



**PENGEMBANGAN KINERJA KOLORIMETRI MULTI SPEKTRA
BERBASIS ARDUINO MELALUI OPTIMASI PENGGUNAAN *DIFFUSER*
DAN LENSA FOKUS**

SKRIPSI

Oleh

**Anggi Sintia Ayu Nur Febianti
221810301062**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI KIMIA
JEMBER
2026**



**PENGEMBANGAN KINERJA KOLORIMETRI MULTI SPEKTRA
BERBASIS ARDUINO MELALUI OPTIMASI PENGGUNAAN *DIFFUSER*
DAN LENS FOKUS**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Kimia.*

SKRIPSI

Oleh

**Anggi Sintia Ayu Nur Febianti
221810301062**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI KIMIA
JEMBER
2026**

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur, saya persembahkan skripsi ini dengan tulus kepada:

1. Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya yang senantiasa memberikan kemudahan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Diri saya sendiri, Anggi Sintia Ayu Nur Febianti yang telah berjuang dan bertahan dalam setiap perjalanan, meskipun keraguan dan rintangan selalu hadir namun tetap percaya pada harapan untuk dapat menyelesaikannya dengan baik.
3. Kedua orang tua tercinta, Ayah dan Ibu yang senantiasa menjadi alasan di setiap langkah dan pencapaian saya. Kasih sayang, dukungan, dan doa yang tak terhingga untuk saya. Semoga selalu diberikan kesehatan, umur panjang, dan kebahagiaan untuk selalu menemani perjalanan hidup saya kedepannya.
4. Adik tersayang, yang telah menemani serta berbagi keluh dan kesah dalam setiap langkah yang dijalani. Semoga selalu sehat, bahagia, dan sukses dalam setiap perjalanan yang kamu ambil.
5. Alm. Kakek dan Nenek, yang telah menemani masa kecil saya dan menjadi salah satu alasan saya untuk bertahan dan melangkah lebih jauh. Terima kasih atas segala pelajaran dan pengalaman berharga yang telah diajarkan dalam kehidupan saya. Semoga Allah SWT senantiasa merahmati dan melapangkan tempat keduanya di sisi-Nya.
6. Bapak Drs. Zulfikar, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah memberikan bimbingan, arahan, kesabaran, dan ilmu yang sangat bermanfaat selama proses penelitian berlangsung.
7. Seluruh dosen dan civitas akademika, yang telah memberikan ilmu pengetahuan serta pengalaman yang sangat berharga selama menempuh masa studi.
8. Keluarga besar dari Ayah dan Ibu, terimakasih atas semua dukungan dan doa, semoga apa yang saya capai bisa membanggakan dan membantu semua pihak.

9. Semua sahabat dan teman-teman saya, yang telah membantu saya untuk belajar banyak hal, semoga senantiasa diberikan kesehatan, kebaikan, dan kesuksesan agar kita bisa melangkah bersama ke depannya.
10. Teman satu kelompok riset saya, terima kasih atas kerja keras dan semangat saling mendukung yang telah terjalin dengan baik. Semoga segala upaya yang telah kita lakukan senantiasa memberikan manfaat dan keberkahan.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta kontribusi dalam penyelesaian penelitian ini.



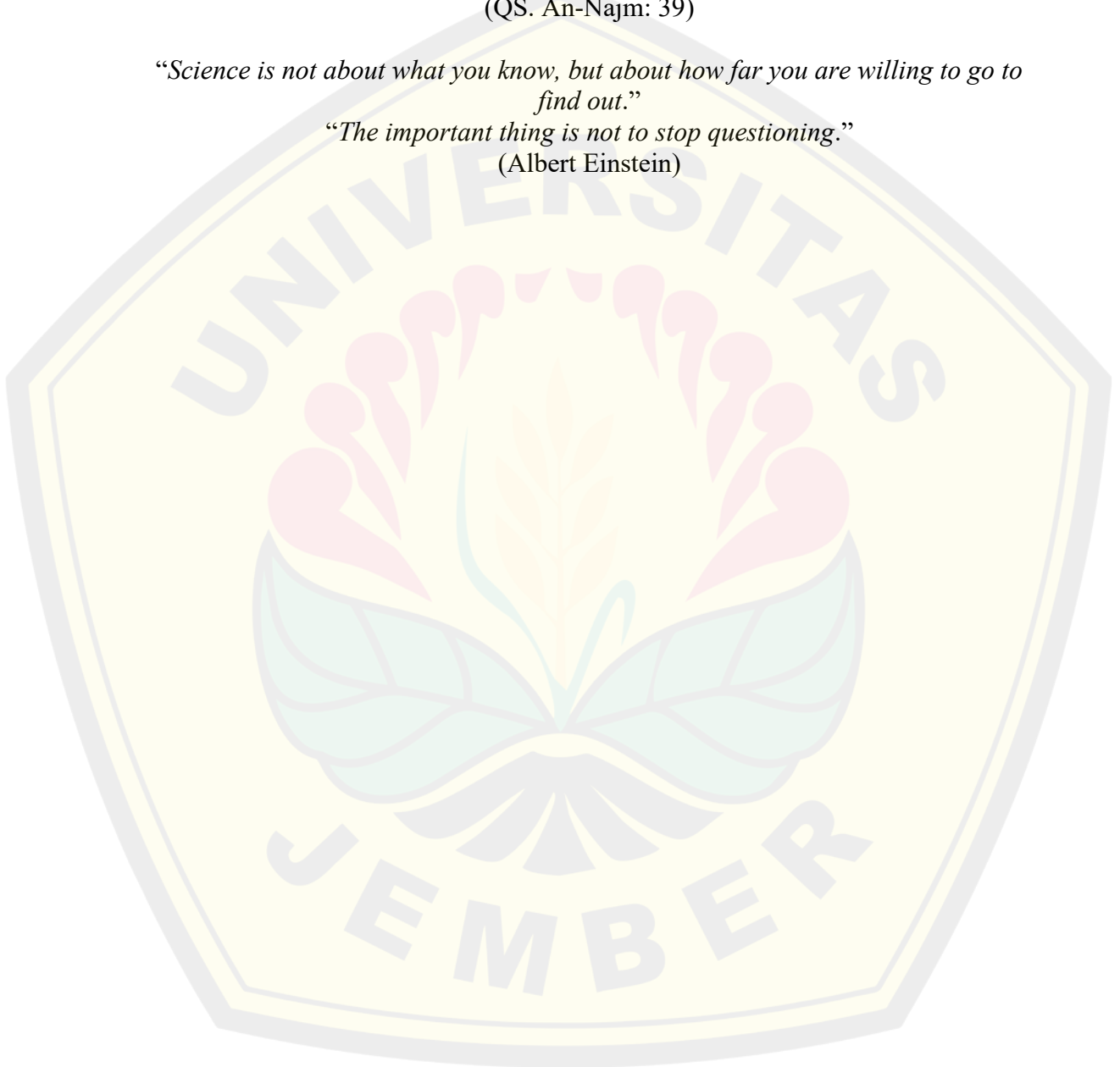
MOTTO

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan.”
(QS. Al-Insyirah: 6)

“Dan bahwasanya seorang manusia tiada memperoleh selain apa yang telah diusahakannya.”
(QS. An-Najm: 39)

“Science is not about what you know, but about how far you are willing to go to find out.”

“The important thing is not to stop questioning.”
(Albert Einstein)



PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Anggi Sintia Ayu Nur Febianti

NIM : 221810301062

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: *Pengembangan Kinerja Kolorimetri Multi Spektra Berbasis Arduino Melalui Optimasi Penggunaan Diffuser dan Lensa Fokus* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 26 Juni 2026

Yang menyatakan,



Anggi Sintia Ayu Nur Febianti

NIM 221810301062

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul *Pengembangan Kinerja Kolorimetri Multi Spektra Berbasis Arduino Melalui Optimasi Penggunaan Diffuser dan Lensa Fokus* telah diuji dan disetujui pada

Hari : **SELASA**

Tanggal : **28 JUL 2026**

Tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,



Drs. Zulfikar, Ph.D.
NIP. 196310121987021001

Anggota I,



Dr. Bambang Fijuharto, S.Si., M.Si.
NIP. 197107031997021001

Anggota II,



Yeni Maulidah Muflihah, S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 198008302006042002

ABSTRACT

The use of synthetic azo dyes is highly hazardous to the environment because they can degrade into aromatic amines that are toxic, non-biodegradable, carcinogenic, and mutagenic. Spectrophotometry is commonly used to analyze these compounds, but such instruments rely on complex optical elements, making them precise to operate and relatively expensive. Therefore, this study developed an RGB LED-based multispectral colorimeter controlled by an Arduino as a simple, inexpensive, and easy-to-control alternative. The colorimeter was designed using an RGB LED module as the light source, a BH1750 sensor as the detector, and an Arduino Nano as the microcontroller. Optimization was performed on the LED diffuser thickness and the HPL focusing lens angle to produce 36 variations of homogeneous and stable light colors, representing wavelengths from 380 to 730 nm at 10-nm intervals. Testing was conducted by comparing the absorbance profiles and performance parameters of acid yellow 17, acid orange 7, and reactive orange 16 between the multispectral colorimeter and a visible light spectrophotometer. Optimal conditions were achieved with a 0.6 mm thick diffuser combined with a 30° HPL focusing lens. The absorbance profiles of the three compounds from both instruments were generally similar; however, shifts in maximum wavelength were observed. Acid yellow 17 shifted from 426 nm to 440 nm, acid orange 7 from 486 nm to 440 nm, and reactive orange 16 from 492 nm to 480 nm. The performance of the multispectral colorimeter is still inferior to that of the spectrophotometer; however, reactive orange 16 showed the closest performance with an R^2 value of 0,9944; slope of 0,0145; SD of 0,0068; %RSD of 3,8772%; LOD of 1,4089 ppm; LOQ = 4,6965 ppm; and $r = 0,9619$. These results indicate that as the maximum wavelength more closely approaches its optimal complementary color, the performance of the two instruments becomes increasingly similar.

Keywords: Spectrophotometry, Multispectral Colorimeter, Azo Dyes, RGB LED, Arduino, Diffuser, Focusing Lens

RINGKASAN

Pengembangan Kinerja Kolorimetri Multi Spektra Berbasis Arduino Melalui Optimasi Penggunaan *Diffuser* dan Lensa Fokus; Anggi Sintia Ayu Nur Febianti; 221810301062; 2026; 41 halaman; Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Limbah dari pewarna sintetis berupa senyawa *azo dyes* yang banyak digunakan oleh industri tekstil sangat berbahaya apabila mencemari lingkungan, terutama perairan. Senyawa *azo dyes* tersebut, seperti *acid yellow 17* ($C_{16}H_{12}N_4Na_2O_7S_2$), *acid orange 7* ($C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$), dan *reactive orange 16* ($C_{20}H_{17}N_3Na_2O_{11}S_3$) dapat tereduksi menjadi amina aromatik yang bersifat toksik, *non-biodegradable*, karsinogenik dan mutagenik. Oleh karena itu, identifikasi dan analisis senyawa *azo dyes* sangat dibutuhkan untuk mendeteksi terjadinya pencemaran lingkungan, yang umumnya dilakukan dengan metode spektrofotometri. Metode spektrofotometri terbukti memiliki keakuratan tinggi, namun instrumennya menggunakan elemen optik yang kompleks, seperti monokromator dan *slit*. Kompleksitas komponen optik tersebut memerlukan pengendalian yang presisi dan relatif mahal, sehingga kolorimetri multi spektra berbasis Arduino merupakan alternatif yang inovatif sebagai instrumen analisis *portable*, sederhana, murah dan mudah dikendalikan.

Kolorimetri dikembangkan menggunakan LED RGB (*Light Emitting Diode Red, Green, and Blue*) yang pengaturan warnanya dapat dikontrol menggunakan *software* Arduino IDE, sehingga dapat menghasilkan 36 variasi warna dari kombinasi intensitas yang merepresentasikan panjang gelombang 380-730 nm dengan interval pendekatan 10 nm. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kinerja kolorimetri multi spektra dengan LED RGB berbasis Arduino agar menyerupai spektrofotometri cahaya tampak, melalui optimasi penggunaan *diffuser* LED dan lensa fokus HPL (*High Power Lens*). Kolorimeter multi spektra dirancang menggunakan sumber cahaya modul LED RGB, sensor cahaya BH1750, dan mikrokontroler Arduino Nano.

Penelitian ini dilakukan dengan empat tahap, yaitu optimasi sumber cahaya, preparasi larutan standar, pemindaian profil larutan standar dan uji kinerja pengukuran larutan standar. Optimasi sumber cahaya dilakukan untuk memperoleh 36 variasi warna cahaya yang homogen dan stabil dalam 200 kali pembacaan, dengan nilai intensitas optimal dari kombinasi ketebalan *diffuser* dan sudut lensa fokus tertentu. Optimasi sumber cahaya dilakukan dengan variasi ketebalan *diffuser* 0; 0,3; dan 0,6 mm, serta variasi sudut lensa 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°. Preparasi larutan standar berupa *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16*. dilakukan untuk memperoleh larutan kerja dengan variasi konsentrasi 8, 10, 12, 14, dan 16 ppm. Pemindaian profil dilakukan menggunakan kolorimeter multi spektra pada kondisi optimum untuk semua larutan standar, kemudian hasilnya dibandingkan dengan pemindaian menggunakan spektrofotometer cahaya tampak. Uji kinerja dilakukan dengan membandingkan parameter regresi kurva kalibrasi meliputi linieritas, sensitivitas, batas deteksi (LOD), batas kuantitasi (LOQ), serta presisi berupa SD dan %RSD dari kedua instrumen, dilengkapi dengan nilai koefisien korelasi *product moment* (r) sebagai indikator kesesuaian antara keduanya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *diffuser* LED meningkatkan homogenitas cahaya, di mana semakin tebal *diffuser* menghasilkan warna cahaya yang semakin homogen akibat perpanjangan lintasan cahaya untuk proses hamburan. Penggunaan lensa fokus meningkatkan intensitas cahaya, dan semakin besar sudutnya (*beam angle*) menghasilkan intensitas yang semakin besar, namun memunculkan *hotspot* cahaya merah akibat pembiasan cahaya pada rongga *cone* lensa yang semakin dangkal. *Diffuser* LED dengan ketebalan 0,6 mm yang dikombinasi dengan lensa fokus HPL pada sudut 30° dipilih sebagai kondisi optimum karena menghasilkan 36 variasi warna yang homogen, intensitas meningkat dan nilai RSD di bawah 1 %.

Profil absorbansi senyawa *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* hasil pemindaian dengan kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer memiliki pola yang secara umum serupa, namun terjadi pergeseran panjang gelombang maksimum. Nilai I_0 pada daerah warna biru sangat rendah, sehingga

sensitif terhadap perubahan kecil dan menjadi kurang akurat. Hasil pemindaian dengan kolorimeter multi spektra pada konsentrasi 12 ppm masing-masing senyawa adalah 440 nm (biru; 0,0512), 440 nm (biru; 0,3855), dan 480 nm (biru-cyan; 0,1761). Sementara itu, hasil pemindaian dengan spektrofotometer masing-masing adalah 426 nm (0,136), 486 nm (0,451), dan 492 nm (0,185).

