

Karakterisasi Sensor Cahaya Berbasis LED Putih Reverse Bias Menggunakan Mikrokontroler Arduino

A. Muh. Hufaidz Dzaki. Z¹, Arda Ramadani², dan Prasepvianto Estu Broto^{3*}

^{1,2,3}Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar

*prasepvianto@uin-alauddin.ac.id

ABSTRACT: White light-emitting diodes (LEDs) can operate as photodetectors when reverse biased, offering a simple alternative to dedicated light sensors. This study designs and characterizes a white LED light sensor using a 10 M Ω pull-up resistor and the 10-bit analog-to-digital converter (ADC) of an Arduino Uno. A dimmable lamp served as a variable light source, while a digital lux meter served as the reference instrument. Sensor output voltage was recorded at six dimmer levels corresponding to 13–1789 lux, and the calibration relationship was evaluated using linear regression. The resulting calibration equation was $Lux = -593.79V + 2833.94$, with $R^2 = 0.9155$. The sensitivity magnitude was 1.684 mV/lux, and the theoretical ADC-based resolution was 2.90 lux/bit. At a reference intensity of 861 lux, the sensor produced 838.77 lux after calibration, corresponding to a point error of 2.58% (point accuracy of 97.42%). Seven repeated measurements at the same illumination level yielded a mean of 809.08 lux, a standard deviation of 48.73 lux, and a relative standard deviation (RSD) of 6.02%. The maximum hysteresis was 0.53 V, equivalent to 15.36% of the full-scale output. These results demonstrate that a reverse-biased white LED can be implemented as a low-cost, laboratory-scale light sensor, although its repeatability and hysteresis at high illumination require improvement through shielding, settling-time control, and digital signal processing.

Keywords: White LED, Photodetector, Reverse Bias, Light Sensor, Calibration

ABSTRAK: Light Emitting Diode (LED) putih dapat berfungsi sebagai detektor cahaya ketika dioperasikan dalam kondisi reverse bias, sehingga berpotensi menjadi alternatif sensor cahaya yang sederhana dan berbiaya rendah. Penelitian ini merancang dan mengkarakterisasi sensor cahaya berbasis LED putih menggunakan resistor *pull-up* 10 M Ω dan *analog-to-digital converter* (ADC) 10-bit pada Arduino Uno. Sumber cahaya variabel berupa lampu *dimmer* digunakan, sedangkan lux meter digital digunakan sebagai instrumen referensi. Tegangan keluaran sensor dicatat pada enam tingkat *dimmer* dengan intensitas referensi 13–1789 lux, kemudian hubungan kalibrasi dianalisis menggunakan regresi linear. Hasil regresi menghasilkan persamaan $Lux = -593,79V + 2833,94$ dengan $R^2 = 0,9155$. Magnitudo sensitivitas sensor sebesar 1,684 mV/lux dan resolusi teoritis berbasis ADC sebesar 2,90 lux/bit. Pada intensitas referensi 861 lux, hasil konversi sensor sebesar

*corresponding author

email: prasepvianto@uin-alauddin.ac.id

DOI: 10.24252/sainfis.v6i2.71861

838,77 lux menghasilkan galat titik sebesar 2,58% (akurasi titik 97,42%). Pengujian keterulangan sebanyak tujuh kali pada kondisi pencahayaan yang sama menghasilkan rata-rata 809,08 lux, simpangan baku 48,73 lux, dan RSD 6,02%. Histeresis maksimum sebesar 0,53 V atau 15,36% terhadap rentang keluaran penuh. Hasil tersebut menunjukkan bahwa LED putih dalam konfigurasi *reverse* bias berpotensi digunakan sebagai sensor cahaya berbiaya rendah untuk pengukuran skala laboratorium, dengan catatan bahwa keterulangan dan histeresis pada intensitas tinggi masih perlu diperbaiki melalui *shielding*, pengendalian waktu tunggu (*settling time*), dan pengolahan sinyal digital.

Kata Kunci: LED Putih, Detektor Cahaya, *Reverse* Bias, Sensor Cahaya, Kalibrasi.

PENDAHULUAN

Sensor cahaya merupakan komponen penting dalam sistem instrumentasi karena memungkinkan besaran optik dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat diproses oleh sistem akuisisi data, dengan aplikasi mulai dari kendali pencahayaan otomatis, sistem pencitraan, hingga instrumentasi laboratorium (Fraden, 2016). Dalam konteks pengembangan instrumen sederhana, kebutuhan terhadap sensor yang murah, mudah diperoleh, dan dapat langsung diintegrasikan dengan sistem akuisisi analog berbasis mikrokontroler tetap relevan.

Light Dependent Resistor (LDR) dan fotodioda merupakan dua komponen yang paling umum digunakan untuk mendeteksi cahaya, namun keduanya memiliki keterbatasan. LDR berbasis cadmium sulfide (CdS) mengandung kadmium, logam berat yang dibatasi penggunaannya dalam perangkat elektronik oleh regulasi *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS) *Directive* 2011/65/EU hingga konsentrasi maksimum 0,01% berat pada material homogen (European Parliament & Council of the European Union, 2011), di samping respons spektralnya yang tidak merata dan waktu responsnya yang relatif lambat (Kasap, 2013). Fotodioda silikon komersial memiliki respons yang lebih cepat dan linearitas yang baik, tetapi arus fotogenerasinya berada pada orde pikoampere hingga nanoampere, sehingga pembacaannya umumnya memerlukan rangkaian pengondisi sinyal tambahan seperti *transimpedance amplifier* (TIA) agar sesuai dengan rentang ADC mikrokontroler (Hobbs, 2009). Kebutuhan komponen tambahan ini meningkatkan kompleksitas rangkaian dan biaya implementasi.

