Rancang Bangun Sistem Deteksi Dini Kanker Payudara Berdasarkan Indikator Warna Pada Kulit Berbasis ESP32-Cam Terintegrasi Edge Impulse

Designing an Early Breast Cancer Detection System Based on Skin Color Indicators Using ESP32-Cam Integrated with Edge Impulse

Hana Dwi Cahyani[1], Muhamad Azwar Annas[1]*, Uswatun Chasanah[2], Muktamar Cholifah Aisiyah[1]

[1]Jurusan Fisika, Fakultas Sains Teknologi dan Pendidikan, Universitas Muhammadiyah Lamongan, Kampus 1, Jl. Raya Plalangan Plosowahyu, Plosowahyu, Kec. Lamongan, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur Indonesia 62218
[2]Jl. Plalangan No.KM, RW.02, Wahyu, Plosowahyu, Kec. Lamongan, Kabupaten Lamongan, Jawa Timur 62218

Email: hanadwicahyani98@gmail.com; *annasazwar93@gmail.com; uswatun_chasanah@umla.ac.id; ifaaisiyah4@gmail.com

Received: 10nd August 2025; Revised: 21th August 2025; Accepted: 29th August 2025

Abstrak – *Deteksi dini kanker payudara merupakan langkah penting untuk meningkatkan peluang kesembuhan dan menekan angka kematian. Penelitian ini merancang sistem deteksi dini berbasis citra digital dengan memanfaatkan indikator visual berupa warna kemerahan pada kulit. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32-Cam yang terintegrasi dengan Edge Impulse untuk pelatihan dan inferensi model klasifikasi berbasis Artificial Intelligence (AI). Deteksi dilakukan melalui pengolahan citra warna dan metode machine learning (ML) yang bekerja berdasarkan prinsip fisika optik dan sensorika, khususnya interaksi cahaya dengan permukaan kulit, serta merupakan bentuk penerapan prinsip-prinsip fisika dalam pengembangan teknologi deteksi visual modern. Dataset dikumpulkan dari phantom payudara dengan variasi tingkat kemerahan, dua jenis warna kulit (kuning langsat dan sawo matang), serta pencahayaan berbeda (600 lux, 800 lux, dan 1000 lux). Gambar diambil dari jarak 20 cm dengan sudut 90° dan 45° menggunakan kamera handphone Samsung Galaxy A03. Model dilatih menggunakan metode Convolutional Neural Network (CNN) dan diintegrasikan ke ESP32-Cam, namun proses inferensi masih memerlukan koneksi internet untuk dapat dijalankan. Hasil menunjukkan bahwa pencahayaan 800 lux memberikan visual optimal, dan berhasil menjalankan klasifikasi dengan akurasi rata-rata sebesar 90,9%. Evaluasi menggunakan confusion matrix menunjukkan bahwa sistem ini baik dan akurat.*

Kata kunci: *Deteksi dini; edge impulse; ESP32-cam; fisika optik; kanker payudara.*

Abstract – *Early detection of breast cancer is an important step in improving the chances of recovery and reducing mortality rates. This study designed an early detection system based on digital images by utilizing visual indicators in the form of redness on the skin. The system was developed using ESP32-Cam integrated with Edge Impulse for training and inference of artificial intelligence-based classification models. Detection is performed through color image processing and machine learning (ML) methods based on principles of optical physics and sensor technology, particularly the interaction of light with the skin surface, and represents the application of physical principles in the development of modern visual detection technology. The dataset was collected from breast phantoms with varying degrees of redness, two skin tones (light yellow and dark brown), and different lighting conditions (600 lux, 800 lux, and 1000 lux). The image was taken from a distance of 20 cm at angles of 90° and 45° using a Samsung Galaxy A03 mobile phone camera. The model was trained using the Convolutional Neural Network (CNN) method and integrated into the ESP32-Cam, but the inference process still requires an internet connection to run. The results show that 800 lux lighting provides optimal visuals and successfully performs classification with*

an average accuracy of 90.9%. Evaluation using a confusion matrix indicates that the system is reliable and accurate.

