Pengaruh Variasi Diameter Lensa dan Arus Listrik terhadap Intensitas Cahaya dan Temperatur pada Lampu *Bi-LED Projector* Sepeda Motor

Esa Setiawan*[1], Purwoko[2], Sugeng Hadi Susilo[3], Muhammad Akhlis Rizza[4]
Politeknik Negeri Malang[1,2,3,4]
*e-mail: esasetiawan71@gmail.com

ABSTRAK

Kinerja lampu utama yang memadai merupakan faktor penentu keselamatan berkendara sepeda motor, terutama pada malam hari, dan regulasi di Indonesia sesuai pp No. 55 tahun 2012. Teknologi *bi-LED projector* yang kian populer menawarkan sumber cahaya yang terarah dan hemat energi. Namun, produk yang beredar di pasaran memiliki variasi diameter lensa dan spesifikasi arus yang berbeda-beda, sehingga memunculkan asumsi umum bahwa lensa terbesar dan arus tertinggi selalu memberikan hasil terbaik. Penelitian ini menganalisis secara eksperimental pengaruh variasi diameter lensa dan arus listrik secara bersamaan terhadap intensitas cahaya dan temperatur kerja lampu *bi-LED projector* yang terpasang pada sepeda motor Honda Supra X125. Rancangan faktorial dua arah digunakan dengan mengombinasikan tiga diameter lensa (2, 2,5, dan 3 inci) dan tiga level arus (2, 4, dan 6 A), masing-masing diuji sebanyak tiga kali pengulangan. Data kemudian diolah menggunakan *Two-Way ANOVA* dan *Response Optimization* pada perangkat lunak *Minitab*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arus listrik dan diameter lensa sama-sama berpengaruh signifikan terhadap intensitas cahaya (P = 0,000), sedangkan terhadap temperatur hanya arus listrik yang berpengaruh signifikan (P = 0,000), sementara diameter lensa tidak berpengaruh signifikan (P = 0,311). Intensitas cahaya tertinggi, yaitu 112.676,74 cd, tercatat pada kombinasi lensa 3 inci dan arus 6 A, tetapi hasil optimasi menunjukkan bahwa kombinasi lensa 3 inci dengan arus 4 A merupakan titik kerja terbaik, yaitu menghasilkan 86.795,2 cd pada temperatur yang lebih aman sebesar 33,83°C dengan nilai *composite desirability* 0,642. Temuan ini menegaskan bahwa memadukan lensa berdiameter besar dengan arus menengah lebih menguntungkan dibandingkan dengan memaksimalkan arus semata, karena tetap jauh melampaui ambang regulasi, sekaligus membatasi *thermal droop* dan menjaga keawetan *chip LED*.

Kata kunci : *Arus Listrik; Bi-LED ; Diameter Lensa; Intensitas Cahaya; Temperatur; Two-Way ANOVA.*

ABSTRACT

Adequate headlight performance is a determining factor for motorcycle safety, especially at night, and regulations in Indonesia are in accordance with PP No. 55 of 2012. The increasingly popular bi-LED projector offers a focused and energy-efficient light source. However, aftermarket units are sold with various lens diameters and driving-current ratings, encouraging the common but unverified assumption that the largest lens and the highest current always produce the best outcome. This study experimentally examines how lens diameter and electric current jointly affect the luminous intensity and operating temperature of a bi-LED projector instalLED on a Honda Supra X125 motorcycle. A quantitative two-factor design was used, combining three lens diameters (2, 2.5, and 3 inches) with three current levels (2, 4, and 6 A), each tested in triplicate, and the data were processed using Two-Way ANOVA and Response Optimization in Minitab. The results show that both current and lens diameter significantly increase luminous intensity (p = 0.000), while only current significantly raises lamp temperature (p = 0.000); lens diameter has no significant thermal effect (p = 0.311). The largest luminous intensity, 112,676.74 cd, occurred at the 3-inch lens and 6 A, but the optimization analysis identified the 3-inch lens combined with 4 A as the best operating point, yielding 86,795.2 cd at a safer 33.83°C, with a composite desirability of 0.642. These findings indicate that pairing a larger lens with a moderate current is more advantageous than maximizing current alone, since it exceeds the regulatory minimum by a wide margin while limiting thermal droop and protecting the LED chip.

Keywords **:** *Bi-LED ; Electric Current; Lens Diameter; Light Intensity; Temperature; Two-Way ANOVA*

PENDAHULUAN

Sistem pencahayaan merupakan salah satu perangkat keselamatan paling mendasar pada sepeda motor, mengingat kendaraan roda dua mendominasi lalu lintas di Indonesia dan sangat rentan terhadap kecelakaan yang dipicu oleh keterbatasan visibilitas pada malam hari maupun dalam kondisi minim cahaya. Kewajiban menyalakan lampu utama pada siang hari telah diatur dalam Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (UUD, 2009),(UUD, 2012),Ketentuan ini menjadikan intensitas cahaya sebagai parameter kunci yang wajib dipenuhi oleh setiap sistem penerangan bagi kendaraan bermotor.

Untuk memenuhi ambang tersebut tanpa membebani sistem kelistrikan kendaraan secara berlebihan, teknologi *bi-LED projector* berkembang pesat sebagai alternatif untuk menggantikan lampu halogen maupun *HID* (*High Intensity Discharge*), karena terbukti mampu menghasilkan pencahayaan yang lebih terang dan hemat energi dengan visibilitas serta keamanan berkendara yang lebih baik (Setiawan dkk., 2025). Cahaya pada *bi-LED* dihasilkan melalui mekanisme elektroluminesensi, yaitu rekombinasi *elektron* dan *hole* pada sambungan semikonduktor yang memancarkan *foton* secara terarah, sehingga lampu jenis ini dikenal hemat energi, terang, dan berumur pakai lebih panjang dibandingkan lampu utama sepeda motor konvensional (Simatupang dkk., 2022). Popularitas ini kemudian mendorong maraknya modifikasi *bi-LED projector* di kalangan pengguna sepeda motor, yang pada praktiknya menghadapi persoalan baru: produk yang beredar di pasaran menawarkan variasi diameter lensa dan spesifikasi arus kerja yang beragam, sementara pemahaman teknis mengenai dampak variasi tersebut terhadap performa lampu masih sangat terbatas di kalangan pengguna maupun mekanik modifikasi,terutama terkait perbedaan dimensi diameter lensa serta suplai arus. Variasi yang beragam ini sering kali menyebabkan pengguna membuat keputusan pemasangan tanpa dasar empiris yang memadai.