Hasil uji kinerja menunjukkan bahwa kolorimeter multi spektra untuk pengukuran standar *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* masih berada di bawah spektrofotometer. Namun, *reactive orange 16* menunjukkan kinerja yang paling mendekati spektrofotometer dengan nilai R^2 , *slope*, SD, %RSD, LOD, dan LOQ masing-masing sebesar 0,9944; 0,0145; 0,0068; 3,8772%; 1,4089 ppm; dan 4,6965 ppm. Sebagai perbandingan hasil dari spektrofotometer masing-masing sebesar 0,9954; 0,0151; 0,0064; 3,4580%; 1,2655 ppm; dan 4,1906 ppm. Hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa senyawa dengan panjang gelombang prediksi yang mendekati warna komplementer optimalnya akan menghasilkan kinerja yang semakin serupa dengan spektrofotometer. Oleh karena itu, kolorimeter multi spektra berbasis LED RGB dan Arduino berpotensi digunakan sebagai instrumen alternatif *portable*, sederhana, murah, dan mudah dikendalikan.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul “*Pengembangan Kinerja Kolorimetri Multi Spektra Berbasis Arduino Melalui Optimasi Penggunaan Diffuser dan Lensa Fokus*” dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana (S1), serta sebagai wujud penerapan ilmu selama masa studi di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember. Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Prof. Drs. Dafik, M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
2. Prof. Dr. Anak Agung Istri Ratnadewi, S.Si., M.Si., selaku Ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
3. Drs. Zulfikar, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan waktu, bimbingan, dukungan, dan nasihat dalam penulisan skripsi ini;
4. Dr. Bambang Piluharto, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji Utama, dan Yeni Maulidah Muflihah, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan kritik dan saran dalam penulisan skripsi ini;
5. Suwardiyanto, S.Si., M.Si, Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah sabar membimbing dan membantu penulis selama masa studi;

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang kimia analitik dan instrumentasi.

Jember, 26 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN	vi
ABSTRACT	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Senyawa <i>Azo Dyes</i>	5
2.2 Spektrofotometri	5
2.3 Kolorimetri.....	7
2.4 Kolorimeter Multi Spektra Berbasis Arduino.....	7
2.5 Kombinasi Warna.....	8
2.6 <i>Diffuser</i> Optik	10
2.7 Lensa Fokus Cahaya	11
2.8 Kinerja Sensor.....	12
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	13

3.2	Alat dan Bahan.....	13
3.2.1	Alat.....	13
3.2.2	Bahan.....	13
3.3	Desain dan Alur Penelitian.....	14
3.4	Prosedur Penelitian.....	14
3.4.1	Desain Alat.....	14
3.4.2	Pembuatan Larutan Standar Senyawa <i>Azo</i>	14
3.4.3	Optimasi Kolorimeter Multi Spektra	14
3.4.4	Uji Profil Kolorimeter Multi Spektra dan Spektrofotometer	15
3.4.5	Pembuatan Kurva Kalibrasi Larutan Standar Senyawa <i>Azo</i>	15
3.4.6	Uji Kinerja Kolorimeter Multi Spektra dan Spektrofotometer	16
BAB 4.	PEMBAHASAN	17
4.1	Kolorimeter Multi Spektra Kondisi Optimum	17
4.1.1	Pengaruh Ketebalan <i>Diffuser</i> terhadap Homogenitas dan Intensitas Cahaya	17
4.1.2	Pengaruh Sudut Lensa Fokus terhadap Homogenitas dan Intensitas Cahaya	21
4.2	Perbandingan Profil Senyawa Hasil Pemindaian.....	26
4.2.1	Profil Spektra Senyawa <i>Acid Yellow 17</i>	26
4.2.2	Profil Spektra Senyawa <i>Acid Orange 7</i>	28
4.2.3	Profil Spektra Senyawa <i>Reactive Orange 16</i>	29
4.3	Perbandingan Kinerja Pengukuran Larutan Standar <i>Azo Dyes</i>	31
4.3.1	Perbandingan Kurva Kalibrasi Larutan Standar	31
4.3.2	Koefisien Korelasi Kedua Instrumen	35
BAB 5.	PENUTUP.....	37
5.1	Kesimpulan	37
5.2	Saran.....	37
DAFTAR PUSTAKA.....		38
LAMPIRAN.....		41

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar Acid Yellow 17	32
Tabel 4.2 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar Acid Orange 7	33
Tabel 4.3 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar Reactive Orange 16	34

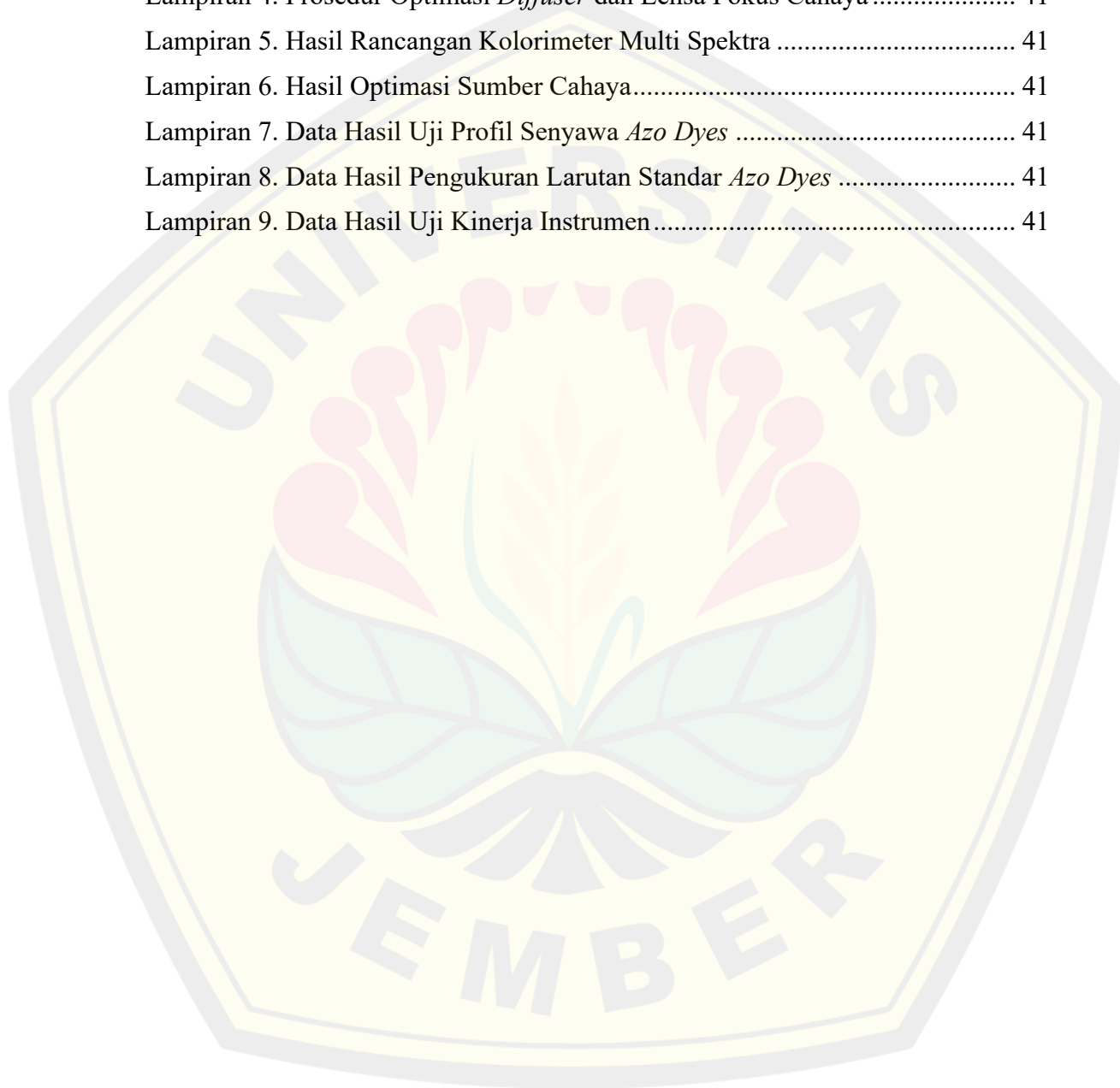


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Hukum Lambert Beer	6
Gambar 2.2 Diagram CIE Yxy yang Menunjukkan Gamut Warna Sistem RGB ...	9
Gambar 2.3 Homogenisasi Cahaya dengan <i>Diffuser</i>	10
Gambar 2.4 Prinsip Kerja Lensa HPL dalam Memfokuskan Cahaya	12
Gambar 3.1 Desain Kolorimeter Multi Spektra	14
Gambar 4.1 Homogenitas dan Stabilitas Warna A1 RGB (102,0,153); A7 RGB (0,0,245)	18
Gambar 4.2 Homogenitas dan Stabilitas Warna A1 RGB (102,0,153); A18 RGB (148,254,0)	18
Gambar 4.3 Homogenitas dan Stabilitas Warna A18 RGB(148,254,0); A26 RGB(245,56,0)	19
Gambar 4.4 a. Homogenitas Warna A1 RGB (102,0,153); b. Stabilitas Variasi Lensa	23
Gambar 4.5 Profil Spektra Standar <i>Acid Yellow</i> 17 12 ppm	27
Gambar 4.6 Profil Spektra Standar <i>Acid Orange</i> 7 12 ppm	29
Gambar 4.7 Profil Spektra Standar <i>Reactive Orange</i> 16 12 ppm	30
Gambar 4.8 Kurva Kalibrasi Standar <i>Acid Yellow</i> 17	32
Gambar 4.9 Kurva Kalibrasi Standar <i>Acid Orange</i> 7	33
Gambar 4.10 Kurva Kalibrasi Standar <i>Reactive Orange</i> 16	34
Gambar 4.11 Kurva Korelasi a. <i>Acid Yellow</i> 17; b. <i>Acid Orange</i> 7; c. <i>Reactive Orange</i> 16	36

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Sketch</i> Pemindaian Kolorimeter Multi Spektra	41
Lampiran 2. Desain dan Alur Penelitian	41
Lampiran 3. Preparasi Larutan Standar.....	41
Lampiran 4. Prosedur Optimasi <i>Diffuser</i> dan Lensa Fokus Cahaya	41
Lampiran 5. Hasil Rancangan Kolorimeter Multi Spektra	41
Lampiran 6. Hasil Optimasi Sumber Cahaya.....	41
Lampiran 7. Data Hasil Uji Profil Senyawa <i>Azo Dyes</i>	41
Lampiran 8. Data Hasil Pengukuran Larutan Standar <i>Azo Dyes</i>	41
Lampiran 9. Data Hasil Uji Kinerja Instrumen.....	41



DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN

ADC	: <i>Analog to Digital Converter</i> : Rangkaian elektronik untuk mengubah sinyal analog menjadi menjadi sinyal digital
Arduino	: <i>Platform</i> sumber terbuka berbasis mikrokontroler untuk perancangan instrumen
Arduino IDE	: <i>Arduino Integrated Development Environment</i> : Perangkat lunak untuk menulis atau mengunggah program ke <i>board</i> Arduino
<i>Azo Dyes</i>	: Senyawa <i>azo</i> yang berwarna
<i>Beam Angle</i>	: Sudut pancaran cahaya
<i>Board</i> Arduino	: Tempat rangkaian komponen Arduino
<i>Cone</i>	: Rongga kerucut pada bagian dalam lensa
<i>Diffuser</i>	: Material yang dapat menghamburkan intensitas cahaya menjadi lebih merata
HPL	: <i>High Power Lens</i> : Jenis lensa fokus yang mengolimesi cahaya LED
LED	: <i>Light Emitting Diode</i> : Dioda pemancar cahaya dari aliran arus listrik
<i>Non-biodegradable</i>	: Sifat senyawa yang tidak dapat terdegradasi
<i>Platform</i>	: Sistem dasar elektronik yang terintegrasi
<i>Portable</i>	: Instrumen yang mudah dibawa atau dipindahkan
<i>Reflective Surface</i>	: Permukaan pada lensa yang berinteraksi dengan cahaya yang dipantulkan
RGB	: <i>Red, Green, Blue</i> : Tiga warna aditif cahaya pada LED
<i>Scattering</i>	: Proses hamburan intensitas cahaya ke segala sudut
<i>Sketch</i>	: Program atau kode untuk mengontrol proses kerja instrumen
<i>Surface</i>	: Permukaan pada lensa yang berinteraksi dengan semua jenis cahaya
TIR	: <i>Total Internal Reflection</i> : Proses pemantulan secara total cahaya dari batas antara dua medium berbeda
USB	: <i>Universal Serial Bus</i> : Penghubung <i>board</i> Arduino ke komputer

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah dari pewarna sintetis yang banyak digunakan oleh industri tekstil merupakan salah satu sumber pencemar perairan. Pewarna sintetis yang memiliki ikatan $-N=N-$ (*azo*) diproduksi sekitar 70% dari total 700.000 ton pewarna sintetis yang digunakan setiap tahunnya. Beberapa jenis senyawa *azo dyes* yang banyak digunakan di industri tekstil adalah *acid yellow 17* ($C_{16}H_{12}N_4Na_2O_7S_2$), *acid orange 7* ($C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$), dan *reactive orange 16* ($C_{20}H_{17}N_3Na_2O_{11}S_3$). Ketiga senyawa tersebut merupakan senyawa *azo* aromatik yang dapat tereduksi menjadi amina aromatik yang bersifat toksik, *non-biodegradable*, karsinogenik dan mutagenik. Oleh karena itu, pelepasan limbah pewarna sintetis ke lingkungan tanpa pengolahan berbahaya bagi organisme, termasuk manusia. Identifikasi dan analisis senyawa *azo dyes* sangat dibutuhkan untuk mendeteksi terjadinya pencemaran lingkungan yang berbahaya (El Awady *et al.*, 2024). Analisis senyawa *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* umumnya banyak dilakukan dengan metode spektrofotometri, didasarkan pada struktur terkonjugasi yang menyerap cahaya pada daerah tampak. Metode ini cukup reliabel dalam analisis kualitatif dan kuantitatif (Nasreen *et al.*, 2025).

Metode spektrofotometri terbukti memiliki keakuratan tinggi, namun instrumennya menggunakan elemen optik yang kompleks, seperti monokromator dan *slit*. Kompleksitas komponen optik memerlukan pengendalian yang presisi dan relatif mahal, dibandingkan dengan instrumen optik sederhana lainnya. Spektrofotometer dalam bentuk sederhana seperti kolorimeter berbasis Arduino merupakan alternatif yang inovatif karena instrumen analisisnya *portable*, murah dan mudah dikendalikan. Kolorimeter dapat dikendalikan dengan *platform* elektronik sumber terbuka Arduino. Arduino sebagai mikrokontroler dapat mengelola secara *plug and play* perangkat lainnya seperti *input*, sensor, lampu, dan layar yang dikomunikasikan melalui *Universal Serial Bus* (USB) dan pengontrolan melalui kode atau *sketch* pada Arduino IDE (Hoang *et al.*, 2021).

Kolorimeter berbasis Arduino dapat menggunakan *Light Emitting Diode Red, Green, and Blue* atau LED RGB sebagai sumber cahaya. Intensitas cahaya dari warna RGB dapat dikombinasikan untuk menghasilkan warna baru dalam rentang spektrum cahaya tampak (Krupa-Kozak & Drabińska, 2022). Kolorimeter dengan LED lebih sederhana karena tidak memerlukan elemen optik kompleks dalam kalibrasinya, cukup menggunakan satu warna cahaya dengan pengontrolan warna cahaya dan intensitas RGB melalui program Arduino IDE. Kolorimeter dengan LED RGB berbasis Arduino dapat diintegrasikan dengan mudah, sehingga menghasilkan instrumen yang sederhana, murah, dan *portable* (Anida, 2025). Validitas sistem ini sebagai alternatif spektrofotometer cahaya tampak telah diuji oleh González-Laprea *et al.*, (2025), hasilnya memenuhi Hukum Lambert-Beer yaitu adanya hubungan linier antara absorbansi dan konsentrasi analit dengan koefisien determinasi mendekati 1.

