



## ***SPECTRO-CAM DUAL MODE: OPTIMALISASI SUMBER DAYA DAUR ULANG DAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) DALAM MONITORING KUALITAS PANGAN DAN AIR LIMBAH MENUJU PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN DALAM PENDIDIKAN***

\*Nuzhula Noer Laili<sup>1</sup>, Ghaniyah Wira Maysa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guru MTsN 1 Sidoarjo

<sup>2</sup>Siswa MTsN 1 Sidoarjo

Email: [nuzhulanoerlaili@gmail.com](mailto:nuzhulanoerlaili@gmail.com), [ghaniyaaysa@gmail.com](mailto:ghaniyaaysa@gmail.com)

### **Abstrak**

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh tingginya biaya dan kompleksitas penggunaan *spektrofotometer* komersial dalam memonitor kontaminasi zat berbahaya seperti Rhodamin B serta polusi air limbah, yang menjadi hambatan dalam pengawasan kesehatan masyarakat dan pelestarian lingkungan. Rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada bagaimana mengoptimalkan sumber daya daur ulang dan *Artificial Intelligence (AI)* untuk menciptakan alat uji portabel yang akurat dan terjangkau. Metode yang digunakan adalah eksperimental dan rekayasa teknologi (*Engineering*) dengan memanfaatkan limbah kepingan CD sebagai kisi difraksi (*grating*), mikrokontroler ESP32-CAM sebagai unit komputasi, serta penerapan algoritma *Machine Learning Random Forest* untuk pengolahan data spektrum. Temuan penelitian menunjukkan bahwa perangkat "*Spectro-CAM Dual Mode*" mampu memberikan klasifikasi dan kuantifikasi *in-situ* yang akurat, baik untuk deteksi keamanan pangan maupun monitoring kualitas air limbah. Keberhasilan inovasi ini memberikan kontribusi nyata terhadap pencapaian SDGs, khususnya dalam aspek kesehatan (SDG 3), air bersih (SDG 6), serta produksi dan konsumsi yang bertanggung jawab (SDG 12).

**Kata Kunci:** *ESP32-CAM, Machine Learning, Pembangunan Berkelanjutan, Rhodamin B, Spektrofotometer Portabel.*

### **A. Pendahuluan**

Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) menuntut solusi yang berakar pada kemandirian lokal. Penelitian ini menyajikan *Spectro-CAM Dual Mode*, sebuah spektrofotometer portabel berbiaya ultra-rendah yang merupakan perwujudan filosofi Kearifan Lokal memecahkan masalah global dengan sumber daya sekitar. *Spectro-CAM* diwujudkan dari optimalisasi CD *Grating* (limbah optik) sebagai komponen presisi dan mikrokontroler ESP32-CAM sebagai inti komputasi. Alat ini beroperasi dalam dua mode: Mode Keamanan Konsumen (deteksi Rhodamin B dalam pangan, minuman, kosmetik) dan Mode Kualitas Lingkungan (monitor air limbah). Data spektrum yang diambil diproses oleh algoritma *Machine Learning Random Forest* yang telah dilatih



khusus untuk memberikan klasifikasi dan kuantifikasi *in-situ* yang akurat, sekaligus berkontribusi langsung pada pencapaian SDG 3, SDG 6, dan SDG 12.

Isu keamanan produk konsumsi dan kualitas lingkungan adalah tantangan utama dalam konteks Pembangunan Berkelanjutan. Di Indonesia, permasalahan ini mengkrystal pada dua isu akut: kontaminasi Rhodamin B (zat karsinogenik yang dilarang pada pangan dan kosmetik seperti *lipstik* dan *eye shadow*) dan polusi air oleh zat warna limbah industri.

