapan sensor kamera yang telah ditampilkan sebelumnya, dijumlahkan lalu dibagi dengan jumlah data (baris) yang ada untuk memperoleh nilai rata-rata. Kemudian nilai rata-rata tersebut diplot pada grafik untuk mengetahui pola distribusi intensitas inframerah sebagai fungsi panjang gelombang. Berikut adalah hasil *plotting* data yang telah diolah:



(a)



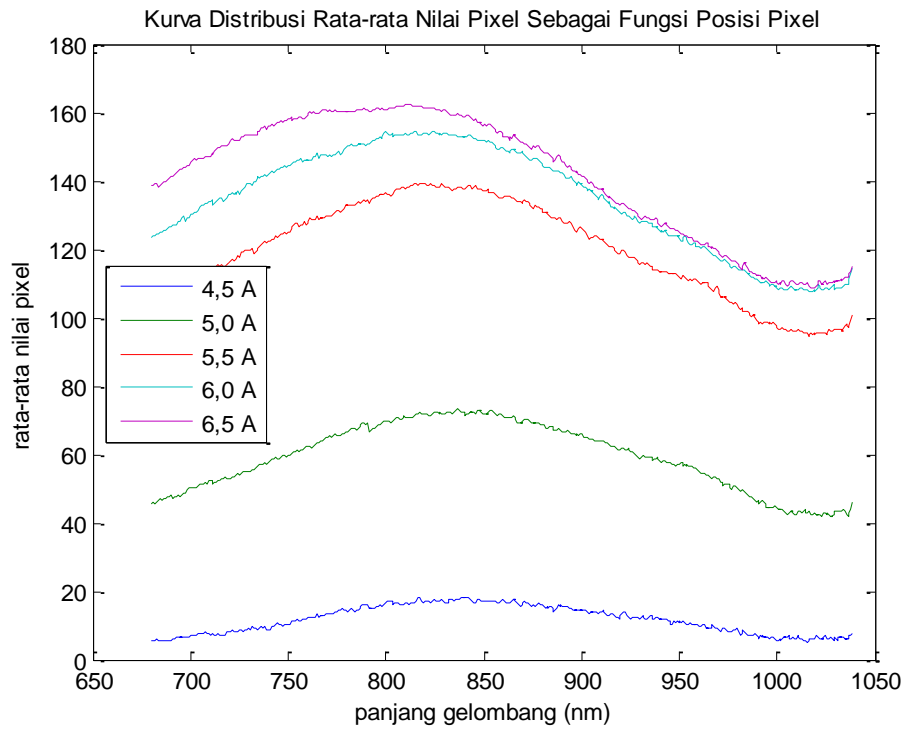
(b)



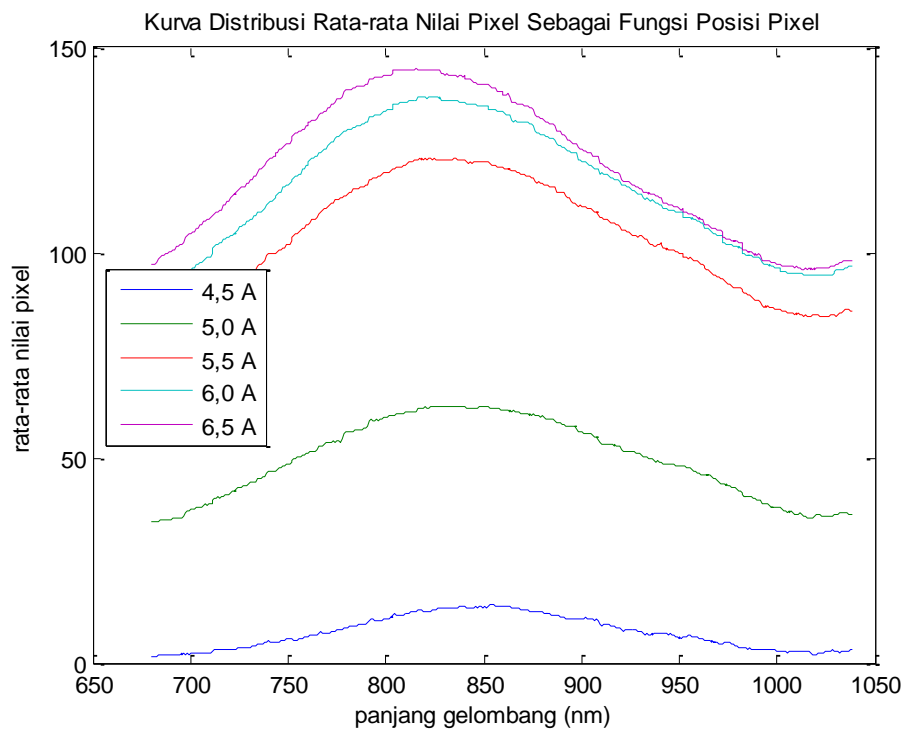
(c)

**Gambar 34.** Kurva distribusi rata-rata nilai pixel sebagai fungsi posisi pixel (a) *red layer* (b) *green layer* (c) *blue layer*

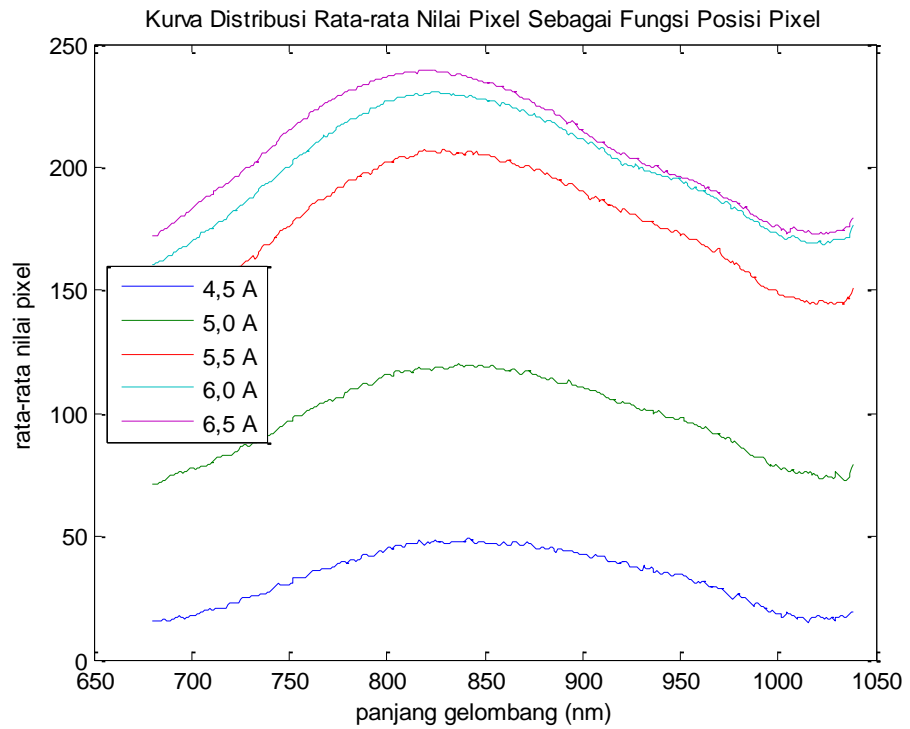
Bila grafik diplot dengan sumbu x menunjukkan panjang gelombang dengan satuan nanometer maka dapat disajikan seperti berikut