Teknologi *LED* dinilai lebih unggul dibandingkan lampu halogen konvensional karena dimensinya yang ringkas, konsumsi daya rendah, dan konsistensinya memenuhi ambang intensitas cahaya sesuai regulasi (Setiawan dkk., 2025 ; Sugiarto dkk., 2023). *Bi-LED projector* menggabungkan fungsi lampu dekat dan jauh dalam satu unit optik; berbeda dari reflektor parabola konvensional, sistem ini memanfaatkan lensa untuk memfokuskan cahaya dari *chip LED* sehingga distribusinya lebih merata dan memiliki garis potong *cutoff* yang tegas agar tidak menyilaukan pengguna jalan dari arah berlawanan (Zhang dkk., 2021). Struktur utamanya terdiri atas *chip LED* , reflektor internal, mekanisme pemindah jauh-dekat, dan lensa *proyektor* sebagai elemen akhir untuk menyebarkan cahaya.



Gambar 1. Variasi Diameter Lensa Bi-LED Projector (2 inci, 2,5 inci, dan 3 inci)

Lensa yang umum digunakan pada *bi-LED projector* berjenis *plano-konveks*, yaitu lensa dengan satu permukaan datar dan satu permukaan cembung yang berfungsi untuk mengumpulkan serta memfokuskan berkas cahaya sejajar pada satu titik fokus di belakang lensa. Kemampuan lensa dalam memfokuskan cahaya ditentukan oleh indeks bias material serta diameter dan kelengkungan permukaannya; semakin besar kelengkungan, semakin pendek jarak fokus yang terbentuk sehingga cahaya terkonsentrasi pada area yang lebih sempit dan intensitasnya meningkat. Selain kelengkungan, diameter lensa juga berperan sebagai gerbang keluaran cahaya, karena lensa yang lebih lebar mampu menangkap *fraksi* fluks cahaya yang lebih besar daripada *chip LED* , sehingga berpotensi menghasilkan intensitas pencahayaan yang lebih tinggi selama tidak dibatasi oleh sumber cahaya maupun komponen optik lainnya (Mulya dkk., 2020).

Asumsi yang umum berkembang menyatakan bahwa penggunaan lensa yang dikombinasikan dengan arus listrik tertinggi akan selalu menghasilkan keluaran cahaya terbaik (Priyanto, 2024). Sementara secara kelistrikan peningkatan arus *forward* pada *chip LED* memang melipatgandakan emisi *foton*, hal ini juga meningkatkan disipasi daya yang kemudian berubah menjadi panas pada sambungan semikonduktor (Cahyadi Putra, 2024).Apabila arus yang diinjeksikan terlalu besar, energi listrik yang terbuang sebagai panas *thermal droop* dapat menurunkan efisiensi pendaran cahaya, mempercepat degradasi material semikonduktor, dan pada akhirnya memperpendek umur pakai komponen *LED* secara drastis (Nasution, 2026).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengamati keterkaitan antara parameter kelistrikan dan performa optik pada lampu *LED* . Studi mengenai perubahan tegangan pada lampu CFL dan *LED* menunjukkan bahwa besaran kelistrikan berbanding lurus dengan intensitas cahaya yang dipancarkan (Andri & Yulisman, 2022),sementara kajian arus harmonik pada beban lampu *LED* domestik menegaskan bahwa karakteristik arus turut berkorelasi dengan kenaikan temperatur komponen akibat disipasi daya (Cahyadi Putra, 2024). Dari sisi optik, penelitian penggunaan lensa cembung untuk sel surya membuktikan bahwa lensa mampu memfokuskan berkas cahaya sehingga meningkatkan intensitas secara signifikan, dengan dimensi dan jarak fokus lensa turut menentukan luas area sebaran cahaya (Priyanto, 2024),yang diperkuat oleh penelitian lensa cembung pada panel surya berbasis Arduino yang menyimpulkan bahwa pemusatan cahaya oleh lensa juga diiringi kenaikan temperatur pada area fokus (Khaspurrohman dkk., 2021).

Adapun penelitian yang memadukan aspek optik *proyektor* dan variasi kelistrikan pernah dilakukan pada sistem *bi-LED proyektor* sepeda motor dengan mengamati pengaruh variasi daya dan penggunaan voltage stabilizer terhadap fluks cahaya, yang mengonfirmasi bahwa kombinasi sistem lensa *proyektor* dengan variasi daya berdampak signifikan terhadap fluks cahaya (Zuhriansyah dkk., 2025). Namun, penelitian tersebut memvariasikan besaran daya dan kestabilan tegangan, bukan dimensi fisik lensa, sehingga interaksi antara diameter lensa dan arus listrik terhadap intensitas cahaya sekaligus temperatur belum terungkap secara komprehensif. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan menguji kedua faktor tersebut secara simultan menggunakan rancangan faktorial dua arah.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menghasilkan data empiris mengenai pengaruh variasi diameter lensa (2, 2,5, dan 3 inci) dan arus listrik (2, 4, dan 6 A) terhadap intensitas cahaya dan temperatur pada lampu *bi-LED projector* yang dipasang pada sepeda motor Honda Supra X125, sekaligus menentukan kombinasi parameter yang paling optimal di antara keduanya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan teknis bagi pengendara, teknisi, dan praktisi otomotif dalam memilih serta menerapkan sistem pencahayaan *bi-LED projector* yang optimal, sehingga mampu meningkatkan visibilitas dan keselamatan berkendara tanpa mengorbankan keawetan komponen lampu.