LED tidak hanya berfungsi sebagai sumber cahaya, tetapi secara prinsip fisika juga dapat bekerja sebagai fotodetektor. Ketika sambungan p–n LED diberi bias balik (*reverse* bias), foton yang datang menghasilkan pasangan elektron-hole yang menimbulkan arus foto berlawanan arah dengan arus *forward* (Sze & Ng, 2007; Saleh & Teich, 2007). Pemanfaatan LED sebagai detektor cahaya pertama kali dipopulerkan oleh Mims (2009) melalui

pengembangan *sun photometer* berbasis LED sebagai detektor spektral selektif tanpa filter optik. Prinsip serupa kemudian diadaptasi untuk sensor berbasis mikrokontroler; Dietz dan Alford (2019) menunjukkan bahwa LED dapat digunakan sebagai sensor dengan rangkaian antarmuka yang sederhana, sementara studi karakterisasi yang lebih baru menegaskan bahwa performa LED sebagai detektor sangat bergantung pada jenis LED serta karakteristik optik dan elektriknya, sehingga karakterisasi eksperimental tetap diperlukan setiap kali LED digunakan sebagai sensor (Sticklus et al., 2020).

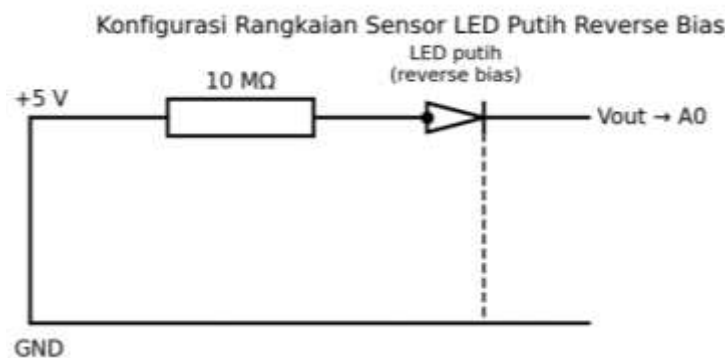
LED putih dipilih dalam penelitian ini karena karakteristik spektral dan struktur materialnya memberikan respons terhadap cahaya pada rentang panjang gelombang yang lebih luas dibandingkan LED monokromatik. Sebagian besar LED putih komersial menggunakan die berbasis Indium Gallium Nitride (InGaN) yang menghasilkan emisi biru dan lapisan fosfor, seperti Cerium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Ce:YAG), yang mengubah sebagian energi cahaya menjadi emisi pada panjang gelombang yang lebih panjang sehingga menghasilkan spektrum cahaya putih (Bachmann et al., 2020). Namun, ketika LED digunakan sebagai fotodetektor, spektrum emisi tersebut tidak secara langsung menentukan respons deteksinya. Respons spektral sebagai detektor ditentukan oleh kemampuan material dan struktur sambungan p–n dalam menyerap foton pada panjang gelombang tertentu serta menghasilkan arus foto. Oleh karena itu, penggunaan LED putih sebagai detektor tidak dapat diasumsikan memiliki respons fotometrik yang identik dengan lux meter. Hubungan antara respons spektral detektor dan satuan fotometrik lux bergantung pada distribusi spektral sumber cahaya dan fungsi sensitivitas fotopik CIE (CIE, 2019). Dengan demikian, kalibrasi terhadap lux meter tetap diperlukan agar keluaran sensor dapat dinyatakan dalam satuan lux. Pemilihan LED putih dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan bahwa struktur dan karakteristik spektralnya berpotensi memberikan respons terhadap sumber cahaya tampak yang digunakan dalam pengujian, sedangkan karakteristik respons aktualnya ditentukan secara eksperimental melalui proses kalibrasi.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan kelayakan LED sebagai detektor cahaya secara kualitatif, tetapi penerapannya dalam konfigurasi *reverse* bias dengan resistor impedansi ultra-tinggi dan pembacaan langsung melalui ADC mikrokontroler terjangkau masih memerlukan karakterisasi performa yang lebih terukur, meliputi linearitas, sensitivitas, resolusi, akurasi, keterulangan, dan histeresis. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) merancang dan mengimplementasikan sensor cahaya berbasis LED putih dengan konfigurasi *reverse* bias dan resistor *pull-up* 10 M Ω yang terhubung ke ADC Arduino Uno; (2) mengkarakterisasi parameter statis sensor secara kuantitatif; dan (3) mengevaluasi kelayakan serta keterbatasan sensor tersebut sebagai alternatif sensor cahaya konvensional untuk aplikasi *monitoring* intensitas cahaya skala laboratorium.

METODE PENELITIAN

Peralatan dan Konfigurasi Sensor

Komponen utama yang digunakan terdiri atas LED putih 5 mm tipe *through-hole*, sepuluh resistor $1\text{ M}\Omega \pm 5\%$ yang dirangkai seri sehingga menghasilkan resistor *pull-up* nominal $10\text{ M}\Omega$, Arduino Uno Rev3 berbasis mikrokontroler ATmega328P, *breadboard*, kabel *jumper*, lampu *dimmer* variabel (skala 0–9), lux meter digital sebagai instrumen referensi, dan laptop untuk akuisisi data melalui Arduino IDE. Arduino Uno Rev3 menyediakan ADC 10-bit dengan tegangan referensi internal nominal 5 V (Arduino, 2026).