(a)



(b)



(c)

**Gambar 35.** Kurva distribusi rata-rata nilai pixel sebagai fungsi panjang gelombang (a) *red layer* (b) *green layer* (c) *blue layer*

Dapat diamati pergeseran puncak maksimum intensitas dari grafik pada Gambar 34. Hasil pengamatan pergeseran puncak maksimum intensitas dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

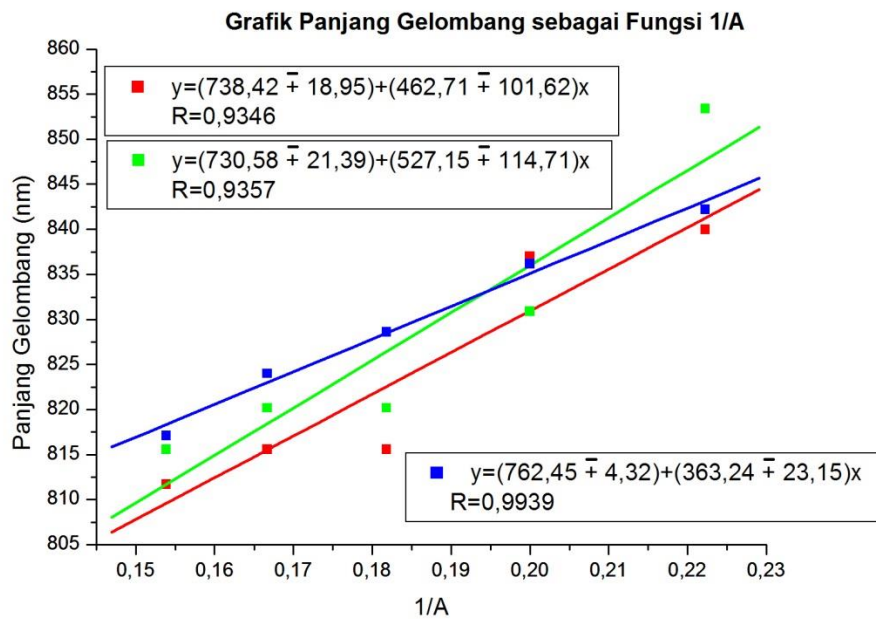
**Tabel 3.** Arus listrik yang mengalir pada sampel kawat nikel dan panjang gelombang intensitas maksimum yang dinyatakan dalam posisi pixel

Arus (A)	Panjang Gelombang Intensitas Maksimum (posisi pixel)		
	<i>Red Layer</i>	<i>Green Layer</i>	<i>Blue Layer</i>
4,5	305	287	302
5	309	317	310
5,5	337	331	320
6	337	331	326
6,5	342	337	335

**Tabel 4.** Arus listrik yang mengalir pada sampel kawat nikel dan panjang gelombang intensitas maksimum yang dinyatakan dalam satuan nanometer

Arus (A)	1/A	Panjang Gelombang Intensitas Maksimum (nm)		
		<i>Red Layer</i>	<i>Green Layer</i>	<i>Blue Layer</i>
4,5	0,22	840,0	853,4	842,2
5	0,2	837,0	830,9	836,2
5,5	0,18	815,6	820,2	828,6
6	0,17	815,6	820,2	824,0
6,5	0,15	811,7	815,6	817,1

Berikut adalah grafik panjang gelombang intensitas maksimum sebagai fungsi arus (A)



**Gambar 36.** Pergeseran panjang gelombang intensitas maksimum terhadap perubahan arus. Grafik Panjang gelombang sebagai fungsi 1/arus

Berdasarkan grafik pada Gambar 35, dapat diamati bahwa data dengan tingkat kelinearan paling tinggi adalah data pada *blue layer*. Pada bab dua telah disebutkan bahwa setiap pixel pada sensor kamera memiliki filter warna RGB yang tipis (dapat ditembus inframerah).

Sensor kamera yang dibangun dengan bahan silikon akan menyerap gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 450 nm (warna biru) lebih baik dibanding dengan panjang gelombang 550 nm (warna hijau) atau panjang gelombang 600 nm (warna merah). Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan data pada *blue layer* memiliki tingkat kelinearan paling tinggi oleh karena penyerapan yang lebih baik dibanding

*layer* lainnya. Hal ini kemungkinan terjadi oleh karena pengaruh filter tipis pada permukaan pixel.

### C. Menghitung Luas di bawah Kurva Distribusi

Hasil perhitungan luas di bawah kurva adalah sebagai berikut:

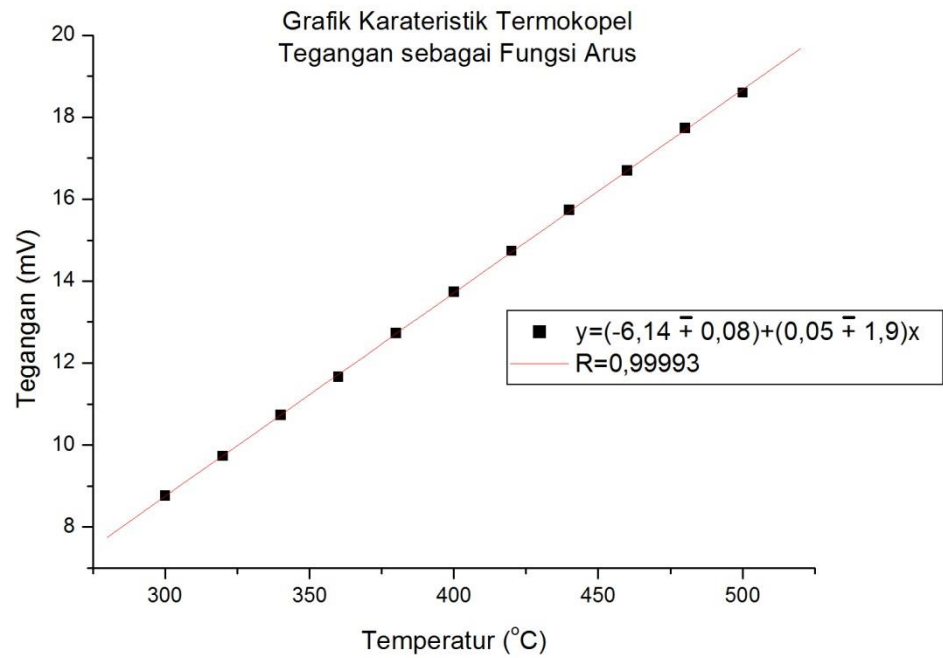
**Tabel 5.** Arus (A) dan luas di bawah kurva distribusi (nm)