METODE PENELITIAN

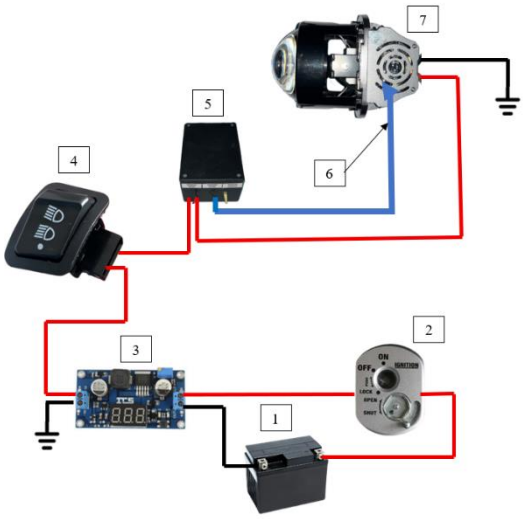
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif dan rancangan faktorial dua arah (*Two-Way ANOVA*) yang bertujuan untuk mengamati pengaruh dua variabel bebas secara bersamaan terhadap dua variabel terikat (Khoeriyah dkk., 2025). Variabel bebas pertama adalah diameter lensa *bi-LED projector* dengan tiga level, yaitu 2 inci, 2,5 inci, dan 3 inci. Variabel bebas kedua adalah arus listrik searah (DC) yang dialirkan ke modul lampu melalui *buck-boost converter cc*, dengan tiga level, yaitu 2 A, 4 A, dan 6 A. Kedua faktor tersebut menghasilkan $3 \times 3 = 9$ kombinasi perlakuan, yang masing-masing diuji sebanyak tiga kali ulangan sehingga diperoleh 27 titik data untuk setiap variabel terikat. Variabel terikat yang diamati adalah intensitas cahaya (cd) dan temperatur operasional lampu (°C), sedangkan variabel kontrol meliputi jenis kendaraan uji (Honda Supra X125), jarak pengujian yang tetap sejauh 5 meter antara sumber cahaya dan titik ukur, serta kondisi ruang gelap agar bebas dari interferensi cahaya dari sekitar.

Hipotesis statistik penelitian ini dirumuskan untuk masing-masing variabel terikat sebagai berikut. Untuk intensitas cahaya, H0 menyatakan tidak terdapat pengaruh signifikan dari variasi diameter lensa dan arus listrik terhadap intensitas cahaya, sedangkan H1 menyatakan sebaliknya. Untuk temperatur, H0 menyatakan bahwa variasi diameter lensa dan arus listrik tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap

kenaikan temperatur, sedangkan H1 menyatakan sebaliknya. Pengujian hipotesis dilakukan berdasarkan nilai P pada taraf signifikansi $\alpha = 0{,}05$; apabila $P < 0{,}05$, maka H0 ditolak dan H1 diterima.

Peralatan dan Instrumen Pengukuran

Pengujian dilakukan menggunakan lampu *bi-LED projector* sebagai objek uji, tiga lensa *Bi-LED* berdiameter 2, 2,5, dan 3 inci, serta *buck-boost converter cc* sebagai pengatur arus listrik yang dialirkan ke modul lampu. Pengukuran intensitas cahaya, arus, dan temperatur dilakukan menggunakan *datalogger* rancangan sendiri yang terintegrasi dengan smartphone, terdiri atas sensor cahaya BH1750FVI, sensor arus ACS712, sensor temperatur termokopel tipe K dengan modul penguat MAX6675, serta mikrokontroler ESP32 DevKit V1 sebagai unit pemroses dan pengirim data. Penggunaan *datalogger* berbasis sensor ini memungkinkan pencatatan tiga besaran (lux, arus, dan temperatur) secara simultan dan konsisten pada setiap ulangan pengujian yang ditampilkan pada smartphone.



Gambar 2. Skema Rangkaian Kelistrikan Pengujian Bi-*LED* : (1) Baterai, (2) Kunci Kontak, (3) *Buck-boost converter cc*, (4) Saklar, (5) *Datalogger*, (6) Sensor Termocuple, (7) Bi-*LED*

Skema rangkaian pengujian ditunjukkan pada Gambar 2. Kutub positif baterai dihubungkan ke kunci kontak, kemudian diteruskan ke input positif *buck-boost converter cc* yang berfungsi mengatur besaran arus listrik yang dialirkan ke sistem. Output positif *converter* dihubungkan ke sensor arus pada *datalogger*, dan diteruskan ke saklar sebelum masuk ke kabel positif lampu bi-*LED* , sementara kabel negatif lampu dihubungkan langsung ke output negatif *converter*. Sensor termokopel dipasang pada bagian belakang board *chip LED* untuk memantau temperatur secara langsung, sedangkan sensor cahaya BH1750FVI diarahkan ke bidang pantul (dinding) pada jarak 5 meter dari sumber cahaya.



Gambar 3. Setting Peralatan Pengujian: (1) Sepeda Motor Honda Supra X125, (2) *Bi-LED Projector*, (3) *Buck-boost converter cc*, (4)-(6) Lensa 2/2,5/3 Inci, (7) *Datalogger*, (8) Sensor Cahaya, (9) Dinding, (10) Smartphone

Prosedur Pengambilan Data

Pengambilan data diawali dengan memasang lensa pada urutan tertentu (2 inci, 2,5 inci, dan 3 inci), kemudian pada setiap lensa dilakukan pengujian pada tiga level arus listrik (2 A, 4 A, dan 6 A) secara bergantian menggunakan *buck-boost converter cc*. Setiap kombinasi lensa dan arus diuji sebanyak tiga kali ulangan, dengan nilai lux dan temperatur yang ditampilkan pada smartphone yang terintegrasi dengan *datalogger*. Nilai intensitas cahaya (cd) kemudian dihitung dari rata-rata iluminansi (lux) menggunakan persamaan $Iv = Ev \times D^2$ dengan D = 5 meter. Seluruh data hasil pengujian selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan metode statistika *Two-Way ANOVA* pada perangkat lunak *minitab* untuk menguji pengaruh utama masing-masing faktor maupun interaksi keduanya, serta dilanjutkan dengan *analisis Response Optimization* berbasis fungsi *desirability* untuk menentukan kombinasi parameter yang paling optimal terhadap kedua respons secara simultan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang keluar dari *datalogger* meliputi nilai iluminansi (lux) dan temperatur (°C) pada setiap kombinasi diameter lensa dan arus listrik, masing-masing diulang sebanyak 3 kali. Hasil pengukuran kemudian dirata-ratakan dan dikonversi menjadi intensitas cahaya (cd) menggunakan persamaan $Iv = Ev \times D^2$ dengan jarak pengukuran D = 5 meter. Sebagai ilustrasi, pada kombinasi lensa 3 inci dan arus 2 A diperoleh rata-rata iluminansi 1.672,22 lx, sehingga intensitas cahayanya adalah $Iv = 1.672{,}22 \times 5^2 = 41.805{,}5$ cd. Rekapitulasi hasil pengujian untuk seluruh kombinasi disajikan pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 1. Hasil Pengujian Lensa Diameter 3 Inci