Keywords: *Breast cancer; early detection; edge impulse; ESP32-cam; optical physics.*

1. Pendahuluan

Kanker payudara merupakan jenis kanker yang menyebabkan kematian terbanyak di dunia termasuk di Indonesia. Menurut *World Health Organization* (WHO), pada tahun 2020 terjadi lebih dari 2,2 juta kasus baru kanker payudara dengan angka kematian mencapai 684.996 jiwa. Pada tahun 2022, data terbaru yang dihasilkan oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC) dari 185 negara melaporkan bahwa kanker payudara berkontribusi sebesar 11,7% dari 2,3 juta kasus baru dan angka kematiannya sebesar 6,9% [1]. Statistik tersebut menunjukkan bahwa kanker payudara memiliki proporsi yang signifikan dalam jumlah kasus kematian, sehingga diperlukan upaya deteksi dini pada kanker payudara.

Namun, deteksi dini kanker payudara baik melalui periksa payudara sendiri (SADARI), pemeriksaan payudara klinis (SADANIS), maupun pemeriksaan penunjang seperti mammografi atau ultrasonografi (USG) masih sulit dilakukan di Indonesia, terutama karena kendala akses terhadap fasilitas kesehatan modern. Banyak masyarakat di daerah pedesaan atau terpencil mengalami kesulitan menjangkau layanan medis seperti mammografi atau ultrasonografi (USG) karena jarak dan biaya yang tinggi. Selain itu, keterbatasan alat deteksi dini yang bersifat portabel, terjangkau, dan mudah digunakan semakin memperburuk kondisi, sehingga banyak kasus baru ditemukan saat sudah memasuki stadium lanjut. Salah satu alternatif potensial untuk menjawab tantangan ini adalah dengan menganalisis perubahan warna kulit pada area payudara, terutama kemunculan warna kemerahan (eritema) yang dapat menjadi indikator awal adanya kelainan akibat inflamasi atau perubahan vaskular. Dengan pendekatan pengolahan citra digital dan klasifikasi warna, pendeteksian perubahan ini dapat dilakukan secara visual dan terukur bahkan sebelum gejala klinis lainnya muncul.

Pemanfaatan teknologi *machine learning* berbasis *edge computing* memberikan peluang besar dalam pengembangan sistem deteksi dini yang cepat, akurat, dan efisien. Salah satunya melalui penggunaan mikrokontroler ESP32-*Cam* yang dikombinasikan dengan platform *Edge Impulse*. Sistem ini menggabungkan metode Pemeriksaan Payudara Sendiri (SADARI) dan Pemeriksaan Payudara Klinis (SADANIS) dengan teknologi citra dan *Artificial Intelligence* atau *neural network* untuk mendeteksi perubahan warna kulit yang mengindikasikan kanker payudara. Sistem dirancang agar hemat biaya, mudah diakses, dan dapat digunakan di fasilitas medis terbatas, terutama bagi masyarakat dengan akses terbatas terhadap rumah sakit atau layanan kesehatan canggih.

Sehubungan dengan itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem deteksi kanker payudara berbasis ESP32-*Cam* untuk mendeteksi tanda-tanda awal kanker payudara; mengimplementasikan model *machine learning* di perangkat *Edge Impulse* dan mengintegrasikannya dengan ESP32-*Cam* secara efektif; mengevaluasi tingkat akurasi sistem dalam meningkatkan efektivitas deteksi dini; serta menganalisis performa sistem secara *real-time* dalam mendeteksi perubahan warna kulit sebagai indikator awal kanker payudara.

2. Landasan Teori

2.1. *Kanker payudara*

Kanker payudara merupakan jenis kanker yang berkembang di jaringan payudara [2]. Menurut Retnaningsih (2021), stadium kanker payudara terbagi menjadi lima tingkatan. Stadium 0 (*karsinoma in situ*) terbatas pada lokasi awal dengan warna kulit kemerahan; Stadium I ditandai tumor kecil (<2 cm) dengan atau tanpa keterlibatan kelenjar getah bening dan warna kemerahan; Stadium II, tumor membesar (>2,5 cm), melibatkan kelenjar getah bening, dan warna kulit merah keunguan; Stadium III, kanker menyebar ke dinding dada atau kulit payudara dengan warna keunguan; Stadium IV, kanker bermetastasis ke organ jauh seperti paru-paru, hati, atau otak dengan warna kulit ungu kehitaman [3]. Kanker memiliki peluang untuk dicegah, diobati, dan disembuhkan apabila tanda serta gejalanya dikenali sejak tahap awal [4]. Upaya pengendalian dilakukan melalui pengurangan faktor risiko, deteksi secara dini, pemantauan epidemiologi, dan edukasi kepada masyarakat [5].