No	Arus (A)	Luas (nm)		
		Merah	Hijau	Biru
1	4,5	3903.80	2522.73	11225.11
2	5	19259.16	16125.78	31827.19
3	5,5	38590.74	33165.13	56628.99
4	6	43344.57	37063.67	63801.74
5	6,5	45635.42	38833.27	66298.85

Berdasarkan data pada Tabel 5, kurva *blue layer* (lapisan biru) memiliki nilai luas paling besar dibanding kurva lainnya. Hal ini kemungkinan terjadi oleh karena pengaruh filter tipis pada permukaan pixel.

### D. Hubungan Temperatur Nikel dengan Luas di bawah Kurva Distribusi

Temperatur nikel diukur manual (sistem kontak) menggunakan termokopel. Termokopel mengubah kalor menjadi beda potensial sehingga perlu dilakukan karakterisasi termokopel. Hasil karakterisasi termokopel disajikan dalam Gambar 36.



**Gambar 37.** Karakteristik termokopel untuk mengkonversi arus menjadi temperatur

Pengukuran temperatur dilakukan setelah dilakukan karakterisasi termokopel. Hasil pengukuran temperatur menggunakan termokopel dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Data konversi arus menjadi temperatur

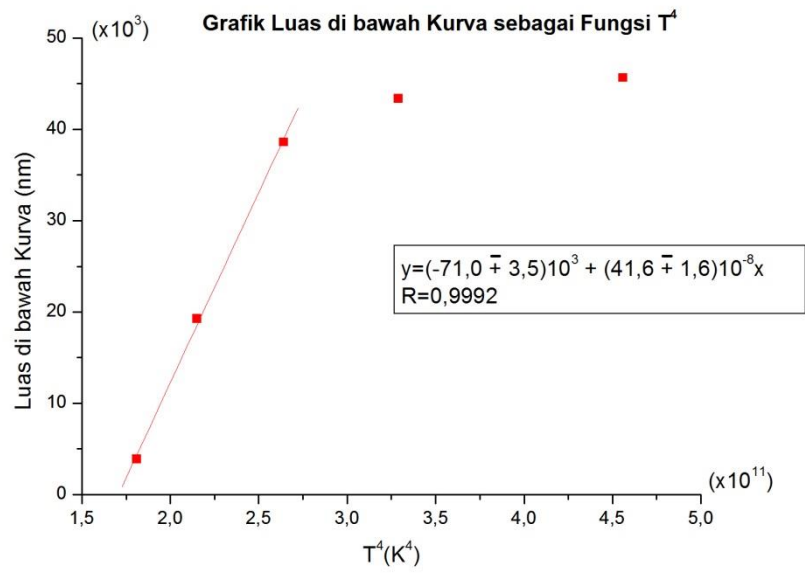
No.	Arus (A)	Tegangan (mV)	Temperatur (°C)	Temperatur (K)	T <sup>4</sup> (K <sup>4</sup> ) (x10 <sup>11</sup> )
1	4,5	12,7	379,5203	652,5203	1,81
2	5,0	14,1	407,7234	680,7234	2,15
3	5,5	15,9	443,9845	716,9845	2,64
4	6,0	17,9	484,2746	757,2746	3,29
5	6,5	21,1	548,7387	821,7387	4,56

Data hasil pengukuran temperatur pada Tabel 6 dihubungkan dengan data hasil luas di bawah kurva distribusi pada Tabel 5.

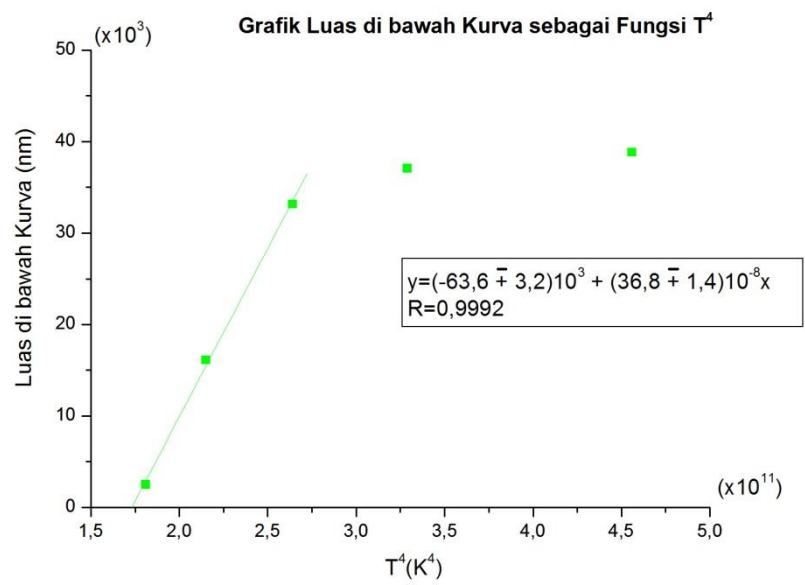
**Tabel 7.** Data  $T^4$  dan luas di bawah kurva distribusi (dinyatakan dalam nanometer)

No	$T^4$ ( $K^4$ ) ( $\times 10^{11}$ )	Luas (nm)		
		Merah	Hijau	Biru
1	1,81	3903.80	2522.73	11225.11
2	2,15	19259.16	16125.78	31827.19
3	2,64	38590.74	33165.13	56628.99
4	3,29	43344.57	37063.67	63801.74
5	4,56	45635.42	38833.27	66298.85