Penyelesaian kedua masalah tersebut terkendala oleh biaya dan kompleksitas alat uji presisi. Spektrofotometer komersial yang merupakan standar analisis, harganya sangat mahal, memerlukan operator terlatih, dan tidak dapat digunakan di lokasi (lapangan). Keterbatasan ini menghasilkan kesenjangan teknologi, di mana pengawasan real-time yang efektif menjadi mustahil di pasar tradisional atau di sekitar kawasan pembuangan limbah. *Spectro-CAM* bertujuan mengkonfirmasi bahwa solusi berbasis kearifan lokal dapat berkontribusi langsung pada pencapaian SDG 3 (Kesehatan), SDG 6 (Air Bersih), dan SDG 12 (Produksi Bertanggung Jawab).

Penelitian ini mengkaji perancangan *platform spektrofotometri portabel* berbasis optimalisasi sumber daya ekonomis, yakni *CD grating* dan ESP32-CAM, yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan. Implementasi model *Machine Learning Random Forest* dilakukan untuk menyediakan fungsi *dual mode* dalam mendeteksi parameter keamanan konsumen dan kualitas lingkungan secara akurat. Selain itu, aspek konektivitas menjadi perhatian utama melalui pengembangan antarmuka API nirkabel berbasis *HTTP Web Server* yang memungkinkan pengoperasian jarak jauh serta pembaruan sistem secara efisien melalui fitur *Over-the-Air* (OTA).

## **B. Metode**

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental dan rekayasa teknologi (*Engineering*) yang mengintegrasikan beberapa pendekatan teknis. Metode Pengembangan Perangkat Keras (*Hardware Engineering*) pada penelitian ini menggunakan pendekatan Optimalisasi Sumber Daya dengan memanfaatkan limbah dan komponen berbiaya rendah.

Transformasi limbah menggunakan kepingan CD bekas sebagai *grating* (kisi difraksi) untuk memisahkan cahaya menjadi spektrum pelangi sesuai dengan Persamaan Kisi Difraksi. Pada sistem deteksi, memanfaatkan mikrokontroler ESP32-CAM sebagai unit komputasi inti dan *array* detektor multi-kanal. Serta Kalibrasi Spektral dengan melakukan pemetaan piksel ke panjang gelombang ( $\lambda$ ) menggunakan referensi lampu neon atau LED melalui metode regresi polinomial orde kedua untuk menjamin akurasi data.



### 1. Metode Komputasi dan Kecerdasan Buatan (*AI Integration*)

Penelitian ini menerapkan algoritma *Machine Learning* untuk pengolahan data spektrum yang kompleks.

- a. Algoritma *Random Forest (RF)*: Dipilih karena ketahanannya terhadap *outlier* dari sensor berbiaya rendah dan akurasi klasifikasi yang tinggi.
- b. Ekstraksi Fitur: Model dilatih menggunakan fitur spektral kritis seperti Rasio Serapan ( $A\lambda_1/A\lambda_2$ ),  $A_{max}$  (absorbansi maksimum), dan *Area Under Curve (AUC)*.
- c. Analisis Dual Mode:
  - 1) Mode Klasifikasi: Untuk mendeteksi zat berbahaya seperti Rhodamin B atau *Metanil Yellow* pada pangan dan kosmetik.
  - 2) Mode Regresi: Untuk melakukan kuantifikasi (ppm) pada zat warna limbah atau polutan air.

### 2. Metode Pengembangan Perangkat Lunak dan Konektivitas

Untuk memastikan perangkat dapat dioperasikan secara nirkabel, digunakan arsitektur komunikasi modern.