Gambar 1. Konfigurasi rangkaian sensor LED putih *reverse bias*.

LED dipasang dalam kondisi *reverse bias* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Katoda dihubungkan ke tegangan suplai +5 V melalui resistor *pull-up* $10\text{ M}\Omega$, sedangkan anoda dihubungkan ke *ground*. Titik percabangan antara resistor *pull-up* dan katoda LED dihubungkan ke pin analog A0 Arduino Uno. Jika arus foto *reverse* dinyatakan sebagai I_{ph} dan resistor *pull-up* sebagai R_p , tegangan pada titik ADC dapat didekati menggunakan Persamaan 1.

$$V_{out} = V_s - I_{ph} R_p \quad (1)$$

Persamaan 1 tersebut menjelaskan mengapa peningkatan intensitas cahaya menghasilkan penurunan tegangan keluaran pada konfigurasi ini: semakin besar I_{ph} , semakin besar pula drop tegangan pada R_p sehingga V_{out} menurun. Resistor *pull-up* $10\text{ M}\Omega$ dipilih untuk memperbesar perubahan tegangan akibat arus foto yang kecil (orde nanoampere), namun konsekuensinya impedansi sumber menjadi sangat tinggi sehingga sistem lebih rentan terhadap kapasitansi parasitik dan interferensi elektromagnetik (Hobbs, 2009; Horowitz & Hill, 2015).

Akuisisi dan Kalibrasi Data

Arduino membaca nilai ADC pada pin A0 secara periodik dan mengonversinya menjadi tegangan menggunakan tegangan referensi nominal 5 V. Resolusi satu *least significant bit* (LSB) untuk ADC 10-bit dihitung dengan Persamaan 2.

$$qV = V_{ref} / 2^N = 5 / 1024 = 4,883 \text{ mV/bit} \quad (2)$$

Pengujian dilakukan pada enam tingkat *dimmer* (skala 0–5). Lampu ditempatkan pada posisi dan jarak tetap terhadap permukaan LED sensor, sedangkan lux meter diposisikan sejajar dan berdekatan dengan LED sensor agar keduanya menerima kondisi pencahayaan yang setara. Nilai tegangan yang digunakan untuk kalibrasi pada setiap tingkat adalah modus (nilai dengan frekuensi kemunculan terbesar) dari pembacaan Serial Monitor yang berfluktuasi, karena fluktuasi tersebut merupakan karakteristik inheren dari rangkaian berimpedansi sangat tinggi yang sensitif terhadap *noise* kapasitif dan elektromagnetik lingkungan (Horowitz & Hill, 2015). Hubungan tegangan keluaran terhadap intensitas referensi selanjutnya dianalisis menggunakan regresi linear, dengan intensitas cahaya sebagai variabel terikat.

Karakterisasi Performa

Karakteristik statis sensor dievaluasi melalui enam parameter, yaitu linearitas, sensitivitas, resolusi, akurasi titik, keterulangan (*repeatability*), dan histeresis. Linearitas dinilai menggunakan koefisien determinasi (R^2) dari regresi kalibrasi. Sensitivitas dihitung sebagai kebalikan kemiringan regresi karena persamaan kalibrasi dituliskan dalam bentuk intensitas cahaya sebagai fungsi tegangan. Resolusi teoritis sistem dihitung berdasarkan resolusi ADC dan sensitivitas hasil kalibrasi. Akurasi diuji pada satu titik dengan membandingkan intensitas hasil konversi sensor terhadap nilai referensi lux meter, sehingga hasilnya dilaporkan sebagai akurasi titik (*point accuracy*), bukan akurasi rentang penuh. Keterulangan (*repeatability*) diuji melalui tujuh pengukuran berurutan pada kondisi pencahayaan yang sama dan dinyatakan menggunakan simpangan baku sampel (SD) serta *relative standard deviation* (RSD). Histeresis diuji dengan menaikkan intensitas cahaya dari skala 1 sampai 5, kemudian menurunkannya kembali pada titik-titik yang sama. Sensitivitas dihitung sebagai kebalikan kemiringan regresi, karena persamaan kalibrasi dituliskan dalam bentuk lux sebagai fungsi tegangan yang dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$S = |\Delta V / \Delta \text{Lux}| = 1/|m| \quad (3)$$

Dengan m adalah kemiringan dari persamaan regresi. Resolusi teoritis sistem dihitung dari resolusi ADC dibagi magnitudo sensitivitas. Akurasi diuji pada satu titik dengan

membandingkan intensitas hasil konversi sensor terhadap nilai referensi lux meter, sehingga hasilnya dilaporkan sebagai akurasi titik (*point accuracy*), bukan akurasi rentang penuh. Keterulangan (*repeatability*) diuji melalui tujuh pengukuran berurutan pada kondisi pencahayaan yang sama dan dinyatakan sebagai simpangan baku sampel (SD) serta *relative standard deviation* (RSD), mengikuti pedoman ISO/IEC Guide 98-3 (2008). Histeresis diuji dengan menaikkan intensitas cahaya dari skala 1 sampai 5, kemudian menurunkannya kembali pada titik-titik yang sama; persentase histeresis dihitung terhadap *full-scale output* (FSO), yaitu selisih tegangan keluaran maksimum dan minimum pada pengujian arah naik.

$$\%Error = |Luxref - Luxsensor| / Luxref \times 100\% \quad (4)$$

$$Akurasi = 100\% - \%Error \quad (5)$$

Persamaan 4 digunakan untuk mengetahui besarnya persen *error* atau kesalahan dari pembacaan sensor dibandingkan dengan pembacaan *luxmeter* sebagai referensi. Hasil perhitungan kesalahan tersebut kemudian digunakan untuk mencari nilai akurasi sensor sesuai dengan Persamaan 5 dengan satuan dalam persen.