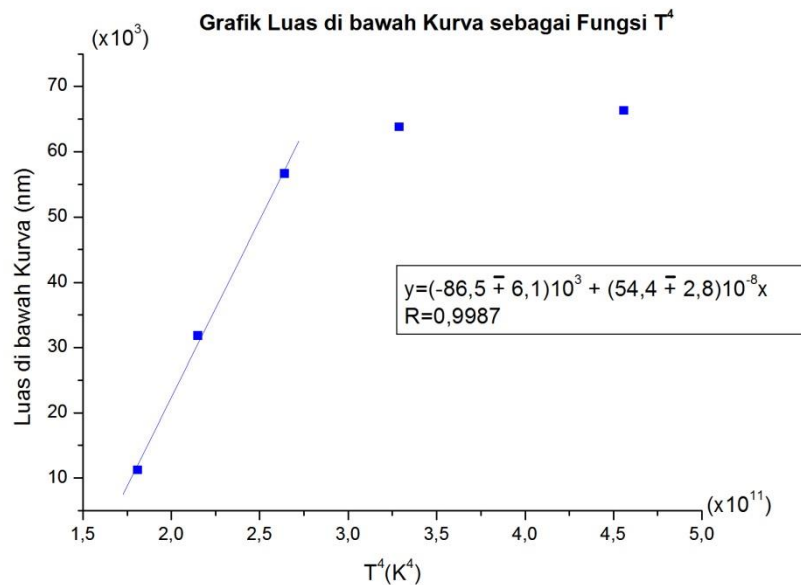
Data pada Tabel 7 diplot dalam grafik dan dilakukan *linear fitting*. Hasil plot data luas di bawah kurva (nanometer) sebagai fungsi  $T^4$  dapat dilihat pada Gambar 37.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 38.** Grafik luas di bawah kurva sebagai fungsi  $T^4$  (a) *red layer* (b) *green layer* (c) *blue layer*

Grafik pada Gambar 37 menunjukkan hubungan pangkat empat temperatur ( $T^4$ ) dengan total radiasi ( $M_b$ ) *blackbody*. Stefan-Boltzmann mengajukan teori bahwa total radiasi dari *blackbody* adalah sebanding (linear) dengan pangkat empat temperaturnya.

$$M_b = \sigma T^4$$

Konstanta Boltzmann ideal,  $\sigma$ , memiliki nilai  $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ . Grafik yang disajikan pada Gambar 37 menunjukkan kelinearan hanya terbatas pada tiga data dari lima data. Dua data yang tidak masuk dalam garis linear disebabkan oleh fitur *Automatic Gain Control* (AGC) sensor yang menurunkan *gain* pixel secara otomatis

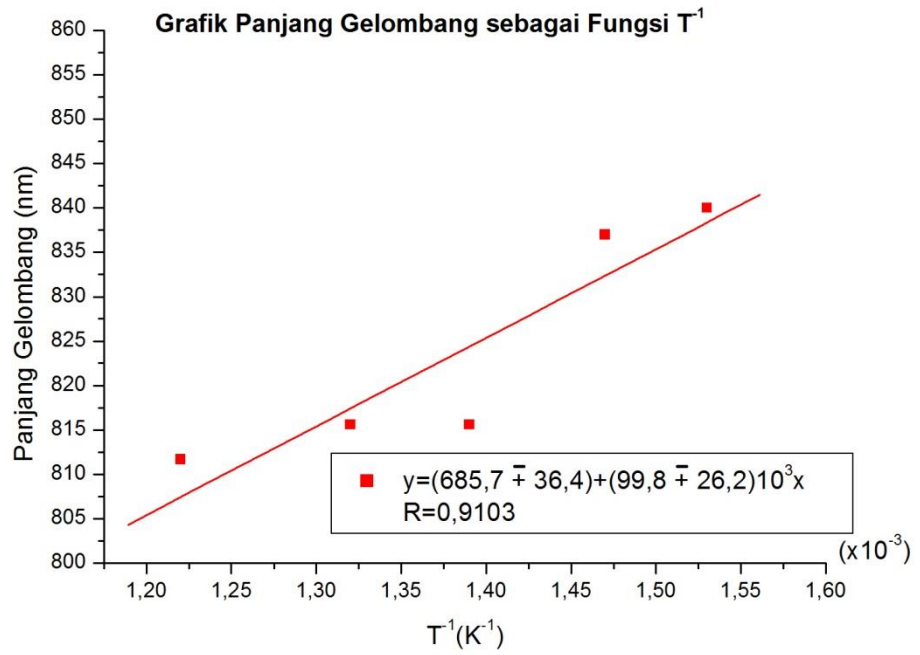
saat radiasi yang diterima terus bertambah. Hal ini mengakibatkan nilai pixel berkurang secara elektrik oleh prosesor sensor kamera.

Berdasarkan grafik pada Gambar 37 dapat ditentukan konstanta,  $C$ , pada setiap lapisan. Pada *red layer* sebesar  $(42 \pm 2) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ , *green layer*  $(37 \pm 1) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ , dan *blue layer* sebesar  $(54 \pm 3) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ . Konstanta  $C$  tersebut belum merupakan konstanta Boltzmann murni, sehingga nilai untuk setiap *layer* berbeda-beda. Telah disebutkan sebelumnya bahwa permukaan pixel pada sensor memiliki filter RGB tipis untuk membangun warna, sehingga nilai  $C$  yang berbeda-beda tersebut mengandung konstanta lain yang berkaitan dengan daya serap energi setiap *layer*. Apabila dinyatakan secara matematis  $C = a \times \sigma$ , dengan  $a$  adalah koefisien serapan setiap *layer* dan  $\sigma$  adalah konstanta Boltzmann.

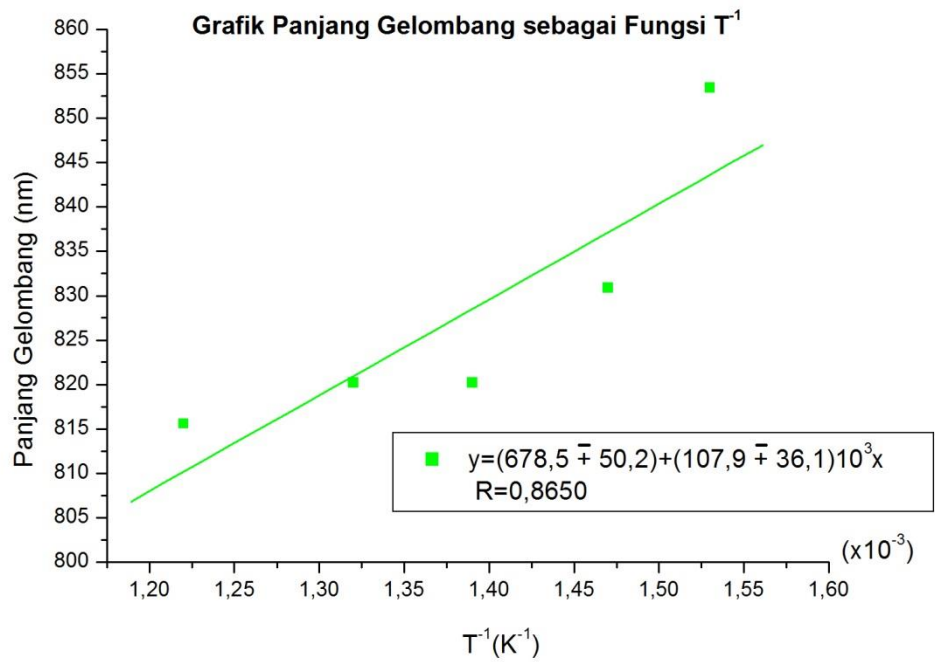
Penelitian ini belum menyelidiki lebih mendalam terkait nilai konstanta  $C$  di atas, sehingga perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui hubungan konstanta Boltzmann dengan konstanta  $C$  tersebut.