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba merancang *prototype* kolorimeter multi spektra berbasis Arduino. Anida, (2025) telah mengembangkan kolorimeter multi spektra berbasis Arduino menggunakan lampu RGB komersial yang dikontrol dengan remot 16 warna. Hasil yang didapat menunjukkan hanya ada 6 warna sumber cahaya yang stabil dan warna lainnya tidak menyatu rata. Upaya untuk menghomogenkan sumber cahaya telah dikaji oleh Kondász *et al.*, (2018) dengan penambahan *engineered diffuser*, yaitu elemen optik untuk menghamburkan cahaya sehingga distribusi intensitas lebih merata. Kim, (2005) juga melaporkan pengaruh ketebalan *diffuser*, di mana peningkatan ketebalan filter CoAl_2O_4 pada fosfor RGB dapat memperpanjang lintasan cahaya. Perpanjangan lintasan meningkatkan hamburan sehingga distribusi cahaya lebih homogen, namun terjadi penurunan intensitas. Wahyuni, (2025) juga melaporkan bahwa penggunaan *diffuser* berupa kertas kalkir dan kertas kalkir yang dilapisi minyak meningkatkan homogenitas. Hasil yang dilaporkan yaitu didapat 8 warna cahaya stabil menggunakan kertas kalkir dan 12 warna cahaya stabil pada kertas kalkir dilapisi minyak, namun intensitas cahaya menurun. Sementara itu, Motogaito & Hiramatsu, (2013) melaporkan bahwa penggunaan lensa fokus difraktif biner dapat meningkatkan intensitas cahaya, yang dilanjutkan dengan kajian sudut lensa oleh

Vu *et al.*, (2020). Hasil kajian menunjukkan semakin kecil *beam angle* lensa menyebabkan penyempitan distribusi intensitas, sehingga cahaya menjadi lebih fokus. Namun, pada jarak dekat geometri lensa yang sangat sempit juga menurunkan efisiensi transmisi optisnya, karena sebagian sinar tidak dapat diteruskan keluar lensa (Syu *et al.*, 2020).

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat permasalahan terkait dengan keterbatasan sumber cahaya dan warna cahaya yang kurang menyatu. Hal ini mendorong kajian lebih lanjut mengenai penggunaan *diffuser* LED dan lensa fokus *High Power Lens* (HPL). Penggunaan *diffuser* dipelajari melalui variasi ketebalan yaitu 0 mm; 0,3 mm; dan 0,6 mm. Penggunaan lensa fokus ditujukan untuk menyatukan cahaya dan meningkatkan intensitasnya, di mana sudut lensa divariasikan dari 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°. Pengaturan warna lampu LED mengadopsi pada kombinasi warna oleh Greim, (2024) dan dikembangkan dalam *sketch* Arduino IDE dengan gradasi warna cahaya dalam kisaran 10 nm pada rentang 380 nm sampai 730 nm. Uji kelayakan kolorimeter multi spektra sebagai alat analisis dilakukan dengan mengidentifikasi senyawa *acid yellow* 17, *acid orange* 7, dan *reactive orange* 16 baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan analisis menggunakan spektrofotometer, sehingga penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan warna-warna spektra yang stabil pada rentang cahaya tampak, dengan hasil pengukuran mendekati spektrofotometer.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana ketebalan *diffuser* dan sudut lensa memengaruhi intensitas dan homogenitas sumber cahaya yang dihasilkan?
2. Bagaimana profil spektra senyawa *azo acid yellow* 17, *acid orange* 7, dan *reactive orange* 16 yang diperoleh dari hasil pemindaian menggunakan kolorimeter multi spektra dibandingkan dengan spektrofotometer cahaya tampak?

3. Bagaimana hasil kinerja kolorimeter multi spektra dibandingkan dengan spektrofotometer cahaya tampak dalam pengukuran dan analisis senyawa *azo acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16*?

1.3 Batasan Penelitian

Batasan dalam penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di suhu ruang tanpa kontrol suhu dan kelembapan, serta menggunakan kolorimeter multi spektra yang dirangkai dengan jarak antarkomponen 0 cm yang diadaptasi dari Anida, (2025).
2. Validasi dilakukan dengan menguji zat yang sama menggunakan spektrofotometer Barcov BRQ-UV10VLE.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan kondisi optimum kolorimeter multi spektra yang menghasilkan sumber cahaya dengan intensitas dan homogenitas tinggi.
4. Mengetahui perbandingan profil spektra senyawa *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* dengan kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer cahaya tampak.
5. Menentukan dan membandingkan hasil kinerja kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer cahaya tampak dalam pengukuran dan analisis larutan standar senyawa *azo acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan yaitu mampu menjadikan referensi dalam pengembangan kolorimeter berbasis Arduino dan LED RGB. Instrumentasi juga dapat digunakan sebagai media pembelajaran sederhana di laboratorium sekolah menengah dan perguruan tinggi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Senyawa Azo Dyes

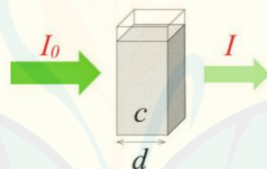
Senyawa azo *dyes* merupakan senyawa organik dengan struktur ikatan rangkap nitrogen ($-N=N-$) yang menghubungkan dua gugus aromatik. Senyawa azo memiliki warna yang kuat, sehingga banyak disintesis sebagai pewarna tekstil. Senyawa azo *dyes* bersifat toksik, *non-biodegradable*, karsinogenik, dan mutagenik karena dapat tereduksi menjadi amina aromatik oleh enzim, mikroorganisme, atau kondisi reduktif di dalam tubuh manusia. Keberadaan senyawa azo di lingkungan sangat berbahaya, terutama dalam ekosistem perairan. Kontaminasi air oleh senyawa azo *dyes* mengurangi penetrasi cahaya yang dapat menghambat fotosintesis dan menurunkan kadar oksigen. Selain itu, senyawa azo bersifat persisten atau sulit didegradasi secara alami di lingkungan (El Awady *et al.*, 2024). Regulasi Uni Eropa melalui *Regulation* (EC) No. 1907/2006 (REACH) melarang penggunaan senyawa azo yang dapat tereduksi menjadi amina aromatik berbahaya pada produk tekstil dan kulit, dengan ambang batas maksimum 30 mg/kg. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan senyawa azo di lingkungan perlu mendapat perhatian (European Parliament & Council, 2006). Beberapa senyawa azo *dyes* yang banyak digunakan di industri tekstil adalah *acid yellow 17* ($C_{16}H_{12}N_4Na_2O_7S_2$), *acid orange 7* ($C_{16}H_{11}N_2NaO_4S$), dan *reactive orange 16* ($C_{20}H_{17}N_3Na_2O_{11}S_3$) (El Awady *et al.*, 2024). Ketiga senyawa tersebut memiliki warna kuning hingga oranye dengan warna komplementer pada daerah ungu hingga biru, serta panjang gelombang maksimum berturut-turut 483 nm (Azam & Hamid, 2006), 494 nm (Obulapuram *et al.*, 2021), dan 400 nm (Farooq *et al.*, 2019).

2.2 Spektrofotometri

Spektrofotometri merupakan metode analitik yang mengukur interaksi cahaya dengan materi. Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik dan setiap panjang gelombang dari cahaya memiliki energi berbeda-beda, sehingga dapat diserap secara spesifik oleh suatu materi. Penyerapan cahaya oleh suatu materi digunakan untuk karakterisasi kualitatif dan kuantitatif (Mettler Toledo, 2023).

Spektrofotometer memiliki rentang serapan daerah ultraviolet dan tampak (200-800 nm). Penyerapan cahaya oleh suatu materi menyebabkan eksitasi elektron dari orbital *bonding* atau *non-bonding* pada keadaan dasar ke orbital *antibonding* yang berenergi lebih tinggi. Eksitasi elektron terjadi karena adanya gugus kromofor, yaitu gugus tak jenuh, struktur yang memiliki pasangan elektron bebas, atau sistem konjugasi. Semakin banyak kromofor maka semakin besar panjang gelombang yang diserap, dan besarnya cahaya yang diserap untuk eksitasi elektron disebut nilai absorbansi (Nasreen *et al.*, 2025).

Prinsip kerja spektrofotometri didasarkan pada perbedaan intensitas cahaya sebelum (I_0) dan sesudah (I) melewati sampel (kuvet), di mana sebagian cahaya diserap oleh materi sehingga $I < I_0$. Detektor pada spektrofotometri mendeteksi intensitas cahaya yang ditransmisikan, di mana nilainya merupakan perbandingan cahaya sesudah (I) dan sebelum (I_0) melewati kuvet, yang dinyatakan sebagai transmittan. Hubungan transmittan dan absorbansi adalah berbanding terbalik, karena nilai absorbansi merupakan $-\log$ dari transmittan. Absorbansi pada spektrofotometri mengikuti Hukum Lambert-Beer, yaitu penyerapan cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi sampel dan panjang lintasan medium (kuvet).



Gambar 2.1 Skema Hukum Lambert-Beer (Sumber: Mettler Toledo, 2023)

Hukum Lambert-Beer dituliskan dalam persamaan matematis berikut:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.1)$$

$$A = -\log T \quad (2.2)$$

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (2.3)$$

Keterangan: T adalah transmitansi; I_0 adalah intensitas cahaya datang; I adalah intensitas cahaya yang ditransmisikan; A adalah Absorbansi; ε adalah absorptivitas molar ($M \text{ cm}^{-1}$); b adalah tebal kuvet (cm); c adalah konsentrasi (M) (Mettler Toledo, 2023).

2.3 Kolorimetri

Kolorimetri merupakan salah satu jenis fotometri yang mendeteksi cahaya dan perubahan intensitasnya. Kolorimetri adalah metode analisis yang mengukur intensitas warna suatu larutan pada daerah tampak (380-780 nm). Kolorimetri dapat digunakan untuk analisis kualitatif dan kuantitatif pada suatu larutan berwarna. Prinsip kerja kolorimetri adalah melewatkan cahaya tampak pada sampel berwarna yang akan menyerap sebagian cahaya tersebut, lalu mendeteksi intensitas transmisinya. Cahaya tampak yang diserap merupakan warna komplementer dari larutan sampel. Intensitas cahaya yang ditransmisikan pada kolorimetri juga diukur sebagai nilai absorbansi. Cahaya yang diserap dan ditransmisikan pada kolorimetri juga mengikuti Hukum Lambert-Beer, di mana semakin pekat warna larutan maka semakin besar cahaya yang diserap atau semakin besar nilai absorbansinya. Kolorimetri pada dasarnya menggunakan pita serapan lebar, berbeda dengan spektrofotometri yang menggunakan panjang gelombang kontinu (Cianci, 2023). Kolorimetri merupakan metode fotometri sederhana karena komponennya hanya terdiri dari sumber cahaya tampak, kuvet dan detektor. Salah satu detektor fotometri yang digunakan adalah sensor BH1750. Sensor BH1750 merupakan sensor terintegrasi yang memiliki fotodiode internal dan ADC 16-bit untuk merubah sinyal analog menjadi digital. Sensor tersebut mendeteksi intensitas cahaya yang ditransmisikan dan menghasilkan langsung nilai digital dalam satuan lux. (ROHM, 2011; Rahmawati & Yohandri, 2023).

2.4 Kolorimeter Multi Spektra Berbasis Arduino

Kolorimeter banyak dikembangkan menggunakan LED RGB (*Light Emitting Diode Red, Green, and Blue*). LED merupakan jenis lampu berbasis semikonduktor dengan kandungan merkuri dan bahan toksik lain yang rendah, sehingga lebih ramah lingkungan, serta memiliki efisiensi energi tinggi dan indeks renderasi warna yang baik (Sutanto, 2017). LED RGB adalah lampu dengan tiga fotodiode merah, hijau dan biru, di mana intensitas warnanya dapat dikombinasikan untuk membentuk spektrum cahaya tampak seperti pada spektrofotometri (Krupa-Kozak & Drabińska, 2022). Spektrofotometer sendiri memiliki elemen optik yang

kompleks, dengan proses kalibrasi dan pengendalian lebih rumit. Kolorimeter berbasis LED RGB atau dapat disebut kolorimeter multi spektra mampu mengimplementasikan prinsip dasar spektrofotometri secara lebih sederhana, *portable*, murah, dan mudah dikendalikan (Anida, 2025).

Kolorimeter multi spektra yang saat ini banyak dikembangkan terdiri dari tiga komponen utama, yaitu sumber cahaya RGB, sensor cahaya, dan mikrokontroler. Mikrokontroler memiliki banyak jenis, beberapa diantaranya seperti ATmega328P, PIC16F877A, STM32F103C8, dan ESP32. Arduino adalah *platform* perangkat keras sumber terbuka yang menggunakan beberapa jenis mikrokontroler, salah satunya adalah ATmega328P 8-bit pada Arduino Nano. Arduino Nano memiliki ukuran paling kecil diantara jenis yang lain, sehingga banyak digunakan untuk perangkat elektronik *portable*. Arduino dikontrol dengan *software* Arduino IDE, di mana menggunakan *sketch* atau bahasa pemrograman C++. *Sketch* Arduino IDE memiliki fungsi utama, yaitu *setup()* dan *loop()*. Fungsi *setup()* adalah untuk inisialisasi awal sistem, seperti mengatur *pin mode* dan komunikasi serial yang hanya dilakukan satu kali jalan. Fungsi *loop()* adalah untuk membaca *input*, memproses data dan mengontrol *output* dari variabel terinisialisasi, yang dapat dijalankan berulang. Arduino dapat mengatur nilai *duty cycle* sinyal PWM untuk memvariasikan intensitas cahaya pada setiap warna RGB melalui pemrograman di Arduino IDE (Ridwan, *et al.*, 2023).

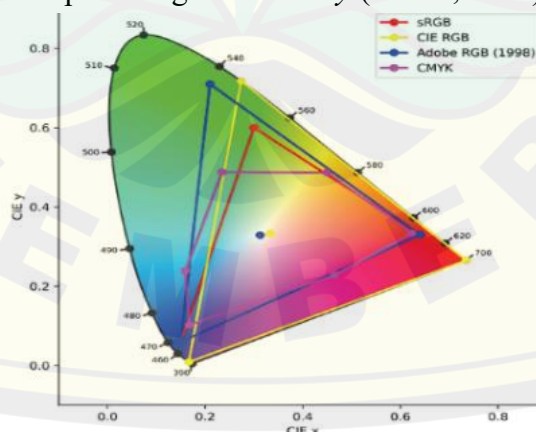
2.5 Kombinasi Warna

Hubungan antara tegangan nyala (*turn-on voltase*) dengan warna cahaya pada LED terjadi karena perubahan energi listrik menjadi energi cahaya. Tegangan nyala adalah tegangan minimum yang diberikan agar arus listrik dapat mengalir melalui LED untuk menghasilkan energi cahaya. LED yang diberi tegangan membuat elektron dalam bahan semikonduktor bergerak dari pita konduksi ke pita valensi dan mengisi daerah kosong elektron. Energi yang dilepaskan karena pergerakan elektron tersebut berupa energi cahaya. Energi cahaya yang dipancarkan ditentukan oleh *bandgap* dari bahan semikonduktor LED (Noah, 2020).

Variasi panjang gelombang yang digunakan diambil dari eksperimen pemetaan warna terhadap panjang gelombang tampak menggunakan ponsel pintar Samsung Galaxy SM-200H yang dimodifikasi dengan *HEX Color Picker*. Panjang gelombang divariasikan dari 380-730 nm dengan interval 10 nm sesuai dengan Lampiran 1. RGB memiliki tiga warna aditif primer, di mana kombinasi ketiga intensitasnya dapat menghasilkan warna baru sesuai dengan teori *Additive Color Mixing*. Warna baru terbentuk dijelaskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$S = aR + bG + cB \quad (2.4)$$

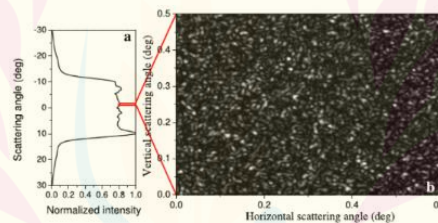
Nilai dari R, G, dan B adalah intensitas warna cahaya yang dipancarkan lampu, sedangkan a, b, dan c merupakan standar koefisien pembobot untuk menghitung kecerahan. Nilai a, b, dan c merepresentasikan kontribusi setiap warna terhadap kecerahan (luminansi). Warna baru yang terbentuk bukan ditentukan dari nilai mutlak intensitas cahayanya, namun dari rasio antara ketiganya (Krupa-Kozak & Drabińska, 2022). Hubungan panjang gelombang yang diperoleh dan kombinasi warna RGB diprediksi berdasarkan Elips MacAdam yang dipetakan dalam diagram *CIE Yxy*. Setiap warna dari RGB divariasikan intensitasnya dari 0-255, gabungan dari ketiga intensitas warna tersebut menghasilkan warna baru dengan panjang gelombang tampak yang dipetakan dalam diagram *CIE Yxy*. Warna hasil kombinasi intensitas RGB bersifat polikromatik dan tidak memiliki panjang gelombang tunggal, sehingga direpresentasikan oleh panjang gelombang dominan yang diperoleh dari pemetaan pada diagram *CIE Yxy* (Greim, 2024).