- a. Arsitektur *Client-Server*: ESP32-CAM bertindak sebagai *HTTP Web Server (API Endpoint)*, sementara perangkat luar (seperti laptop) bertindak sebagai klien yang menarik data menggunakan protokol *HTTP*.
  - b. Protokol Transmisi Data: Menggunakan metode *chunked* untuk mengirimkan data gambar besar dalam paket-paket kecil guna menjaga stabilitas memori (*heap*).
  - c. Mekanisme *Over-the-Air (OTA)*: Implementasi pembaruan *firmware* dan model AI secara nirkabel untuk mendukung kemandirian pemeliharaan alat di lapangan.
- ### 3. Metode Pengujian Aplikasi (Uji Coba Lapangan)

Penelitian ini menguji efektivitas alat pada dua domain utama:

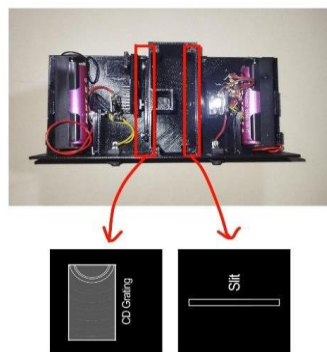
- a. Keamanan Konsumen: Pengujian pada sampel pangan (kerupuk, cendol) dan kosmetik (lipstik, *eye shadow*) untuk mendeteksi kontaminasi Rhodamin B.
- b. Kualitas Lingkungan: Pengujian pada air limbah industri untuk mengukur kekeruhan dan zat warna limbah.

Secara keseluruhan, metode ini menggabungkan prinsip Hukum *Beer-Lambert* dalam spektroskopi dengan teknologi digital modern untuk menciptakan "Teknologi Tepat Guna" yang demokratis dan terjangkau.



## C. Pembahasan

1. Dasar Teori Spektroskopi dan Optimalisasi Optik Daur Ulang
  - a. Prinsip Dasar dan Hukum *Beer-Lambert*
  - b. *Spectro-CAM* beroperasi pada prinsip bahwa Intensitas Cahaya ( $I$ ) yang ditransmisikan setelah melalui suatu larutan dapat dihubungkan secara matematis dengan Konsentrasi ( $C$ ) zat terlarut melalui Hukum *Beer-Lambert*. Alat ini menggunakan nilai Absorbansi ( $A$ ) yang dihitung dari Intensitas Piksel RGB yang dibaca sensor kamera.
  - c. Optimalisasi Optik: CD *Grating* sebagai Kearifan Inovasi
  - d. Komponen kunci alat ini adalah CD *Grating*, sebuah manifestasi fisik dari nilai "Gemi" (Hemat/Daur Ulang).
  - e. Transformasi Limbah: Kepingan CD bekas yang seharusnya menjadi limbah elektronik diubah menjadi komponen ilmiah presisi. Alur mikroskopis pada CD bertindak sebagai kisi difraksi refleksi yang memisahkan cahaya eksitasi menjadi spektrum pelangi, sesuai dengan Persamaan Kisi Difraksi.
  - f. Kalibrasi Spektral: Akurasi dijamin melalui kalibrasi Piksel  $\rightarrow \lambda$ . Spektrum garis diskrit dari Lampu Neon/CFL atau LED digunakan sebagai referensi  $\lambda$  yang diketahui, kemudian dipetakan ke posisi piksel sensor melalui regresi polinomial orde kedua. Proses ini memastikan data spektrum yang dihasilkan *Spectro-CAM* dapat bersaing dengan akurasi alat komersial.
  
2. Metodologi Perangkat Keras dan Stabilisasi Nirkabel



Gambar 1. Rangkaian Komponen Alat Spektro-CAM

- a. Detektor ESP32-CAM dan Kebutuhan Stabilitas  
ESP32-CAM berfungsi sebagai *array* detektor multi-kanal. Namun, operasi bersamaan kamera, WiFi, dan *Web Server* sangat membebani *heap* memori dan daya.