Residual pada setiap titik pengukuran dihitung sebagai selisih antara nilai intensitas referensi dan nilai intensitas hasil prediksi model regresi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (6)$$

dengan e_i adalah residual pada titik ke- i , y_i adalah intensitas cahaya hasil pengukuran lux meter, dan $\hat{y}_i$ adalah intensitas hasil prediksi berdasarkan persamaan kalibrasi.

Untuk mengevaluasi kesalahan model secara keseluruhan digunakan Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Error (MAE), masing-masing dihitung menggunakan Persamaan 7 dan Persamaan 8.

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = (1/n) \sum |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

RMSE memberikan ukuran kesalahan dengan memberikan bobot lebih besar terhadap residual yang besar, sedangkan MAE menunjukkan rata-rata besar kesalahan absolut model pada seluruh titik pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi dan Linearitas

Hasil pengujian kalibrasi pada enam tingkat *dimmer* ditunjukkan pada Tabel 1. Residual dan kesalahan model kalibrasi pada setiap titik pengujian ditunjukkan pada Tabel

2. Tegangan keluaran cenderung menurun ketika intensitas cahaya meningkat, sesuai dengan prinsip kerja LED sebagai fotodetektor *reverse bias*.

Tabel 1. Data pengujian linearitas sensor cahaya berbasis LED putih.

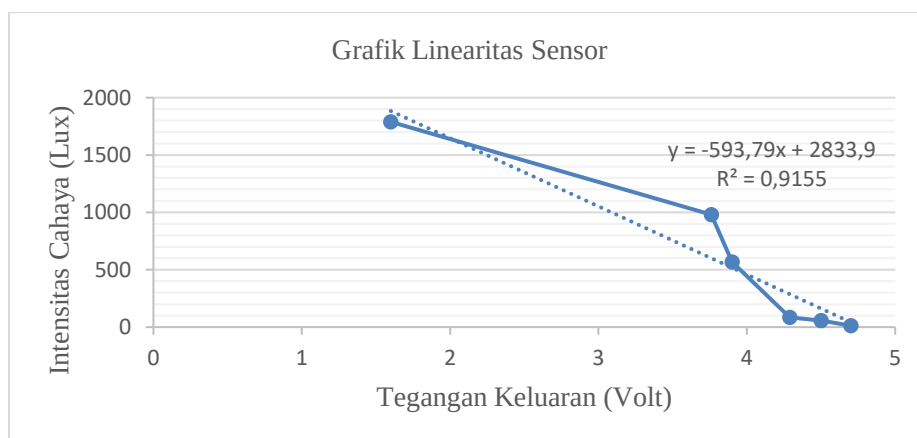
No.	Skala <i>Dimmer</i>	Tegangan (V)	Intensitas Referensi (Lux)
1	0	4,70	13
2	1	4,50	58
3	2	4,29	85
4	3	3,90	569
5	4	3,76	981
6	5	1,60	1789

Tabel 2. Residual dan kesalahan model kalibrasi pada setiap titik pengujian.

No	Tegangan (V)	Lux Referensi	Lux Prediksi	Residual (lux)	Error Absolut (lux)	Error Relatif (%)
1	4,70	13	43,14	-30,14	30,14	231,87
2	4,50	58	161,90	-103,90	103,90	179,14
3	4,29	85	286,60	-201,60	201,60	237,17
4	3,90	569	518,17	50,83	50,83	8,93
5	3,76	981	601,30	379,70	379,70	38,71
6	1,60	1789	1883,88	-94,88	94,88	5,30

Regresi linear terhadap enam titik tersebut menghasilkan persamaan kalibrasi yang ditunjukkan pada Persamaan 9.

$$\text{Lux} = -593,79V + 2833,94 \quad (R^2 = 0,9155) \quad (9)$$



Gambar 2. Hubungan tegangan keluaran sensor terhadap intensitas cahaya referensi.

Nilai R^2 sebesar 0,9155 menunjukkan bahwa model linear menjelaskan sekitar 91,55% variasi intensitas referensi pada rentang data pengujian (13–1789 lux). Nilai tersebut mengindikasikan hubungan linear yang cukup kuat, tetapi belum sempurna. Karena kalibrasi hanya menggunakan enam titik dengan rentang yang tidak berjarak seragam, nilai R^2 ini sebaiknya dipahami sebagai ukuran kecocokan model terhadap data yang tersedia, bukan sebagai tolak ukur mutlak kualitas sensor secara umum.