Gambar 2.2 Diagram CIE Yxy yang Menunjukkan Gamut Warna Sistem RGB
(Sumber: Greim, 2024)

2.6 Diffuser Optik

Diffuser optik merupakan material yang berfungsi mendistribusikan cahaya secara merata dengan menyebarkan cahaya dari *point source* ke berbagai arah pada *area source*. Salah satu jenis *diffuser* optik yang umum digunakan adalah *diffuser* polikarbonat (*polycarbonate light diffuser sheet*), yaitu lembaran plastik putih *translucent* yang dapat menghamburkan dan melembutkan cahaya secara merata ke seluruh permukaan. *Diffuser* polikarbonat memiliki transmisi cahaya yang tinggi dengan efisiensi difusi yang baik, serta stabil pada rentang suhu -40°C - 120°C , sehingga sesuai untuk digunakan dalam berbagai kondisi operasional (UNQ, 2023). *Diffuser* optik menghomogenkan cahaya melalui proses *scattering* atau penyebaran acak oleh mikrostruktur *pseudorandom* dipermukaannya. Cahaya yang masuk melewati *diffuser* akan dipecah dan diarahkan ke banyak sudut, sehingga intensitasnya terdistribusi merata dan tampak lebih homogen (Kondász *et al.*, 2018).



Gambar 2.3 Homogenisasi Cahaya dengan *Diffuser* (Kondász *et al.*, 2018)

Filter dan *diffuser* memiliki fungsi yang sama untuk meningkatkan homogenitas cahaya, namun berbeda cara kerjanya. Filter bekerja dengan menyerap cahaya tertentu yang dianggap *overlap* sehingga cahaya yang diinginkan akan tampak lebih homogen. Kim, (2005) melaporkan penggunaan variasi ketebalan filter CoAl_2O_4 pada fosfor RGB, di mana hasilnya menunjukkan bahwa semakin tebal filter maka semakin homogen cahaya yang dihasilkan. Filter CoAl_2O_4 hanya menyerap warna cahaya oranye yang dianggap *overlap*, sehingga semakin tebal filter maka semakin banyak cahaya yang diabsorpsi dan warna cahaya tampak lebih murni (homogen), namun intensitas cahayanya semakin menurun. Ketebalan *diffuser* juga berpengaruh terhadap homogenitas cahaya, serupa dengan pengaruh ketebalan filter. Semakin tebal *diffuser* maka semakin meningkat homogenitas

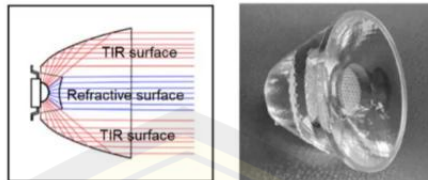
cahaya. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya panjang lintasan cahaya yang dilewati, sehingga semakin banyak cahaya dapat didistribusikan dan dihamburkan berkali-kali ke segala arah (Kondász *et al.*, 2018).

2.7 Lensa Fokus Cahaya

Lensa merupakan komponen optik yang mengubah arah sinar datang dengan pembiasan melalui permukaan lengkungnya. Lensa dibuat berdasarkan perhitungan matematis, sesuai Hukum Snellius. LED memiliki sebaran cahaya yang lebar, sehingga intensitasnya berkurang pada jarak jauh dan penggunaan lensa fokus dapat meningkatkan intensitasnya. Cara kerja lensa fokus yaitu cahaya yang masuk akan dibelokkan dan difokuskan ke bidang fokus. Kemampuan lensa dalam memfokuskan cahaya dipengaruhi oleh bentuk dan sudut. Lensa cembung lebih memfokuskan cahaya, karena sifatnya mengumpulkan cahaya datang, dibanding lensa cekung dan pelat datar yang sifatnya menghamburkan cahaya. *Numerical Aperture* (NA) juga memengaruhi ketajaman fokus cahaya. NA menunjukkan seberapa besar sudut cahaya yang dapat ditangkap oleh lensa, semakin besar nilainya maka semakin besar sudut penerimaan cahaya, sehingga semakin kuat kemampuan lensa untuk fokus (Gallegos dan Stokkermans, 2023).

Lensa *High Power Lens* (HPL) merupakan salah satu jenis lensa fokus cahaya yang memiliki dua bagian utama, yaitu *Total Internal Reflection* (TIR) *surface* dan *reflective surface*. Kedua bagian tersebut berfungsi untuk memantulkan cahaya yang datang agar tidak keluar, namun mengarah pada daerah tertentu yang difokuskan. TIR *surface* bekerja secara alami dengan memantulkan cahaya datang yang mengenai dinding lensa ke arah dalam pada sudut tertentu, sedangkan *reflective surface* memantulkan cahaya melalui lapisan pemantul sehingga arah pantulannya bergantung pada bentuk permukaannya. Kedua bagian tersebut berfungsi mengarahkan cahaya agar terfokus pada daerah tertentu dan memengaruhi sudut keluaran cahaya (*beam angle*) serta geometri lensa. Semakin kecil sudutnya maka semakin sempit daerah distribusi intensitas cahaya dan semakin fokus cahaya yang dipancarkan (Vu *et al.*, 2020). Namun demikian, pada jarak dekat penyempitan sudut tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan

intensitas yang terukur, karena geometri lensa juga memengaruhi efisiensi transmisi optisnya. Sudut yang sempit menyebabkan cahaya belum mencapai kondisi TIR optimal, sehingga intensitas yang keluar berkurang (Syu *et al.*, 2020).



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Lensa HPL dalam Memfokuskan Cahaya (Sumber: Vu *et al.*, 2020)

2.8 Kinerja Sensor

Kinerja sensor dapat diukur menggunakan parameter linieritas dalam range kerja, sensitivitas, *Limit of Detection* (LOD), *Limit of Quantification* (LOQ), *Standard Deviation* (SD), *Relative Standard Deviation* (RSD), dan koefisien korelasi. Range kerja adalah rentang konsentrasi analit yang terukur dengan baik oleh alat. Linieritas yang ditentukan di dalam *range* kerja menunjukkan hubungan berbanding lurus antara dua variabel pada kurva kalibrasi. Hubungan dua variabel pada analisis fotometri meliputi nilai absorbansi dan konsentrasi yang memenuhi hukum Lambert-Beer, dengan tingkat linieritas ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1. Kemampuan alat untuk mendeteksi analit ditunjukkan dengan LOD, sedangkan kemampuan untuk mengukurnya ditunjukkan oleh LOQ. Presisi dalam pengukuran dilihat dari sebaran data, yaitu kesalahan dalam bentuk standar deviasi, sedangkan tingkat ketelitian dalam pengukuran ditunjukkan oleh nilai relatif standar deviasi dengan ambang batas $\leq 5\%$. Sensitivitas sendiri menunjukkan kemampuan alat memberi respon yang besar terhadap perubahan konsentrasi yang kecil, yang ditunjukkan oleh nilai *slope* (Robinson *et al.*, 2004). Kedekatan hasil pengukuran antara spektrofotometer dan kolorimeter multi spektra diuji menggunakan koefisien korelasi *product moment*. Koefisien korelasi *product moment* menunjukkan tingkat kedekatan linier antara dua variabel, di mana nilai yang mendekati 1 menunjukkan hubungan linier yang kuat antara kedua instrumen (Puth *et al.*, 2014).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Maret 2026 hingga Mei di Laboratorium Kimia Analitik Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan untuk membuat *casing* kolorimeter multi spektra, yaitu *software* Blender, dan *printer* 3D. Alat yang digunakan untuk merangkai kolorimeter multi spektra, yaitu *software* Arduino IDE, Arduino Nano V3, modul LED RGB WS2812B, *diffuser* LED Polikarbonat, lensa HPL, modul sensor BH1750, kotak proyek hitam, kabel *jumper*, kabel USB, adaptor DC 12V, dan laptop Acer Aspire Lite 15. Alat yang dibutuhkan dalam preparasi pada penelitian ini, yaitu pipet tetes, pipet mohr 10 mL, *ball* pipet, gelas beker (50 mL dan 100 mL), labu ukur (50 dan 100 mL), batang pengaduk, spatula, kaca arloji, dan botol kaca gelap. Alat yang digunakan untuk analisis pada penelitian ini adalah neraca analitik, kuvet, ponsel Oppo A17, dan spektrofotometer Barcov model BRQ-UV10VLE.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan untuk membuat *casing* kolorimeter multi spektra yaitu filamen plastik hitam, dan bahan untuk merangkai kolorimeter multi spektra yaitu lem dan gabus hitam. Bahan yang dibutuhkan dalam preparasi pada penelitian ini, yaitu akuades, *acid yellow* 17 (komersial), *acid orange* 7 (komersial), dan *reactive orange* 16 (komersial).

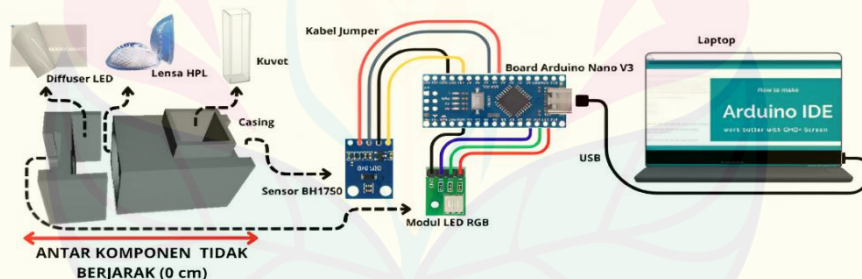
3.3 Desain dan Alur Penelitian

Pelaksanaan penelitian mengikuti desain dan alur yang ditunjukkan pada Lampiran 2.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Desain Alat

Kolorimeter multi spektra didesain berdasarkan prinsip spektrofotometri sesuai rangkaian pada Gambar 3.1. Modul LED RGB, *diffuser* LED, lensa HPL, kuvet, dan sensor BH1750 disusun tidak berjarak (0 cm) di dalam *casing* yang didesain menggunakan *software* Blender dan dicetak dengan *printer* 3D. Kolorimeter multi spektra dirancang dengan mengintegrasikan modul LED RGB dan sensor BH1750 pada Arduino Nano V3 menggunakan kabel *jumper*. Sistem kolorimeter dijalankan menggunakan *sketch* pada *software* Arduino IDE dengan fungsi *write* untuk mengontrol sumber cahaya dan menampilkan data, serta fungsi *read* untuk membaca data, sebagaimana ditunjukkan pada Lampiran 1. Sistem dihubungkan ke komputer dengan USB dari Arduino Nano V3.



Gambar 3.1 Desain Kolorimeter Multi Spektra

3.4.2 Pembuatan Larutan Standar Senyawa Azo

Larutan standar dibuat menggunakan senyawa *acid yellow* 17, *acid orange* 7, dan *reactive orange* 16 dengan prosedur perlakuan ditunjukkan pada Lampiran 3.

3.4.3 Optimasi Kolorimeter Multi Spektra

a. Uji Stabilitas Sumber Cahaya

Pengukuran dilakukan melalui pemindaian menggunakan kolorimeter multi spektra dengan 36 gradasi warna cahaya yang secara teoritis merepresentasikan spektrum tampak (380-730 nm) dengan interval pendekatan 10 nm. Pengukuran

dilakukan menggunakan kolorimeter multi spektra dengan kondisi tanpa *diffuser*, lensa HPL, dan larutan sampel, serta dalam ruangan gelap. Setiap gradasi warna cahaya diamati homogenitas warnanya secara visual melalui dokumentasi gambar menggunakan ponsel. Stabilitasnya diamati berdasarkan nilai intensitas yang diterima sensor terhadap jumlah pembacaan, dengan nilai SD dan RSD sebagai indikator kestabilan. Secara lengkap uji stabilitas sumber cahaya ditunjukkan pada Lampiran 4.

b. Optimasi Ketebalan *Diffuser*

Pengukuran dilakukan dengan cara yang sama seperti stabilitas sumber cahaya dan prosedur perlakuan ditunjukkan pada Lampiran 4. Pemindaian kolorimeter multi spektra dilakukan pada variasi ketebalan *diffuser* 0; 0,3; dan 0,6 mm.

c. Optimasi Sudut Lensa Fokus

Pengukuran dilakukan dengan cara yang sama seperti stabilitas sumber cahaya dan prosedur perlakuan ditunjukkan pada Lampiran 4. Pemindaian kolorimeter multi spektra dilakukan pada variasi sudut lensa 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°.

3.4.4 Uji Profil Kolorimeter Multi Spektra dan Spektrofotometer

Pengukuran dilakukan dengan parameter kondisi optimum kolorimeter multi spektra. Larutan standar 3 mL dari senyawa *azo acid yellow* 17, *acid orange* 7, dan *reactive orange* 16 dengan konsentrasi 8, 10, 12, 14, dan 16 ppm dipindai menggunakan kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer. Setiap pemindaian diawali dengan pengukuran blanko berupa akuades. Pemindaian menggunakan kolorimeter multi spektra dilakukan dengan 36 gradasi warna cahaya, sedangkan pemindaian menggunakan spektrofotometer dilakukan pada rentang 380-730 nm dengan interval 2 nm. Pengukuran dilakukan 5 kali pengulangan. Profil spektra senyawa *azo* dipilih pada konsentrasi 12 ppm kemudian dibandingkan hasilnya antara kolorimeter multi spektra dengan spektrofotometer.

3.4.5 Pembuatan Kurva Kalibrasi Larutan Standar Senyawa *Azo*

Kurva kalibrasi dibuat berdasarkan nilai absorbansi tertinggi dari hasil pemindaian profil senyawa *azo* pada konsentrasi 8, 10, 12, 14, dan 16 ppm

menggunakan kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer. Kurva kalibrasi dibuat dengan memplot nilai absorbansi pada sumbu y terhadap konsentrasi pada sumbu x.

3.4.6 Uji Kinerja Kolorimeter Multi Spektra dan Spektrofotometer

Uji kinerja dihitung dari data pengukuran analisis senyawa *azo* dan kurva kalibrasi menggunakan kedua instrumen. Hasil uji kinerja menggunakan kolorimeter multi spektra yang dirancang, dibandingkan dengan menggunakan spektrofotometer Barcov model BRQ-UV10VLE. Uji kinerja meliputi meliputi linieritas, sensitivitas, standar deviasi (SD), standar deviasi relatif (RSD), batas deteksi (LOD), batas kuantitasi (LOQ), dan koefisien korelasi *product moment*. Nilai linieritas diambil dari *range* kerja pada kurva kalibrasi berupa nilai koefisien determinasi (R^2). Sensitivitas ditunjukkan oleh nilai *slope* (m) pada kurva kalibrasi. Nilai SD dihitung dari data pengulangan dan kemudian digunakan untuk memperoleh nilai RSD. Nilai LOD dan LOQ dihitung dari nilai *slope* dan SD. Koefisien korelasi *product moment* diperoleh dari kurva korelasi antara nilai absorbansi kolorimeter multi spektra (sumbu y) dan spektrofotometer (sumbu x). Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari kurva korelasi digunakan untuk menghitung nilai koefisien korelasi *product moment* (r).

$$y = mx + c \quad (1)$$

$$SD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n-1} \quad (2)$$

$$RSD = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \% \quad (3)$$

$$LOD = 3 \times SD/b \quad (4)$$

$$LOQ = 10 \times SD/b \quad (5)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} = \sqrt{R^2} \quad (6)$$

Keterangan: y adalah respons instrumen; m adalah kemiringan (*slope*); x adalah konsentrasi analit; c adalah intersep; $\bar{x}$ adalah nilai rata-rata pengukuran; x_i adalah nilai pengukuran; n adalah jumlah data; b adalah nilai *slope*; ($x_i y_i$) adalah pasangan nilai data ke-i dari dua variabel; ($\bar{x} \bar{y}$) adalah rata-rata dari dua variabel; R^2 adalah koefisien determinasi.

