

**EFEK LASER MERAH DAN HIJAU PADA HASIL
PENGUKURAN UKURAN PARTIKEL BERBASIS DYNAMIC
LIGHT SCATTERING**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Menempuh Ujian Akhir Tingkat Sarjana
pada Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran

MOHAMAD FAUZI

140310190053



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PADJADJARAN**

2024

**EFEK LASER MERAH DAN HIJAU PADA HASIL
PENGUKURAN UKURAN PARTIKEL BERBASIS DYNAMIC
LIGHT SCATTERING**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Menempuh Ujian Akhir Tingkat Sarjana
pada Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran

MOHAMAD FAUZI

140310190053



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PADJADJARAN**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : Efek Laser Merah dan Hijau Pada Hasil Pengukuran Ukuran Partikel Berbasis Dynamic Light Scattering
Penyusun : Mohamad Fauzi
NPM : 140310190053
Lab : Fisika Instrumentasi

Jatinangor, Desember 2023

Menyetujui,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Ferry Faizal, Ph.D

NIP. 1234567 123456 1 123

Prof. Dr. Eng. I Made Joni, M.Sc

NIP. 1234567 123456 1 123

Mengetahui,

Ketua Program Studi Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Padjadjaran

Prof. Dr. Eng. Camellia Panatarani, M.Si

NIP. 1234567 123456 1 123

KATA PENGANTAR

Prakata berisikan ucapan terima kasih penulis skripsi kepada pihak-pihak yang telah memberikan kontribusi terhadap penulisan skripsi, baik secara institusional maupun secara akademik.

Berikut adalah contoh penulisan rincian yang berisi ucapan terima kasih:

1. Nama pembimbing 1 dan nama pembimbing 2 selaku dosen pembimbing tugas akhir,
2. Rekan-rekan Treddian ...
3. Pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung, terima kasih atas segala dukungan yang diberikan kepada penulis.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan oleh penulis. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu dan teknologi serta bagi pihak-pihak yang membutuhkan.

Jatinangor, Desember 2023

Mohamad Fauzi

ABSTRAK

Pengukuran nanopartikel berbasis *Dynamic Light Scattering* memiliki keunggulan, seperti waktu pengukuran yang cepat dan biaya pengoperasian yang relatif murah tanpa merusak struktur sampel yang diukur, jika dibandingkan dengan metode lain seperti *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Brunauer Emmett Teller* (BET). Pada dasarnya, metode *Dynamic Light Scattering* menggunakan hamburan cahaya dari partikel yang terdispersi. Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang bervariasi. Ketika cahaya diarahkan ke sebuah partikel berukuran tertentu, arah gerak cahaya dapat terhambur dengan sudut hamburan tertentu. Prinsip ini dijelaskan dalam *Rayleigh Scattering* di mana intensitas cahaya yang masuk berbeda dengan intensitas setelah melewati objek, dipengaruhi oleh panjang gelombang dan sudut hamburan cahaya. Ukuran objek juga memengaruhi sudut hamburan cahaya; partikel yang lebih kecil menghasilkan sudut hamburan yang lebih kecil pada panjang gelombang yang sama. Penelitian ini bertujuan membuktikan apakah laser hijau dapat mendeteksi partikel yang lebih kecil dibandingkan dengan laser merah dalam pengukuran *Dynamic Light Scattering*. Rangkaian yang digunakan memanfaatkan komponen yang murah dan mudah ditemukan, seperti Arduino Uno dan fotodioda OPT101. Sudut hamburan dibatasi pada 90° dari arah cahaya laser. Ukuran partikel dihitung dari kumulasi nilai yang terdeteksi oleh sensor, kemudian dilakukan fitting untuk mendapatkan nilai koefisien difusi, menggunakan persamaan Stokes Einstein untuk mendapatkan nilai jari-jari partikel. Hasil pengukuran dari sampel yang diuji, yaitu SiO_2 , berkisar antara $398nm$ dan $619nm$ untuk laser merah, serta $365nm$ untuk laser hijau. Referensi dari karakterisasi PSA, yaitu Z-Average, adalah sebesar $463.1nm$.

Kata kunci: *Dynamic Light Scattering*, Sudut Hamburan, Panjang Gelombang, Cahaya

ABSTRACT

The Dynamic Light Scattering-based nanoparticle measurement offers advantages such as fast measurement time and relatively low operating costs without damaging the structure of the measured sample compared to other methods like Scanning Electron Microscopy (SEM) and Brunauer Emmett Teller (BET). Essentially, Dynamic Light Scattering utilizes the scattering of light from dispersed particles. Light is an electromagnetic wave with varying wavelengths. When light is directed at a particle of a certain size, the direction of light motion can be scattered at a specific scattering angle. This principle is described in Rayleigh Scattering, where the incoming light intensity differs from the intensity after passing through an object, influenced by the wavelength of light and the scattering angle. Object size also affects the scattering angle of light; smaller particles produce smaller scattering angles at the same wavelength. This research aims to determine if green laser can detect smaller particles compared to red laser in Dynamic Light Scattering measurements. The setup uses affordable and readily available components like Arduino Uno and OPT101 photodiode. The scattering angle is limited to 90° from the laser light source. Particle size is calculated from the cumulative values detected by the sensor, followed by fitting to obtain diffusion coefficient values. The Stokes Einstein equation is then employed to derive particle radius values. The tested SiO₂ sample yielded measurements ranging from 398nm to 619nm for red laser and 365nm for green laser, with a reference obtained from PSA, the Z-Average, at 463.1nm

Keywords: *Dynamic Light Scattering, Scattering Angle, Wavelength, Light*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	5
II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Light Scattering	6
2.2. Dynamic Light Scattering	7
2.3. Fotodioda	10

2.4. Mikrokontroler	12
III METODE PENELITIAN	15
3.1. Diagram Alir Penelitian	15
3.2. Perancangan <i>Prototype</i> Instrumen	17
3.2.1. Desain Sistem Instrumen DLS	17
3.2.2. Diagram Blok Rangkaian	18
3.2.3. Hasil Rancangan <i>Prototype</i> Instrumen DLS	19
3.3. Desain Software	20
3.3.1. Pengolahan Data pada Arduino	20
3.3.2. Pengolahan Data pada Python	22
3.4. Pengambilan Data	23
3.4.1. Pengukuran dengan DLS Sederhana	23
3.4.2. Karakterisasi Sampel dengan PSA	24
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1. Hasil Pengujian Blok OPT101	25
4.2. Hasil Pengujian Instrumen Dynamic Light Scattering	28
4.2.1. Data Fluktuasi Sinyal	28
4.2.2. Data Autokorelasi	30
4.2.3. Hasil Karakterisasi Sampel pada PSA	32
4.2.4. Distribusi Data Ukuran Partikel	33
V KESIMPULAN DAN SARAN	35

5.1. Kesimpulan	35
5.2. Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR GAMBAR

2.1	Lambang dan Gambar Fotodioda LED Inframerah	11
2.2	P-N Fotodioda	11
2.3	Fotodioda dengan <i>Transimpedance Amplifier</i> OPT101	12
2.4	Board Arduino Uno R3	13
3.1	Diagram Alir Penelitian	15
3.2	Desain Rangkaian Instrumen DLS dua laser	18
3.3	Diagram Blok Rangkaian DLS Sederhana	18
3.4	<i>Prototype</i> Instrumen DLS Sederhana Dua Laser	20
3.5	Skema Pengolahan Data pada Arduino	21
3.6	Skema Pengolahan Data pada Python	22
4.1	Nilai Output OPT101 terhadap Resistor	26
4.2	Nilai Output OPT101 terhadap Resistor dengan Variasi LED berbeda	
	Intensitas Cahaya	27
4.2	Sampel Nilai Detektor Sensor terhadap Waktu	29
4.2	Sampel Data Autokorelasi terhadap Tau	31
4.3	Distribusi Ukuran Partikel pada PSA	32
4.4	Distribusi 20000 Ukuran Partikel	33
4.5	Perbandingan Hasil Instrumen dengan Karakterisasi PSA	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi dalam pengamatan nanopartikel kini sudah berkembang pesat terutama dalam tes diagnosa untuk penyakit yang berkaitan dengan virus dimana hal tersebut sangat diminati dalam sains dan industri. Sebagai contohnya yaitu pandemi yang melanda dunia selama dua tahun terakhir. Varian Omicron yang tersebar hampir ke seluruh dunia dengan skala penyebaran yang tidak terprediksi dan membahayakan kesehatan. Hal tersebut membuktikan bahwa nanopartikel memiliki sifat fisika dan kimia yang bervariasi. Bagi peneliti, perubahan sifat dari beberapa nanopartikel dapat dimodifikasi dengan perlakuan khusus seperti mengontrol ukuran material maupun komposisi kimiawi[1]. Modifikasi tersebut mempengaruhi pergerakan nanopartikel, saat jarak antar nanopartikel terlalu dekat ataupun terlalu jauh maka tidak akan terjadi tumbukan antar nanopartikel.

Pada saat sebuah partikel bertumbukan dengan partikel lain yang lebih besar, partikel besar dapat membelokkan arah gerak dari partikel kecil. Hal tersebut dapat diinterpretasikan dengan cahaya yang merupakan gelombang atau partikel yang bergerak dengan arah tertentu. Adanya partikel lain yang tersebar di dalam sebuah sistem menyebabkan cahaya tersebut dapat bergerak lurus, dipantulkan, ataupun dihamburkan ke arah tertentu. Hal tersebut dikuatkan dalam percobaan penghamburan cahaya yang dilakukan John Tyndall dalam penelitian suspensi koloid[2, 3].