Arus listrik	No	Lux (*lx*)	Temperature (°*C*)	Jumlah Intensitas Cahaya (*cd*)
	1	1.671,25	30,25	
	2	1.674,17	30,25	
2 A	3	1.671,25	30,5	41.805,5
	Rata-Rata	1.672,22	30,33	
	1	3.476,67	34	
	2	3.467,92	34,5	
4 A	3	3.470,83	33	86.795,25
	Rata-rata	3.471,81	33,83	
	1	5.142,08	39	
	2	5.121,67	39,75	
6 A	3	5.101,25	40,5	112.676,74
	Rata-rata	5.121,67	39,75	

Tabel 2. Hasil Pengujian Lensa Diameter 2,5 Inci

Arus listrik	No	Lux (*lx*)	Temperature (°*C*)	Jumlah Intensitas Cahaya (*cd*)
	1	1.187,08	30,75	
	2	1.190,00	31	29.750
2 A	3	1.192,92	31,5	
	Rata-Rata	1.190,00	31	
	1	2.444,17	34,25	
	2	2.420,63	34,5	
4 A	3	2.438,33	34,75	60.859,5
	Rata-rata	2.434,38	34,5	
	1	3.462,08	38,75	
	2	3.453,33	39,5	
6 A	3	3.473,75	39,75	86.576,25
	Rata-rata	3.463,05	39,33	

Tabel 3. Hasil Pengujian Lensa Diameter 2 Inci

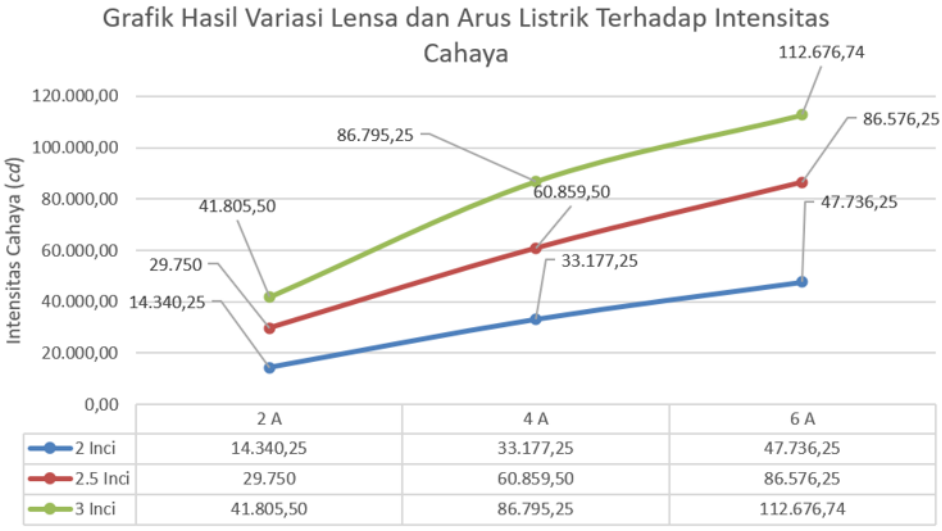
Arus listrik	No	Lux (*lx*)	Temperature (°*C*)	Jumlah Intensitas Cahaya (*cd*)
	1	574,58	30,75	
	2	574,58	30,25	

2 A	3	571,67	30,25	14.340,25
	Rata-Rata	573,61	30,41	
	1	1.332,92	34,5	
	2	1.332,92	34,5	
4 A	3	1.315,42	33	33.177,25
	Rata-rata	1.327,09	34	
	1	1.901,67	39,5	
	2	1.901,67	39,75	47.736,25
6 A	3	1.925,00	39	
	Rata-rata	1.909,45	39,41	

Pengaruh Arus Listrik dan Diameter Lensa terhadap Intensitas Cahaya

Data pada Tabel 2 hingga Tabel 4 menunjukkan pola yang konsisten: pada setiap diameter lensa, peningkatan arus listrik senantiasa diikuti oleh kenaikan intensitas cahaya. Pada lensa 3 inci, intensitas cahaya naik dari 41.805,50 cd pada arus 2 A menjadi 86.795,25 cd pada arus 4 A, dan mencapai 112.676,74 cd pada arus 6 A. Pola serupa terjadi pada lensa 2,5 inci (29.750,00 cd; 60.859,50 cd; 86.576,25 cd) maupun lensa 2 inci (14.340,25 cd; 33.177,25 cd; 47.736,25 cd). Kecenderungan ini sejalan dengan prinsip elektroluminesensi, di mana arus yang lebih besar meningkatkan laju rekombinasi *elektron* dan *hole* pada *chip LED* sehingga jumlah *foton* yang dipancarkan turut bertambah.

Di sisi lain, pada tingkat arus yang sama, diameter lensa yang lebih besar selalu menghasilkan intensitas cahaya yang lebih tinggi. Pada arus 6 A, misalnya, lensa 2 inci hanya menghasilkan 47.736,25 cd, meningkat menjadi 86.576,25 cd pada lensa 2,5 inci, dan mencapai 112.676,74 cd pada lensa 3 inci—kenaikan sebesar 64.940,49 cd akibat pembesaran diameter lensa dari 2 inci menjadi 3 inci pada arus yang tetap. Hal ini menegaskan bahwa lensa berdiameter lebih besar memiliki area bukaan yang lebih luas untuk mengumpulkan dan memfokuskan berkas cahaya dari *chip LED* , sehingga *fraksi foton* yang berhasil diteruskan menuju titik ukur menjadi lebih besar.