BAB 4. PEMBAHASAN

4.1 Kolorimeter Multi Spektra Kondisi Optimum

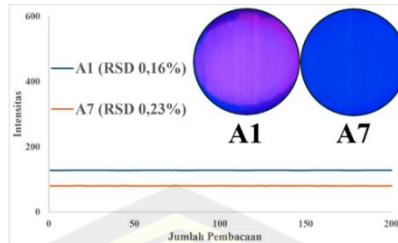
Kolorimeter multi spektra yang diuji dirangkai dan dirakit dengan komponen *diffuser* LED dan lensa fokus HPL yang ketebalan dan sudutnya dapat divariasikan. Hasil rancangan ditunjukkan pada Lampiran 5.

4.1.1 Pengaruh Ketebalan *Diffuser* terhadap Homogenitas dan Intensitas Cahaya

a. Homogenitas Cahaya Tanpa *Diffuser*

Parameter pertama yang digunakan dalam optimasi sumber cahaya kolorimeter multi spektra adalah homogenitas warna yang menunjukkan pola pencahayaan merata atau tidak. Berdasarkan pengukuran pada 36 variasi kombinasi warna RGB (merah, hijau, biru) dalam kondisi tanpa *diffuser*, menunjukkan hampir semua memiliki pola pencahayaan yang tidak merata, seperti pada Gambar 4.1. Hal ini disebabkan LED RGB memiliki 3 *chip* terpisah yang masing-masing memancarkan cahaya sesuai pola Lambertian, sehingga intensitas cahaya tidak seragam dan menghasilkan daerah gelap dan terang (*hotspot*). Intensitas cahaya paling kuat berada pada daerah tengah dan melemah pada daerah tepi, sehingga distribusi yang tidak merata ini mengakibatkan warna menjadi tidak homogen (Moreno dan Sun, 2008). Pola pencahayaan yang homogen, seperti pada Gambar 4.1, hanya dihasilkan oleh warna dengan kode A7, A13 hingga A15, dan A28 hingga A36. Pola pencahayaan homogen tersebut dihasilkan oleh warna yang menggunakan satu jenis kanal RGB tanpa pencampuran warna, seperti warna A7 yang menggunakan kanal biru, serta warna A15 hingga A28 yang menggunakan kanal merah. Berbeda dengan warna A13 hingga A15, meskipun hasil dari pencampuran kanal hijau-biru dan hijau-merah, tetap menunjukkan pola pencahayaan yang homogen karena didominasi oleh lampu warna hijau yang menyala dengan rasio RGB tinggi. Hal ini berkaitan dengan karakteristik persepsi visual, di mana sensitivitas mata manusia mencapai puncaknya pada wilayah spektrum hijau. Akibatnya, cahaya hijau memiliki tingkat kecerahan yang relatif tinggi dibandingkan warna merah dan biru, sehingga dominasinya menyebabkan

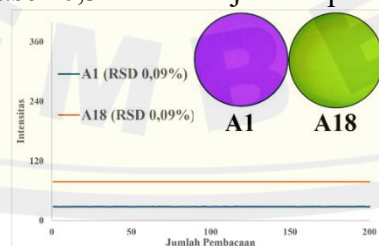
distribusi cahaya tampak merata (Choudhury, 2014). Hasil keseluruhan pengujian homogenitas cahaya tanpa *diffuser* ditunjukkan pada Lampiran 6.



Gambar 4.1 Homogenitas dan Stabilitas Warna A1 RGB (102,0,153); A7 RGB (0,0,245)

b. Homogenitas Cahaya dengan *Diffuser* 0,3 mm

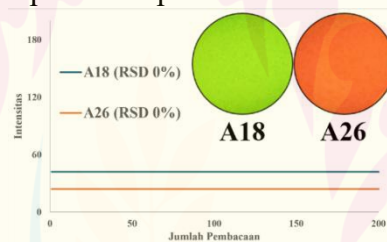
Penggunaan *diffuser* LED dengan ketebalan 0,3 mm menghasilkan peningkatan homogenitas warna dibandingkan dengan kondisi tanpa *diffuser*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar variasi warna cahaya memiliki pola pencahayaan yang homogen, seperti pada Gambar 4.2. *Diffuser* LED memiliki struktur mikroskopik pada permukaannya yang dapat menghamburkan (*scattering*) intensitas cahaya RGB menjadi lebih merata dan mengurangi terbentuknya *hotspot*, sehingga warna yang dihasilkan tampak homogen (Kondász *et al.*, 2018). Beberapa warna yang belum homogen seperti pada Gambar 4.2, yaitu pada warna kuning kehijauan hingga oranye (A18-A26). Ketidakseragaman yang masih terlihat pada rentang warna tersebut disebabkan oleh interaksi kanal hijau dan merah dengan rasio RGB yang sama-sama tinggi. Kombinasi kedua kanal ini menghasilkan dominasi visual yang kuat, sehingga *diffuser* 0,3 mm belum mampu menghasilkan distribusi intensitas cahaya yang merata. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik persepsi visual yang memiliki kecerahan semakin tinggi berurutan dari warna biru, merah, dan hijau (Choudhury, 2014). Hasil keseluruhan pengujian homogenitas cahaya menggunakan *diffuser* 0,3 mm ditunjukkan pada Lampiran 6.



Gambar 4.2 Homogenitas dan Stabilitas Warna A1 RGB (102,0,153); A18 RGB (148,254,0)

c. Homogenitas Cahaya dengan *Diffuser* 0,6 mm

Penggunaan *diffuser* LED dengan ketebalan 0,6 mm menunjukkan pengaruh ketebalan *diffuser* terhadap homogenitas cahaya. Seperti pada Gambar 4.3, seluruh 36 variasi warna juga menghasilkan pola pencahayaan yang homogen, berbeda dengan kondisi pada *diffuser* 0,3 mm yang masih menunjukkan distribusi tidak merata pada warna A18 hingga A26. Hasil pengujian ini sesuai dengan penelitian yang laporan oleh Kim, (2005), bahwa peningkatan ketebalan *diffuser* dapat meningkatkan keseragaman distribusi cahaya. Secara teori, semakin tebal *diffuser* maka semakin panjang lintasan cahaya yang harus dilewati, sehingga proses hamburan terjadi lebih banyak dan menghasilkan distribusi intensitas yang lebih merata. Hasil keseluruhan pengujian homogenitas cahaya menggunakan *diffuser* 0,6 mm ditunjukkan pada Lampiran 6.



Gambar 4.3 Homogenitas dan Stabilitas Warna A18 RGB(148,254,0); A26 RGB(245,56,0)

d. Stabilitas Cahaya Tanpa *Diffuser*

Parameter kedua dalam optimasi sumber cahaya adalah stabilitas intensitas cahaya, yang diuji untuk memastikan bahwa sumber cahaya yang digunakan stabil sehingga tidak menimbulkan gangguan pada pembacaan absorbansi. Setiap variasi warna RGB memiliki intensitas yang berbeda-beda. Sensor BH1750 yang digunakan membaca intensitas cahaya berdasarkan gelap dan terang, sehingga warna hijau yang terlihat paling cerah menghasilkan nilai intensitas tertinggi, diikuti merah, dan biru terendah. Kombinasi antara hijau dan merah menghasilkan intensitas yang paling tinggi karena kedua kanal tersebut direspons kuat oleh sensor (ROHM, 2011). Pada pengujian tanpa *diffuser*, nilai intensitas tertinggi tercatat sebesar 395,52 lux yang pada warna kuning (A21) dan nilai intensitas terendah sebesar 79,69 lux pada warna biru (A7). Nilai intensitas setiap warna diuji

stabilitasnya dan hasilnya menunjukkan adanya fluktuasi intensitas cahaya, namun dalam interval perubahan yang relatif kecil, seperti pada Gambar 4.1. Hal ini juga ditunjukkan oleh seluruh 36 variasi warna yang memiliki nilai %RSD tidak melebihi 1%, sehingga dikategorikan stabil berdasarkan kriteria analisis instrumentasi yaitu $RSD \leq 5\%$ (Robinson *et al.*, 2004). Data lengkap hasil pengujian stabilitas tanpa *diffuser* ditunjukkan pada Lampiran 6.

e. Stabilitas Cahaya dengan *Diffuser* 0,3 mm

Penggunaan *diffuser* dengan ketebalan 0,3 mm memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai intensitas dan stabilitas cahaya RGB. Hasil pengujian menunjukkan nilai intensitas mengalami penurunan pada seluruh 36 variasi warna, dengan nilai tertinggi sebesar 90,87 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 14,17 lux pada warna biru (A7). Penurunan intensitas terjadi karena cahaya yang melewati *diffuser* sebagian diserap dan dipantulkan kembali (Kim, 2005; Kondász *et al.*, 2018). Selanjutnya, hasil stabilitas intensitas menunjukkan pengurangan fluktuasi cahaya. Seperti pada Gambar 4.2, nilai %RSD seluruh warna cahaya juga berada di bawah 1% dan beberapa memiliki nilai 0%, sehingga dikategorikan stabil. Hal ini dapat dijelaskan karena LED RGB bersifat *point source*, sehingga tanpa *diffuser* pergeseran kecil atau perubahan arus akan mengubah nilai intensitas yang terbaca oleh sensor. Ketika menggunakan *diffuser* cahaya dihamburkan ke berbagai arah, sehingga sensor membaca nilai intensitas yang tersebar merata bukan dari satu titik. Kondisi tersebut yang menyebabkan fluktuasi intensitas berkurang dan nilai %RSD menurun (Chen *et.al.*, 2015). Data lengkap hasil pengujian stabilitas menggunakan *diffuser* 0,3 mm ditunjukkan pada Lampiran 6.

f. Stabilitas Cahaya dengan *Diffuser* 0,6 mm

Seperti tren homogenitas cahaya, penggunaan *diffuser* dengan ketebalan 0,6 mm juga memberikan peningkatan stabilitas intensitas cahaya RGB dibandingkan dengan ketebalan 0,3 mm. Nilai intensitas juga menunjukkan penurunan seiring dengan bertambahnya ketebalan, dengan nilai tertinggi sebesar 48,36 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 7,92 lux pada warna biru (A7). Penurunan tersebut terjadi karena semakin tebalnya *diffuser* yang memperpanjang

lintasan optis cahaya di dalam material, sehingga semakin banyak cahaya mengalami absorpsi dan pemantulan. Stabilitas intensitas cahaya menunjukkan seluruh variasi memiliki nilai %RSD di bawah 1% dengan sebagian besar bernilai 0%, sehingga dikategorikan stabil, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Peningkatan stabilitas ini sejalan dengan efek hamburan yang lebih tinggi pada *diffuser* yang lebih tebal, yang menyebabkan cahaya RGB tercampur merata sehingga variasi intensitas semakin mengecil. Data lengkap hasil pengujian stabilitas menggunakan *diffuser* 0,6 mm ditunjukkan pada Lampiran 6.

g. Ketebalan *Diffuser* Optimum

Berdasarkan hasil optimasi penggunaan *diffuser*, ketebalan 0,6 mm dipilih sebagai kondisi optimum karena menghasilkan 36 variasi warna yang homogen dengan stabilitas intensitas tertinggi, ditunjukkan dengan nilai %RSD sebagian besar warna mendekati 0%. Meskipun demikian, *diffuser* 0,6 mm menyebabkan penurunan intensitas yang signifikan dibandingkan kondisi tanpa *diffuser*, dengan nilai intensitas tertinggi turun dari 395,52 lux menjadi 48,36 lux. Oleh karena itu, diperlukan adanya optimasi komponen optis tambahan berupa lensa fokus untuk meningkatkan nilai intensitas cahaya tanpa mengurangi homogenitas warna, sehingga mendapatkan sumber cahaya kolorimeter multi spektra yang optimum.

4.1.2 Pengaruh Sudut Lensa Fokus terhadap Homogenitas dan Intensitas Cahaya

a. Homogenitas, Intensitas, dan Stabilitas Cahaya pada Lensa Sudut 15°

Optimasi penggunaan lensa fokus bertujuan untuk meningkatkan intensitas sumber cahaya yang telah berada dalam kondisi optimum dengan *diffuser* 0,6 mm. Pengujian menggunakan lensa fokus dengan sudut 15° menunjukkan bahwa seluruh 36 variasi warna cahaya RGB menghasilkan pola pencahayaan yang homogen (Gambar 4.4 a). Lensa sudut 15° memiliki geometri optik berupa rongga *cone* yang dalam dan *beam angle* yang kecil, sehingga cahaya melewati jalur refleksi internal total (TIR) yang seragam di sepanjang dinding *cone*. Kondisi ini menyebabkan semua kanal (merah, hijau, biru) melewati jalur optik yang sama di dalam rongga, sehingga tidak terjadi pemisahan spasial antar warna dan distribusi intensitas cahaya tetap homogen (Vu *et al.*, 2020).

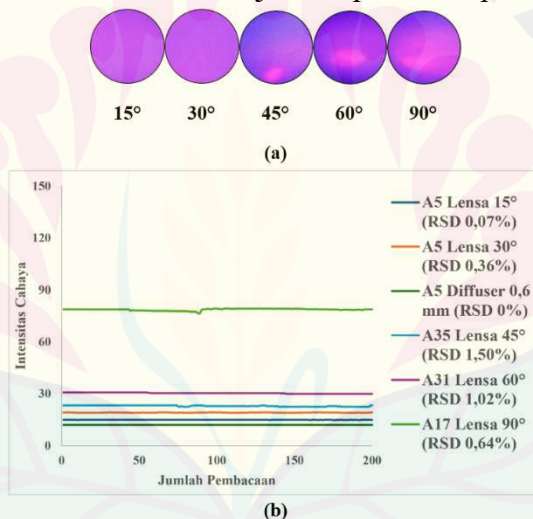
Nilai intensitas dengan penambahan lensa sudut 15° lebih tinggi dibandingkan kondisi hanya menggunakan *diffuser* 0,6 mm, dengan nilai tertinggi sebesar 52,08 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 10,42 lux pada warna biru (A7). Peningkatan intensitas terjadi karena lensa sudut 15° mengumpulkan fluks cahaya yang sebelumnya tersebar oleh *diffuser* dan mengarahkannya melalui *cone*, sehingga intensitas yang sampai pada sensor meningkat. Hal ini sesuai yang dilaporkan oleh (Vu *et al.*, 2020), bahwa sistem optik kolimasi dapat memfokuskan cahaya yang menyebar. Hasil pengujian stabilitas intensitas menunjukkan nilai %RSD seluruh variasi warna tidak melebihi 1% dan beberapa masih memiliki nilai 0%, sehingga dikategorikan stabil. Nilai %RSD pada beberapa warna lampu mengalami sedikit peningkatan dibandingkan kondisi *diffuser* 0,6 mm tanpa lensa. Warna A5 seperti pada Gambar 4.4 b, menunjukkan nilai %RSD 0,07 %, sedangkan pada kondisi *diffuser* 0,6 mm, nilai %RSD tercatat sebesar 0%. Peningkatan ini disebabkan oleh karakteristik lensa fokus yang mengolimasi cahaya, sehingga muncul kembali variasi kecil pada intensitas yang terdeteksi oleh sensor (Vu *et al.*, 2020). Hasil pengujian optimasi menggunakan lensa sudut 15° secara keseluruhan ditunjukkan pada Lampiran 6.

b. Homogenitas, Intensitas, dan Stabilitas Cahaya pada Lensa Sudut 30°

Pengujian lensa fokus selanjutnya dilakukan dengan sudut 30° , yang menunjukkan bahwa seluruh 36 variasi warna RGB masih menghasilkan pola pencahayaan yang homogen (Gambar 4.4 a). Lensa sudut 30° juga memiliki rongga *cone* yang dalam dengan *beam angle* yang sedikit lebih besar dari lensa sudut 15° . Geometri optik tersebut masih memungkinkan untuk cahaya mengalami proses TIR dengan efektif, sehingga distribusi spasial seluruh warna RGB tetap seragam tanpa terbentuk *hotspot*.