2.2. Mikrokontroler ESP32-cam

ESP32-*cam* merupakan mikrokontroler dengan prosesor *dual-core Xtensa* LX6 hingga 240 MHz, dilengkapi 520 KB SRAM, 4 MB PSRAM, 4 MB *flash*, serta kamera OV2640 beresolusi 2 MP. Modul ini mendukung konektivitas *Wi-Fi* dan *Bluetooth*, memiliki slot *microSD* hingga 32 GB, serta LED *internal* sebagai pencahayaan tambahan. Dengan ukuran 27 × 40,5 mm dan tegangan operasi 3,3V hingga 5 V, ESP32-*cam* mampu bekerja dengan konsumsi daya efisien antara 10 mA (*standby*) hingga 250 mA (operasi penuh). Fitur kamera, penyimpanan, dan konektivitas menjadikan modul ini sesuai untuk aplikasi pengolahan citra berbasis *Artificial Intelligence* (AI) [6].

2.3. *Edge impulse*

Edge Impulse adalah *platform machine learning* khusus untuk perangkat *edge* yang dirancang untuk aplikasi *Internet of Things* (IoT) dan perangkat cerdas lainnya. *Platform* ini memungkinkan pengembang mengembangkan, melatih, dan mengimplementasikan model pembelajaran mesin pada perangkat dengan daya rendah dan kemampuan komputasi terbatas. Dengan *Edge Impulse*, data dari sensor dapat diolah secara *real time* di perangkat, sehingga respon cepat dan efisien dapat dicapai tanpa bergantung pada konektivitas jaringan. Komponen utamanya mencakup *platform cloud*, alat pengembangan lokal, dan perangkat lunak *edge* yang ringan dan dapat disesuaikan. *Edge Impulse* juga menyediakan antarmuka *web* untuk mengelola proyek, mengunggah data, melatih, dan mengimplementasikan model [7].

2.4. *Intensitas cahaya*

Intensitas cahaya atau luminasi adalah besaran arus cahaya yang dipancarkan dan jatuh pada suatu bidang. Luminasi memiliki hubungan erat dengan tingkat kenyamanan, dan karakteristik penerangan. Standar pencahayaan adalah aturan atau pedoman desain untuk mencapai sistem pencahayaan yang baik sesuai standar. Tujuannya adalah mencapai pencahayaan yang efisien dan minim dampak buruk. Tingkat intensitas cahaya ruangan dipengaruhi oleh penerangan alami dan buatan. Berdasarkan Permen Perburuhan No. 7 Tahun 1964, ruangan memenuhi standar jika intensitas cahayanya antara 500–1000 Lux, mengacu pada SNI No. 16-7062-2004 [8]. Standar pencahayaan tersebut tercantum dalam Tabel 1. Nilai pencahayaan minimal laboratorium bergantung pada jenis aktivitas, sesuai SNI 03-6575-2001 atau ISO 8995.

Tabel 1. Standar pencahayaan laboratorium [8].

Kategori Aktivitas	Kisaran Intensitas Cahaya (Lux)	Keterangan
Aktivitas Umum atau Pekerjaan Rutin	300-500	Pengamatan ringan atau pekerjaan yang tidak memerlukan presisi tinggi.
Pekerjaan dengan Detail atau Pengamatan Presisi	500-750	Aktivitas seperti penggunaan alat laboratorium spesifik yang membutuhkan pengamatan presisi.
Pekerjaan dengan Ketelitian Sangat Tinggi	750-1000	Penggunaan mikroskop, analisis jaringan, atau pekerjaan forensik yang membutuhkan ketelitian tinggi.

2.5. *Pengolahan intensitas gambar dan evaluasi klasifikasi*

Pada gambar digital, nilai intensitas mewakili piksel dalam gambar dan menentukan tingkat kecerahan gambar. Karena nilai intensitas berbeda untuk setiap piksel, diperlukan perhitungan guna menyeimbangkan intensitas secara akurat [9]. Untuk menyatakan keseimbangan intensitas dan evaluasi kinerja sistem, dapat dilakukan pengukuran menggunakan *confusion matrix*.