## **E. Menentukan Konstanta Wien**

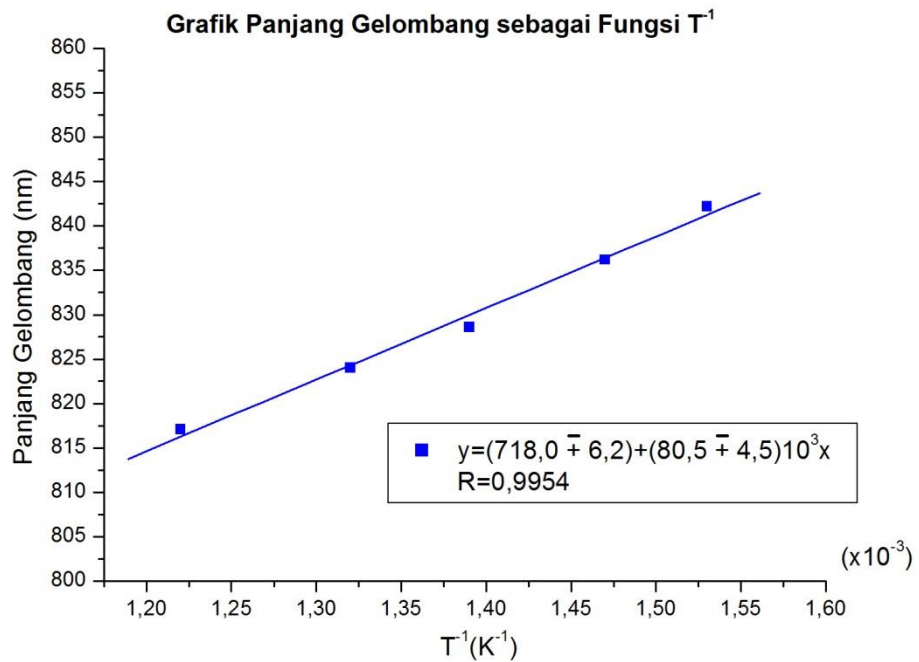
Wien menyatakan bahwa  $\lambda_m T = b$  sehingga konstanta Wien dapat ditentukan dari gradien grafik panjang gelombang intensitas maksimum sebagai fungsi  $T^{-1}$ . Berikut grafik panjang gelombang maksimum sebagai fungsi  $T^{-1}$  setiap *layer*:



(a)



(b)



**Gambar 39.** Grafik panjang gelombang sebagai fungsi  $T^{-1}$  (a) *red layer* (b) *green layer* (c) *blue layer*

Berdasarkan grafik pada Gambar 38, nilai konstanta Wien dapat ditentukan berdasarkan gradien grafik. Konstanta Wien pada *red layer* sebesar  $(10 \pm 3) \times 10^4$  nmK, pada *green layer* sebesar  $(11 \pm 4) \times 10^4$  nmK dan pada *blue layer* sebesar  $(81 \pm 4) \times 10^3$  nmK.

Konstanta Wien yang didapatkan dari gradien grafik pada Gambar 38 menunjukkan bahwa nilai konstanta pada *blue layer* memiliki nilai yang paling baik karena memiliki ralat relatif paling kecil.

#### F. Menentukan Konstanta Wien Terkoreksi

Nilai temperatur sampel dapat diperkirakan menggunakan data panjang gelombang intensitas maksimum pada Tabel 4 (hal 87) dan

konstanta Wien,  $b = 2,89782 \times 10^6$  nmK, sebagaimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya, dengan menganggap sampel sebagai *blackbody* ideal. Namun faktanya, sampel yang digunakan bukanlah *blackbody* ideal, sehingga konstanta Wien untuk *blackbody* ideal tidak dapat digunakan untuk menentukan temperatur sampel. Perbedaan temperatur sampel jika dianggap sebagai *blackbody* ideal dengan temperatur riil berdasarkan pengukuran menggunakan termokopel disajikan dalam Tabel 8.

**Tabel 8.** Perbandingan data temperatur riil sampel dan temperatur sampel sebagai *blackbody* ideal

No.	$\lambda_m$ (nm)			Temperatur sampel bila dianggap sebagai <i>blackbody</i> ideal (K)			Temperatur riil (K)
1	840	853,4	842,2	3450	3396	3441	652,5
2	837	830,9	836,2	3462	3488	3465	680,7
3	815,6	820,2	828,6	3553	3533	3497	717
4	815,6	820,2	824	3553	3533	3517	757,3
5	811,7	815,6	817,1	3570	3553	3546	821,7

Data pada Tabel 8 menunjukkan perbandingan nilai temperatur sampel riil dan ideal sebesar 18%-23%, artinya jika konstanta Wien *blackbody* ideal sebesar  $b = 2897820$  nmK, maka konstanta Wien terkoreksi (sesuai dengan temperatur riil) berada pada rentang nilai  $50 \times 10^4$  nmK –  $70 \times 10^4$  nmK.