- 1) Stabilitas Daya (Optimalisasi Sumber Daya): Solusi kritis adalah penggunaan Catu Daya Eksternal 5V/2A yang kuat dan *brownout detector* yang dinonaktifkan (`WRITE_PERI_REG(RTC_CNTL_BROWN_OUT_REG, 0)`). Ini adalah optimalisasi yang menjamin *power delivery* yang stabil, mencegah kegagalan sistem saat *upload* OTA atau saat transmisi data besar.
- 2) Optimalisasi Memori: Pemanfaatan PSRAM untuk *frame buffer* kamera dan penggunaan *frame size* yang efisien (SVGA) membebaskan *DRAM heap* utama untuk tugas-tugas kritis *Web Server* dan AI.

b. Arsitektur Komunikasi Nirkabel: *Client-Server* API

Aliran data dirancang dengan arsitektur *Client-Server* melalui WiFi:

- 1) *Server* (ESP32-CAM): Berjalan sebagai *Web Server* HTTP yang melayani data. Ia berfungsi sebagai API *Endpoint* (`/capture`) yang siap mengirimkan *frame buffer* gambar mentah saat diminta.
- 2) Klien (Python di Laptop): Bertindak sebagai Klien HTTP yang aktif. Menggunakan pustaka `requests` untuk mengirim permintaan GET nirkabel ke API *Server*. Arsitektur ini adalah model yang efisien, di mana pemrosesan berat dilakukan di Laptop.
- 3) Transmisi Stabil: Untuk mengatasi kendala *heap* dan jaringan, data dikirim menggunakan protokol *chunked* (`httpd_resp_send_chunk`) yang memecah *frame buffer* besar menjadi paket-paket kecil.

c. Fungsionalitas OTA: Kemandirian Teknologi Lokal

Fungsionalitas OTA (*Over-The-Air*) diimplementasikan di *firmware*, memungkinkan pembaruan *software* (termasuk Model AI) tanpa koneksi kabel. Ini mendukung prinsip kemandirian teknologi di daerah, di mana perangkat dapat di-*maintenance* dan di-*upgrade* dari jarak jauh.

3. Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) untuk Analisis Cerdas

a. Peran AI dalam Diferensiasi Spektral Multidimensi

AI diperlukan untuk membedakan antara *sidik jari* spektral analit target dan *noise* latar belakang yang kompleks (misalnya, lilin lipstik atau kekeruhan air). Pada alat ini untuk ekstraksi fitur dengan model AI yang dilatih pada fitur spektral kritis yakni Rasio Serapan Kritis ( $A_{\lambda 1}/A_{\lambda 2}$ ),  $A_{max}$ , dan AUC (Area Under Curve). Rasio absorpsi terbukti paling efektif untuk mengatasi *scattering* dan *noise* matriks.



b. Algoritma *Random Forest* (RF) dan Mode Ganda AI

*Random Forest* dipilih karena akurasi klasifikasinya yang tinggi dan toleransinya terhadap *outlier* sensor *low-cost*. Pada alat ini menggunakan model *Dual Mode AI: Platform Spectro-CAM* mampu menyimpan dan beralih antara Model AI yang berbeda:

- 1) Model 1 (Keamanan Konsumen): Klasifikasi → Rhodamin B/Metanil Yellow (Label Bahaya) vs. Produk Aman (Label Aman).
- 2) Model 2 (Kualitas Lingkungan): Regresi → Kuantifikasi (ppm) zat warna limbah atau polutan reagen.

4. Aplikasi Luas *Spectro-CAM* dan Kontribusi Kearifan Lokal



Gambar 2. Proses kerja alat *Spectro-CAM* untuk mendeteksi makanan yang mengandung zat berbahaya Rhodamin B