Confusion matrix adalah perhitungan matriks yang digunakan untuk memperoleh nilai akurasi, presisi, *recall* (sensitivitas), dan F1-*score* [10]. Perhitungan ini umum dalam metode *machine learning* atau klasifikasi dan rumus yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan (1) – (4).

$$Akurasi = \frac{TP+TN}{TP+FN+TN+FN} \times 100\% \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\% \quad (2)$$

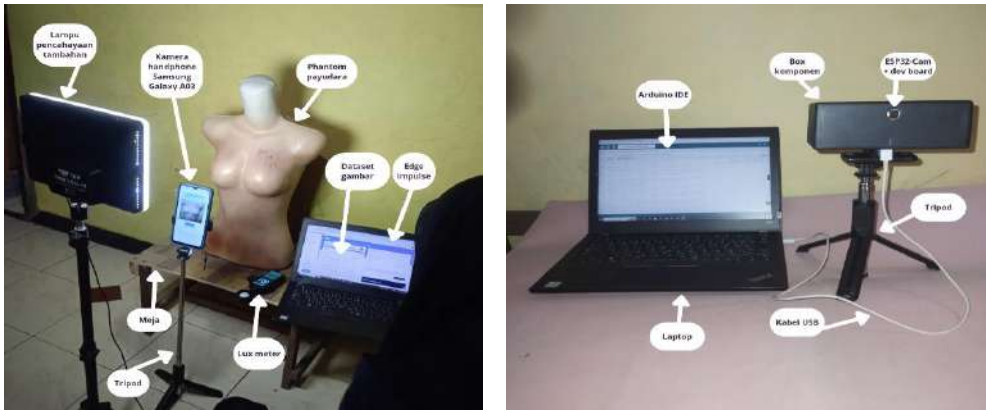
$$Presisi = \frac{TP}{TP+FP} \times 100\% \quad (3)$$

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Presisi \times Recall}{Presisi + Recall} \times 100\% \quad (4)$$

Dimana TP (*True Positive*) = jumlah kasus positif terdeteksi dengan benar oleh model, TN (*True Negative*) = jumlah kasus negatif terdeteksi dengan benar oleh model, FN (*False Negative*) = jumlah kasus positif yang salah terdeteksi sebagai negatif, dan FP (*False Positive*) = jumlah kasus negatif yang salah terdeteksi sebagai positif.

3. Material Dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret sampai Juni 2025 di Laboratorium Fisika, Universitas Muhammadiyah Lamongan. Penelitian ini menggunakan beberapa alat dan bahan, antara lain yakni laptop, kamera *handphone Samsung Galaxy* A03 dengan kamera utama 48 MP (*wide*) + 2 MP (*depth*) (kamera *handphone* resolusi tinggi), *fritzing*, lux meter, tripod, meja, dan penggaris. Adapun bahan yang digunakan adalah phantom payudara, dataset gambar, lampu pencahayaan tambahan, *memory card*, *edge impulse*, arduino IDE, ESP32-*cam*, *dev board*, kabel USB, dan *box* komponen. Alat dan bahan penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



a) b)

Gambar 1. Alat deteksi dini kanker payudara a) alat pengambilan dataset gambar dan b) alat pengujian.

Prosedur penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengukur performa sistem secara objektif melalui data akurasi, presisi, *recall*, dan waktu pemrosesan model. Variabel yang diuji meliputi keberhasilan deteksi, akurasi pelatihan, dan pengaruh intensitas cahaya terhadap pembacaan warna kemerahan pada kulit sebagai indikator visual potensi kanker. Evaluasi dilakukan dengan analisis statistik berupa grafik regresi linier. Penilaian dilakukan melalui pengamatan variasi warna kemerahan pada citra, dan dijelaskan secara deskriptif untuk mendukung evaluasi sistem.

Data dikumpulkan dari phantom payudara yang telah diberi variasi warna kulit (kuning langsat dan sawo matang) yang dipilih karena merepresentasikan mayoritas warna kulit masyarakat Indonesia sehingga relevan untuk kondisi nyata, serta tingkat kemerahan (normal, ringan, sedang, dan parah) sebagai simulasi tanda-tanda awal kanker. Pengambilan gambar dilakukan menggunakan kamera handphone beresolusi tinggi dengan jarak konstan 20 cm, sudut 90° dan 45°, serta tiga variasi intensitas cahaya (600, 800, dan 1000 lux) yang diukur menggunakan lux meter. Kamera ditempatkan pada tripod untuk menjaga stabilitas, sehingga citra yang diperoleh lebih konsisten. Seluruh gambar yang dihasilkan kemudian dilabeli menjadi dua kelas, yaitu “Normal” dan “Terindikasi Kanker Payudara”, untuk selanjutnya digunakan sebagai dataset latih dalam pengembangan model klasifikasi citra pada *platform Edge Impulse*. Secara umum, prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahap utama, yakni perancangan sistem perangkat keras, pengambilan dataset latih, pelatihan model klasifikasi citra menggunakan *platform Edge Impulse*, integrasi model ke dalam perangkat ESP32-*cam*, pengujian sistem secara langsung, serta analisis hasil pengujian model berdasarkan metrik performa dan pengamatan visual.

