



Pengembangan DIY Fotometer Terintegrasi Sensor Kualitas Udara Berbasis IoT

Cahyo Puji Asmoro^{1*}, Hana Susanti², Judhistira Aria Utama¹, Feri Apriyandi¹,
Winny Liliawati²

¹Program Studi Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

²Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

Abstrak

Abstraksi konsep dalam materi astronomi sering kali mengalami hambatan akibat minimnya visualisasi data empiris mengenai degradasi kualitas langit malam. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem *Air and Sky Quality Meter* (ASQM) sebagai media pembelajaran berbasis riset (*research-based learning*) bagi mahasiswa Fisika dan Pendidikan Fisika. Inovasi dilakukan melalui optimasi sensor fotometrik TSL2591 yang memiliki jangkauan dinamis dan sensitivitas lebih tinggi dibandingkan pendahulunya, serta integrasi sensor gas semikonduktor MQ135 untuk menganalisis kontribusi polutan udara terhadap fenomena *skyglow*. Data yang diperoleh dari tiga lokus dengan karakteristik kontras (Baros, Patengan, dan Timau) secara konsisten menunjukkan bahwa sinergi antara emisi cahaya buatan dan polusi partikulat secara signifikan meningkatkan luminansi langit, yang berdampak pada reduksi kontras magnitudo bintang. Keberhasilan validasi fungsional dalam berbagai kondisi lingkungan ini menegaskan bahwa ASQM memiliki reliabilitas tinggi untuk diimplementasikan sebagai perangkat praktikum yang diharapkan mampu mentransformasi pemahaman teoretis mahasiswa menjadi keterampilan analisis fisis yang aplikatif dan kontekstual.

Masuk:

14 Maret 2026

Diterima:

15 Juni 2026

Diterbitkan:

30 Juni 2026

Kata kunci:

Fotometer DIY,
Pembelajaran Berbasis
Riset, Sensor Kualitas
Udara, *Skyglow*.

PENDAHULUAN

Interaksi radiasi elektromagnetik dengan atmosfer merupakan fondasi penting dalam pembelajaran astronomi. Di Program Studi Fisika dan Pendidikan Fisika UPI, mahasiswa menghadapi tantangan dalam memahami konsep abstrak seperti degradasi kualitas langit malam dan keterlihatan objek langit tanpa dukungan data empiris real-time. Pembelajaran magnitudo bintang dan transparansi atmosfer selama ini bersifat teoretis, sehingga mahasiswa minim pengalaman langsung dalam menguantifikasi dampak aktivitas antropogenik terhadap keterbatasan observasi astronomi. Kondisi ini semakin

relevan dengan meningkatnya polusi cahaya di kawasan urban.

Implementasi instrumen fotometri mandiri (DIY photometer) dalam memfasilitasi pembelajaran astronomi sebelumnya telah memberikan kontribusi signifikan terhadap penguatan pemahaman teoretis mahasiswa melalui proyek-proyek pengukuran mandiri (Asmoro et al., 2025). Namun, pengembangan lebih lanjut menjadi krusial seiring dengan munculnya bukti empiris mengenai interdependensi fungsional antara kualitas udara dan polusi cahaya. Fenomena ini tidak lagi dapat dipandang secara parsial; polusi cahaya bukan sekadar masalah intensitas

*Korespondensi: Cahyo Puji Asmoro ✉ cp.asmoro@upi.edu 📍 Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudhi 229 Bandung Jawa Barat

lampu kota, melainkan dimediasi oleh mekanisme hamburan radiasi pada partikulat polutan yang terakumulasi di atmosfer bawah. Penelitian terbaru mengonfirmasi adanya tren korelasi linier antara eskalasi polusi udara dan peningkatan intensitas polusi cahaya (Azura, 2024). Hal ini mengindikasikan bahwa fluktuasi polutan pada siang hari memberikan dampak residual terhadap profil kecerahan langit pada malam hari melalui penguatan hamburan balik (backscattering).