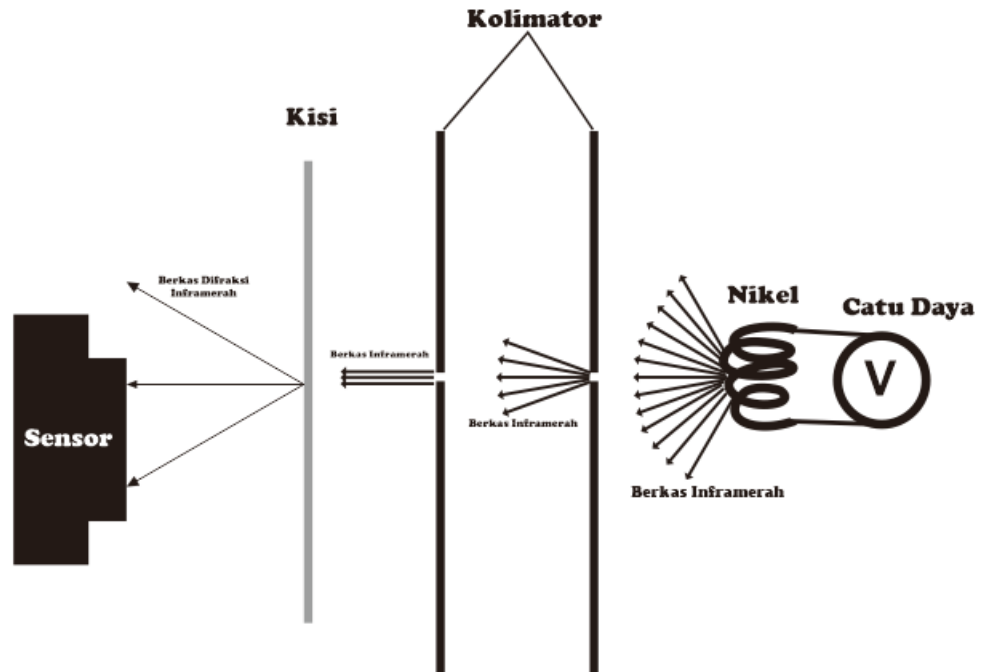
## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **A. Kesimpulan**

Setelah dilakukan penelitian, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan alat pengukur temperatur nonkontak dibangun dengan memanfaatkan kamera webcam sebagai sensor panas yang menerima pola difraksi berkas gelombang elektromagnetik (dari objek yang diamati) yang dilewatkan pada kisi. Sebelum melewati kisi, gelombang elektromagnetik tersebut terlebih dahulu dilewatkan pada kolimator untuk menghasilkan berkas gelombang sejajar. Berikut adalah ilustrasi rancangan alat pengukur temperatur nonkontak berdasarkan penelitian yang telah dilakukan



**Gambar 40.** Ilustrasi rancangan alat pengukur temperatur nonkontak berdasarkan hukum pergeseran Wien memanfaatkan sensor *webcam*

2. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan menggunakan kawat nikel sebagai sampel, didapatkan nilai konstanta Boltzmann untuk *red layer* sebesar  $(42 \pm 2) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ , *green layer*  $(37 \pm 2) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ , dan *blue layer* sebesar  $(54 \pm 3) \times 10^{-8} \text{ nm/K}^4$ . Terjadi pergeseran panjang gelombang intensitas maksimum saat temperatur sample diubah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan nilai konstanta Wien pada *red layer* sebesar  $(10 \pm 3) \times 10^4 \text{ nmK}$ , pada *green layer* sebesar  $(11 \pm 4) \times 10^4 \text{ nmK}$  dan pada *blue layer* sebesar  $(81 \mp 4) \times 10^3 \text{ nmK}$ .
3. Matlab memiliki fungsi-fungsi yang dapat dibangun dan digunakan untuk mengolah citra. Pengolahan citra pada penelitian ini menggunakan analisis nilai pixel dan posisinya. Pengolahan citra dilakukan dengan

mengambil sampel gambar dari berkas inframerah dengan menggunakan perintah “*getsnapshot*” pada matlab. Sampel gambar dianalisis pada setiap layer warna (RGB) untuk mengetahui panjang gelombang intensitas maksimum.

## **B. Saran**

Berikut adalah saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Sensor kamera yang digunakan sebaiknya sensor tanpa fitur *automatic gain control* (AGC) agar intensitas yang diterima oleh sensor tidak mengalami *gain* secara elektronis.
2. Peneliti selanjutnya sebaiknya membangun alat dengan memperhatikan kepresisian alat (sensor, kisi dan kolimator).
3. Jika peneliti selanjutnya hendak membangun *prototype* berdasarkan hasil penelitian ini, sebaiknya *prototype* yang dibangun disusun dalam kotak yang tidak dapat melewati inframerah untuk mencegah noise dari luar alat yang dibangun.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balaji, C. 2014. *Essential of Radiation Heat Transfer*. Ane Books Pvt. Ltd.: New Delhi, India.
- Braunovic Milenko, Konchits Valery V., Myshkin Nikolai K. 2007. *Electrical Contacts*. CRC Press. New York.
- Boas, Mary L. 2006. *Mathematical Methods in the Physical Sciences*. John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey.
- Burger, W. and Burge, Mark J. 2009. *Principles of Digital Image Processing*. Springer-Verlag: London, UK.
- Farace, Joe. 2010. *Complete Guide to Digital Infrared Photography*. Lark Books: New York.
- Holst, Gerald C. 2000. *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. SPIE Optical Engineering Press. Florida, USA.
- Kuroda, Takao. 2015. *Essentials Principles of Image Sensors*. CRC Press: New York.
- Liou, K.N. 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press: New York.
- Maitre, Henri. 2015. *From Photon to Pixel*. John Wiley and sons, Inc.: USA.
- Modest, Michael F. 2003. *Radiative Heat Transfer*. Academic Press: New York.
- Nakamura, Junichi. 2005. *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. CRC Press: New York.
- Palmer, Christopher. 2002. *Diffraction Grating Handbook*. Thermo RGL. New York.
- Planck, Max. 1914. *The Theory of Heat Radiation*. P Blakiston's Son & Co.: Philadelphia.
- Reif, Frederick. 1965. *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*. McGraw-Hill Book Co.: New York
- Sandidge, Deborah. 2009. *Digital Infrared Photography Photo Workshop*. Wiley Publishing, Inc.: USA.

Solomon, Chris. and Breckon, Toby. 2011. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Wiley Blackwell: West Sussex, UK.

Stewart Sean M and Johnson Barry R. 2017. *Blackbody Radiation*. CRC Press: New York.

Veeder, Kenton T. 2015. *Digital Converters for Image Sensors*. SPIE Press. Bellingham, Washington.

Vollmer, Michael and Mollmann, K.P. 2010. *Infrared Thermal Imaging*. Wiley-VCH: Weinheim, Germany.