Pembelokan cahaya bergantung dari partikel yang membelokkan arah cahaya tersebut. Semakin besar dimensi yang dimiliki partikel, maka pembelokan cahaya akan semakin kecil. Adapun hubungan dari hamburan cahaya oleh partikel dengan ukuran tertentu terhadap panjang gelombang yang mengenai partikel tersebut adalah panjang gelombang sebanding dengan ukuran dari partikel yang ditembakkan oleh cahaya tersebut ($\lambda/d \sim \theta$), dan berbanding terbalik dengan sudut hamburan cahayanya. Hal tersebut yang menjelaskan mengenai warna yang dapat dilihat seperti atmosfer langit yang berwarna biru, api yang berwarna merah, dan lain-lain.

Hamburan cahaya bukan satu satunya cara untuk mengidentifikasi ukuran dari sebuah partikel. Selain dari hamburan cahaya, terdapat beberapa metode lain untuk mengidentifikasi ukuran dari nanopartikel. Sebagai contoh yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan profil permukaan benda dengan menembakan permukaan benda dengan berkas elektron berenergi tinggi. Selanjutnya, Metode *Transmission Electron Microscopy* (TEM) yang memanfaatkan prinsip kerja dari peralatan Rontgen. Terakhir yaitu metode BET yang memanfaatkan fenomena adsorpsi molekul gas di permukaan zat padat. Ketiga metode tersebut dapat merusak atau mengubah komposisi dari zat tersebut. Di sisi lain, pengoperasian dari alat tersebut juga cukup mahal.

Pada penelitian ini digunakan pengukuran dengan menggunakan sistem Dynamic Light Scattering (DLS) yang dilakukan dengan mengamati fluktuasi dari hamburan cahaya laser. Pada spektrum warna, cahaya dengan warna tertentu memiliki panjang gelombang dengan jangkauan tertentu. Partikel yang memiliki ukuran den-

gan jangkauan radius panjang gelombang cahaya tersebut akan memantulkan atau menghamburkan cahaya yang datang. Pada umumnya penggunaan DLS berbasiskan laser merah yang memiliki panjang gelombang di antara $630nm$ hingga $670nm$. Jika menggunakan laser hijau yang memiliki panjang gelombang di antara $520nm$ hingga $532nm$, maka akan didapatkan data hasil pengukuran partikel yang memiliki ukuran lebih kecil dibanding menggunakan laser merah[4]. Selain itu sudut hamburan juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran bergantung dari ukuran partikel yang dapat menghamburkan arah datang laser[5].

Respon dari sensor yang digunakan untuk menangkap fluktuasi hamburan cahaya tersebut berperan besar untuk mengukur ukuran dari partikel. Sensor yang digunakan dalam sistem DLS ini adalah Fotodioda dengan tipe OPT101 dan BPW34. Kedua sensor ini memiliki karakteristik dari Silikon sebagai bahan utama penyusun Fotodioda. Responsivitas dari silikon mempengaruhi konversi dari intensitas cahaya yang masuk menjadi arus listrik. Responsivitas dari silikon merupakan pengukuran sensitivitas cahaya yang datang, dan didefinisikan sebagai rasio dari Fotoelektrik I terhadap daya dari cahaya P pada panjang gelombang tertentu. ($R = I/P$). Responsivitas akan berubah bergantung pada daya dari cahaya pada panjang gelombang tertentu. Di sisi lain sensor memiliki Efisiensi Kuantum yang mengukur efektivitas dari sebuah sensor untuk mengkonversi kuatnya foton menjadi elektron. Hal tersebut mempengaruhi responsivitas dari silikon pada fotodioda terhadap panjang gelombang tertentu. Oleh karena itu penelitian ini diharapkan dapat membuktikan pengaruh panjang gelombang terhadap pengukuran partikel berbasis Dynamic Light

Scattering

1.2. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana efek dari panjang gelombang laser merah dan hijau terhadap hasil pengukuran DLS?
2. Bagaimana responsivitas fotodioda terhadap laser merah dan hijau?

1.3. Batasan Masalah

1. Partikel yang dapat diukur bergantung dari panjang gelombang Laser Merah, Laser Hijau, dan pembacaan fluktuasi nilai dari *Transimpedance Amplifier*
2. Partikel yang akan diukur merupakan partikel terdispersi yang sudah diukur sebelumnya
3. Nilai sudut hamburan yang dibuat 90 derajat dari sudut datang laser

1.4. Tujuan Penelitian

1. Mengidentifikasi hasil dari metode Dynamic Light Scattering antara laser merah dan laser hijau,
2. Menganalisa efek dari panjang gelombang laser merah dan hijau terhadap hasil pengukuran pada Dynamic Light Scattering.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu dapat menganalisa hasil pengukuran dari alat ukur partikel berbasis Dynamic Light Scattering sederhana dengan range pengukuran berdasarkan panjang gelombang Laser Merah dan Laser Hijau

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Light Scattering

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang memiliki sifat layaknya partikel. Dengan adanya dualisme gelombang dan partikel tersebut membuat nanopartikel dapat membelokkan arah gerak dari cahaya tersebut. Apabila cahaya dihamburkan oleh partikel dapat menyebabkan fenomena yang disebut dengan pemantulan, pembiasan atau difraksi. Pada saat berkas cahaya terhamburkan oleh partikel, intensitas dari cahaya yang diteruskan akan berkurang. Peristiwa ini merupakan peristiwa penghamburan cahaya atau *light scattering*[4].

Pada *Static Light Scattering* intensitas dari cahaya yang terhamburkan akan dianalisa dalam bentuk intensitas terhadap waktu yang dimana informasi ini dapat dimanfaatkan untuk pengukuran berat molekular, komposisi oligomeric, dan jari-jari dari makromolekul tersebut. Selain itu, dari data tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk mengukur konformasi kasar dari sebuah protein. Oleh karena itu metode *Light Scattering* ini dapat juga digunakan untuk menganalisa struktur dari sebuah virus[6]

Sistem dari penghamburan cahaya tidak selalu berbasis molekul. Pada dasarnya sendiri pada saat sebuah objek terkena cahaya, objek tersebut dapat memantulkan atau membelokkan arah cahaya tersebut. Oleh karena itu dalam *Light Scattering*, cahaya dari laser tidak akan terlihat oleh mata apabila tidak terpantulkan oleh sebuah

partikel lainnya. Hal tersebutlah yang menyebabkan mengapa langit berwarna biru. Cahaya laser yang terlihat oleh mata kita merupakan hasil dari hamburan partikel di sekitar arah gerak cahaya tersebut.

2.2. Dynamic Light Scattering

Partikel tidak sepenuhnya dalam kondisi diam. Terutama partikel yang tersuspensi dimana terdapat medium lainnya yang membuat partikel tersebut berfluktuasi dari waktu ke waktu. Dari fluktuasi intensitas terhadap waktu didapatkan informasi berupa solusi persamaan dinamika. Analisa terhadap rata rata intensitas yang didapatkan disebut dengan *Static Light Scattering* (SLS) sedangkan kumpulan data hasil dari fluktuasi partikel tersebut disebut dengan *Dynamic Light Scattering* (DLS).

Metode DLS memanfaatkan hamburan elektromagnetik dari partikel yang terdispersi. Medan elektrik dari komponen pada gelombang cahaya laser berinteraksi dengan molekul sampel dengan adanya osilasi dipol elektrik terhadap molekul sampel pada frekuensi yang sama yang menghasilkan emisi cahaya. Cahaya akan terhamburkan ke berbagai arah sembari mempertahankan energi konstan dari foton.

Sebagai contoh, pada sampel yang seringkali digunakan pada biokimia untuk mengidentifikasi sebuah protein yang dimana lebih kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dari laser pada DLS itu sendiri ($< 0.1\lambda$) sehingga cahaya dapat tembus dan terjadi hamburan isotropic seperti yang dijelaskan pada hukum *Rayleigh Scattering*, yaitu merupakan penyebaran radiasi elektromagnetik dari keadaan elektron yang terikat setelah foton tereksitasi ke keadaan yang jauh dari resonansi[7].

Partikel terdispersi dalam suatu medium akan mengikuti sebuah pola pergerakan acak yang disebut dengan gerak Brown. Pada gerak brown, digunakan persamaan *Stokes-Einstein* untuk menghubungkan gerak Brownian dengan ukuran dari partikel[8]. Persamaan dari *Stokes-Einstein* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$D_{\tau} = \frac{k_b T}{6\pi\eta R} \quad (2.1)$$

Dalam hamburan cahaya, ketika laser mengenai molekul, cahaya yang terhamburkan akan menyebar ke segala arah dan intensitas dari hamburan tersebut akan terdeteksi oleh detector. Cahaya monokromatik yang terdeteksi akan mengalami pelebaran Doppler karena pergerakan fluktuatif dari molekul tersebut. Cahaya yang tersebar akan menghasilkan fase yang saling meniadakan atau membangun sinyal yang dapat dideteksi. Akibat adanya fluktuasi tersebut, nilai yang didapatkan dari detektor akan berubah-ubah seiring waktu. Oleh karena itu pada DLS pengukuran berdasarkan dari nilai distribusi dari gerak Brownian[3, 9].