Prediksi keterkaitan fungsional ini telah diantisipasi dalam studi literatur mengenai dinamika kecerahan langit malam, khususnya yang berkaitan dengan *pseudo-night effect* atau "efek malam semu". Fenomena ini merepresentasikan kondisi di mana stabilitas luminansi langit yang teramati mengalami distorsi akibat hamburan radiasi matahari oleh polutan atmosfer yang terkonsentrasi di lapisan bawah (Herdiwijaya, 2020; Herdiwijaya et al., 2020). Hal ini menjadi urgensi penelitian ini, karena akan memberikan pemahaman dalam menjelaskan penurunan *limiting magnitude* (magnitudo batas) objek astronomi di kawasan urban.

Sebagai alternatif terhadap keterbatasan instrumen parameter tunggal, penelitian ini menawarkan pengembangan sebuah platform pemantauan terintegrasi yang lebih sensitif dan komprehensif. Kebaruan penelitian ini terletak pada optimasi perangkat keras dengan mengganti sensor fotometrik TSL2391 menjadi TSL2591 yang memiliki jangkauan dinamis lebih luas (Boubeta et al., 2023) dan mengintegrasikannya dengan sensor kualitas udara MQ135 dengan dukungan parameter Temperatur dan kelembaban dari sensor termohigrometrik SHTC3.

Solusi yang dipilih adalah pengembangan sistem *Air and Sky Quality Meter* (ASQM) berbasis *Internet of Things* (IoT). Integrasi ini memungkinkan akuisisi data kecerahan langit dan respons gas polutan secara simultan, memberikan dimensi analisis yang lebih kaya bagi mahasiswa dibandingkan penggunaan

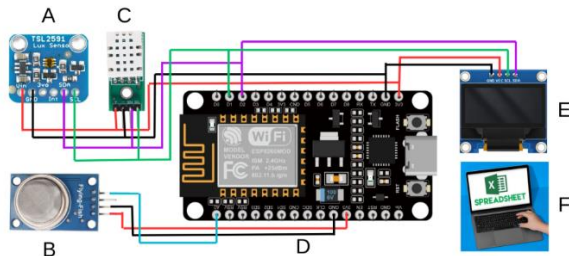
fotometer standar (Asmoro et al., 2022; Boubeta et al., 2023; Cinzano, 2005; Karpińska & Kunz, 2022a).

Selain validasi teknis, penelitian ini juga diarahkan untuk mengevaluasi keterbacaan instrumen dan efektivitasnya dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa. Dengan demikian, kontribusi penelitian tidak hanya pada aspek ilmiah, tetapi juga pada penguatan praktik pembelajaran berbasis riset.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang, menguji, dan memvalidasi sistem ASQM sebagai media pembelajaran berbasis riset (*research-based learning*). Penelitian ini diarahkan untuk membuktikan fungsionalitas sistem melalui uji coba di tiga lokus dengan karakteristik kontras guna memastikan reliabilitas data yang dihasilkan sebelum diimplementasikan secara luas.

METODE PENELITIAN

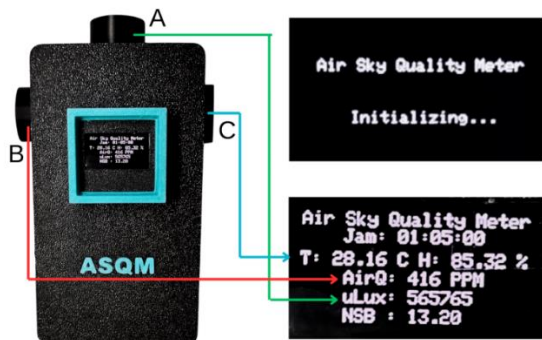
Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) melalui pendekatan eksperimental instrumentasi. Konstruksi instrumen ASQM mencakup tiga fase integrasi: (1) perakitan sirkuit elektronik (Gambar 1) berbasis mikrokontroler ESP8266 [D]; (2) pengembangan *firmware* via Arduino IDE untuk optimasi sensor TSL2591 [A], MQ135 [B], dan SHTC3 [C] dan Output visual melalui layar oled [E] dan *datalogger* lewat data awan [F]; serta (3) fabrikasi selongsong menggunakan teknik cetak 3D berbasis material *Polylactic Acid* (PLA) lihat Gambar 2. Secara teknis, komunikasi data dilakukan melalui antarmuka I2C dan pin analog guna menjamin linearitas respons serta efisiensi transmisi data digital pada tegangan operasional 3,3V (Gueye et al., 2024; Kanti et al., 2020; Muttaqin et al., 2024).