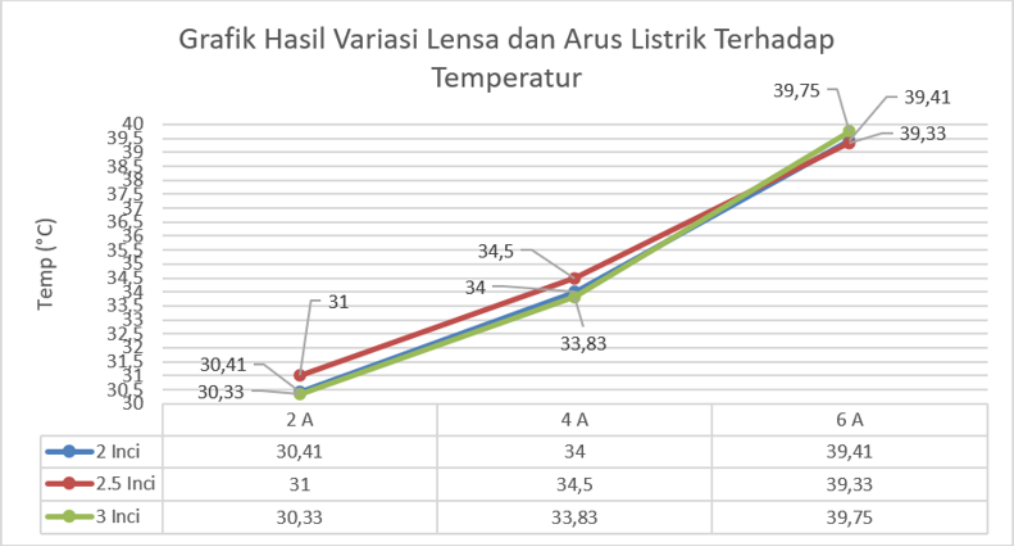


Gambar 4. Grafik Pengaruh Variasi Diameter Lensa dan Arus Listrik terhadap Intensitas Cahaya

Pengaruh Arus Listrik dan Diameter Lensa terhadap Temperatur

Berbeda dengan pola pada intensitas cahaya, temperatur lampu *bi-LED* terutama dipengaruhi oleh besarnya arus listrik, bukan diameter lensa. Pada lensa 3 inci, temperatur rata-rata naik dari 30,33°C pada arus 2 A menjadi 33,83°C pada arus 4 A, dan mencapai 39,75°C pada arus 6 A. Pola kenaikan yang hampir identik juga terjadi pada lensa 2,5 inci (31,00°C; 34,50°C; 39,33°C) dan lensa 2 inci (30,41°C; 34,00°C; 39,41°C). Ketika dibandingkan pada arus yang sama, selisih temperatur antarlensa sangat kecil misalnya pada arus 6 A, ketiga lensa hanya berbeda pada rentang 39,33°C hingga 39,75°C. Hal ini mengindikasikan bahwa lensa hanya berperan sebagai medium optik pasif yang membiaskan cahaya dan tidak terlibat dalam

proses pelepasan kalor pada *chip LED* maupun *heatsink* lampu, sehingga variasi ukurannya tidak berdampak signifikan terhadap kenaikan suhu.



Gambar 5. Grafik Pengaruh Variasi Diameter Lensa dan Arus Listrik terhadap Temperatur

Kenaikan temperatur akibat arus listrik terjadi karena aliran *elektron* yang lebih besar menimbulkan disipasi daya yang lebih tinggi pada resistansi internal *chip LED* , sesuai dengan hukum Joule. Meskipun kombinasi lensa 3 inci dan arus 6 A menghasilkan intensitas cahaya tertinggi di antara seluruh pengujian, temperaturnya (39,75°C) juga merupakan yang tertinggi, sehingga berpotensi mendekati ambang *thermal droop* apabila dioperasikan dalam jangka waktu lama. Sebaliknya, kombinasi lensa 2 inci dan arus 2 A menghasilkan temperatur terendah (30,41 °C), tetapi intensitas cahayanya juga paling rendah (14.340,25 cd) dan berada jauh di bawah kebutuhan praktis untuk pencahayaan kendaraan. Temuan ini menunjukkan perlunya analisis lebih lanjut untuk menentukan kombinasi yang memberikan keseimbangan terbaik antara intensitas cahaya yang tinggi dan temperatur kerja yang tetap aman, sebagaimana diuraikan pada bagian optimasi respons.

Analisis Statistik *Two-Way ANOVA*

Data hasil pengujian selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan metode *Two-Way ANOVA* pada perangkat lunak *Minitab* untuk menguji pengaruh utama *main effect* diameter lensa dan arus listrik, serta interaksi keduanya, terhadap masing-masing variabel terikat. Rancangan faktorial yang digunakan *factor information* terdiri atas dua faktor dengan tiga level pada setiap faktor, yaitu diameter lensa (2,0; 2,5; dan 3,0 inci) dan arus listrik (2, 4, dan 6 A), sehingga terbentuk 3 × 3 = 9 kombinasi perlakuan dengan tiga kali ulangan pada setiap kombinasi, atau 27 observasi secara keseluruhan. Pengujian hipotesis dilakukan pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, dengan kriteria $P < 0,05$ menyebabkan H0 ditolak dan H1 diterima.

Hasil Analisis Statistik Metode *Two-Way ANOVA* (Intensitas Cahaya)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	30726666481	3840833310	55892,54	0,000
Linear	4	28622957811	7155739453	104131,70	0,000
Diameter (inch)	2	13024199112	6512099556	94765,32	0,000
Arus (A)	2	15598758698	7799379349	113498,07	0,000
2-Way Interactions	4	2103708670	525927167	7653,39	0,000
Diameter (inch)*Arus (A)	4	2103708670	525927167	7653,39	0,000
Error	18	1236927	68718		
Total	26	30727903408			

Gambar 6. *Analysis of Variance* Intensitas Cahaya

Gambar 6 menyajikan keluaran *analysis of variance Minitab* untuk respons intensitas cahaya. Derajat bebas (DF) faktor Diameter dan faktor Arus masing-masing bernilai 2, sesuai jumlah level dikurangi satu, sedangkan interaksi Diameter×Arus memiliki DF = 4 dan *Error* memiliki DF = 18 sebagai konsekuensi dari tiga kali ulangan pada 9 kombinasi perlakuan. Baik faktor diameter lensa, faktor arus listrik, maupun interaksi keduanya menghasilkan nilai P = 0,000 (< 0,05), sehingga H0 ditolak dan H1 diterima untuk ketiga sumber variasi tersebut. Nilai Adj SS pada faktor arus (15.598.758.698) sedikit lebih besar dibandingkan faktor diameter lensa (13.024.199.112), yang mengindikasikan bahwa arus listrik memberikan kontribusi variasi yang sedikit lebih dominan. Sementara itu, Adj SS *Error* yang sangat kecil (1.236.927) dari total variasi (30.727.903.408) menunjukkan noise pengukuran yang sangat rendah.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
262,142	100,00%	99,99%	99,99%