Nilai intensitas tertinggi pada penambahan lensa sudut 30° tercatat sebesar 71,28 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 13,32 lux pada warna biru (A7). Nilai intensitas tersebut lebih tinggi dibandingkan saat hanya menggunakan *diffuser* 0,6 mm maupun kombinasi dengan lensa sudut 15° . Peningkatan intensitas ini tidak hanya disebabkan oleh efek kolimasi, tetapi juga karena *beam angle* yang lebih besar dibandingkan lensa sudut 15° . Semakin besar

beam angle, semakin banyak fluks cahaya yang dapat dikumpulkan dan diarahkan keluar menuju titik pengukuran, sehingga nilai intensitas cahaya yang terukur meningkat. Secara teoritis, sudut lensa yang lebih kecil meningkatkan kefokusan cahaya. Namun, pada jarak dekat sudut yang sangat sempit (15°) efisiensi transmisi optis lensa berkurang (Syu *et al.*, 2019). Hasil pengujian stabilitas intensitas cahaya menunjukkan bahwa seluruh 36 variasi warna juga memiliki nilai %RSD di bawah 1% dan beberapa bernilai 0%, sehingga dikategorikan stabil. Peningkatan %RSD juga terjadi pada lensa sudut 30° , konsisten dengan efek kolimasi yang telah dijelaskan sebelumnya. Warna A5 yang sebelumnya memiliki nilai %RSD sebesar 0% pada penggunaan *diffuser* 0,6 mm, meningkat menjadi 0,036% pada kombinasi dengan lensa sudut 30° , seperti pada Gambar 4.4 b. Secara keseluruhan hasil pengujian menggunakan lensa 30° ditunjukkan pada Lampiran 6.



Gambar 4.4 a. Homogenitas Warna A1 RGB (102,0,153); b. Stabilitas Variasi Lensa

c. Homogenitas, Intensitas, dan Stabilitas Cahaya pada Lensa Sudut 45°

Berdasarkan pengujian menggunakan lensa fokus sudut 45° , pola pencahayaan yang dihasilkan oleh 36 variasi warna RGB menunjukkan adanya *hotspot* cahaya merah pada warna-warna yang melibatkan komponen kanal merah (Gambar 4.4 a). Hal ini terjadi karena lensa dengan sudut 45° memiliki rongga *cone* yang lebih dangkal dan *beam angle* yang lebih besar dibandingkan lensa sudut 15° dan 30° , sehingga cahaya RGB tidak cukup efektif mengalami pantulan TIR di sepanjang dinding *cone* sebelum keluar. Akibatnya cahaya merah yang memiliki

indeks bias paling kecil dibelokkan sedikit dari pusat *beam angle*, sedangkan cahaya hijau dan dibelokkan lebih jauh ke arah tepi (Hecht, 2017). Warna yang tetap menghasilkan pola pencahayaan homogen adalah warna A7 hingga A14. Warna-warna tersebut dari kanal biru murni atau kombinasi biru dan hijau tanpa melibatkan kanal merah, kecuali warna A14 yang mengandung komponen merah sangat kecil sehingga *hotspot* tidak terlihat.

Nilai intensitas tertinggi tercatat sebesar 76,81 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 15,42 lux pada warna biru (A7). Nilai intensitas ini lebih tinggi dibandingkan dengan lensa sudut 15° dan 30°, sebanding dengan semakin besarnya *beam angle* yang meningkatkan jumlah fluks cahaya menuju titik pengukuran. Hasil pengujian stabilitas intensitas menunjukkan peningkatan nilai %RSD dibandingkan lensa 15° dan 30°, dengan tiga warna mencapai nilai di atas 1%, namun semua variasi warna masih berada di bawah 5%, sehingga dikategorikan stabil. Salah satunya pada Gambar 4.4 b, warna A35 yang memiliki nilai %RSD sebesar 1,5%. Peningkatan nilai %RSD ini sebanding dengan semakin besarnya *beam angle* yang menyebabkan semakin banyak fluks cahaya yang terkolidasi. Hasil pengujian optimasi lensa sudut 40° secara keseluruhan ditunjukkan pada Lampiran 6.

d. Homogenitas, Intensitas, dan Stabilitas Cahaya pada Lensa Sudut 60°

Pengujian menggunakan lensa fokus sudut 60° menunjukkan karakteristik pola pencahayaan seperti lensa 45°, yaitu memiliki *hotspot* cahaya merah pada variasi warna yang memiliki komponen kanal merah (Gambar 4.4 a). Lensa dengan sudut 60° juga memiliki geometri optik berupa rongga *cone* yang dangkal dan *beam angle* yang lebih besar dari lensa sudut 45°. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa *hotspot* muncul karena proses TIR pada cahaya tidak berjalan efektif akibat dari *cone* yang dangkal. Warna yang sama yaitu A7 hingga A14 merupakan warna dengan pola pencahayaan yang tetap homogen pada lensa sudut 60°.

Nilai intensitas tertinggi tercatat sebesar 87,44 lux pada warna kuning (A21) dan nilai terendah sebesar 15,83 lux pada warna biru (A7), hasil ini telah sesuai dengan penjelasan sebelumnya yaitu peningkatan intensitas sebanding dengan besarnya *beam angle*. Pengujian stabilitas intensitas cahaya menunjukkan hanya 1

warna memiliki nilai %RSD di atas 1%, dan variasi warna lainnya nilainya di bawah 1%, sehingga dikategorikan stabil. Seperti pada Gambar 4.4 b, warna yang memiliki %RSD lebih dari 1% adalah warna A31 dengan nilai 1,02%. Jumlah warna dengan %RSD di atas 1% lebih sedikit dibandingkan lensa sudut 45°, yang kemungkinan disebabkan oleh *beam angle* yang terlalu besar sehingga cahaya cenderung tersebar lebih merata sebelum mencapai titik pengukuran, dan variasi intensitas kembali berkurang. Hasil pengujian menggunakan lensa 60° secara keseluruhan ditunjukkan pada Lampiran 6.

e. Homogenitas, Intensitas, dan Stabilitas Cahaya pada Lensa Sudut 90°

Pengujian menggunakan lensa fokus sudut 90° menunjukkan pola pencahayaan yang sama seperti lensa 45° dan 60°, yaitu *hotspot* cahaya merah tetap muncul pada warna yang melibatkan kanal merah (Gambar 4.4 a). Lensa sudut 90° memiliki rongga *cone* yang paling dangkal dan *beam angle* paling besar di antara semua variasi sudut yang diuji. Warna yang tetap menghasilkan pola pencahayaan homogen adalah warna A7 hingga A15, yaitu warna yang tidak memiliki kanal merah atau hanya dalam jumlah kecil. *Hotspot* yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan lensa sudut 45° dan 60°, hal ini mungkin disebabkan oleh rongga *cone* yang sangat dangkal sehingga efek kolimasi melemah dan cahaya merah ikut tersebar lebih luas mendekati kondisi tanpa kolimasi.

Nilai intensitas tertinggi tercatat sebesar 95,42 lux pada warna kuning (A21) dan terendah sebesar 17,50 lux pada warna biru (A7), sesuai dengan tren peningkatan intensitas yang sebanding dengan semakin besarnya *beam angle*. Stabilitas intensitas cahaya pada lensa 90° ditunjukkan seperti pada Gambar 4.4 b, di mana seluruh 36 variasi warna memiliki nilai %RSD di bawah 1%. Hal ini konsisten dengan penjelasan sebelumnya, bahwa *beam angle* yang terlalu besar cenderung menyebabkan cahaya tersebar lebih merata dan variasi intensitas berkurang. Hasil pengujian menggunakan lensa 90° secara keseluruhan ditunjukkan pada Lampiran 6.

f. Kombinasi dengan Sudut Lensa Optimum

Berdasarkan hasil pengujian optimasi sumber cahaya kolorimeter multi spektra dengan variasi ketebalan *diffuser* dan variasi sudut lensa fokus, maka

penggunaan *diffuser* 0,6 mm dengan kombinasi lensa fokus sudut 30° dipilih sebagai kondisi optimum. Kondisi tersebut dipilih karena menghasilkan pola pencahayaan yang homogen pada seluruh 36 variasi warna tanpa memunculkan *hotspot*, memiliki nilai intensitas yang lebih tinggi dibandingkan lensa sudut 15°, serta nilai %RSD seluruh warna di bawah 1% sehingga dikategorikan stabil.

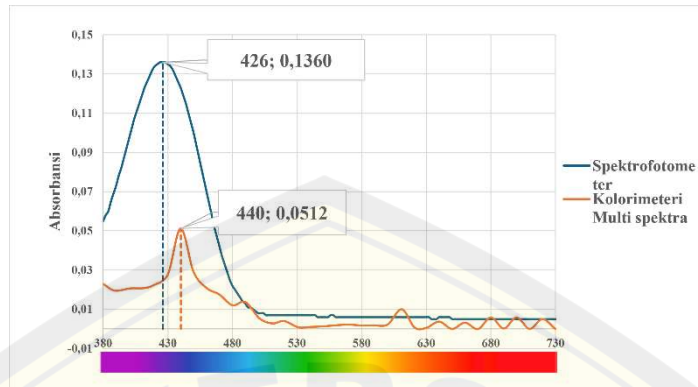
4.2 Perbandingan Profil Senyawa Hasil Pemindaian

Analisis kemiripan profil dilakukan pada tiga larutan standar konsentrasi 12 ppm senyawa *azo dyes*, yaitu *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16*, yang berada pada rentang panjang gelombang maksimum 400-500 nm, dan pada kolorimeter multi spektra direpresentasikan oleh warna maksimum ungu hingga biru-cyan. Profil spektra dibandingkan berdasarkan kemiripan bentuk kurva dan nilai absorbansi maksimum. Setiap warna yang dihasilkan oleh kombinasi dari lampu RGB LED akan memberikan respon pada masing-masing senyawa tersebut, sehingga akan membentuk profil spektra, dan data hasil pemindaian profil ketiga senyawa secara keseluruhan di tunjukkan pada Lampiran 7.

4.2.1 Profil Spektra Senyawa *Acid Yellow 17*

Hasil pemindaian senyawa *acid yellow 17* menggunakan kolorimeter multi spektra menunjukkan profil kurva absorbansi yang serupa dengan hasil spektrofotometer cahaya tampak (Gambar 4.5). Kedua instrumen menunjukkan respon absorbansi yang tinggi pada rentang panjang gelombang 380-500 nm atau warna ungu hingga hijau, kemudian menunjukkan respon yang rendah hingga 730 nm. Pada kolorimeter multi spektra, absorbansi maksimum terdeteksi pada panjang gelombang 440 nm dengan nilai 0,0512, sedangkan pada spektrofotometer cahaya tampak didapatkan pada panjang gelombang maksimum 426 nm dengan nilai 0,1360. Hasil dari spektrofotometer sedikit berbeda dengan yang dilaporkan oleh Farooq *et al.*, (2019), yaitu panjang gelombang maksimum *acid yellow 17* sebesar 400 nm. Pergeseran panjang gelombang maksimum pada spektrofotometer terjadi kemungkinan karena dua faktor, pertama disebabkan oleh *acid yellow 17* yang digunakan merupakan senyawa komersial yang tidak sepenuhnya murni. Faktor kedua, pelarut akuades yang digunakan memiliki pH 6, di mana dapat memengaruhi

kesetimbangan elektronik pada gugus kromofor *azo* yang menyebabkan pergeseran batokromik dan hipsokromik (Shahzadi *et al.*, 2026).



Gambar 4.5 Profil Spektra Standar *Acid Yellow* 17 12 ppm

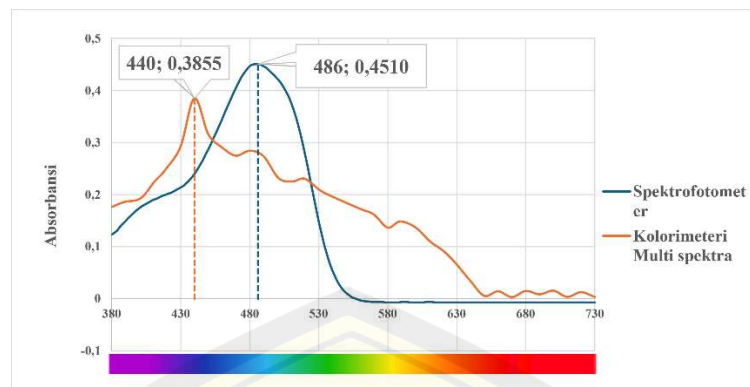
Perbedaan panjang gelombang maksimum antara kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer cahaya tampak kemungkinan disebabkan oleh karakteristik sumber cahaya yang digunakan, di mana 36 konversi warna RGB yang digunakan belum merepresentasikan panjang gelombang 380-730 nm dengan interval 10 nm secara tepat. Hal ini juga didukung LED RGB yang memiliki pita serapan relatif lebar sehingga setiap warna yang dihasilkan tidak dapat secara presisi merepresentasikan panjang gelombang tunggal. Pergeseran juga dimungkinkan karena intensitas awal (I_0) pada warna biru (440 nm) paling rendah, sehingga sensor BH1750 yang membaca intensitas berdasarkan gelap dan terang sangat sensitif pada warna ini. Akibatnya, senyawa yang memiliki panjang gelombang maksimum pada daerah warna ungu hingga biru-cyan cenderung akan terdeteksi pada 440 nm (biru) karena absorbansinya cenderung tinggi, namun bukan sebagai representasi panjang gelombang absolut.

Nilai absorbansi maksimum juga menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kedua instrumen, yaitu 0,0512 pada kolorimeter multi spektra dan 0,1360 pada spektrofotometer. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh ketidaksesuaian warna maksimum, yang secara teoritis untuk *acid yellow* 17 memiliki warna komplementer ungu (420-430 nm), serta sensitivitas instrumen. Pada konsentrasi 12 ppm, *acid yellow* 17 dalam bentuk larutan menghasilkan warna kuning yang sangat lemah. Kolorimeter berbasis LED RGB bekerja dengan prinsip pengukuran absorbansi menggunakan cahaya berwarna diskrit, sehingga kurang sensitif

terhadap larutan berwarna mendekati tidak berwarna. Spektrofotometer cahaya tampak memiliki sensitivitas yang sangat tinggi karena menggunakan sumber cahaya kontinu dengan monokromator yang mampu memisahkan panjang gelombang secara presisi, sehingga dapat mendeteksi konsentrasi senyawa berwarna pada konsentrasi rendah (Cianci, 2023).

4.2.2 Profil Spektra Senyawa *Acid Orange 7*

Pemindaian pada senyawa *acid orange 7* menggunakan kolorimeter multi spektra menunjukkan profil kurva absorbansi yang berbeda dengan spektrofotometer, namun secara garis besar polanya serupa (Gambar 4.6). Kolorimeter multi spektra menunjukkan respon absorbansi yang tinggi pada rentang panjang gelombang 380-600 nm (ungu hingga oranye), kemudian menurun pada rentang panjang gelombang yang lebih tinggi. Sementara itu, spektrofotometer menunjukkan respon yang tinggi pada rentang 380-543 nm dan menurun setelahnya hingga 730 nm. Perbedaan lebar respon absorbansi ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik LED RGB yang memiliki pita lebih serapan lebar, sehingga serapan yang terdeteksi meluas ke panjang gelombang lebih besar. Kondisi ini diperkuat oleh *acid orange 7* yang berwarna oranye pekat, sehingga serapannya secara alami dapat melebar hingga sekitar 600 nm. Nilai absorbansi maksimum pada kolorimeter multi spektra terdeteksi pada panjang gelombang prediksi 440 nm (biru) dengan nilai 0,3855, sedangkan pada spektrofotometer terdeteksi pada panjang gelombang 486 nm dengan nilai 0,4510. Hasil spektrofotometer ini mendekati nilai yang dilaporkan oleh Azam dan Hamid, (2006), yaitu panjang gelombang maksimum *acid orange 7* sebesar 483 nm. Pergeseran kecil tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh jenis senyawa dan pH pelarut seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.