Gambar 1. Rancangan Sirkuit Elektronik

Untuk menjamin akurasi analisis fisis, variabel penelitian diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama:

1. Variabel Utama: Mencakup *Night Sky Brightness* (NSB) yang dikonversi ke dalam satuan magnitudo per detik busur kuadrat (mag/arcsec^2 atau MPSAS) dari input fluks cahaya (Lux). Selain itu, respons atmosferik direpresentasikan melalui nilai *Analog-to-Digital Converter* (ADC) dari sensor MQ135, yang berfungsi sebagai indikator kualitatif dinamika polutan udara.
2. Variabel Pendukung: Meliputi parameter termodinamika atmosfer berupa temperatur ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembaban relatif (%RH) yang diakuisisi oleh sensor SHTC3 untuk memantau stabilitas lingkungan saat pengukuran.
3. Variabel Kendali: Meliputi konsistensi interval waktu akuisisi, orientasi sensor fotometrik yang diposisikan tegak lurus menuju zenit, serta stabilitas konektivitas jaringan IoT.

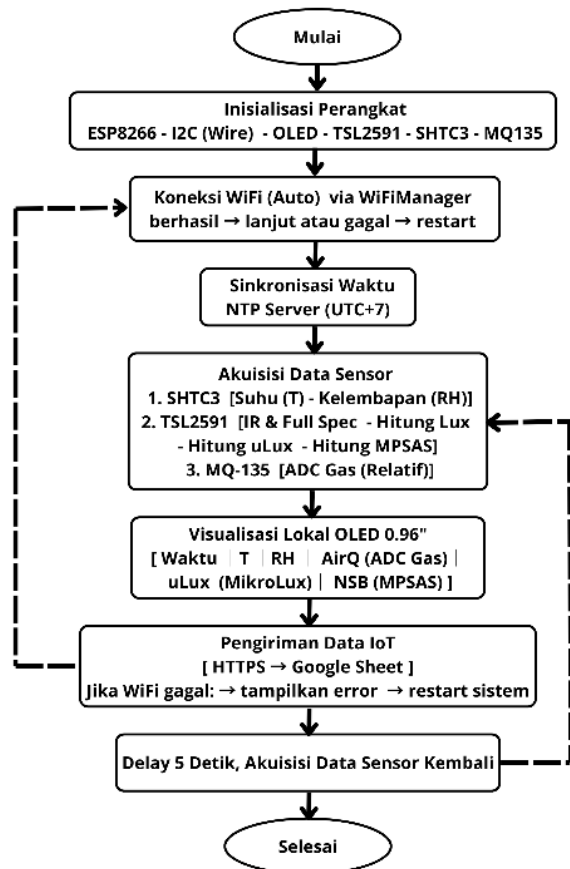


Gambar 2. Air and Sky Quality Meter

Validasi fungsional ASQM dilakukan melalui pengujian di tiga lokasi

pengamatan dengan karakteristik ekosistem yang kontras untuk menguji daya diskriminasi instrumen:

- Baros, Kota Cimahi: Merepresentasikan tipologi urban dengan saturasi polusi cahaya dan udara yang tinggi.
- Patengan, Kabupaten Bandung: Wilayah semi-alami yang berfungsi sebagai parameter transisi.
- Gunung Timau, Kabupaten Kupang: Kawasan alami dengan kualitas langit optimal (lokasi Observatorium Nasional).