Gambar 7. Model *Summary* Intensitas Cahaya

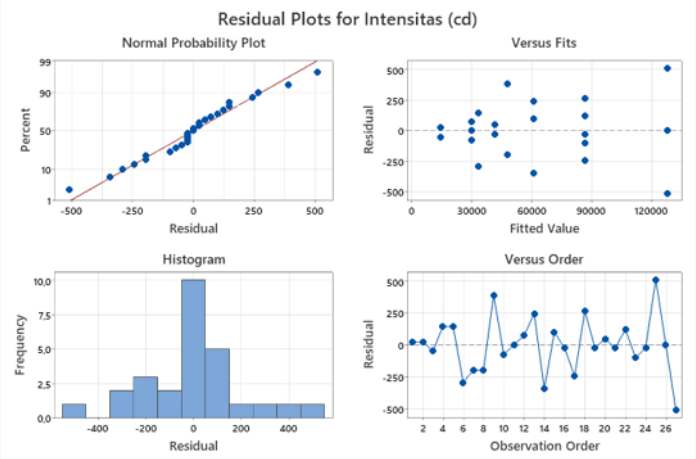
Kebaikan Model regresi dievaluasi melalui model *summary* pada Gambar 7. Nilai S menunjukkan simpangan baku dari selisih antara data pengamatan dan nilai prediksi Model, sedangkan R-sq, R-sq(adj), dan R-sq(pred) menunjukkan proporsi variasi data yang mampu dijelaskan oleh Model. Ketiga nilai R-sq yang sangat tinggi dan saling berdekatan (100,00%; 99,99%; 99,99%) menandakan bahwa Model regresi sudah sangat akurat dan tidak mengalami *overfitting*.

Regression Equation

Intensitas (cd) = 58786,9 - 27035,7 Diameter (inch)_2,0 + 275,1 Diameter (inch)_2,5
+ 26760,6 Diameter (inch)_3,0 - 30154,9 Arus (A)_2 + 1490,4 Arus (A)_4
+ 28664,5 Arus (A)_6 + 12744 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0 2
- 64 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0 4 - 12680 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0 6
+ 843 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5 2 + 307 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5 4
- 1150 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5 6 - 13587 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0
2 - 243 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0 4 + 13830 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0
6

Gambar 8. Persamaan regresi Intensitas cahaya

Konstanta 58.786,9 cd merupakan rata-rata umum *grand mean* intensitas cahaya. Kombinasi diameter 3,0 inci dan arus 6 A menyumbangkan penambahan terbesar (26.760,6 + 28.664,5), konsisten dengan hasil pengujian yang mencatat intensitas cahaya tertinggi, sedangkan kombinasi diameter 2,0 inci dan arus 2 A menyumbangkan pengurangan terbesar, sejalan dengan intensitas cahaya terendah.



Gambar 9. Residual Plots untuk Intensitas Cahaya

Keempat panel *residual plot* menunjukkan Model regresi intensitas cahaya telah memenuhi asumsi dasar *ANOVA*: titik-titik pada *Normal probability plot* mengikuti garis diagonal secara rapat normalitas terpenuhi sebaran pada *Versus Fits* bersifat acak di sekitar nol tanpa pola corong terpenuhi; histogram

residual terpusat di sekitar nol dengan bentuk mendekati simetris; dan *versus order* tidak menunjukkan tren maupun pola siklik sepanjang 27 observasi, sehingga model dinyatakan valid.

Hasil Analisis Statistik Menggunakan *Two-Way ANOVA* (Temperatur)

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	362,935	45,367	155,54	0,000
Linear	4	361,634	90,409	309,97	0,000
Diameter (inch)	2	0,727	0,363	1,25	0,311
Arus (A)	2	360,907	180,454	618,70	0,000
2-Way Interactions	4	1,301	0,325	1,12	0,380
Diameter (inch)*Arus (A)	4	1,301	0,325	1,12	0,380
Error	18	5,250	0,292		
Total	26	368,185			

Gambar 10. *Analysis of Variance* Temperature

Gambar 10 menyajikan keluaran *analysis of variance Minitab* untuk respons temperatur, dengan struktur derajat bebas yang sama. Berbeda dengan intensitas cahaya, hanya faktor arus listrik yang berpengaruh signifikan (P = 0,000), sedangkan faktor diameter lensa (P = 0,311) dan interaksi Diameter×Arus (P = 0,380) tidak signifikan pada taraf α = 0,05. Adj SS faktor Arus (360,907) jauh lebih besar dibandingkan faktor Diameter (0,727) dari total variasi 368,185, yang menegaskan bahwa arus listrik memberikan kontribusi yang sangat dominan terhadap perubahan temperatur.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,540062	98,57%	97,94%	96,79%

Gambar 11. Model *Summary* Temperatur

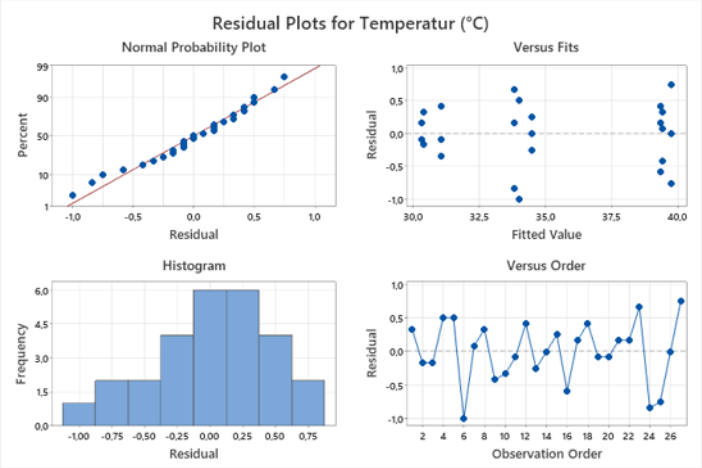
Model *summary* pada Gambar 11 menunjukkan R-sq sebesar 98,57%, R-sq(adj) sebesar 97,94%, dan R-sq(pred) sebesar 96,79%. Meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan dengan Model intensitas cahaya, ketiga nilai di atas 96% menunjukkan bahwa Model regresi temperatur tetap sangat baik dan layak digunakan.