Pada umumnya perubahan intensitas terhadap waktu akan mempengaruhi akurasi dari pengukuran DLS, oleh karena itu terdapat *Auto Corelation Function* yang menghitung rata-rata nilai fluktuasi gerak partikel. Dalam *Corelation Function* orde pertama di antara besaran yang seringkali digunakan yaitu fungsi medan elektromagnetik $g_1(\tau)$ atau dapat didefinisikan dengan persamaan:

$$g_1(\tau) = \frac{\langle E(t)E(t + \tau) \rangle}{\langle E(t) \rangle^2} \quad (2.2)$$

Dalam kondisi ini, dipertimbangkan kondisi stasioner sehingga ketergantungan terhadap waktu t dianggap implisit, sedangkan ketergantungan terhadap τ dianggap eksplisit. Ketika $\tau = 0$ maka nilai dari autokorelasi $g_1(\tau)$ sama dengan 1 dan akan berkurang hingga 0 untuk τ yang lebih besar ketika medan elektromagnetik tidak berkorelasi. Ketika persamaan diatas dihubungkan dengan intensitas cahaya didapatkan persamaan orde kedua temporal fungsi korelasi atau bisa disebut juga *intensity correlation function* yang dapat ditulis:

$$g_2(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle^2} \quad (2.3)$$

Fungsi dari $g_1(\tau)$ dan $g_2(\tau)$ dapat dihubungkan dengan *Siegrt Relation* berdasarkan aproksimasi hamburan bersifat homodyne (Fotodetektor hanya mendeteksi cahaya yang tersebar) [6]. Berdasarkan kondisi tersebut, maka persamaan $g_2(\tau)$ menjadi:

$$g_2(\tau) = B + \beta |g_1(\tau)|^2 \quad (2.4)$$

dimana B merupakan baseline (~ 1) dan β adalah konstanta eksperimental empiris. Untuk monodispersi partikel, faktor korelasi medan magnet $g_1(\tau)$ meluruh secara eksponensial bergantung pada konstanta peluruhan Γ untuk molekul pada gerak *Brownian*.

$$g_1(\tau) = e^{-\Gamma\tau} \quad (2.5)$$

Maka persamaan 2.5 menjadi

$$g_2(\tau) = B + \beta g_1(\tau)^{-2\Gamma\tau} \quad (2.6)$$

Konstanta peluruhan pada persamaan 2.5 berhubungan langsung pada koefisien difusi makromolekul (D_τ) yang dituliskan dalam persamaan.

$$\Gamma = -D_\tau q^2 \quad (2.7)$$

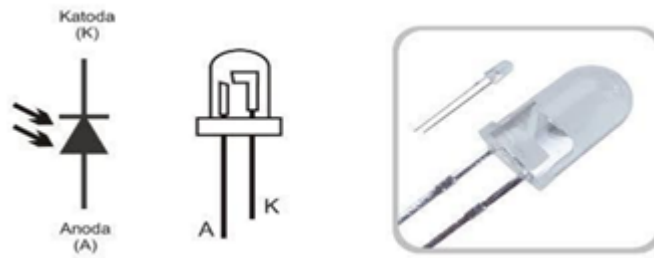
Pada persamaan 2.7 *Bragg Wave Vector* (q) akan proporsional pada medium hamburan (n).

$$q = \frac{4\pi n}{\lambda} \sin(\theta/2) \quad (2.8)$$

dimana λ merupakan panjang gelombang dari cahaya dan θ adalah sudut dimana detektor diletakan.

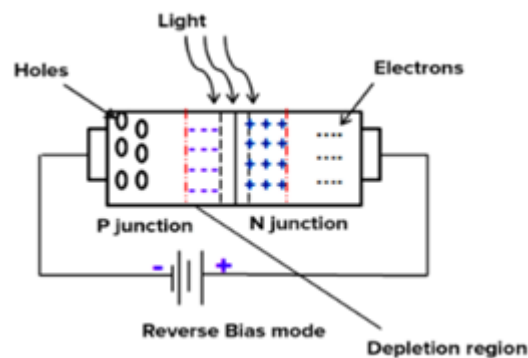
2.3. Fotodioda

Pada umumnya, sensor merupakan perangkat yang merubah stimulus yang masuk ke dalam sensor menjadi suatu sinyal dalam bentuk arus. Sensor cahaya berdasarkan perubahan elektrik yang dihasilkan dibagi menjadi dua jenis, yaitu fotovoltaiik dan fotokonduktif. Salah satu sensor cahaya jenis fotokonduktif adalah sensor fotodioda. Sensor fotodioda dapat merespon stimulus berupa cahaya tampak maupun tidak tampak dan mengkonversi intensitas cahaya yang terdeteksi menjadi arus[10].



Gambar 2.1 Lambang dan Gambar Fotodioda LED Inframerah

Fotodioda adalah suatu jenis dioda yang resistansinya akan berubah-ubah apabila terkena sinar cahaya. Resistansi dari fotodioda dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterimanya, semakin banyak cahaya yang diterima maka semakin kecil resistansi dari fotodioda dan begitupula sebaliknya jika semakin sedikit intensitas cahaya yang diterima oleh sensor fotodioda maka semakin besar nilai resistansinya[10, 11].



Gambar 2.2 P-N Fotodioda

Pada fotodioda, terdapat bahan semikonduktor seperti *silicon* (Si) atau *gallium arsenide* (GaAs) dan lain lain seperti *indium antimonide* (InSb), *lead selenide* (PbSe) dan *timah sulfida* (PbS). Fotodioda memiliki lapisan substrat dengan area depletion sebagai tempat masuknya foton. Pada saat foton masuk ke area depletion, elektron pada N-substrat akan bergerak membuat pasangan lubang-elektron pada katoda

sehingga terjadi arus listrik pada rangkaian fotodioda[12].



Gambar 2.3 Fotodioda dengan *Transimpedance Amplifier* OPT101

Pada prinsipnya fotodioda menghasilkan arus proporsional dari cahaya yang mengenai area aktif dari fotodioda. Kebanyakan aplikasi dari pengukuran sensor ini menggunakan transimpedance amplifier untuk mengkonversi nilai arus menjadi keluaran voltase. Adanya amplifier tersebut dapat mengoperasikan fotodioda dalam mode *photovoltaic* dimana op amp akan membuat voltase di sekitar fotodioda pada 0V. Sebagai contoh terdapat pada OPT101 yang digunakan pada percobaan kali ini.

2.4. Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan perangkat yang memiliki mikro prosesor dengan memori program dan memori serbaguna, lalu didukung oleh fasilitas pendukung lainnya seperti output berupa data ke display layaknya komputer dalam sebuah satu chip komputer sehingga mikrokontroler biasa disebut dengan *single chip computer*. Mikrokontroler ini dapat mengontrol atau mengendalikan sebuah sistem yang telah diprogram dalam chip tersebut. Berbeda dengan mikroprosesor dimana dalam mikrokontroler ini terdapat komponen mikroprosesor yang didukung ADC, PPL,

dan EEPROM dalam satu kemasan [13].



Gambar 2.4 Board Arduino Uno R3

Dalam penelitian ini mikrokontroler yang digunakan merupakan mikrokontroler Arduino yang merupakan platform komputasi fisik berbasis open source yang memiliki rangkaian input/output sederhana dalam mengimplementasikan bahasa processing. Rangkaian ini memiliki IDE (*Integrated Development Environment*) yang bersifat open source sehingga komponen dapat terhubung dengan komponen lainnya tanpa bantuan alat lainnya. Pada perancangannya digunakan papan Arduino Uno R3 yang merupakan board mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328[13]. Spesifikasi dari Arduino Uno R3 sendiri yaitu:

Mikrokontroller	: ATmega328
Tegangan Pengoperasian	: 5 V
Tegangan Input Rekomendasi	: 7-12V
Batas Tegangan Input	: 6-20V
Jumlah Pin I/O Digital	: 14
Jumlah Pin Input Analog	: 6

Arus DC tiap Pin I/O	: 40mA
Arus DC untuk Pin 3.3V	: 50mA
Memori	: 32 KB (ATmega328), sekitar 0.5KB digunakan oleh bootloader
SRAM	: 2KB (ATmega328)
EEPROM	: 1KB (ATmega328)
Clock Speed	: 16 MHz

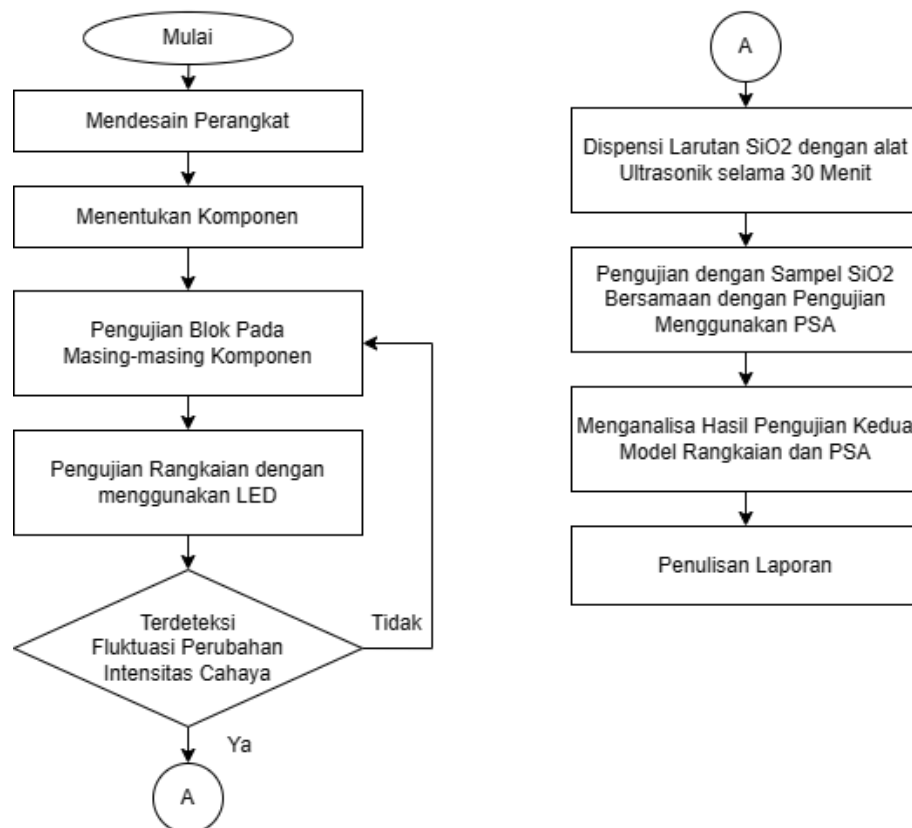
BAB III

METODE PENELITIAN

Bab ini akan menjelaskan mengenai tahapan penelitian dan pengujian komponen untuk perancangan instrumen *Dynamic Light Scattering* dan perencanaan pengolahan data yang dilakukan dengan Arduino dan Python.