Gambar 3. Tahapan Pengumpulan Data

Data diakuisisi secara otomatis dan dikirimkan secara *real-time* menuju platform data awan melalui jaringan Wi-Fi (Rathi et al., 2022; Salvi et al., 2025). Penempatan sensor dilakukan secara strategis; fotometer diarahkan ke zenit untuk menangkap luminansi langit yang representatif (Herdiwijaya, 2016; Herdiwijaya & Arumaningtyas, 2011), sementara sensor gas dan

termohigrometrik ditempatkan pada sirkulasi terbuka guna merekam kondisi atmosfer lokal secara akurat. Tahapan pengumpulan data dari sistem ASQM dapat dilihat pada Gambar 4.

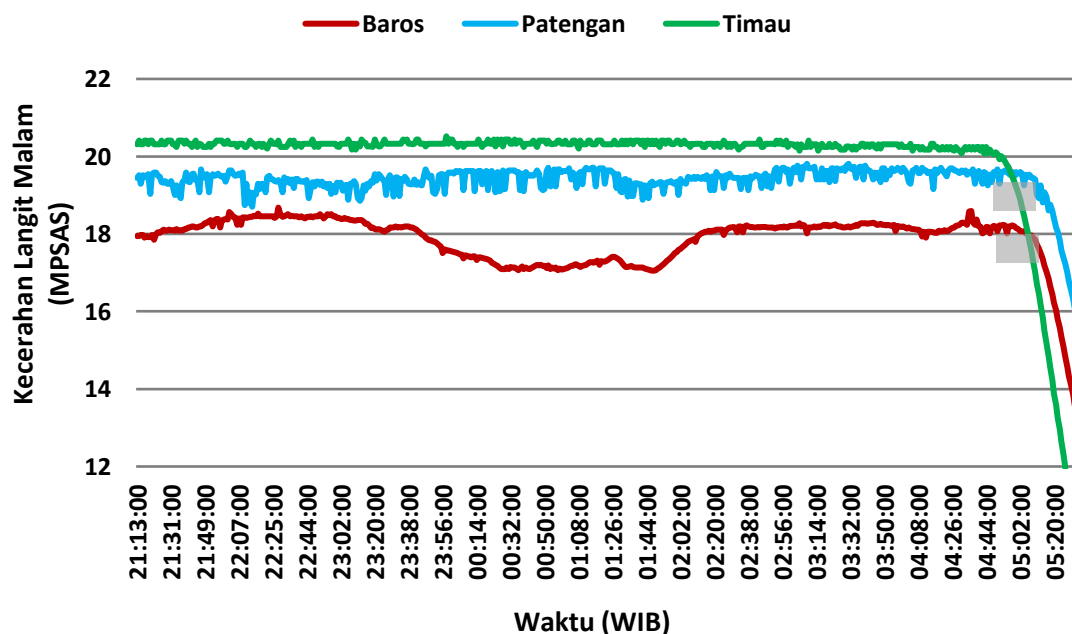
Data mentah diekstraksi dari platform IoT, kemudian melalui tahap filtrasi dan konversi menjadi satuan logaritmik MPSAS (Karpińska & Kunz, 2022b) untuk dianalisis secara deskriptif guna memverifikasi kemampuan instrumen dalam mendeteksi fenomena *pseudo-night effect*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data akuisisi menunjukkan disparitas kualitas langit yang tajam antara ketiga lokus pengamatan (Gambar 4). Kawasan Timau merepresentasikan kondisi *pristine sky* dengan nilai *Night Sky Brightness* (NSB) tertinggi dan paling stabil pada rentang ~20–21 MPSAS.

Stabilitas ini mengindikasikan minimnya interferensi cahaya buatan, menjadikannya standar ideal untuk observasi astronomi. Sebaliknya, Baros menunjukkan saturasi polusi cahaya perkotaan yang intens dengan nilai terendah (~17–18 MPSAS), sementara Patengan berada pada zona transisi (~18–19 MPSAS). Penurunan nilai MPSAS pada fase akhir pengamatan di seluruh lokasi merupakan respons alami sensor terhadap munculnya cahaya fajar (*astronomical twilight*).