Regression Equation

Temperatur (°C) = 34,741 - 0,130 Diameter (inch)_2,0 + 0,231 Diameter (inch)_2,5
- 0,102 Diameter (inch)_3,0 - 4,130 Arus (A)_2 - 0,630 Arus (A)_4
+ 4,759 Arus (A)_6 - 0,065 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0 2
+ 0,019 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0 4 + 0,046 Diameter (inch)*Arus (A)_2,0
6 + 0,241 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5 2
+ 0,157 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5 4 - 0,398 Diameter (inch)*Arus (A)_2,5
6 - 0,176 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0 2
- 0,176 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0 4 + 0,352 Diameter (inch)*Arus (A)_3,0
6

Gambar 12. Persamaan Regresi Temperatur

Koefisien pada faktor arus (−4,130 hingga +4,759) jauh lebih besar dibandingkan koefisien diameter lensa (−0,130 hingga +0,231), menegaskan bahwa temperatur lampu *bi-LED* terutama ditentukan oleh besarnya arus listrik, sedangkan pengaruh diameter lensa dapat diabaikan secara praktis.

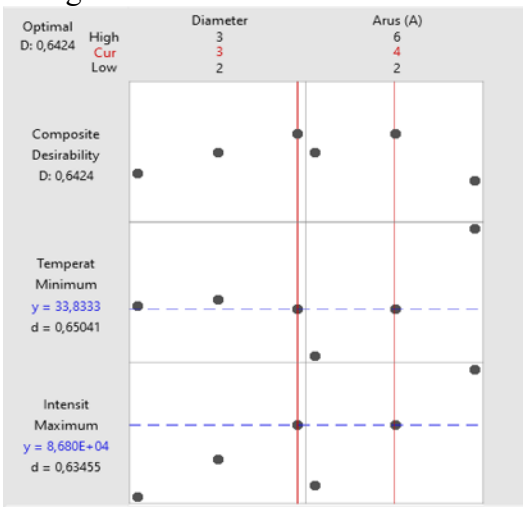


Gambar 13. Residual Plots Temperatur

Normal probability plot secara umum mengikuti garis diagonal, *versus fits* membentuk tiga kelompok nilai fitted (±30°C, 34°C, 39°C sesuai level arus) dengan sebaran yang cukup acak dan homogen, Histogram mendekati simetris di sekitar nol, dan *versus order* tanpa tren sistematis, sehingga asumsi normalitas, dan independensi cukup terpenuhi dan model regresi temperatur dinyatakan valid.

Optimasi Kombinasi Diameter Lensa dan Arus Listrik

Mengingat intensitas cahaya dan temperatur menunjukkan pola pengaruh yang berbeda terhadap kedua faktor tersebut, *analisis response optimization* dengan fungsi *desirability* digunakan untuk mencari kombinasi diameter lensa dan arus listrik yang secara simultan menghasilkan intensitas cahaya setinggi mungkin dan temperatur serendah mungkin.



Gambar 14. *Response Optimization* Intensitas Cahaya dan Temperatur

Hasil optimasi pada *minitab* merekomendasikan diameter lensa 3 inci dengan arus listrik 4 A sebagai titik kerja optimum (ditandai dengan garis vertikal merah pada grafik), dengan nilai *composite desirability* sebesar 0,6424. Pada kombinasi tersebut, Model memprediksi temperatur sebesar 33,83°C (*desirability* individu d = 0,650) dan intensitas cahaya sebesar 86.795,2 cd (*desirability* individu d = 0,635), sehingga kedua respons terpenuhi secara proporsional tanpa mengorbankan salah satunya secara berlebihan. Nilai *desirability* individu untuk kedua respons yang relatif seimbang (0,650 dan 0,635) menunjukkan bahwa *Minitab* berhasil menemukan titik tengah (*trade-off* point) terbaik antara kebutuhan temperatur rendah dan intensitas cahaya yang tinggi.

Pemilihan arus 4 A, bukan arus maksimum 6 A, sebagai kondisi optimum mencerminkan pertimbangan *trade-off*: meskipun arus 6 A menghasilkan intensitas cahaya tertinggi (112.676,74 cd pada lensa 3 inci), temperatur yang menyertainya (39,75°C) mendekati batas atas rentang pengujian dan berisiko mempercepat *thermal droop* apabila lampu dioperasikan dalam waktu lama. Sebaliknya, pada arus 4 A dengan lensa 3 inci, lampu tetap menghasilkan intensitas cahaya yang tinggi dengan margin lebih dari tujuh

kali lipat sementara mempertahankan temperatur dalam rentang yang lebih aman untuk menjaga keawetan *chip LED* . Dengan demikian, kombinasi lensa berdiameter besar dan arus menengah terbukti lebih menguntungkan secara teknis dibandingkan dengan strategi yang hanya memaksimalkan arus untuk mengejar cahaya seterang mungkin.

Analisis Sains

Hasil pengujian Two-Way ANOVA menunjukkan bahwa arus listrik dan diameter lensa berpengaruh signifikan terhadap intensitas cahaya, namun hanya arus yang berpengaruh terhadap suhu. Temuan ini konsisten dengan prinsip daya listrik $P = V \times I$, di mana peningkatan arus memperbesar rekombinasi *elektron-hole* pada *junction LED* sehingga jumlah *foton* yang dipancarkan meningkat. Secara simultan, lensa berdiameter lebih besar 3 inci memperluas luas penampang efektif ($A = \pi \times D^2/4$), sehingga lebih banyak lux cahaya yang terkumpul dan dibiaskan terfokus ke titik ukur.

Sesuai Hukum Joule ($Q = I^2Rt$), kenaikan arus turut meningkatkan disipasi daya menjadi panas pada *junction LED* akibat resistansi internal, yang menjelaskan lonjakan suhu pada arus maksimal (6 A) hingga 40°C. Diameter lensa tidak berkontribusi terhadap suhu karena lensa merupakan komponen optik pasif yang tidak terlibat dalam sistem kelistrikan maupun pendinginan, dan posisi pengukuran termokopel yang terpusat pada *heatsink* turut memperkuat temuan ini.