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metodologi yang dapat ditunjukkan dengan diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah pada gambar 3.1 dijelaskan sebagai berikut.

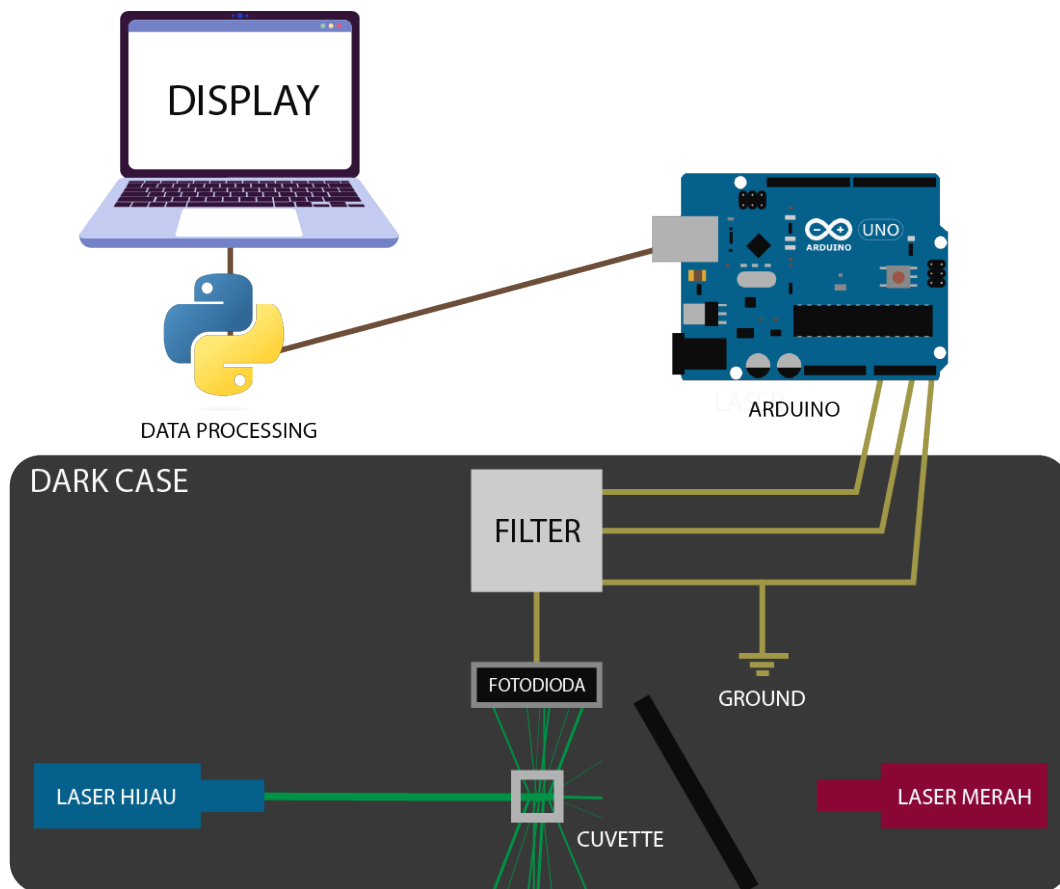
1. Mendesain Perangkat agar dapat memastikan komponen yang dapat digunakan. Desain dari perangkat dibuat berdasarkan referensi yang didapatkan. Untuk membuat ruang gelap digunakan wadah hitam yang digunakan sebagai tempat pengukuran partikel dengan fotodioda. Untuk meminimalisir cahaya luar masuk ke sistem didalam ruang gelap, maka Arduino diposisikan di luar wadah.
2. Menentukan Komponen. Berdasarkan desain yang telah dibuat, penentuan komponen dilakukan untuk menyesuaikan kebutuhan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan pada setiap proses pengambilan data. OPT101 digunakan sebagai fotodioda yang terintegrasi dengan *Transimpedance Amplifier* sehingga tidak memerlukan Amplifier external sebagai filter aktif. Laser yang digunakan adalah modul laser merah 650nm dan modul laser hijau 532nm.
3. Pengujian Blok pada Masing-masing komponen dilakukan untuk meminimalisir error yang dapat terjadi akibat dari salah satu komponen rangkaian. Setiap komponen diuji dengan menggunakan *multimeter* dan *power supply* untuk memastikan keluaran dari komponen.
4. Rangkaian yang telah dirakit diuji dengan LED terlebih dahulu untuk memastikan apakah nilai keluaran sesuai dengan referensi. Nilai keluaran akan diproses dengan ADC (*Analog Digital Converter*) dari sinyal pada sensor dan *Transimpedance Amplifier* yang terdapat pada Arduino.

5. Pengujian dengan sampel dilakukan bersamaan dengan pengujian pada PSA pada ruangan dan suhu yang sama. Sampel yang digunakan merupakan SiO_2 yang telah di ultrasonik selama 30 menit.
6. Analisa Hasil Pengujian. Setelah didapatkan data dari kedua hasil pengujian, maka dilakukan analisa.
7. Penulisan Laporan dilakukan sebagai bukti hasil yang didapat setelah melakukan penelitian.

3.2. Perancangan *Prototype* Instrumen

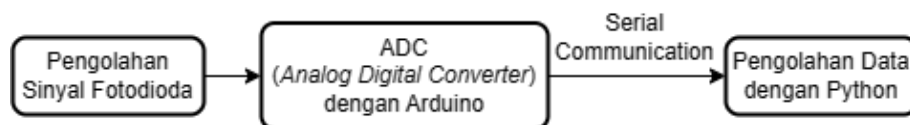
3.2.1. Desain Sistem Instrumen DLS

Rancangan dari rangkaian *Dynamic Light Scattering* sederhana dengan dua laser yang dibuat pada penelitian ini dapat digambarkan dengan Gambar 3.2. Sistem dari DLS dibuat dalam sebuah wadah tertutup gelap agar cahaya dari lingkungan tidak masuk kedalam sistem. Laser merah dan Laser hijau diletakan menghadap kuvet, lalu diletakan stopper pada salah satu sisi agar cahaya laser tidak terpantul kembali ke kuvet. Agar kedua laser dapat digunakan bergantian, masing-masing laser dihubungkan dengan switch yang terhubung dengan pin 5V dari arduino. Pada saat laser ditembakkan ke kuvet, berkas cahaya laser yang terhamburkan oleh partikel pada kuvet akan terdeteksi sensor fotodiode yang diletakan pada sudut 90° dari sudut datang laser. Data yang diterima sensor lalu dikirim menuju Arduino sebagai ADC dan diolah kembali pada program Python hingga didapatkan hasil pengukurannya.



Gambar 3.2 Desain Rangkaian Instrumen DLS dua laser

3.2.2. Diagram Blok Rangkaian



Gambar 3.3 Diagram Blok Rangkaian DLS Sederhana

Diagram 3.3 dapat dijelaskan sebagai berikut.

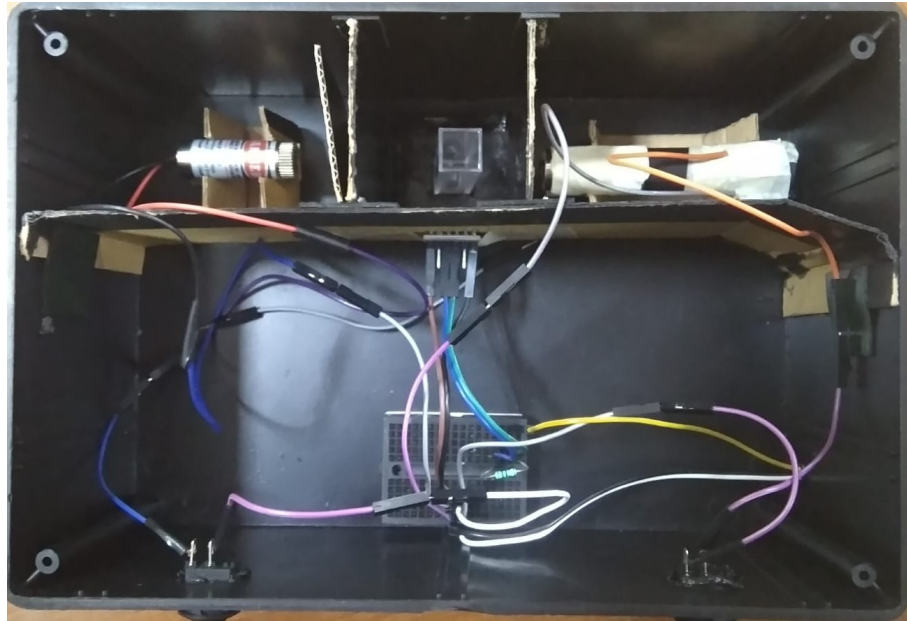
1. Pada instrumen DLS yang dibuat menggunakan fotodioda yang digunakan untuk mendeteksi hamburan cahaya dari pergerakan partikel. Fotodioda yang digunakan sudah terhubung dengan *Transimpedance Amplifier* sehingga sinyal

dari fotodioda dapat diperkuat untuk meningkatkan sensitivitas dari sensor tersebut.