Dari Gambar 5 terlihat fenomena efek malam semu (*pseudo-night effect*) pada lokus Baros dan Patengan pada selang waktu 04:45 WIB hingga 05:05 WIB (kotak abu-abu pada grafik). Kondisi malam yang seharusnya sudah mulai terang oleh kehadiran fajar justru masih gelap layaknya malam hari.

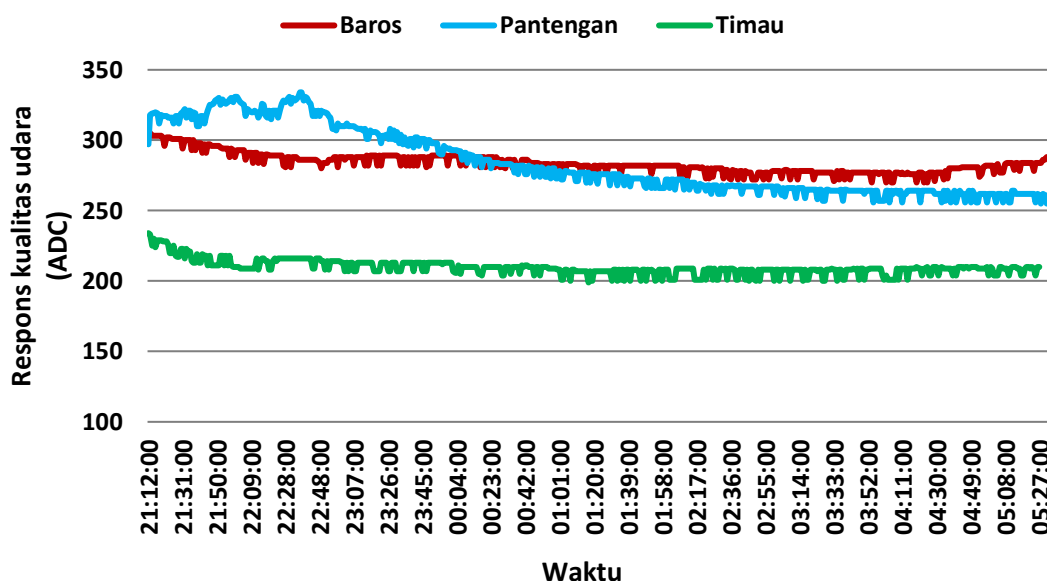


Gambar 4. Variasi Kecerahan Langit Malam

Selaras dengan data fotometrik, respons sensor MQ135 (Gambar 5) mengonfirmasi tingkat kebersihan atmosfer di tiap lokasi. Timau mencatatkan nilai ADC terendah (~200–230), yang mencerminkan profil udara dengan gangguan antropogenik minimum.

Di Patengan, sistem berhasil merekam dinamika polutan lokal jangka pendek (penurunan dari ~330 ke ~260 ADC) seiring redupnya aktivitas manusia (api unggun) di sekitar area praktikum. Sementara itu, Baros menunjukkan beban

polutan kontinu ($\approx 280\text{--}310$ ADC) yang tipikal bagi kawasan urban padat.



Gambar 5. Respons Sensor Gas MQ135

Data termodinamika (Tabel 1) melengkapi analisis kondisi atmosfer lokal, di mana Baros mencatat temperatur rata-rata tertinggi ($23,15$ °C) dengan peningkatan kelembaban relatif yang progresif, sementara Patengan menjadi lokasi terdingin (rata-rata $13,86$ °C) dengan kelembaban ekstrem mencapai $98,9\%$. Sebaliknya, kondisi Timau cenderung lebih kering (RH $74,23\%$) dan stabil, yang secara fisis sangat mendukung transparansi optik atmosfer karena rendahnya kandungan uap air (Yatini et al., 2024).