Meskipun kombinasi arus 6 A dan lensa 3inci menghasilkan intensitas cahaya tertinggi, hasil *Response Optimization* merekomendasikan arus 4 A sebagai titik optimal guna mencegah *thermal droop*, yaitu penurunan efisiensi pendaran akibat suhu berlebih. Dengan menginjeksikan arus 4 A pada lensa 3 inci, sistem mampu melampaui syarat (berdasarkan PP No. 55 Tahun 2012) dengan margin yang sangat besar (86.795,2 cd), sekaligus mempertahankan temperatur pada kisaran aman 33,8°C untuk menjamin keawetan dan umur pakai *lifetime* lampu.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistik *Two-Way ANOVA* serta *response optimization* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi diameter lensa dan arus listrik secara bersama-sama memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap intensitas cahaya yang dihasilkan oleh lampu *bi-LED projector* ($P = 0{,}000$ untuk kedua faktor beserta interaksinya), di mana intensitas cahaya tertinggi sebesar 112.676,74 cd diperoleh pada kombinasi lensa 3 inci dan arus 6 A. Terhadap temperatur, hanya arus listrik yang terbukti berpengaruh signifikan ($P = 0{,}000$), sedangkan variasi diameter lensa tidak memberikan pengaruh yang berarti ($P = 0{,}311$), karena lensa hanya berfungsi sebagai medium optik pasif yang tidak terlibat dalam pelepasan kalor komponen *LED* . Melalui analisis *response optimization*, kombinasi parameter paling optimal ditemukan pada penggunaan lensa berdiameter 3 inci dengan arus listrik 4 A, yang menghasilkan intensitas cahaya sebesar 86.795,2 cd pada temperatur 33,83°C, dengan nilai *composite desirability* 0,642, sehingga memberikan keseimbangan terbaik antara kebutuhan pencahayaan yang tinggi dan keawetan komponen dalam jangka panjang.

Bagi pengguna dan teknisi modifikasi, disarankan untuk tidak memaksimalkan arus listrik pada lampu *bi-LED* semata-mata demi mengejar cahaya yang lebih terang, karena penggunaan lensa berdiameter 3 inci dengan arus yang dibatasi pada kisaran 4 A sudah lebih dari cukup untuk memenuhi standar laik jalan sekaligus menjaga usia pakai komponen. Bagi penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian pada kondisi dinamis saat kendaraan melaju untuk mengamati efek pendinginan udara terhadap temperatur kerja lampu, serta menambahkan variabel lain seperti jenis kipas pendingin tambahan dan pola distribusi sorot cahaya (*cutoff*) yang memengaruhi kenyamanan visual pengguna jalan dari arah berlawanan. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada kondisi pengujian statis dan rentang variasi arus serta diameter lensa yang terbatas pada tiga level, sehingga generalisasi hasil pada konfigurasi lensa maupun arus di luar rentang tersebut perlu dilakukan dengan hati-hati.

DAFTAR PUSTAKA

Andri, & Yulisman. (2022). ANALISA PERUBAHAN TEGANGAN TERHADAP INTENSITAS CAHAYA PADA LAMPU CFL DAN LAMPU *LED* , 1(3), 100–106.

Cahyadi Putra, A. (2024). ANALISIS ARUS HARMONIK PADA BEBAN LAMPU *LED* UNTUK PENGGUNAAN SEKTOR DOMESTIK, 23220327.

INDONESIA, P. R. (2012). PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA NOMOR 55 TAHUN 2012 TENTANG KENDARAAN.

Khaspurrohman, A., Budairi, J. Al, Kusumah, B. R., Nurkhasanah, D., Fatimatuzzahra, F., & Pratama, A. R. (2021). Pengaruh Lensa Cembung Terhadap Keluaran Panel Surya Secara Real Time Menggunakan Arduino, 1(1), 11–18.

Khoeriyah, A. D., Putri, D. O., Rahma, N. A., Syariah, P., & Ekonomi, F. (2025). *ANOVA* TWO WAY (ANALISIS VARIANS DUA ARAH).

Mulya, H., Magdalena, S. E., Bambang, W., Purba Robinson Purba, & Nempung Ignatius Judo. (2020). TINJAUAN FLUKS CAHAYA, SUHUWARNA, TOTAL HARMONICDISTORTION, FAKTOR DAYA LAMPU PIJAR, LAMPU HEMAT ENERGI DAN LIGHTEMITTING DIODE, 3(September), 22–30.

Nasution, A. A., Sukrawan, Y., & Noor, R. A. M. (2026). Analisis Pengaruh Drop Tegangan Baterai terhadap Waktu Starting pada Engine 4N15 Mitsubishi Triton, 10(1), 131–140. https://doi.org/10.30588/jeemm.v10i1.2691

PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA. (2009). No TitleTENTANG, UNDANG-UNDANG REPUBLIK INDONESIA NOMOR 22 TAHUN 2009 JALAN, LALU LINTAS DAN ANGKUTAN.

Priyanto, B. (2024). PEMAKSIMALAN DAYA KELUARAN SEL SURYA MENGGUNAKAN LENSA CEMBUNG.

Setiawan, D., Rokhimawan, D. N., & Munawar, W. (2025). ANALISIS PENGGUNAAN LAMPU *BI-LED* DALAM MENINGKATKAN VISIBILITAS DAN PENGARUHNYA TERHADAP KEAMANAN PENGEMUDI, 9(2), 111–116.

Simatupang, J. W., Santoso, F. H., Afristanto, S. D., Bramasto, R., & Maheli, H. B. (2022). LAMPU *LED* SEBAGAI PILIHAN YANG LEBIH EFISIEN UNTUK LAMPU UTAMA SEPEDA MOTOR, 1, 20–26.

Sudarti, & Putri, S. F. D. (2022). Analisis Intensitas Cahaya di Dalam Ruangan dengan Menggunakan Aplikasi Smart Luxmeter Berbasis Android, 12, 51–55.

Sugiarto, T., Rizal, M. A., Fernandez, D., & Arif, A. (2023). Analisis Penggunaan Beberapa Jenis Lampu Utama Sepeda Motor Terhadap Intensitas Cahaya, 133–144.

Widiarto, E., Adiwismono, A., Setiyoko, T., & Triyani, E. (2022). PENGARUH FLUKTUASI TEGANGAN TERHADAP INTENSITAS CAHAYA PADA LAMPU *LED* (Light Emitti Diode) DARI BERBAGAI MEREK, 18(1), 46–52.

Zhang, H., Liu, D., Wei, Y., & Wang, H. (2021). Asymmetric Double Freeform Surface Lens for Integrated *LED* Automobile Headlamp.

Zuhriansyah, H. R., Winoko, Y. A., & Purwoko. (2025). Pengaruh Variasi Daya *Bi-LED Projector* dan Penggunaan Voltage Stabilizer terhadap Fluks Cahaya pada Sepeda Motor, 3.