2. Sinyal yang keluar dari sistem fotodioda merupakan sinyal Analog sehingga untuk mengubahnya menjadi sinyal digital diperlukan ADC yang sudah terintegrasi pada Arduino. Sinyal dari Fotodioda terhubung dengan Arduino pada pin input A0.
3. Sinyal yang telah diubah pada arduino disimpan, lalu dikirim menuju device seperti laptop. Device tersebut menerima data dengan serial communication dari Arduino. Data yang diterima akan diolah dengan program Python sehingga didapatkan nilai ukuran partikel.

3.2.3. Hasil Rancangan *Prototype* Instrumen DLS

Rangkaian DLS sederhana dua laser ini terdiri dari sebuah wadah *casing* berbentuk balok yang terbuat dari *polymer* berwarna hitam dengan dimensi $21.5 \times 14.5 \times 8.5 \text{ cm}$. Untuk mengurangi cahaya luar masuk ke sistem fotodioda digunakan sekat yang membatasi kuvet dengan laser. Hasil rancangan alat tersebut dapat dilihat pada gambar 3.4.

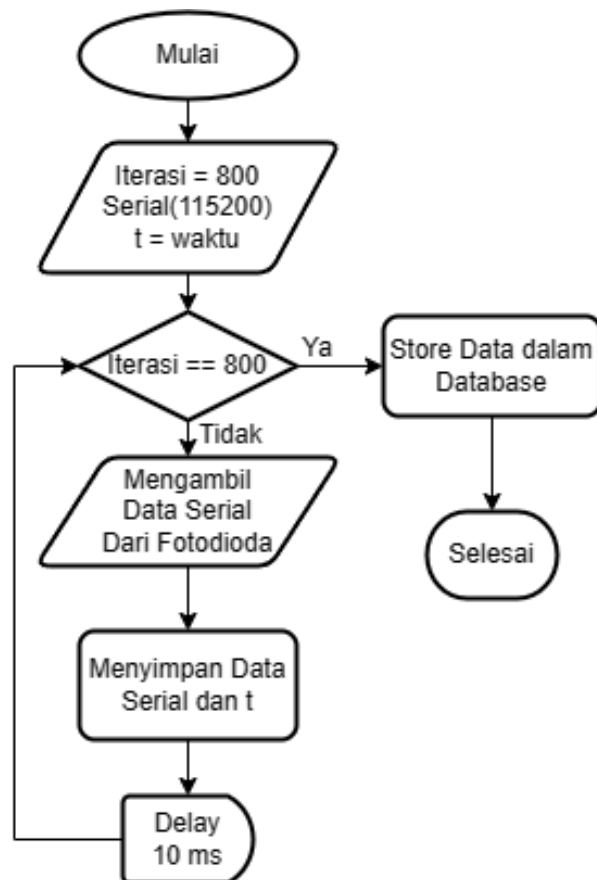


Gambar 3.4 *Prototype* Instrumen DLS Sederhana Dua Laser

3.3. Desain Software

3.3.1. Pengolahan Data pada Arduino

Penjelasan sistematika pengolahan data sensor pada arduino digambarkan pada gambar 3.5

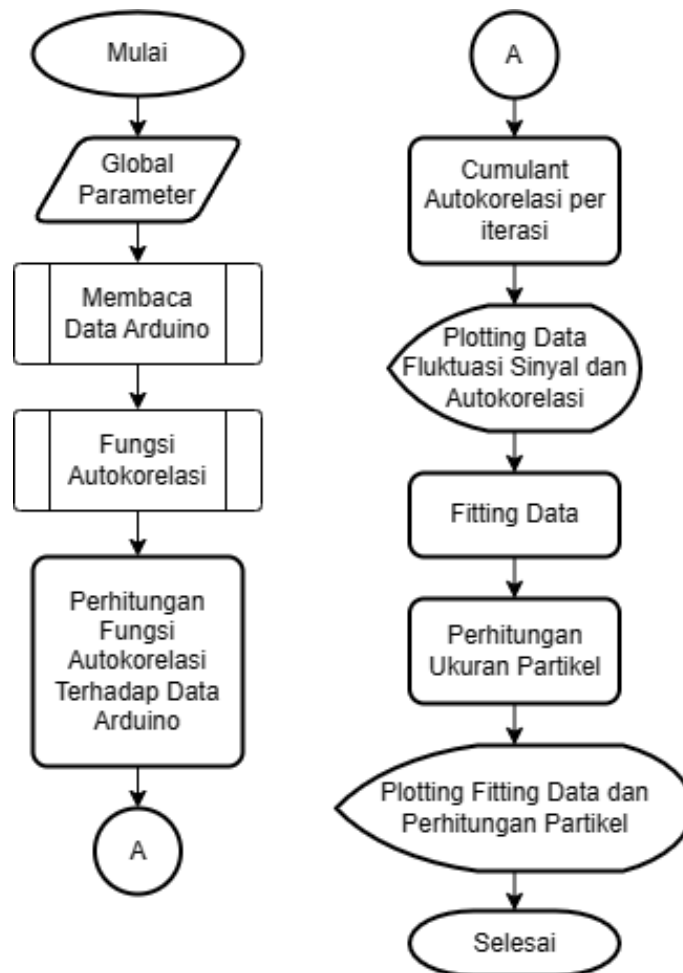


Gambar 3.5 Skema Pengolahan Data pada Arduino

Sinyal yang keluar dari rangkaian fotodiode dan *Transimpedance Amplifier* masuk melalui pin input A0 Arduino. Sinyal tersebut diolah menjadi sinyal digital sehingga dapat dibaca dalam bentuk angka pada komputer. Kecepatan pembacaan data dari sensor diatur dengan serial Arduino yang pada penelitian ini optimumnya menggunakan *baudrate* 115200. Spesifikasi dari Arduino Uno R3 memiliki kapasitas penyimpanan dalam satu iterasi kurang lebih sebanyak 800 data dan akan dibangun dalam bentuk *array*. Durasi iterasi penyimpanan data ditetapkan sebagai variabel t .

3.3.2. Pengolahan Data pada Python

Ketika Arduino terhubung dengan laptop atau perangkat pengolahan data, setiap iterasi akan diolah oleh program Python. Dengan menggunakan library *Serial Communication*, pengiriman data akan berjalan secara otomatis selama Arduino terhubung dengan laptop. Pengolahan data yang diterima oleh laptop dapat digambarkan pada gambar 3.6



Gambar 3.6 Skema Pengolahan Data pada Python

Data yang diterima program Python berupa 800 nilai dari pembacaan sensor dalam waktu t didefinisikan sebagai *Global Parameter*. Selain itu terdapat nilai Pan-

jang gelombang Laser, Indeks Bias, Konstanta Boltzman, Suhu sampel, Viskositas Sampel, dan Sudut Hamburan. Nilai sensor yang dikirim melalui Serial akan diolah menggunakan Fungsi Autokorelasi dengan menggunakan *numpy correlate*. Data hasil autokorelasi tersebut tersimpan dalam bentuk *array*, lalu di plotting sehingga dapat dilakukan fitting data untuk mencari nilai koefisien difusi. Kemudian perhitungan ukuran partikel dilakukan dengan persamaan *Stokes-Einstein* untuk mencari nilai jari-jari partikel berdasarkan koefisien difusi.

3.4. Pengambilan Data

Pengujian alat dilakukan dengan menggunakan sampel *Silika Geothermal* (SiO_2) yang telah di ultrasonik selama 30 menit agar distribusi ukuran partikel dalam pelarut homogen. Pengambilan data dari DLS sederhana dilakukan bersamaan dengan karakterisasi menggunakan PSA pada suhu ruangan ($20^{\circ}C$).

3.4.1. Pengukuran dengan DLS Sederhana

Data yang disimpan pada Arduino merupakan fluktuasi intensitas hamburan cahaya yang terdeteksi pada sensor terhadap waktu. Data tersebut dijadikan variabel untuk perhitungan autokorelasi hingga perhitungan ukuran partikel. Pengujian pada setiap laser dilakukan secara bergantian. Untuk memastikan bahwa perhitungan pada program sesuai, data awal dari sensor disimpan dalam penyimpanan lokal.

Pengambilan data ukuran partikel dilakukan sebanyak 10.000 kali untuk setiap laser. Total data ukuran partikel berjumlah 20.000. Semua data yang terkumpul

tercatat sebagai distribusi ukuran partikel untuk masing-masing laser.

3.4.2. Karakterisasi Sampel dengan PSA

Pada waktu yang sama dilakukan karakterisasi psa untuk mengetahui distribusi ukuran partikel sampel sebagai dasar untuk menganalisa kesesuaian data yang didapatkan dari DLS sederhana. Data keluaran dari PSA berupa distribusi ukuran partikel dan *Z-average* dari sampel tersebut.