Secara teoretis, tingginya kelembaban relatif di Baros dan Patengan yang mendekati titik jenuh tidak hanya

memicu pembentukan aerosol higroskopis, tetapi juga meningkatkan densitas optik atmosfer yang memperbesar probabilitas hamburan Mie. Fenomena ini menyebabkan dispersi cahaya buatan oleh partikulat air ke seluruh kubah langit menjadi lebih intens (McCartney, 1976). Di sisi lain, stabilitas temperatur di Timau meminimalkan fluktuasi indeks bias udara akibat turbulensi termal (*seeing*), yang dikombinasikan dengan rendahnya koefisien ekstingsi atmosfer, menjaga integritas data fotometrik tetap optimal bahkan untuk objek dengan magnitudo lemah (Bohren & Huffman, 2008).

Tabel 1. Statistik Parameter Termodinamika Atmosfer

Lokasi	Temperatur (°C)			Kelembaban (%)		
	Rata-Rata	Minimal	Maksimal	Rata-Rata	Minimal	Maksimal
Baros	23,15	21,5	24,6	91,31	85,5	96,2
Patengan	13,86	12,9	15,7	96,88	91,4	98,9
Timau	20,04	19,4	20,7	74,23	58,5	90,9

Analisis korelasi peringkat Spearman mengungkapkan hubungan fungsional yang lemah antara NSB dan respons sensor gas di ketiga lokasi ($R^2 <$

$0,01$). Koefisien korelasi yang rendah di Baros ($\rho = 0,08$) dan Timau ($\rho = 0,14$), serta korelasi negatif di Patengan ($\rho = -0,36$), menegaskan bahwa degradasi

kualitas langit malam didominasi secara langsung oleh emisi cahaya buatan (*direct uplight*), sementara polusi udara berperan sebagai faktor pemodulasi transparansi melalui mekanisme hamburan..

Keberhasilan instrumen ASQM dalam mendiferensiasi karakteristik lingkungan ini membuktikan reliabilitasnya sebagai perangkat instruksional. Integrasi data memungkinkan mahasiswa memvisualisasikan fenomena *pseudo-night effect* secara empiris, menganalisis bagaimana partikulat (data ADC) memperparah *skyglow* (data MPSAS), yang berujung pada penurunan *limiting magnitude*. Penggunaan platform IoT dalam instrumen ini mentransformasi metodologi pembelajaran menjadi lebih eksploratif dan berbasis riset lapangan.

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menjawab tantangan kebutuhan instrumen pemantauan atmosfer melalui perancangan dan implementasi sistem ASQM berbasis IoT. Integrasi sensor fotometrik TSL2591, sensor gas semikonduktor MQ135, serta sensor termohigrometrik SHTC3 dalam satu platform kompak terbukti efektif dalam melakukan akuisisi parameter optik dan fisis atmosfer secara simultan, *real-time*, dan berkelanjutan. Keberhasilan pengembangan instrumen berbasis fisika semikonduktor ini memberikan solusi atas keterbatasan alat ukur parameter tunggal dalam aktivitas praktikum mahasiswa.

Hasil pengujian lapangan menunjukkan kemampuan sistem dalam melakukan diferensiasi kondisi lingkungan secara konsisten. Kondisi langit paling gelap dan respons sensor gas terendah di Timau secara strategis memperkuat dasar ilmiah pemilihan wilayah tersebut sebagai lokasi Observatorium Nasional. Analisis hubungan antara kecerahan langit dan respons sensor gas menegaskan bahwa emisi cahaya buatan merupakan

determinan utama polusi cahaya, sementara kualitas udara berperan sebagai faktor pendukung yang memodulasi transparansi atmosfer.