- a. Mode 1: Penjaga Konsumen dan Warisan Kuliner. Mode ini beroperasi sebagai Penjaga Budaya dan Kesehatan Lokal.
  - 1) Pangan dan Minuman: Deteksi karsinogen Rhodamin B pada minuman atau jajanan pasar (seperti kerupuk) dilakukan setelah dilarutkan. *Spectro-CAM* memastikan integritas pangan tradisional tetap aman dan dipercaya.
  - 2) Kosmetik: Deteksi Rhodamin B di lipstik atau *eye shadow* dilakukan melalui ekstraksi sederhana dengan pelarut. Pengawasan ini melindungi kesehatan konsumen dari produk yang tidak sesuai standar.
- b. Mode 2: Implementasi Filosofi Pelestarian Lingkungan. Mode Lingkungan selaras dengan filosofi "Memayu Hayuning Bawana" (pelestarian alam).
  - 1) Monitor Air Bersih: Alat ini memantau Kekeruhan dan Zat Warna Limbah Industri. Dengan reagen sederhana, ia dapat mengukur polutan utama air (seperti Fosfat atau Klorin), memberikan data yang memberdayakan komunitas untuk menjaga sumber air lokal mereka.



## 5. Hasil Uji Coba *Spectro-CAM*

Berikut hasil *Spectro-CAM* pada sampel makanan yang berpotensi mengandung pewarna berbahaya (Tabel 1). Sampel di uji menggunakan alat *Spectro-CAM* yang sebelumnya diambil sari patinya dengan bantuan alcohol 90% yang sudah dilembutkan dan disaring menjadi cair.

Tabel 1. Uji Sampel Makanan yang Berpotensi Mengandung Pewarna Berbahaya

No	Nama Sampel	Hasil Deteksi	Tingkat Keyakinan	Rhodamin (ppm)	Deskripsi
1.	Jelly Merah A	Rhodamin B	99.5%	18.70	Sangat Yakin
2.	Jelly Merah B	Pewarna Makanan Aman	98.5%		Sangat Yakin
3.	Jelly Kuning A	Pewarna Makanan Aman	98.75%		Sangat Yakin
4.	Jelly Kuning B	Methanyl Yellow	98.0%	5.86	Sangat Yakin
5.	Saos Tomat A	Pewarna Makanan Aman	99.25%		Sangat Yakin
6.	Saos Tomat B	Pewarna Makanan Aman	99.1%		Sangat Yakin
7.	Rainbow cake	Pewarna Makanan Aman	99.2%		Sangat Yakin
8.	Kue Lapis Merah	Pewarna Makanan Aman	99.4%		Sangat Yakin

Pada Tabel 1 terlihat bahwa dari total 8 sampel yang diuji menggunakan alat *Spectro-CAM*, ditemukan dua sampel yang mengandung zat berbahaya, yakni Jelly Merah A positif mengandung Rhodamin B sebesar 18.70 ppm, begitupun juga dengan Jelly Kuning B yang positif mengandung Methanyl Yellow sebesar 5.86 ppm. Sedangkan 6 sampel lainnya dinyatakan aman menggunakan pewarna makanan.

## 6. Kontribusi Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)

Secara Rinci Proyek *Spectro-CAM* adalah solusi *multi-impact* yang sangat relevan dengan tema lomba.

- a. SDG 3: Kesehatan dan Kesejahteraan yang Baik
  - 1) Dampak: Mengurangi risiko penyakit dari bahan kimia berbahaya.
  - 2) Implementasi: Mendukung Target 3.9 melalui alat diagnostik preventif yang dapat diakses secara massal. Pengawasan Rhodamin B dalam pangan dan kosmetik secara langsung melindungi masyarakat dari paparan zat karsinogenik.
- b. SDG 6: Air Bersih dan Sanitasi
  - 1) Dampak: Memperbaiki kualitas air melalui pengawasan polusi.
  - 2) Implementasi: Mendukung Target 6.3 dengan memfasilitasi pemantauan cepat terhadap air limbah (deteksi zat warna dan kekeruhan) oleh petugas lokal. Data ini vital untuk penindakan terhadap industri yang melanggar baku mutu limbah.
- c. SDG 12: Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab
  - 1) Dampak: Mendorong optimalisasi sumber daya dan rantai pasok yang etis.