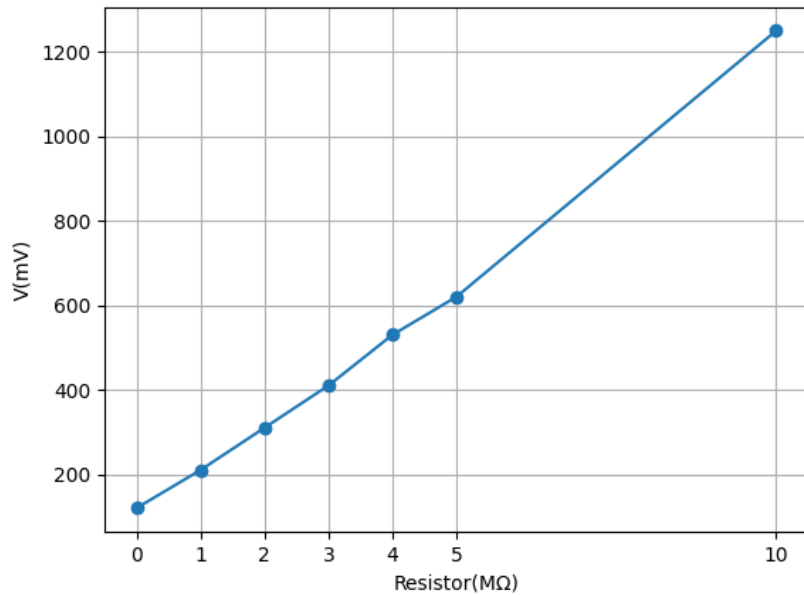
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini dibahas mengenai hasil perbandingan dari pengukuran partikel berbasis Dynamic Light Scattering dengan menggunakan PSA, DLS sederhana dengan laser merah dan hijau.

4.1. Hasil Pengujian Blok OPT101

Fotodioda yang digunakan dalam penelitian ini merupakan OPT101 yang di dalamnya sudah terkombinasi dengan *transimpedance amplifier* dalam satu chip nya sehingga mengurangi error yang bersumber dari kebocoran arus. Oleh karena itu pengujian blok hanya bisa dilakukan dengan memanfaatkan langsung fotodioda sebagai input arus. Sebagai komparasi maka digunakan resistor dengan nilai $1\text{M}\Omega$, $2\text{M}\Omega$, $3\text{M}\Omega$, $4\text{M}\Omega$, $5\text{M}\Omega$, $10\text{M}\Omega$ dan untuk perubahan arus yang akan masuk digunakan LED yang input DC nya terhubung dengan power supply agar nilai Voltasenya dapat diatur untuk merubah intensitas cahaya dari LED.



Gambar 4.1 Nilai Output OPT101 terhadap Resistor

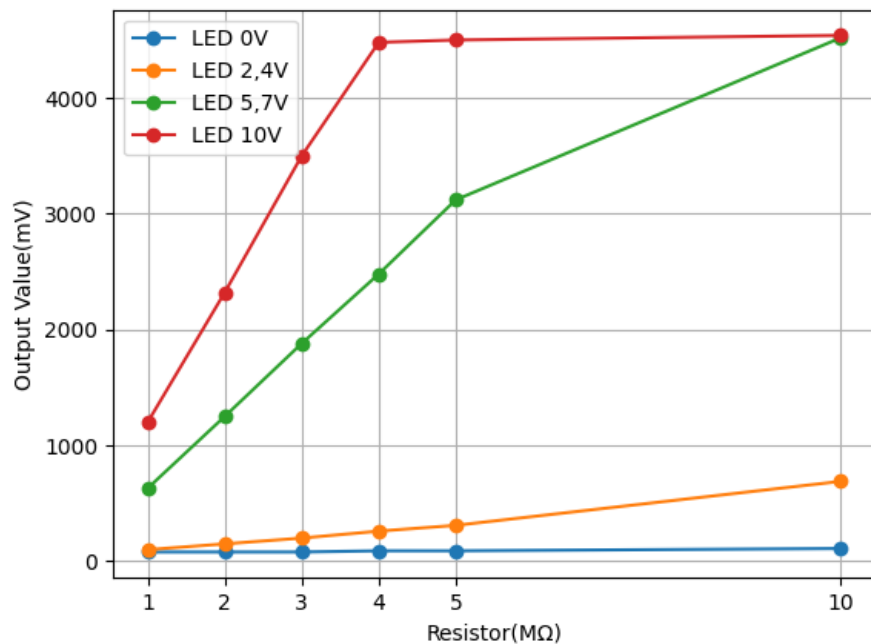
Dari grafik diatas pembesaran nilai tegangan keluaran yang dihasilkan dari rangkaian OPT101 menunjukan hasil yang linear terhadap nilai resistor yang digunakan. IC yang tidak terhubung dengan resistor memiliki nilai keluaran $120mV$, namun nilai tersebut merupakan hasil yang ter invert sebelum melewati rangkaian inverting sehingga perubahan nilai pada saat gelap lebih tinggi dibandingkan saat lebih terang. Setelah diberikan resistor secara inverting pada skema rangkaian *Transimpedance Amplifier*, nilai pembesaran yang diukur dengan menggunakan persamaan:

$$A_v = \frac{V_{output}}{V_{input}} \quad (4.1)$$

didapatkan nilai 1,75 pada resistor $1M\Omega$, 2,58 pada resistor $2M\Omega$, 3,41 pada

resistor $3\text{M}\Omega$, 4,41 pada resistor $4\text{M}\Omega$, 5,16 pada resistor $5\text{M}\Omega$, dan 10,41 pada resistor $10\text{M}\Omega$.

Untuk memastikan bahwa OPT101 mendeteksi perbedaan intensitas cahaya maka dilakukan pengujian dengan memvariasikan intensitas cahaya LED yang diletakkan di depan fotodiode sehingga dihasilkan data sebagai berikut



Gambar 4.2 Nilai Output OPT101 terhadap Resistor dengan Variasi LED berbeda Intensitas Cahaya

Pada saat LED tidak diberikan tegangan, keluaran dari OPT101 di semua ukuran resistor hampir berdekatan pada kisaran 70mV hingga 110mV . Ketika LED diberikan tegangan 2,4V, keluaran dari OPT101 pada setiap ukuran resistor memiliki peningkatan sesuai gain oleh ukuran resistornya. LED yang diberikan tegangan 5,7V dan 10V memiliki intensitas cahaya yang lebih tinggi, namun data menun-

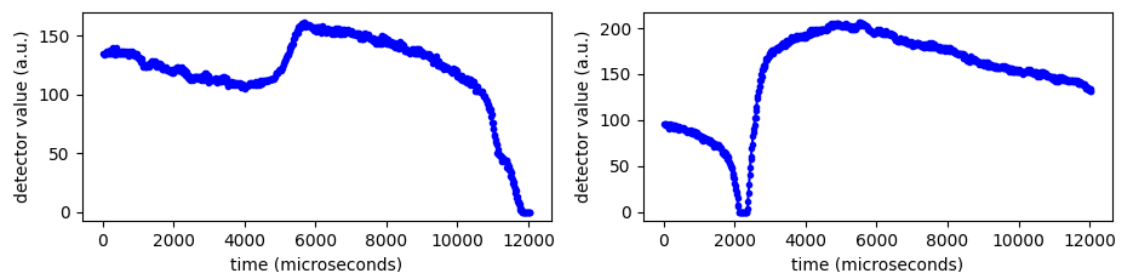
jukan adanya nilai maksimum yang dibatasi oleh fotodiodanya. Output Value yang dihasilkan dari OPT101 hanya dibatasi hingga nilai $4500mV$ sehingga pembesaran yang melebihi nilai $4500mV$ akan memiliki nilai yang menyerupai nilai maksimum tersebut.

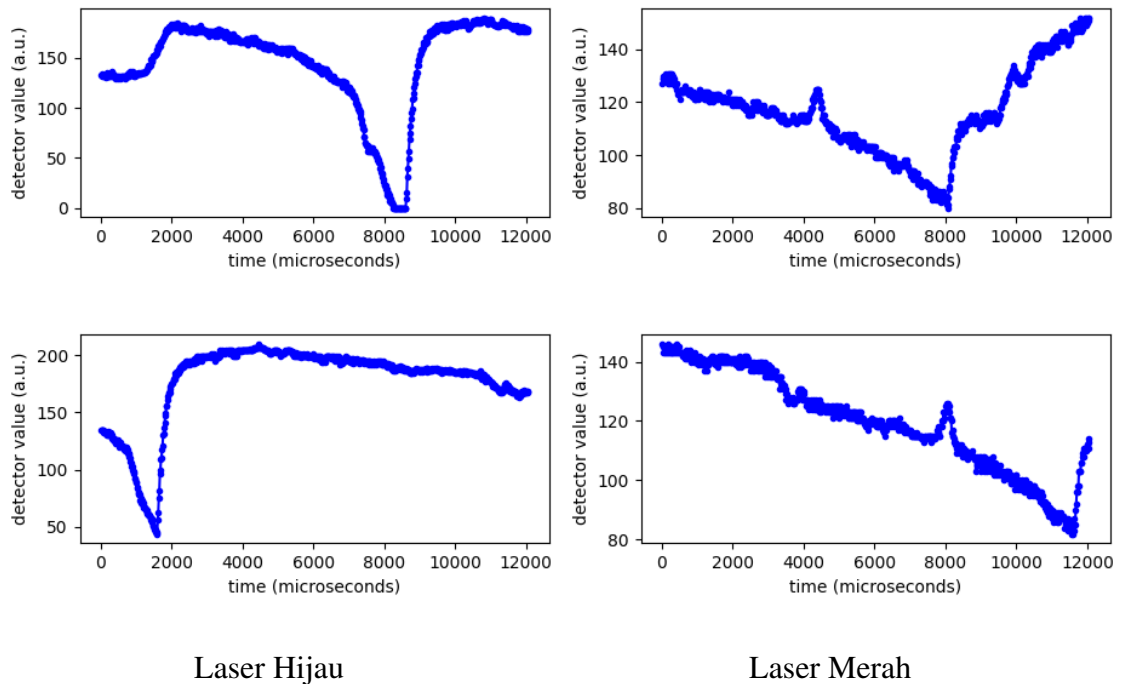
4.2. Hasil Pengujian Instrumen Dynamic Light Scattering

Kedua rangkaian alat yang digunakan merupakan modul rangkaian dengan laser yang berbeda. Satu rangkaian menggunakan laser merah dan rangkaian lainnya menggunakan laser hijau. Pada pengujian ini digunakan sampel SiO_2 dengan pelarut aquades.