Secara keseluruhan, sistem ASQM layak diimplementasikan sebagai platform praktikum yang mampu mentransformasi pemahaman teoretis menjadi keterampilan analisis data fisis yang aplikatif. Pengembangan ke depan memerlukan kalibrasi terhadap instrumen standar untuk meningkatkan akurasi absolut pengukuran serta eksplorasi sistem komunikasi alternatif guna mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

REFERENSI

- Asmoro, C. P., Liliawati, W., Saepuzaman, D., Utama, J. A., & Herdiwijaya, D. (2025). Development student guidebook on night sky brightness measurement project with DIY photometer kit. *European Journal of Physics*, 46(5), 55706.
- Asmoro, C. P., Susanti, H., & Utama, J. A. (2022). DIY Photometer for Night Sky Brightness in Earth & Space Laboratory. *Jurnal Riset Dan Kajian Pendidikan Fisika*, 9(2), 68–75.
<https://doi.org/10.12928/jrpkpf.v9i2.167>
- Azura, W. T. (2024). *Keterkaitan Antara Polusi Cahaya dan Polusi Udara Berdasarkan Pengukuran Sensor Sky Quality Meter dan Purpleair*.
- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (2008). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons.
- Boubeta, D., Dafonte, C., Masana, E., Ulla, A., Mosteiro, A., & Manteiga, M. (2023). FreeDSM: An Open IoT Platform for Ambient Light Pollution Monitoring. *International Conference on Ubiquitous*

- Computing and Ambient Intelligence*, 16–24.
- Cinzano, P. (2005). Night sky photometry with sky quality meter. *ISTIL Int. Rep*, 9(1).
- Gueye, A., Drame, M. S., & Niang, S. A. A. (2024). A low-cost IoT-based real-time pollution monitoring system using ESP8266 NodeMCU. *Measurement and Control*, 00202940241306690.
- Herdiwijaya, D. (2016). Pengukuran Kecerahan Langit Malam Arah Zenit Untuk Penentuan Awal Waktu Fajar. *Prosiding SKF, 2016*, 95–102.
- Herdiwijaya, D. (2020). On the beginning of the morning twilight based on sky brightness measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 1523(1), 012007.
- Herdiwijaya, D., & Arumaningtyas, E. P. (2011). Pengukuran kecerlangan langit arah zenith di bandung dan cimahi dengan menggunakan sky quality meter. *Prosiding Seminar Himpunan Astronomi Indonesia, 2011*, 6–8.
- Herdiwijaya, D., Satyaningsih, R., Prastyo, H. A., Arumaningtyas, E. P., Sulaeman, M., Setiawan, A., & Yulianti, Y. (2020). Measurements of sky brightness at Bosscha Observatory, Indonesia. *Heliyon*, 6(8).
- Kanti, A., Jagadish, P. M., & Soumya, P. (2020). Air pollution monitoring system using Arduino with MQ135 sensor. *Int. Res. J. Modern. Eng. Technol. Sci*, 2(8), 412–421.
- Karpińska, D., & Kunz, M. (2022a). Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports*, 12(1), 16476.
- Karpińska, D., & Kunz, M. (2022b). Device for automatic measurement of light pollution of the night sky. *Scientific Reports*, 12(1), 16476.
- McCartney, E. J. (1976). Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles. *New York*.
- Muttaqin, R., Prayitno, W. S. W., Setyaningsih, N. E., & Nurbaiti, U. (2024). Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet Of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 6(2), 102–115.
- Rathi, B. S., Sakhare, A. N., Indore, S. B., Suryawanshi, S. D., & Jadhav, S. S. (2022). Air Quality Monitoring Using Arduino and Cloud Based System in IoT. *Ijrasnet Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology*.
- Salvi, S. S., Tiwari, H. U., & Bobade, S. S. (2025). Integrated IoT System for Real-Time Air Quality Assessment in Diverse Environments. *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*, 6(1), 1362–1372.
- Yatini, C. Y., Ruhimat, M., Tanesib, J. L., Maryam, S., Admiranto, A. G., & Noor, M. F. (2024). An Overview of Sky Brightness Surrounding Timau National Observatory (TNO), Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 56(2).