<http://www.goodfellow.com/E/Nickel.html>

[Alibaba.com](http://Alibaba.com)

# **LAMPIRAN**

## LAMPIRAN

1. Citra hasil tangkapan kamera inframerah (a) 4,5 A (b) 5,0 A (c) 5,5 A (d) 6,0 A (e) 6,5 A



(a)



(b)



(c)

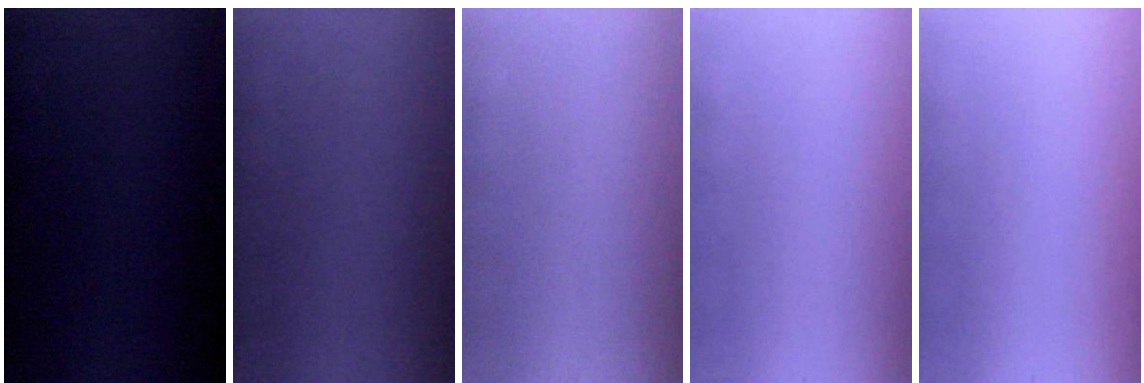


(d)



(e)

2. Bagian citra yang dianalisis dari lampiran 1 (a) 4,5 A (b) 5,0 A (c) 5,5 A (d) 6,0 A (e) 6,5 A



(a)

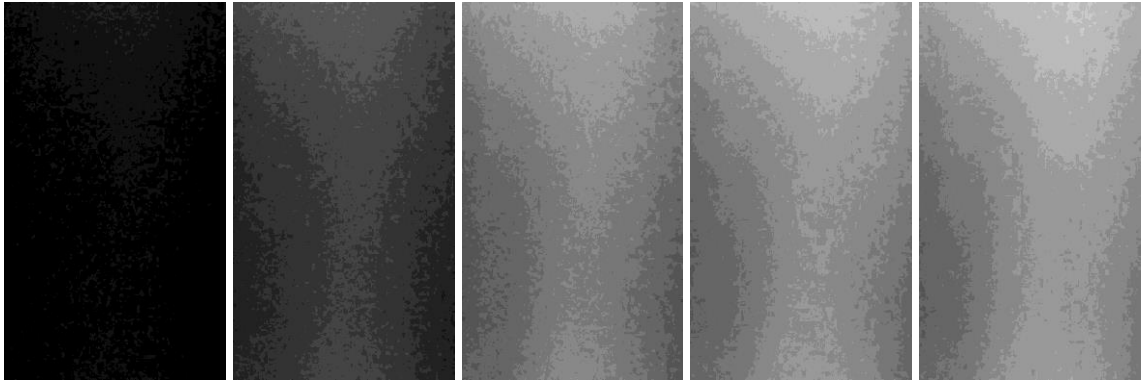
(b)

(c)

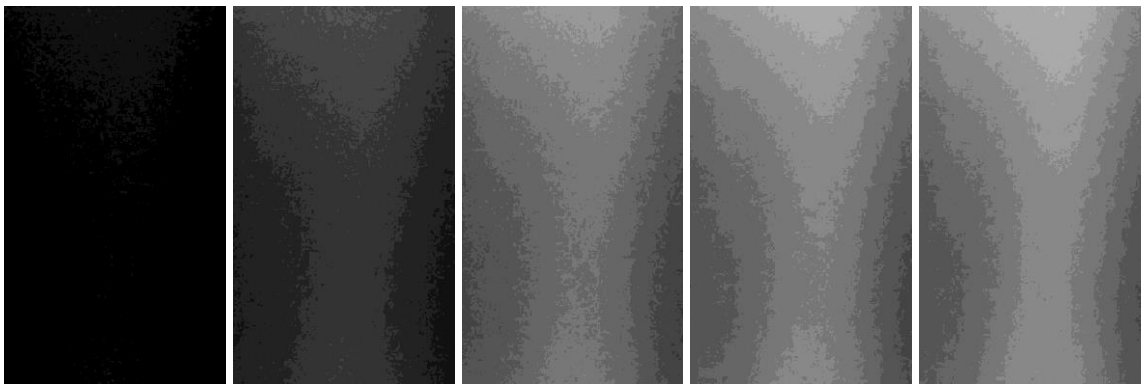
(d)

(e)

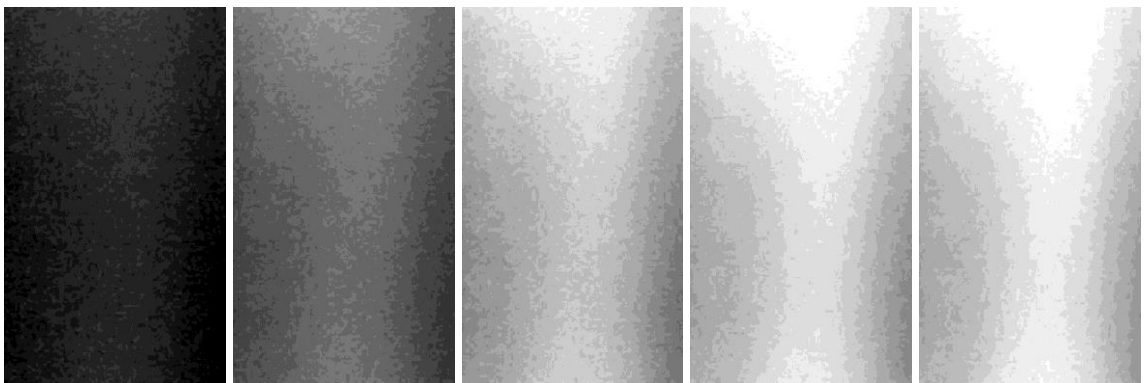
*Red layer*



*Green layer*



*Blue layer*



### 3. Data Karakteristik Termokopel

No	Temperatur	Tegangan (mV)			rata-rata tegangan (mV)
1	300	8,8	8,7	8,8	8,766667
2	320	9,8	9,8	9,6	9,733333
3	340	10,7	10,7	10,8	10,73333
4	360	11,7	11,7	11,6	11,66667
5	380	12,8	12,7	12,7	12,73333
6	400	13,8	13,7	13,7	13,73333
7	420	14,7	14,7	14,8	14,73333
8	440	15,7	15,7	15,8	15,73333
9	460	16,7	16,7	16,7	16,7
10	480	17,8	17,7	17,7	17,73333
11	500	18,5	18,7	18,6	18,6