4.2.1. Data Fluktuasi Sinyal

Untuk memastikan kesesuaian data dari setiap pengukuran, maka dilakukan beberapa pengukuran untuk membandingkan distribusi persebaran ukuran partikel setiap waktunya dari masing-masing laser.





Gambar 4.2 Sampel Nilai Detektor Sensor terhadap Waktu

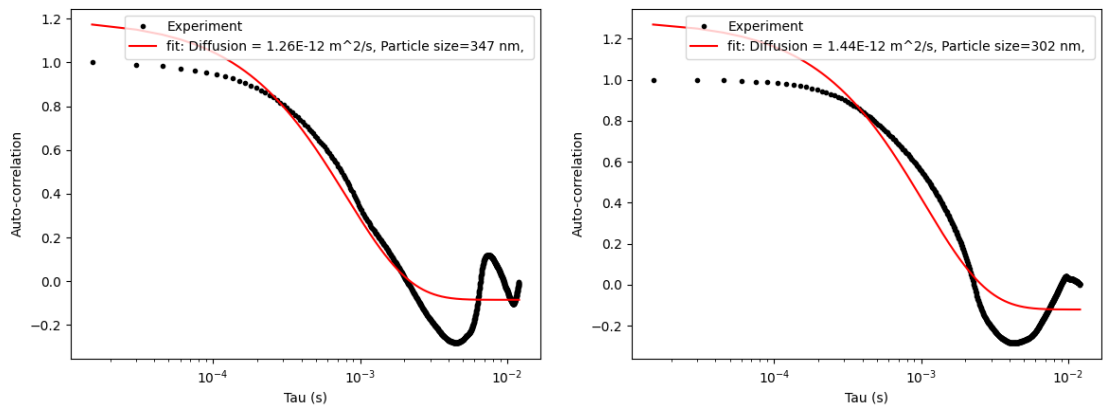
Grafik diatas menunjukkan beberapa data fluktuasi yang diukur melalui 10.000 pengulangan dengan 800 nilai pada setiap pengulangan dalam durasi 12.048 mikrodetik pada masing-masing laser. Melalui grafik dapat dilihat bahwa fluktuasi yang dihasilkan berbeda pada masing-masing laser, data yang terbaca oleh sensor dari hamburan partikel menggunakan laser hijau memiliki pola fluktuasi yang lebih bervariasi dibandingkan dengan laser merah yang seringkali tidak mendeteksi perubahan yang signifikan. Pada rangkaian laser merah fluktuasi yang dihasilkan memiliki pola yang hampir serupa pada setiap pengukurannya.

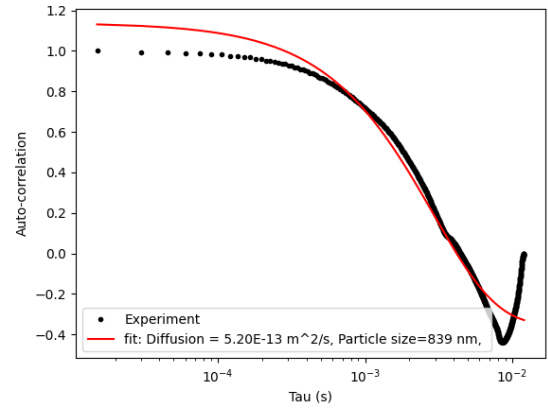
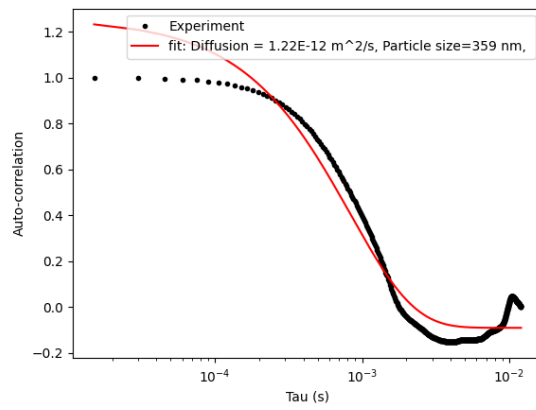
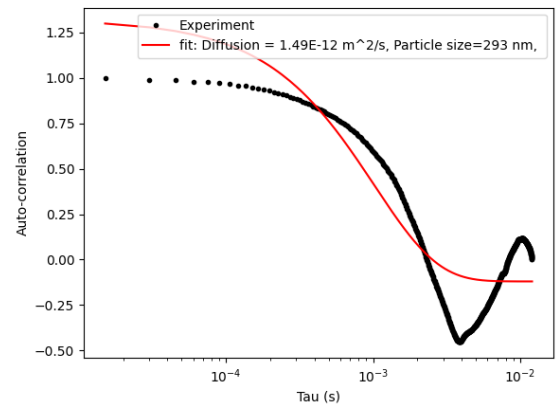
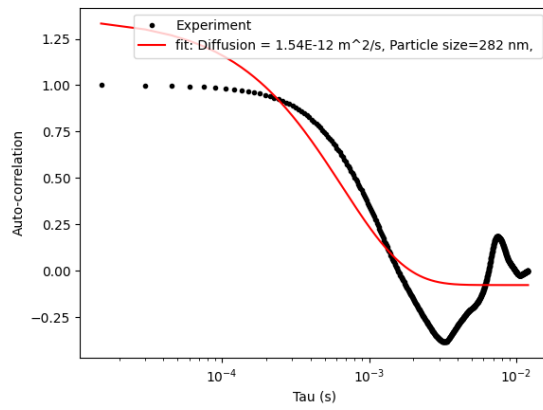
Selain itu melalui grafik juga dapat diketahui bahwa hamburan dari laser hijau memiliki fluktuasi yang cukup cepat, dapat diperlihatkan dari seberapa cepat

detektor mencapai lembah dan kembali lagi ke puncak, sedangkan hamburan dari laser merah dominan memiliki perubahan yang lebih lambat.

4.2.2. Data Autokorelasi

Fluktuasi nilai dari sensor pada setiap pengukurannya dapat dijadikan acuan sebagai seberapa cepat partikel tersebut bergerak. Untuk mendapatkan nilai ukuran partikel diperlukan nilai autokorelasi yang merupakan korelasi dari setiap nilai pada setiap pengulangan. Nilai autokorelasi didapatkan dengan menggunakan *library Numpy* dari Python untuk mempermudah pengolahan data berbentuk matriks. Dari nilai autokorelasi tersebut dapat di plotting menjadi gambar berikut:



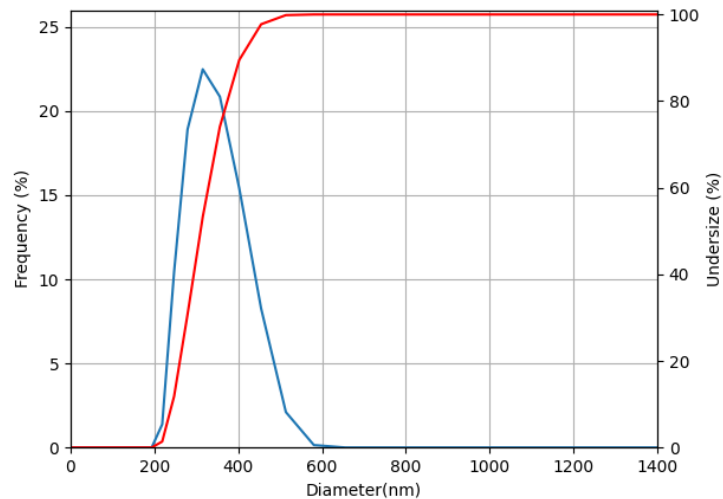


Laser Hijau

Laser Merah

Gambar 4.2 Sampel Data Autokorelasi terhadap Tau

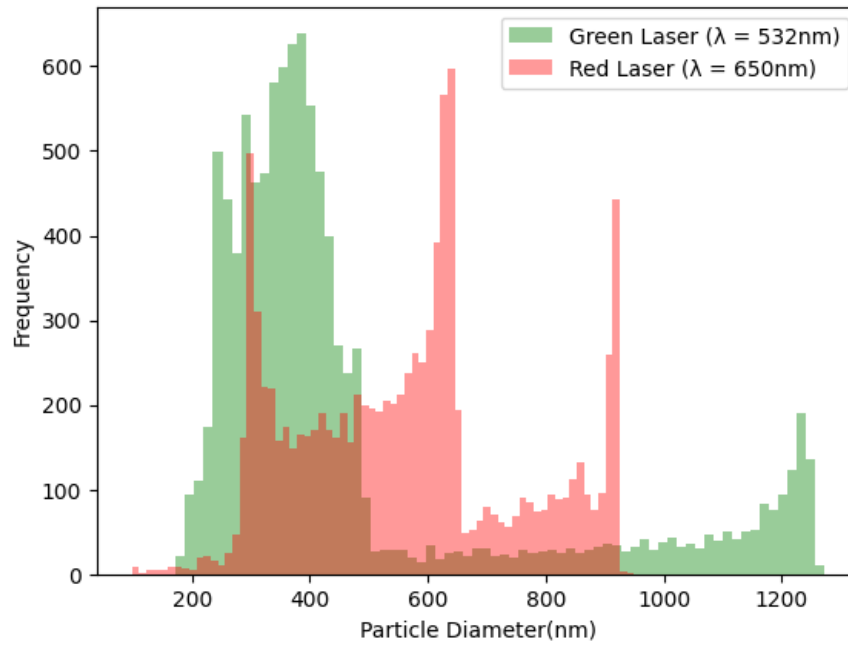
4.2.3. Hasil Karakterisasi Sampel pada PSA



Gambar 4.3 Distribusi Ukuran Partikel pada PSA

Pada pengukuran PSA, data yang didapat berupa *Z – Average* berkisar di 251nm dengan PI 2,555. Data tersebut mempengaruhi pengukuran dari PSA karena Polidispersity Index yang tinggi mengurangi tingkat akurasi pada pengukuran. Apabila dibandingkan dengan kedua rangkaian DLS yang diuji, distribusi data diameter partikel yang didapat memiliki range lebih sempit. Lebar range tersebut juga mempengaruhi tingkat akurasi dari pengukuran pada rangkaian yang digunakan.