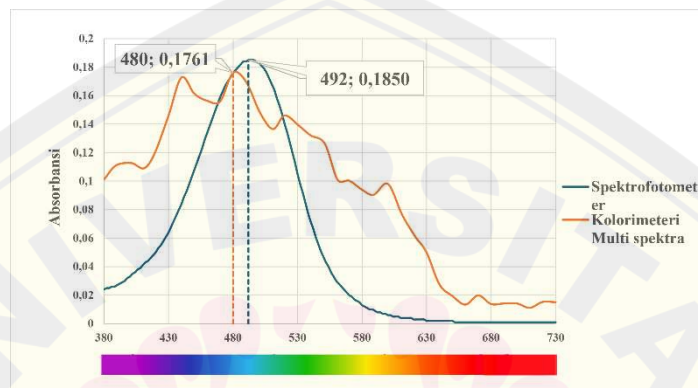
Gambar 4.6 Profil Spektra Standar *Acid Orange 7* 12 ppm

Perbedaan panjang gelombang maksimum antara kedua instrumen disebabkan oleh dua faktor sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Pertama, variasi warna RGB yang belum terbukti merepresentasikan panjang gelombang prediksi secara tepat dan didukung keterbatasan titik diskrit dari cahaya LED RGB. Kedua, warna biru (440 nm) memiliki yang nilai I_0 terendah sehingga cenderung menghasilkan absorbansi tinggi. Perbedaan nilai absorbansi maksimum disebabkan oleh pembacaan yang berada pada panjang gelombang 440 nm (biru) yang kurang sesuai dengan warna komplementer optimalnya, sehingga nilai absorbansi akan terbaca lebih rendah dari yang seharusnya yaitu pada 480 nm (biru-cyan). Nilai absorbansi maksimum dari kedua instrumen memiliki perbedaan yang relatif kecil kemungkinan disebabkan oleh *acid orange 7* yang memiliki warna oranye pekat, sehingga memberikan serapan yang signifikan bahkan di luar panjang gelombang komplementer optimalnya.

4.2.3 Profil Spektra Senyawa *Reactive Orange 16*

Reactive orange 16 memiliki warna yang mendekati *acid orange 7*, yaitu oranye kemerahan. Pemindaian *reactive orange 16* menggunakan kolorimeter multi spektra menunjukkan profil kurva absorbansi yang berbeda dengan spektrofotometer, meskipun secara garis besar pola spektralnya juga masih serupa (Gambar 4.7). Kolorimeter menunjukkan respon absorbansi yang tinggi pada rentang panjang gelombang 380-630 nm (ungu hingga oranye kemerahan), setelah itu memberi respon yang rendah hingga 730 nm. Spektrofotometer menunjukkan respon yang tinggi pada rentang panjang gelombang 380-550 nm, dan juga mengalami penurunan hingga 730 nm. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya,

lampu biru yang merepresentasikan panjang gelombang 440 nm memiliki I_0 paling rendah, sehingga terjadi lonjakan nilai absorbansi yang nilainya hampir mendekati absorbansi maksimum pada 480 nm. Perbedaan bentuk kurva profil absorbansi kemungkinan juga disebabkan oleh karakteristik cahaya LED yang memiliki pita serapan lebih lebar, serta sifat senyawa yang berwarna pekat, sehingga menyebabkan terjadinya pelebaran serapan ke panjang gelombang yang lebih besar.



Gambar 4.7 Profil Spektra Standar *Reactive Orange* 16 12 ppm

Nilai absorbansi maksimum pada kolorimeter multi spektra terdeteksi sebesar 0,1761 pada panjang gelombang prediksi 480 nm (biru-cyan), sedangkan pada spektrofotometer terdeteksi sebesar 0,1850 pada panjang gelombang 492 nm. Hasil spektrofotometer sangat mendekati nilai yang dilaporkan oleh Obulapuram *et al.*, (2021), yaitu panjang gelombang maksimum *reactive orange* 16 sebesar 494 nm, di mana pergeseran kecil juga disebabkan oleh jenis senyawa dan pH pelarut. Hasil dari kedua instrumen dapat dikatakan cukup mirip, di mana *reactive orange* 16 tidak terdeteksi di panjang gelombang prediksi 440 nm karena warnanya kemerahan lebih pekat, sehingga cenderung mendekati daerah spektra hijau. Akibatnya, warna yang terbaca berada relatif dekat dengan panjang gelombang maksimum sesungguhnya. Secara teoritis *reactive orange* 16 seharusnya terdeteksi pada warna biru-cyan yang kuat (490 nm), sesuai dengan panjang gelombang maksimumnya (492 nm). Pergeseran tersebut disebabkan oleh konversi variasi warna RGB yang belum terbukti tepat dengan panjang gelombang prediksi dan didukung dengan keterbatasan titik diskrit dari cahaya LED RGB. Hal ini juga disebabkan I_0 pada 480 nm yang lebih rendah dibandingkan 490 nm, sehingga absorbansi pada 480 nm terbaca lebih tinggi dan terdeteksi sebagai puncak serapan.

4.3 Perbandingan Kinerja Pengukuran Larutan Standar *Azo Dyes*

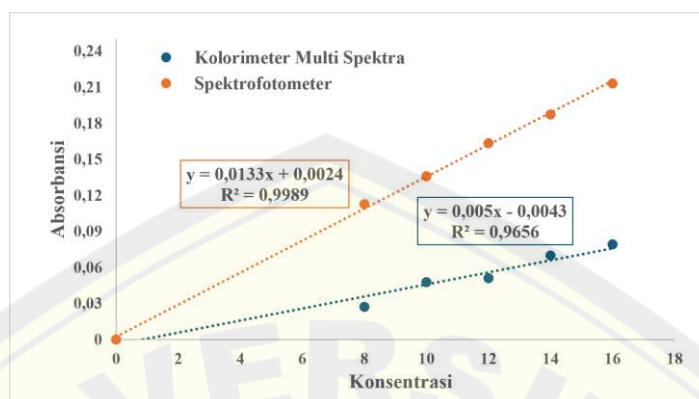
4.3.1 Perbandingan Kurva Kalibrasi Larutan Standar

a. *Acid Yellow 17*

Kurva kalibrasi standar *acid yellow 17* (Gambar 4.8), menunjukkan persamaan regresi linier $y = 0,005x - 0,0043$ untuk kolorimeter multi spektra dan $y = 0,0133x + 0,0024$ untuk spektrofotometer. Persamaan tersebut menunjukkan nilai *slope* spektrofotometer (0,0133) jauh lebih besar dibandingkan kolorimeter multi spektra (0,0050), yang mengindikasikan bahwa sensitivitas spektrofotometer terhadap perubahan konsentrasi jauh lebih tinggi. Hubungan absorbansi dan konsentrasi yang ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) dari kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer masing-masing adalah 0,9656 dan 0,9989. Berdasarkan SNI6989.84:2019, nilai R^2 untuk linieritas adalah $\geq 0,995$ (BSN, 2019). Nilai R^2 kolorimeter multi spektra belum memenuhi kriteria tersebut, sehingga mengindikasikan adanya deviasi dari linieritas Lambert-Beer. Parameter lainnya dari kedua instrumen ditunjukkan pada Tabel 4.1. Kesalahan dan kepresisian pengukuran yang ditunjukkan oleh nilai SD dan %RSD pada kolorimeter multi spektra masing-masing sebesar 0,0056 dan 10,1536%, sedangkan pada spektrofotometer sebesar 0,0025 dan 1,5440%. Nilai SD dan %RSD yang lebih besar dibandingkan spektrofotometer, bahkan melebihi 5%, sehingga presisi pengukuran dengan kolorimeter kurang baik. Kemampuan pengukuran analit yang dapat terdeteksi dan terkuantifikasi ditunjukkan oleh nilai LOD dan LOQ dari masing-masing instrumen, yaitu (3,9018 ppm; 13,0061 ppm) untuk kolorimeter multi spektra dan (0,5662 ppm; 1,8872 ppm) untuk spektrofotometer. Hasil ini menunjukkan bahwa spektrofotometer mampu mendeteksi dan mengukur pada konsentrasi yang jauh lebih rendah, sehingga lebih sensitif dan akurat dibandingkan kolorimeter multi spektra yang memiliki nilai lebih besar.

Seluruh parameter menunjukkan bahwa kolorimeter multi spektra masih memiliki kinerja yang lebih rendah dibandingkan spektrofotometer cahaya tampak untuk pengujian standar *acid yellow 17*. Kinerja yang lebih rendah ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik warna senyawa yang lemah, konversi warna RGB terhadap panjang gelombang prediksi yang belum tepat, dan karakteristik sensor

BH1750 yang membaca intensitas berdasarkan gelap dan terang. Akibatnya, nilai absorbansi yang terbaca pada panjang gelombang prediksi yang tidak optimal cenderung tidak stabil.



Gambar 4.8 Kurva Kalibrasi Standar *Acid Yellow 17*

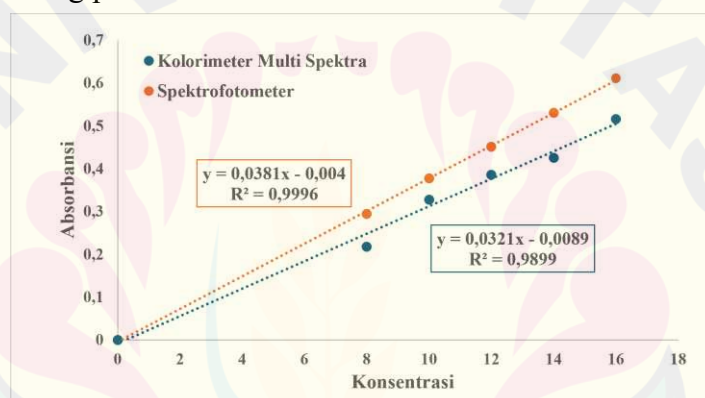
Tabel 4.1 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar *Acid Yellow 17*

Instrumentasi	R ²	Slope	SD	% RSD	LOD	LOQ
Kolorimeter Multi Spektra	0,9656	0,0050	0,0056	10,1536	3,9018	13,0061
Spektrofotometer	0,9989	0,0133	0,0025	1,5440	0,5662	1,8872

b. *Acid Orange 7*

Kurva kalibrasi untuk standar *acid orange 7* (Gambar 4.9) menunjukkan persamaan regresi linier pada kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer masing-masing adalah $y = 0,0321x - 0,0089$ dan $y = 0,0381x - 0,004$. Perbedaan nilai *slope* kedua instrumen terlihat lebih kecil dibandingkan pada standar *acid yellow 17*, ini disebabkan warna senyawa yang lebih kuat sehingga instrumen lebih sensitif. Meskipun demikian, spektrofotometer tetap memiliki sensitivitas lebih tinggi, ditunjukkan dengan nilai *slope* yang lebih besar (0,0381) dibandingkan kolorimeter multi spektra (0,0321). Hubungan absorbansi dan konsentrasi yang ditunjukkan oleh nilai R² dari kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer masing-masing adalah 0,9899 dan 0,9996. Pada kolorimeter multi spektra menunjukkan bahwa belum memenuhi syarat nilai R² untuk linieritas yaitu $\geq 0,995$, sehingga pada pengukuran *acid orange 7* juga mengindikasikan adanya deviasi linieritas. Tabel 4.2 menunjukkan nilai SD dan %RSD sebagai kesalahan dan kepresisian pengukuran untuk kolorimeter multi spektra masing-masing sebesar 0,0297 dan 7,9286%, sedangkan untuk spektrofotometer sebesar 0,0104 dan 2,2936%. Nilai SD dan %RSD kolorimeter multi spektra yang lebih besar

dibandingkan spektrofotometer dan masih melebihi 5%, mengindikasikan presisi pengukuran yang kurang baik. Kemampuan pengukuran analit yang dapat terdeteksi dan terkuantifikasi ditunjukkan oleh nilai LOD dan LOQ dari masing-masing instrumen, yaitu (2,7744 ppm; 9,2480 ppm) untuk kolorimeter multi spektra dan (0,8178 ppm; 2,7259 ppm) untuk spektrofotometer. Hasil ini menunjukkan bahwa spektrofotometer mampu mendeteksi dan mengukur *acid orange 7* pada konsentrasi yang lebih rendah. Semua parameter menunjukkan bahwa spektrofotometer cahaya tampak masih memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan kolorimeter multi spektra untuk pengukuran standar *acid orange 7*. Hal ini juga kemungkinan berkaitan dengan akurasi konversi warna terhadap panjang gelombang prediksi dan karakteristik sensor BH1750.



Gambar 4.9 Kurva Kalibrasi Standar *Acid Orange 7*

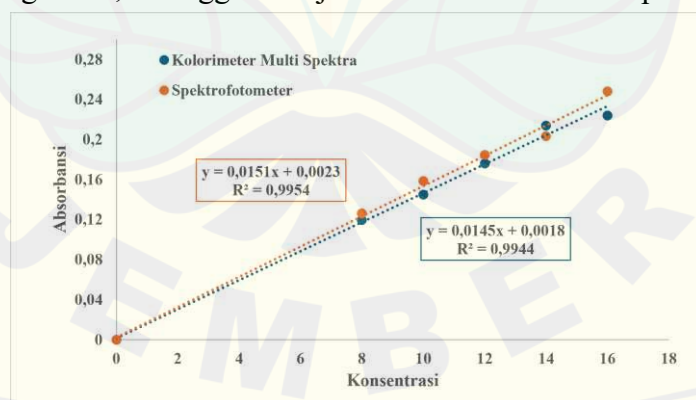
Tabel 4.2 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar *Acid Orange 7*

Intrumentasi	R ²	Slope	SD	% RSD	LOD	LOQ
Kolorimeter Multi Spektra	0,9899	0,0321	0,0297	7,9286	2,7744	9,2480
Spektrofotometer	0,9996	0,0381	0,0104	2,2936	0,8178	2,7259

c. *Reactive Orange 16*

Kurva kalibrasi standar *reactive orange 16* (Gambar 4.10), menunjukkan persamaan regresi linier $y = 0,0145x + 0,0018$ untuk kolorimeter multi spektra dan $y = 0,0151x - 0,0023$ untuk spektrofotometer. Perbedaan nilai *slope* yang menunjukkan sensitivitas kedua instrumen (0,0145 dan 0,0151) relatif sangat kecil dibandingkan dua senyawa sebelumnya. Hal ini selain warna senyawa yang lebih kuat juga karena hasil pengukuran mendekati warna komplementer optimal. Hubungan absorbansi dan konsentrasi yang ditunjukkan dengan nilai R² dari kedua instrumen adalah 0,9944 untuk kolorimeter multi spektra dan 0,9954

spektrofotometer. Nilai R^2 kolorimeter multi spektra meskipun belum memenuhi standar SNI linieritas yaitu $\geq 0,995$, dapat dikatakan cukup baik dan mendekati ambang batas tersebut. Tabel 4.3 menunjukkan nilai SD dan %RSD sebagai kesalahan dan kepresisian pengukuran kedua instrumen, yaitu masing-masing sebesar 0,0068 dan 3,8722% untuk kolorimeter multi spektra, serta 0,0064 dan 3,4580% untuk spektrofotometer. Kedua instrumen memiliki nilai yang hampir sama dan nilai %RSD yang tidak melebihi 5%, sehingga dapat dikatakan memiliki presisi pengukuran yang baik. Meskipun demikian, spektrofotometer tetap menunjukkan nilai SD dan %RSD yang lebih kecil sehingga memiliki presisi pengukuran yang lebih baik. Kemampuan pengukuran analit yang dapat terdeteksi dan terkuantifikasi ditunjukkan oleh nilai LOD dan LOQ dari masing-masing instrumen adalah (1,4089 ppm; 4,6965 ppm) untuk kolorimeter multi spektra dan (1,2655 ppm; 4,1906 ppm) untuk spektrofotometer. Selisih nilai LOD dan LOQ kedua instrumen relatif sangat kecil, menunjukkan bahwa kolorimeter multi spektra memiliki batas deteksi dan batas ukur yang hampir sama dengan spektrofotometer. Hasil ini menunjukkan bahwa pengukuran pada panjang gelombang prediksi yang mendekati warna komplementer optimalnya akan menghasilkan kinerja kolorimeter multi spektra yang semakin mendekati kinerja spektrofotometer. Pengukuran pada warna komplementer optimal cenderung menghasilkan nilai absorbansi yang stabil, sehingga kinerja instrumen akan lebih optimum.