Koefisien regresi bernilai negatif karena peningkatan intensitas cahaya meningkatkan arus foto *reverse* Iph, sehingga drop tegangan pada resistor *pull-up* meningkat dan tegangan pada titik ADC menurun, konsisten dengan Persamaan 1 dan dengan prinsip LED sebagai fotodetektor yang telah dilaporkan pada penelitian terdahulu (Mims, 2009; O'Toole & Diamond, 2008; Sticklus et al., 2020). Deviasi dari model linear sempurna kemungkinan berasal dari karakteristik intrinsik sambungan p–n yang bersifat non-linear pada rentang intensitas yang luas, sebagaimana dijelaskan oleh persamaan dioda Shockley yang memasukkan komponen arus foto (Streetman & Banerjee, 2015), serta dari fluktuasi data pada Serial Monitor akibat sensitivitas tinggi rangkaian berimpedansi ultra-tinggi terhadap *noise* kapasitif dan elektromagnetik (Horowitz & Hill, 2015).

Selain koefisien determinasi, kualitas model kalibrasi dievaluasi berdasarkan residual pada setiap titik pengukuran. Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa residual terbesar terjadi pada intensitas referensi 981 lux dengan nilai residual sebesar 379,70 lux. Sebaliknya, residual terkecil terdapat pada intensitas referensi 13 lux dengan nilai absolut sebesar 30,14 lux. Secara keseluruhan, model regresi menghasilkan RMSE sebesar 186,23 lux dan MAE sebesar 143,51 lux. Nilai RMSE yang lebih besar daripada MAE menunjukkan adanya beberapa titik dengan residual relatif besar yang memberikan kontribusi kuat terhadap kesalahan kuadrat rata-rata, terutama pada titik 981 lux. Dengan demikian, meskipun nilai R^2 sebesar 0,9155 menunjukkan kecocokan model linear yang cukup kuat terhadap data, nilai RMSE dan MAE menunjukkan bahwa masih terdapat penyimpangan yang cukup besar pada beberapa titik pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa model linear belum sepenuhnya mampu merepresentasikan respons sensor pada seluruh rentang intensitas 13–1789 lux.

Penyimpangan tersebut dapat berkaitan dengan karakteristik respons non-linear LED ketika digunakan sebagai fotodetektor, distribusi intensitas sumber cahaya yang tidak sepenuhnya linear terhadap skala dimmer, serta fluktuasi sinyal pada rangkaian dengan impedansi sangat tinggi. Oleh karena itu, penggunaan model linear dalam penelitian ini diposisikan sebagai model kalibrasi empiris pada rentang pengujian, bukan sebagai representasi universal hubungan antara tegangan LED dan intensitas cahaya.

Sensitivitas dan Resolusi

Dari kemiringan persamaan kalibrasi, sensitivitas tegangan terhadap intensitas cahaya dihitung menggunakan Persamaan 3 diperoleh sebesar 1,684 mV/lux. Magnitudo

sensitivitas 1,684 mV/lux menunjukkan bahwa setiap perubahan intensitas cahaya berkaitan dengan perubahan tegangan keluaran yang berlawanan arah pada besaran tersebut. Nilai ini merupakan sensitivitas empiris dari kombinasi LED, resistor, ADC, dan kondisi pencahayaan yang digunakan dalam penelitian ini, sehingga tidak dapat langsung digeneralisasi ke LED putih dengan tipe atau geometri yang berbeda. Sebagai konteks, arus foto tipikal LED dalam kondisi *reverse* bias pada kisaran intensitas ini berada pada orde 1–10 nA (Fay & Nattestad, 2022); tanpa resistor *pull-up* berimpedansi tinggi, arus sekecil itu hanya menghasilkan penurunan tegangan pada orde mikrovolt pada resistor 1 k Ω , jauh di bawah resolusi ADC Arduino Uno. Dengan resolusi ADC sebesar 4,883 mV/bit, resolusi intensitas teoritis sistem dihitung dengan cara mengalikan resolusi ADC dengan nilai magnitudo sensitivitasnya diperoleh 2,90 lux/bit.

Nilai 2,90 lux/bit merupakan resolusi kuantisasi teoritis berdasarkan ADC dan sensitivitas regresi, dan belum memperhitungkan *noise*, *drift*, maupun ketidakpastian lux meter, sehingga resolusi praktis sistem berpotensi lebih rendah daripada nilai teoritis ini. Sebagai konteks, standar pencahayaan SNI 03-6197-2011 umumnya menetapkan perbedaan antar kategori pencahayaan hingga puluhan lux (Badan Standardisasi Nasional, 2011), sehingga resolusi 2,90 lux/bit masih memadai untuk aplikasi *monitoring* cahaya ruangan pada skala laboratorium. Resolusi dapat ditingkatkan dengan ADC beresolusi lebih tinggi atau dengan *averaging* digital melalui *oversampling* (Horowitz & Hill, 2015).

Akurasi

Pengujian akurasi dilakukan pada satu kondisi pencahayaan dengan nilai referensi 861 lux. Pada kondisi tersebut, tegangan sensor sebesar 3,36 V dikonversi menggunakan persamaan kalibrasi menjadi 838,77 lux, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian akurasi sensor.

Parameter	Nilai	Satuan
Intensitas Referensi (Lux Meter)	861	lux
Intensitas Sensor (Konversi Regresi)	838.77	lux
<i>Error</i> Absolut	22,23	lux
Persentase <i>Error</i>	2,58	%
Akurasi	97,42	%



Gambar 3. Perbandingan hasil sensor dengan nilai referensi pada 861 lux.