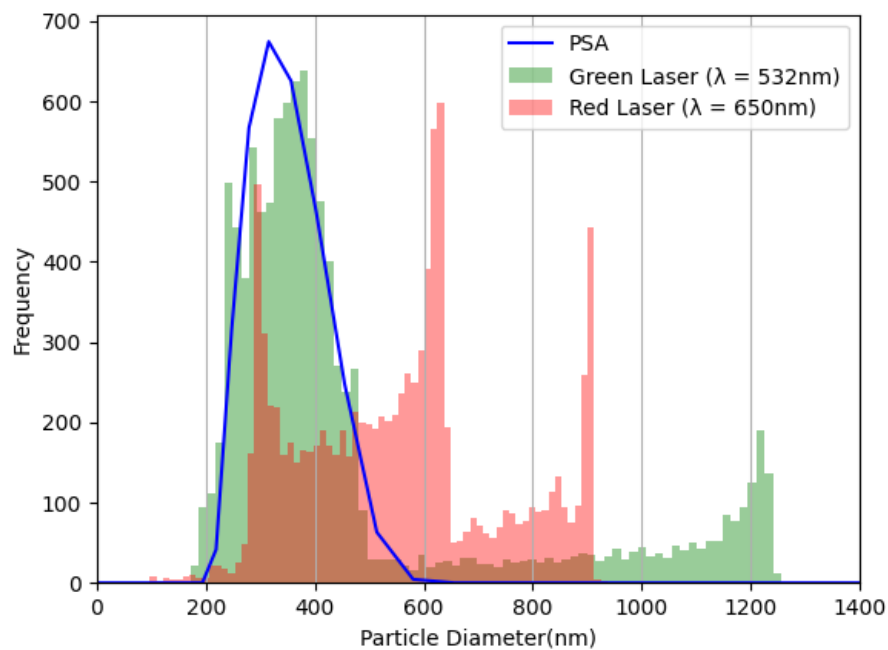
4.2.4. Distribusi Data Ukuran Partikel



Gambar 4.4 Distribusi 20000 Ukuran Partikel

Grafik diatas merupakan grafik distribusi frekuensi terhadap diameter dari partikel. Distribusi kedua data dengan 10.000 iterasi pada masing-masing laser memiliki perbedaan hasil kumulatif yang cukup signifikan. Persebaran diameter partikel dengan laser merah memiliki range yang lebar dengan beberapa puncak, seperti yang terlihat pada grafik dimana diameter partikel memiliki puncak pada rentang $300nm - 350nm$ dan $580nm - 620nm$. Adanya tiga puncak dari grafik distribusi diatas menunjukkan adanya tiga ukuran partikel yang terdeteksi. Perubahan nilai pada sensor yang lambat menghasilkan perhitungan diameter partikel yang lebih besar, namun terdapat beberapa pengulangan yang mendeteksi perubahan dengan cepat sehingga dapat mengukur diameter partikel yang lebih kecil. Berbeda dengan

laser hijau yang memiliki persebaran diameter partikel yang memiliki puncak pada rentang $200\text{nm} - 400\text{nm}$. Range data yang terukur pada laser hijau dominan lebih kecil dibandingkan pada laser merah. Hal ini menunjukkan bahwa laser hijau dapat mendeteksi diameter partikel yang lebih kecil dibandingkan dengan laser merah.



Gambar 4.5 Perbandingan Hasil Instrumen dengan Karakterisasi PSA

Apabila data dari DLS sederhana disandingkan langsung dengan hasil karakterisasi dari PSA, maka didapatkan grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Grafik tersebut menunjukkan bahwa hasil pengukuran dengan menggunakan laser hijau memiliki hasil yang hampir menyerupai pengukuran dengan menggunakan PSA.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Telah dibandingkan dua instrument *Dynamic Light Scattering* (DLS) sederhana dengan laser yang berbeda yaitu laser merah dan laser hijau yang memiliki hasil berkisar diantara $365nm$ untuk laser hijau dan $398nm$ dan $619nm$ untuk laser merah. Sebagai referensi didapatkan data pengukuran PSA berupa Z-Average pada $463.1nm$

1. Laser merah memiliki range persebaran data yang lebih lebar dibandingkan dengan laser hijau. Disisi lain pengukuran dengan laser hijau menghasilkan diameter yang dominan lebih kecil dibandingkan laser merah.
2. Responsivitas dari silikon pada fotodioda OPT101 memiliki nilai lebih rendah pada laser hijau dibandingkan dengan laser merah, namun intensitas dari laser hijau lebih sehingga sensitivitas pada sensor meningkat dibandingkan dengan laser merah

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, sampel yang dapat diukur masih terlalu sedikit untuk memastikan akurasi pengukuran yang dilakukan oleh rangkaian yang telah dibuat. Hal tersebut memberikan saran berupa adanya variasi sampel

yang lebih banyak namun masih dalam range pengukuran dengan menggunakan laser merah dan laser hijau agar mendapatkan data yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. B. da Silva, J. R. da Silva, M. C. Rodrigues, J. A. Vieira, I. A. de Andrade, T. Nagata, A. S. Santos, S. W. da Silva, M. C. O. da Rocha, S. N. Bão, P. M. Moraes-Vieira, J. Proença-Modena, M. K. Angelim, G. F. de Souza, S. P. Muraro, A. L. B. de Barros, G. A. de Souza Martins, F. Ribeiro-Dias, G. Machado, M. R. Fessel, A. M. Chudzinski-Tavassi, C. M. Ronconi, D. Gonçalves, R. Curi, O. N. Oliveira, and R. B. Azevedo, “Detection of sars-cov-2 virus via dynamic light scattering using antibody-gold nanoparticle bioconjugates against viral spike protein,” *Talanta*, vol. 243, 6 2022.
- [2] W. I. Goldberg, “Dynamic light scattering,” *American Journal of Physics*, vol. 67, 1999.
- [3] S. Falke and C. Betzel, *Radiation in Bioanalysis Spectroscopic Techniques and Theoretical Methods*. Springer Cham, 2019.
- [4] D. L. Black, M. Q. Mcquay, and M. P. Bonin, “Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications,” *Prog. Energy Combust. Sci*, vol. 22, pp. 267–306, 1996.
- [5] J. D. Vos, P. P. Aguilar, C. Köppl, A. Fischer, C. Grünwald-Gruber, M. Dürkop, M. Klausberger, J. Mairhofer, G. Striedner, M. Cserjan-Puschmann, A. Jungbauer, and N. Lingg, “Production of full-length sars-cov-2 nucleocapsid protein from escherichia coli optimized by native hydrophobic interaction chromatog-

- raphy hyphenated to multi-angle light scattering detection,” *Talanta*, vol. 235, 12 2021.
- [6] J. Stetefeld, S. A. McKenna, and T. R. Patel, “Dynamic light scattering: a practical guide and applications in biomedical sciences,” *Biophysical Reviews*, vol. 8, pp. 409–427, 12 2016.
- [7] R. Piazza and V. Degiorgio, *Scattering, Rayleigh*. Elsevier, 2005.
- [8] A. L. Anindya, “Particle size analyser: beberapa penggunaan instrumen hamburan cahaya,” *Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO)*, pp. 10–11, 2018.
- [9] P. M. V. Raja and A. R. Barron, “Dynamic light scattering.” [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_\(Barron\)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.04%3A_Dynamic_Light_Scattering](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Physical_Methods_in_Chemistry_and_Nano_Science_(Barron)/02%3A_Physical_and_Thermal_Analysis/2.04%3A_Dynamic_Light_Scattering), 8 2022. Accessed: (12 September 2023).
- [10] E. Setyaningsih, D. Prastiyanto, and D. Suryono, “Penggunaan sensor photodiode sebagai sistem deteksi api pada wahana terbang vertical take-off landing (vtol),” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9, pp. 53–59, 2017.
- [11] I. D. Arta and M. Rosmiati, “Monitoring sistem pendeteksi kadar gula darah menggunakan photodiode berbasis web,” *e-Proceeding of Applied Science*, vol. 6, pp. 3362–3331, 2020.

- [12] E. Vlasov, N. Denisov, and J. Verbeeck, “Low-cost electron detector for scanning electron microscope specifications table,” *HardwareX*, vol. 14, p. 413, 2023.
- [13] S. J. Sokop, D. J. Mamahit, M. Eng, S. R. U. A. Sompie, . Mahasiswa, and . Pembimbing, “Trainer periferan antarmuka berbasis mikrokontroler arduino uno,” *Journal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 5, 2016.