- 2) Implementasi:
  - a) Optimalisasi Daur Ulang: Pemanfaatan CD *Grating* mewujudkan Target
  - b) 12.5 (mengurangi limbah melalui daur ulang), memberikan contoh nyata optimalisasi sumber daya.
  - c) Etika Produksi: Mendorong produksi yang bertanggung jawab (Target 12.4) di sektor pangan dan kosmetik dengan meningkatkan risiko deteksi.
- d. SDG 9: Industri, Inovasi, dan Infrastruktur
  - 1) Dampak: Mendemokratisasi alat ilmiah presisi.
  - 2) Implementasi: Proyek ini membuktikan Target 9.5 dapat dicapai dengan biaya rendah, mendorong inovasi berbasis teknologi yang dapat direplikasi (ESP32-AI) dan meningkatkan kapasitas teknologi di sektor pengawasan lokal.

## **D. Kesimpulan dan Saran**

### 1. Kesimpulan

*Spectro-CAM Dual Mode* adalah manifestasi sukses dari optimalisasi sumber daya berbasis kearifan lokal. Proyek ini berhasil menciptakan spektrofotometer portabel berbiaya sangat rendah yang memiliki kemampuan *multi-purpose* dan *multi-impact* dengan:

- a. Optimalisasi Sumber Daya Daur Ulang: Mengubah limbah optik (CD *Grating*) menjadi komponen presisi.
- b. Integrasi AI: Menggunakan *Random Forest* untuk klasifikasi Rhodamin B dalam pangan dan kosmetik.
- c. Dampak SDGs: Berkontribusi langsung pada SDG 3 (Kesehatan), SDG 6 (Air Bersih), dan SDG 12 (Produksi Bertanggung Jawab).

Keberhasilan ini membuktikan bahwa inovasi lokal dapat menjadi solusi efektif dan terjangkau bagi masalah pembangunan berkelanjutan.

### 2. Saran Pengembangan Lanjutan

Untuk mencapai implementasi penuh Pembangunan Berkelanjutan, disarankan:

- a. Kuantifikasi Mutlak: Mengembangkan Model Regresi Linier untuk memberikan hasil konsentrasi dalam satuan ppm secara langsung untuk semua analit (pangan dan lingkungan).
- b. Integrasi *Cloud* dan *Big Data*: Mengembangkan *platform cloud* untuk menyimpan



- data spektrum, memfasilitasi pemetaan geografis polusi, dan *database* untuk pelatihan model ML yang lebih komprehensif.
- c. Analisis Multi-Parameter IoT: Mengintegrasikan sensor elektrokimia tambahan (*probe* pH, sensor suhu) ke dalam *firmware* Spectro-CAM untuk menciptakan stasiun monitor lingkungan *all-in-one* yang mengumpulkan data *multi-parameter*.
  - d. Desain Fisik Modular: Mencetak *casing* 3D modular yang *durable* untuk seluruh sistem agar siap untuk uji coba lapangan yang berkelanjutan.

### Daftar Pustaka

- Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Kepala BPOM tentang Pengawasan Bahan Tambah Pangan*. Jakarta: BPOM.
- Breiman, Leo. (2001). "Random Forests." *Machine Learning* 45, no. 1: 5–32. (Dasar Algoritma AI)
- Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian PUPR. (2020). *Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)*. Diakses dari laman resmi pemerintah. (Referensi Utama SDG)
- Skoog, Douglas A., F. James Holler, and Stanley R. Crouch. (2017). *Principles of Instrumental Analysis*. 7th ed. Boston, MA: Cengage Learning. (Dasar Spektrofotometri dan Hukum Beer-Lambert)
- Wajs, Artur, et al. (2018). "Low-cost spectrometry using a compact disc (CD) and a webcam: A versatile teaching tool." *Optics and Photonics Journal* 8, no. 9: 251-262. (Dasar Komponen Optik Daur Ulang)
- Sustainable Development Goals Knowledge Platform*. United Nations. (2024). Accessed [Current Date]