Kesalahan relatif dan akurasi titik dihitung menggunakan Persamaan 4 dan Persamaan 5. Hasil perhitungan menunjukkan kesalahan relatif sebesar 2,58% dan akurasi titik sebesar 97,42%. Nilai tersebut menunjukkan kesesuaian pembacaan sensor yang cukup baik pada kondisi pengujian 861 lux. Namun, karena pengujian akurasi hanya dilakukan pada satu titik, hasil tersebut tidak dapat digunakan untuk menyatakan akurasi sensor pada seluruh rentang pengukuran.

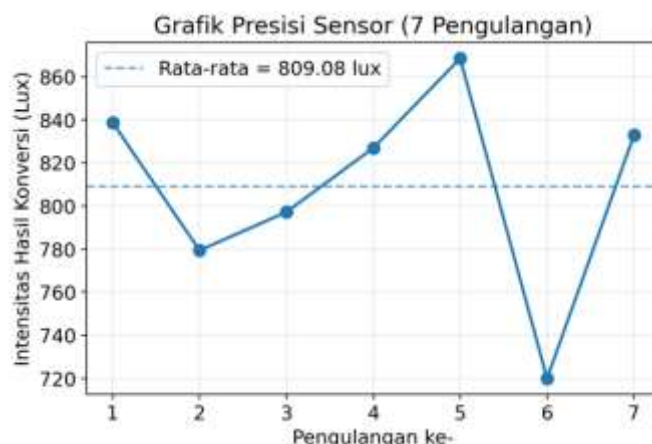
Presisi

Presisi atau keterulangan (*repeatability*) sensor diuji melalui 7 kali pengukuran berurutan pada kondisi intensitas cahaya yang identik. Tegangan yang terukur dikonversi ke lux menggunakan persamaan kalibrasi regresi. Hasil disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data pengujian presisi sensor (7 pengulangan pada kondisi cahaya sama).

No.	Tegangan (V)	Lux Konversi	Lux Referensi (Lux Meter)
1	3,36	838,77	861
2	3,46	779,39	
3	3,43	797,20	
4	3,38	826,89	
5	3,31	868,46	
6	3,56	720,01	
7	3,37	832,83	
Rata-rata		809,08	lux

SD	48,73	lux
RSD / Presisi	6,02 % / 93,98 %	



Gambar 4. Variasi hasil pengukuran pada tujuh pengulangan.

Grafik variasi hasil pengukuran pada tujuh pengulangan ditunjukkan pada Gambar 4. Rata-rata hasil pengukuran adalah 809,08 lux dengan Standar Deviasi (SD) atau simpangan baku sampel sebesar 48,73 lux. *Relative standard deviation* (RSD) merupakan metrik presisi yang lebih informatif dan memungkinkan perbandingan antar sistem pengukuran yang berbeda (ISO/IEC Guide 98-3, 2008). Nilai RSD 6,02% menunjukkan adanya variasi pengukuran yang cukup nyata pada konfigurasi ini. Fluktuasi tersebut berkaitan dengan impedansi sumber yang sangat tinggi (10 M Ω), kapasitansi parasitik pada breadboard dan kabel jumper, serta interferensi elektromagnetik frekuensi jala-jala (50 Hz) yang dapat terkopling pada input ADC berimpedansi tinggi (Horowitz & Hill, 2015). Karena pengujian keterulangan hanya dilakukan pada satu kondisi intensitas, hasil ini menggambarkan *repeatability* pada titik tersebut dan tidak mewakili seluruh rentang sensor. Variasi pembacaan yang diperoleh kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi noise elektronik, impedansi sumber yang tinggi, kapasitansi parasitik pada breadboard dan kabel jumper, interferensi elektromagnetik, serta variasi kondisi lingkungan. Karena kontribusi masing-masing sumber belum dipisahkan secara eksperimental, penyebab variasi tidak dapat ditentukan secara tunggal dari data yang diperoleh (Morris & Langari, 2016).

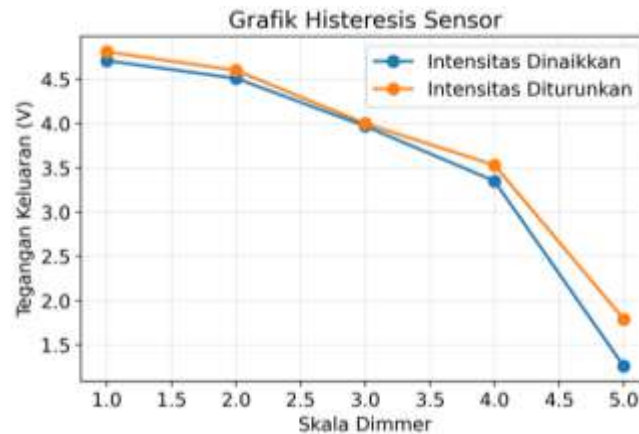
Histeresis

Hasil pengujian ketika intensitas dinaikkan dan diturunkan ditampilkan pada Tabel 5. Perhitungan persentase histeresis menggunakan *full-scale output* (FSO) sebesar 3,45 V sebagai penyebut tetap pada seluruh titik pengujian.