Gambar 4.10 Kurva Kalibrasi Standar *Reactive Orange 16*

Tabel 4.3 Nilai Parameter Turunan Kurva Kalibrasi Standar *Reactive Orange 16*

Intrumentasi	R^2	Slope	SD	% RSD	LOD	LOQ
Kolorimeter Multi Spektra	0,9944	0,0145	0,0068	3,8772	1,4089	4,6965
Spektrofotometer	0,9954	0,0151	0,0064	3,4580	1,2655	4,1906

4.3.2 Koefisien Korelasi Kedua Instrumen

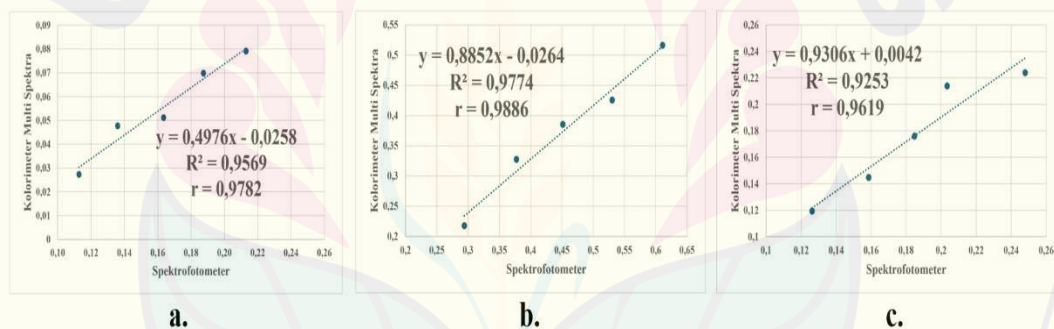
Koefisien korelasi merupakan parameter yang digunakan untuk melihat kesesuaian kinerja dari kedua instrumen. Analisis pertama, yaitu koefisien korelasi pengukuran standar *acid yellow 17* (Gambar 4.11 a), menunjukkan persamaan regresi linier $y = 0,4976x - 0,0258$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9569. Nilai R^2 pada kurva korelasi digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien korelasi *product moment* (r) sebesar 0,9782. Nilai (r) yang mendekati 1 menunjukkan hubungan linier yang kuat antara hasil kolorimeter multi spektra dan spektrofotometer dalam mengukur standar *acid yellow 17*. Kedua instrumen memberikan tren hasil pengukuran yang sejalan atau serupa terhadap sampel yang sama (Puth *et al.*, 2014). Nilai *slope* sebesar 0,4976 yang jauh dari 1 menunjukkan bahwa, meskipun terdapat korelasi yang tinggi, nilai absolut kolorimeter hanya $\approx 49,7\%$ dari spektrofotometer. Intersep sebesar $-0,0258$ yang tidak mendekati 0 menunjukkan adanya perbedaan sistematis yang cukup besar antara hasil pengukuran kedua instrumen untuk *acid yellow 17*.

Analisis kedua, yaitu koefisien korelasi pengukuran standar *acid orange 7* (Gambar 4.11 b), menunjukkan persamaan regresi linier $y = 0,8852x - 0,0264$ dengan nilai (r) sebesar 0,9886, yang mendekati 1. Kedua instrumen juga menunjukkan tren hasil pengukuran yang serupa pada senyawa ini. Berbeda dengan *acid yellow 17*, nilai *slope* pada pengukuran ini sebesar 0,8852 jauh lebih mendekati 1, meskipun belum optimum. Nilai *slope* yang semakin mendekati 1 menunjukkan hasil absolut kolorimeter multi spektra semakin mendekati hasil spektrofotometer, yaitu sebesar $\approx 88,52\%$. Nilai intersep sebesar $-0,0264$ yang juga tidak mendekati 0 menunjukkan bahwa adanya perbedaan sistematis yang cukup besar antara hasil pengukuran kedua instrumen untuk *acid orange 7*.

Analisis ketiga, yaitu koefisien korelasi pengukuran standar *reactive orange 16* (Gambar 4.11 c), yang menunjukkan persamaan regresi linier $y = 0,9306x + 0,0042$, dengan nilai (r) 0,9619, yang juga mendekati 1. Kedua instrumen juga menunjukkan hasil pengukuran yang sejalan dan serupa dengan sampel yang sama. Nilai *slope* yang mendekati 1 yaitu 0,9306 dan intersep yang mendekati 0 yaitu 0,0042, menunjukkan bahwa kinerja kedua instrumen pada pengukuran *reactive*

orange 16 semakin sama. Nilai absolut dari kolorimeter multi spektra hampir sama dengan spektrofotometer yaitu sebesar $\approx 93,06\%$ dan perbedaan sistematis pengukuran yang sangat kecil.

Hasil koefisien korelasi ketiga senyawa standar ini memperkuat penjelasan dari hasil perbandingan parameter kurva kalibrasi dan profil spektra sebelumnya. Pengukuran senyawa pada panjang gelombang prediksi yang sesuai warna komplementer optimalnya merupakan faktor penentu utama kinerja kolorimeter multi spektra. Hal ini menunjukkan bahwa variasi warna RGB LED yang merepresentasikan panjang gelombang prediksi dan sensor yang digunakan memiliki pengaruh besar terhadap akurasi instrumen. Semakin sesuai kombinasi warna RGB dengan panjang gelombang prediksinya, serta spesifikasi sensor dengan spektrum cahaya tampak, kolorimeter multi spektra akan semakin menghasilkan kinerja yang sama dan bahkan bisa berpotensi lebih unggul dari spektrofotometer.



Gambar 4.11 Kurva Korelasi a. *Acid Yellow* 17; b. *Acid Orange* 7; c. *Reactive Orange* 16

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penggunaan *diffuser* LED ketebalan 0,6 mm dan lensa fokus HPL sudut 30° sebagai kondisi optimum menghasilkan 36 variasi warna cahaya yang homogen dengan intensitas meningkat. Peningkatan ketebalan *diffuser* meningkatkan homogenitas tetapi menurunkan intensitas akibat lintasan *scattering* yang lebih panjang. Sebaliknya, pembesaran sudut lensa meningkatkan intensitas, tetapi memunculkan *hotspot* cahaya merah akibat pembiasan cahaya pada rongga *cone* yang lebih dangkal.
2. Profil absorbansi senyawa *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* memiliki pola yang secara umum serupa antara kedua instrumen, namun terjadi pergeseran panjang gelombang maksimum akibat nilai I_0 yang rendah, sehingga sensitif terhadap perubahan kecil. Masing-masing senyawa terdeteksi pada warna A7 (440 nm), A7 (440 nm), dan A11 (480 nm).
3. Kinerja kolorimeter multi spektra untuk pengukuran larutan standar *acid yellow 17*, *acid orange 7*, dan *reactive orange 16* masih berada di bawah spektrofotometer. Namun, pada *reactive orange 16* menunjukkan kinerja yang paling mendekati spektrofotometer karena absorbansi maksimum terdeteksi pada warna yang mendekati komplementer optimalnya. Akurasi konversi warna RGB terhadap panjang gelombang prediksi, serta spesifikasi sensor memberikan pengaruh besar terhadap kinerja instrumen.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan sensor cahaya multispektral seperti AS7341 (8 kanal), AS7343 (8 kanal), atau AS7265x (tiga sensor) yang mampu mengukur intensitas cahaya pada tiap panjang gelombang secara terpisah, serta memperkecil interval variasi warna cahaya dengan konversi panjang gelombang secara aktual, seperti metode Dan Bruton.

DAFTAR PUSTAKA

- Anida, C. N. (2025). Pengembangan kolorimeter multispektra berbasis Arduino Uno untuk analisis formalin. *Skripsi*. Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas, Jember Jember.
- Azam, A., & Hamid. A. (2006). Effects of gap size and UV dosage on decolorization of C.I. Acid Orange 7 by UV/H₂O₂ process. *Journal of Hazardous Materials*, 133(1–3), 167–171.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 6989.84:2019: Air dan air limbah - Bagian 84: Cara uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrometri Serapan Atom (SSA) – nyala*. Badan Standardisasi Nasional.
- Chen, P.-L., Liao, C.-H., Chen, H.-T., Peng, W.-J., Kuo, H.-J., Lin, Y.-H., Tang, Y.-H., & Lee, T.-X. (2015). Effects of various diffuser plates on illumination uniformity for reflective LED module. *International Conference on Optical and Photonic Engineering (IcOPEN 2015)*, 9524(icOPEN), 95241W.
- Choudhury A. K. R. (2014). *Principles of colour and appearance measurement: object appearance, colour perception and instrumental measurement*. Vol. 1. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Cianci, L. (2023). *Colour Theory: Understanding and Working with Colour*. RMIT University Library.
- El Awady, M. E., El-Shall, F. N., Mohamed, G. E., Abd-Elaziz, A. M., Abdel-Monem, M. O., & Hassan, M. G. (2024). Exploring the decolorization efficiency and biodegradation mechanisms of different functional textile azo dyes by *Streptomyces albidoflavus* 3MGH. *BMC Microbiology*, 24(1).
- European Parliament & Council. (2006). *Regulation (EC) No 1907/2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)*. Official Journal of the European Union.
- Farooq, M., Ramli, A., Naeem, A., Shah, L. A., Mahmood, T., Tariq, M., Khan, J., Perveen, F., & Humayun, M. (2019). Photo-catalytic degradation of Acid Yellow 17 azo dye using ZrO₂-CeO₂ hollow microspheres as a catalyst. *Desalination and Water Treatment*, 170, 318–324.
- Gallegos, J., & Stokkermans. T. J. (2023). Lensmaker's equation. In *StatPearls Publishing*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK594278/>.

- Greim, C. (2024). Better representation of the limits of RGB and CMYK Colour spaces. *Innovations in Publishing, Printing and Multimedia Technologies*, 31–40.
- González-Laprea, J., Smith-Rincón, C. E., García-Goitia, M. F., Coronel, M., Fernandez, L., & Borrero-González, L. J. (2025). 3D-Printable RGB LED Photometer Controlled by an Arduino-Python Interface for Molecular Absorption Applications in Chemistry Laboratories. *Journal of Chemical Education*.
- Hecht, E. (2017) *Optics*, 5th ed. Boston: Pearson Education.
- Hoang, L. Q., Chi, H. B. L., Nguyen, D. N. K., Ngo, T. T. V., Phan, X. H., Truong, N. V., Lam, H. T., & Nguyen, N. K. P. (2021). Development of a low-cost colorimeter and its application for determination of environmental pollutants. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 249, 119212.
- Kim, S. M. (2005). Color simulation to demonstrate the effects of the filter layer with CoAl₂O₄ on inner face of CRT panel. *Journal of Information Display*, 6(3), 26–29.
- Kondász, B., Hopp, B., & Smausz, T. (2018). Homogenization with coherent light illuminated beam shaping diffusers for vision applications: spatial resolution limited by speckle pattern. *Journal of the European Optical Society*, 14(1).
- Krupa-Kozak, U., & Drabińska, N. (2022). *Chapter 7 - Additive color mixing dalam Physics in the Arts* (P.U.P.A Gilbert, Ed.; Third Edition). Academic Press.
- Matogaito, A., & Hiramatsu, K. (2013). Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminosity Distribution. *Optics and Photonics Journal*, 03(01), 67–73.
- Mettler Toledo. (2023). *UV/Vis Spectrophotometry: Fundamentals and Applications*. [https://www.mt.com/dam/MT-MX/UVVIS Spectrophoto Guide EN 30256131C V08.21 Original 69649%20\(1\).pdf](https://www.mt.com/dam/MT-MX/UVVIS_Spectrophoto_Guide_EN_30256131C_V08.21_Original_69649%20(1).pdf). [Diakses pada tanggal 30 November 2025].
- Moreno, I., & Sun, C.-C. (2008). Modeling the radiation pattern of LEDs. *Optics Express*, 16(3), 1808.
- Nasreen, A., Praveena, K., Keerthana, P., Manikanta Sai, G., & Uma Soundarya, G. (2025). *A Review of Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectroscopy and Its Practical Applications*. *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*, 8(4), 950-955.

- Noah Cristino. (2020). *Is there any relation between turn on voltage of LED and the colour emitted?* *Physics Stack Exchange*. <https://physics.stackexchange.com/questions/534998/is-there-any-relation-between-turn-on-voltage-of-led-and-the-colour-emitted> [Diakses pada 12 Januari 2026].
- Obulapuram, P. K., Arfin, T., Mohammad, F., Khiste, S. K., Chavali, M., Albalawi, A. N., & Al-Lohedan, H. A. (2021). Adsorption, equilibrium isotherm, and thermodynamic studies towards the removal of reactive orange 16 dye using cu(I)-polyaniline composite. *Polymers*, 13(20).
- Puth, M. T., Neuhauser, M., & Ruxton, G. D. Puth, M. T., Neuhauser, M., & Ruxton, G. D. (2014). Effective use of Pearson's product-moment correlation coefficient. *Animal Behaviour*, 93, 183–189.
- Rahmawati, D., & Yohandri. (2023). Arduino-based Spectrometer Design for Measurement of Liquid Absorbance. *Journal of Experimental and Applied Physics*, 1(1), 67–75.
- Ridwan, A., Wulandari, R., Sepriano, S., Fahrurrozi, M., Darpono, R., & Kharisma, L. P. I. (2023). *Belajar Dasar Mikrokontroler Arduino: Teori & Praktek*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Robinson, J. W., Skelly Frame, E. M., & Frame II, G. M. (2004). *Undergraduate instrumental analysis* (6th ed.). Marcel Dekker.
- ROHM semiconductor. (2011). *Datasheet BH1750FVI*. 11046, 21. www.rohm.com
- Shahzadi, K., Sarfraz, M., Alomar, M., Huwayz, M. Al, & Adediran, A. A. (2026). Designing eco-friendly pH-responsive Azo dyes for sustainable textile fabrics. *Scientific Reports*, 1–14.
- Syu, Y. S., Wu, C. Y., & Lee, Y. C. (2019). Double-sided freeform lens for light collimation of light emitting diodes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(24).
- UNQ. (n.d.). *Polycarbonate Light Diffuser Sheet*. <https://www.unqpc.com/light-diffuser-sheet/>. [Diakses pada tanggal 26 Juni 2026].
- Vu, H., Kieu, N. M., Gam, D. T., Shin, S., Tien, T. Q., & Vu, N. H. (2020). Design and evaluation of uniform LED illumination based on double linear fresnel lenses. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(9).
- Wahyuni, P. S. (2025). Studi Komparasi Kinerja Kolorimeter Multispektra RGB-Arduino Uno dan Spektrofotometer Cahaya Tampak untuk Analisis Pewarna Tekstil. *Skripsi*. Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember, Jember.

LAMPIRAN

Lampiran 1. *Sketch* Pemindaian Kolorimeter Multi Spektra

Lampiran 2. Desain dan Alur Penelitian

Lampiran 3. Preparasi Larutan Standar

Lampiran 4. Prosedur Optimasi *Diffuser* dan Lensa Fokus Cahaya

Lampiran 5. Hasil Rancangan Kolorimeter Multi Spektra

Lampiran 6. Hasil Optimasi Sumber Cahaya

Lampiran 7. Data Hasil Uji Profil Senyawa *Azo Dyes*

Lampiran 8. Data Hasil Pengukuran Larutan Standar *Azo Dyes*

Lampiran 9. Data Hasil Uji Kinerja Instrumen