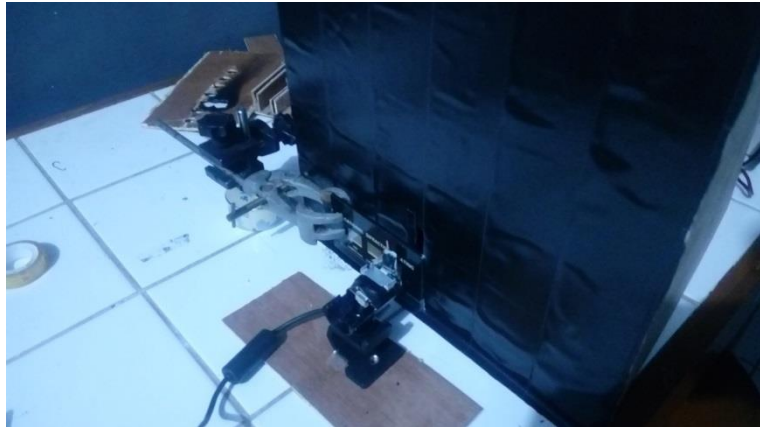
### 4. Data Temperatur Sampel yang Dipanaskan

No.	Arus (A)	Tegangan (mV)
1	4,5	12,7
2	5	14,1
3	5,5	15,9
4	6	17,9
5	6,5	21,1

### 5. Alat dan bahan



Skema alat tampak samping



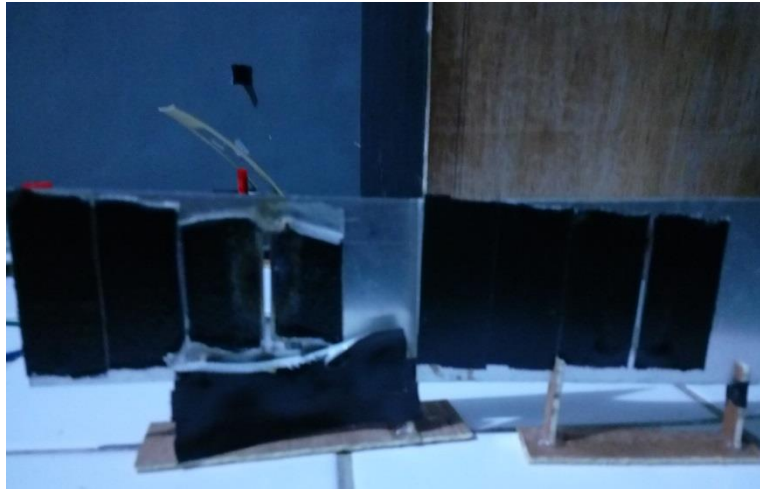
Skema alat tampak depan



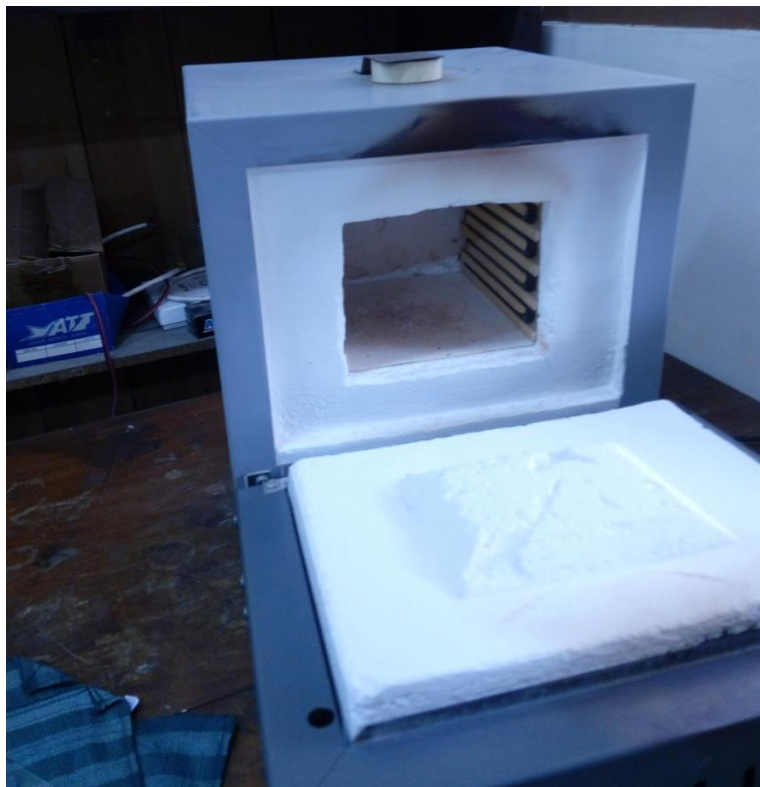
Skema alat tampak dari belakang



Power Supply



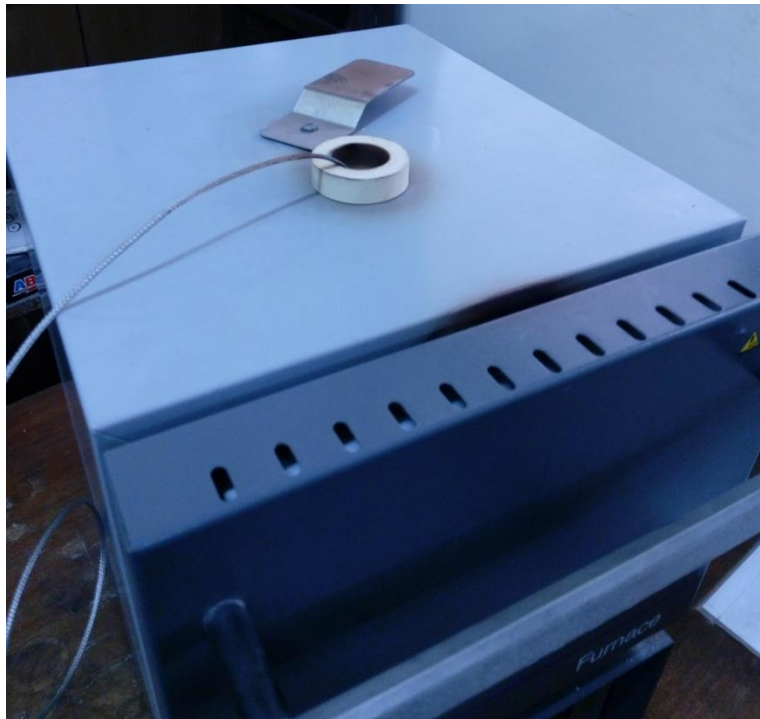
Dua buah kolimator



Furnace



Termokopel



Proses karakterisasi termokopel pada Furnace



Nikel



Laptop