Tabel 5. Data Pengujian Histeresis Sensor (Intensitas Naik dan Turun)

Skala <i>Dimmer</i>	V Naik (V)	V Turun (V)	$ \Delta V $ (V)	%Histeresis
1	4,71	4,81	0,10	2,90
2	4,51	4,60	0,09	2,61
3	3,97	4,00	0,03	0,87
4	3,35	3,53	0,18	5,22
5	1,26	1,79	0,53	15,36
Histeresis Maks.			0,53 V	15,36%

%Histeresis dihitung terhadap rentang *output* penuh sensor (*Full Scale Output* = $4,71 - 1,26 = 3,45$ V): $\%H = |\Delta V| / FSO \times 100\%$

**Gambar 5.** Grafik Histeresis Sensor.

Pada Gambar 5 terlihat bahwa perbedaan pembacaan meningkat pada skala *dimmer* 5 (intensitas tertinggi), dengan selisih maksimum 0,53 V, setara dengan 15,36% dari FSO. Histeresis yang relatif kecil pada intensitas rendah hingga menengah (skala 1–4, $\%H = 0,87 - 5,22\%$) namun meningkat tajam pada intensitas tinggi mengindikasikan adanya efek dinamis pada sistem yang lebih dominan pada arus foto besar. Beberapa mekanisme fisis yang secara prinsip dapat berkontribusi terhadap fenomena ini antara lain efek penyimpanan muatan (*charge storage*) pada kapasitansi difusi sambungan p–n (Sze & Ng, 2007; Streetman & Banerjee, 2015) dan efek memori fotokonduktif (*persistent photoconductivity*) yang umum diamati pada material GaN/InGaN, material dasar LED putih (Bachmann et al., 2020).

Untuk aplikasi dengan intensitas cahaya yang berubah secara dinamis, pembacaan sebaiknya dilakukan setelah waktu tunggu (*settling time*) yang tetap setiap perubahan intensitas. Penggunaan pelindung elektromagnetik, pengurangan panjang kabel, tata letak

rangkaian yang lebih baik, dan *averaging* digital juga dapat membantu mengurangi variasi pembacaan akibat histeresis maupun *noise* (Morris & Langari, 2016).

Keterbatasan Eksperimen dan Ketidakpastian Pengukuran

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Pertama, kalibrasi sensor hanya dilakukan pada enam titik intensitas cahaya dalam rentang 13–1789 lux. Jumlah titik tersebut masih relatif terbatas dan interval intensitas tidak seragam, sehingga kemampuan model regresi dalam merepresentasikan respons sensor pada seluruh rentang belum dapat dinilai secara menyeluruh. Penambahan titik kalibrasi dengan interval intensitas yang lebih merata diperlukan untuk memperoleh model kalibrasi yang lebih representatif.

Kedua, pengujian akurasi hanya dilakukan pada satu titik intensitas, yaitu 861 lux. Oleh karena itu, nilai akurasi 97,42% yang diperoleh merupakan akurasi titik dan tidak dapat digunakan sebagai nilai akurasi keseluruhan sensor pada seluruh rentang pengukuran. Pengujian pada beberapa titik intensitas diperlukan untuk memperoleh karakteristik kesalahan terhadap rentang pengukuran.

Ketiga, pengujian keterulangan dilakukan sebanyak tujuh kali hanya pada satu kondisi pencahayaan. Hasil RSD sebesar 6,02% dengan demikian menggambarkan keterulangan pada kondisi tersebut dan belum mewakili seluruh rentang intensitas sensor. Pengujian pada beberapa tingkat intensitas dan beberapa siklus pengukuran akan memberikan evaluasi repeatability yang lebih komprehensif.

Keempat, konfigurasi menggunakan resistor pull-up 10 M Ω menghasilkan impedansi sumber yang sangat tinggi. Kondisi ini meningkatkan sensitivitas terhadap kapasitansi parasitik, panjang kabel, breadboard, interferensi elektromagnetik, dan perubahan kondisi lingkungan. Faktor-faktor tersebut dapat berkontribusi terhadap fluktuasi tegangan yang diamati pada pembacaan ADC. Oleh karena itu, penggunaan kabel yang lebih pendek, shielding, tata letak rangkaian yang lebih baik, serta pengondisian sinyal atau averaging digital berpotensi meningkatkan kestabilan pembacaan.

Dari sisi ketidakpastian pengukuran, beberapa sumber ketidakpastian yang relevan meliputi resolusi ADC, ketidakpastian tegangan referensi, toleransi resistor pull-up, ketidakpastian lux meter, perubahan posisi dan jarak sumber cahaya, cahaya ambien, serta fluktuasi sinyal pada input ADC. Resolusi kuantisasi ADC secara teoritis adalah 4,883 mV/bit berdasarkan ADC 10-bit dan tegangan referensi nominal 5 V. Namun, nilai tersebut belum mencakup seluruh komponen ketidakpastian pengukuran. Karena spesifikasi ketidakpastian lux meter, nilai aktual tegangan referensi, dan karakteristik toleransi komponen selama pengujian tidak didokumentasikan secara lengkap, ketidakpastian gabungan secara kuantitatif belum dapat dihitung secara menyeluruh dalam penelitian ini.

Dengan demikian, nilai sensitivitas, resolusi, akurasi, repeatability, dan histeresis yang dilaporkan dalam penelitian ini harus dipahami sebagai karakteristik eksperimental dari konfigurasi sensor yang diuji, bukan sebagai nilai universal untuk seluruh LED putih. Evaluasi ketidakpastian secara lebih lengkap pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan dengan mendokumentasikan spesifikasi instrumen referensi, mengukur tegangan referensi aktual ADC, mengkarakterisasi toleransi resistor, mengontrol kondisi lingkungan, dan melakukan pengulangan pengukuran pada beberapa tingkat intensitas.

Tabel 6. Rekapitulasi Parameter Karakteristik Statis Sensor Cahaya Berbasis LED Putih

Parameter	Hasil	Keterangan
Persamaan kalibrasi	$\text{Lux} = -593,79V + 2833,94$	Rentang 13–1789 lux
Linearitas (R^2)	0,9155	Enam titik kalibrasi
Sensitivitas	1,684 mV/lux	Magnitudo; arah negatif
Resolusi	2,90 lux/bit	ADC 10-bit, V_{ref} nominal 5 V
Akurasi	97,42%	Pada 861 lux
Presisi (RSD)	6,02%	Tujuh pengulangan, satu titik
Histeresis Maksimum	0,53 V (15,36% FSO)	Skala <i>dimmer</i> 5

Tabel 6 menunjukkan ringkasan karakteristik statis sensor cahaya berbasis LED putih secara keseluruhan. Konfigurasi LED putih *reverse* bias berhasil menghasilkan sinyal analog yang dapat dikalibrasi terhadap intensitas cahaya. Kekuatan utama sistem ini adalah kesederhanaan rangkaian dan penggunaan komponen yang tersedia secara luas tanpa memerlukan penguat sinyal tambahan. Namun, performanya masih dipengaruhi oleh *noise* dan histeresis, terutama pada intensitas tinggi. Dengan demikian, hasil penelitian ini lebih tepat ditempatkan sebagai karakterisasi awal dan bukti kelayakan konsep untuk sensor cahaya laboratorium berbiaya rendah, dan belum membuktikan bahwa LED putih *reverse* bias merupakan pengganti langsung fotodiode komersial pada aplikasi dengan tuntutan metrologi tinggi.

SIMPULAN

Sensor cahaya berbasis LED putih dalam konfigurasi *reverse* bias berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan resistor *pull-up* 10 M Ω dan ADC 10-bit Arduino Uno tanpa memerlukan rangkaian pengondisi sinyal tambahan. Pada rentang pengujian 13–1789 lux, hubungan antara tegangan keluaran dan intensitas referensi dapat dimodelkan dengan persamaan $\text{Lux} = -593,79V + 2833,94$ ($R^2 = 0,9155$). Magnitudo sensitivitas sebesar 1,684 mV/lux dan resolusi kuantisasi teoritis sebesar 2,90 lux/bit diperoleh dari karakteristik ADC dan hasil regresi. Pada pengujian satu titik (861 lux), sensor menghasilkan akurasi titik

97,42%. Pengujian keterulangan sebanyak tujuh kali menghasilkan simpangan baku 48,73 lux dan RSD 6,02%, sedangkan histeresis maksimum tercatat sebesar 0,53 V atau 15,36% dari full-scale output pada intensitas tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa LED putih *reverse* bias layak digunakan sebagai sensor cahaya sederhana untuk aplikasi *monitoring* skala laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Arduino. (2026). Arduino Uno Rev3 — Technical specifications. <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>
- Bachmann, V., Ronda, C., & Meijerink, A. (2020). Garnet-type nanophosphors for white LED lighting. *Frontiers in Materials*, 7, 210. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00210>
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 03-6197-2011: Konservasi energi pada sistem pencahayaan. BSN Indonesia.
- Commission Internationale de l'Éclairage. (2019). CIE 018:2019 – The basis of physical photometry (3rd ed.). CIE Central Bureau. <https://doi.org/10.25039/TR.018.2019>
- Dietz, P. H., & Alford, J. G. (2019). LEDs as sensors. In *ACM SIGGRAPH 2019 Studio*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3306306.3328752>
- European Parliament & Council of the European Union. (2011). Directive 2011/65/EU on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS recast). *Official Journal of the European Union*, L174, 88–110.
- Fay, C. D., & Nattestad, A. (2022). LED PEDD discharge photometry: Effects of software driven measurements for sensing applications. *Sensors*, 22(4), 1526. <https://doi.org/10.3390/s22041526>
- Fraden, J. (2016). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5th ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>
- Hobbs, P. C. D. (2009). *Building electro-optical systems: Making it all work* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470466339>
- Horowitz, P., & Hill, W. (2015). *The art of electronics* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- International Organization for Standardization. (2008). ISO/IEC Guide 98-3:2008 – Uncertainty of measurement, Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). <https://www.iso.org/standard/50461.html>
- Kasap, S. O. (2013). *Optoelectronics and photonics: Principles and practices* (2nd ed.). Pearson Education.
- Mims, F. M., III. (2009). LED sun photometry. *Optics & Photonics News*, 20(9), 32–38. <https://doi.org/10.1364/OPN.20.9.000032>
- Morris, A. S., & Langari, R. (2016). *Measurement and instrumentation: Theory and application* (2nd ed.). Academic Press.

- O'Toole, M., & Diamond, D. (2008). Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices. *Sensors*, 8(4), 2453–2479. <https://doi.org/10.3390/s8042453>
- Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2007). *Fundamentals of photonics* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471213748>
- Streetman, B. G., & Banerjee, S. K. (2015). *Solid state electronic devices* (7th ed.). Pearson.
- Sticklus, J., Hoehner, P. A., & Hieronymi, M. (2020). Experimental characterization of single-color power LEDs used as photodetectors. *Sensors*, 20(18), 5200. <https://doi.org/10.3390/s20185200>
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0470068329>