4. Hasil Dan Pembahasan

Hasil pelatihan model phantom kuning langsat dan sawo matang dengan menggunakan metode *object detection* pada *platform Edge Impulse* pada variasi intensitas pencahayaan sebesar 600 lux, 800 lux, dan 1000 lux menunjukkan kinerja yang optimal berdasarkan nilai akurasi, presisi, *recall*, dan F1-*score* yang diperoleh, dapat dilihat pada Gambar 2.

Gambar 2. Phantom yang diberi tanda kemerahan.

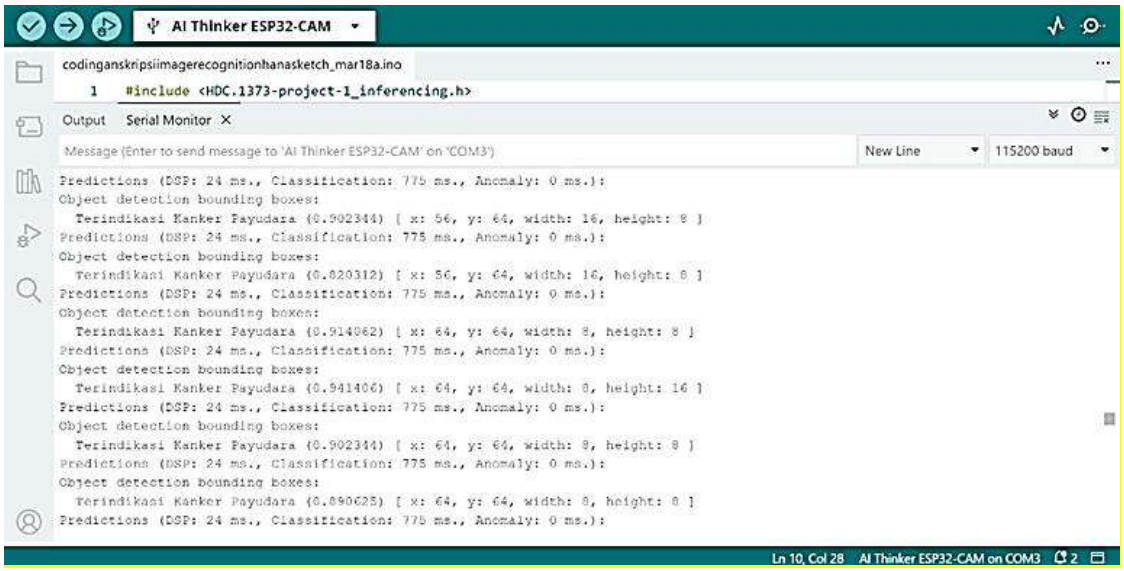
Hasil pelatihan model dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai *recall* yang tinggi menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang baik dalam mengidentifikasi area dengan indikasi kanker (*true positive*), yang berarti sebagian besar area yang seharusnya terdeteksi memang berhasil diidentifikasi oleh sistem. Sementara itu, nilai presisi yang sedikit lebih rendah mengindikasikan masih terdapat sejumlah kesalahan dalam klasifikasi (*false positive*), yakni ketika model salah mengenali area normal sebagai area yang mengindikasikan kanker.

Tabel 2. Hasil evaluasi model *training phantom* kuning langsat dan sawo matang.

Phantom	Intensitas Cahaya (lux)	Akurasi (%)	Presisi (%)	*Recall* (%)	F1-*Score* (%)
Kuning Langsat	600	75	78	92	84
	800	100	100	100	100
	1000	60	77	82	80
Sawo Matang	600	100	100	100	100
	800	93	94	100	97
	1000	95	96	100	98

Model yang telah dilatih selanjutnya diuji menggunakan dataset uji yang belum pernah dilihat sebelumnya. Proses ini bertujuan untuk menguji kinerja sistem dalam mendeteksi area yang menunjukkan indikasi warna kemerahan pada permukaan kulit. Pengujian juga dilakukan pada tiga kondisi pencahayaan yang berbeda, yaitu 600 lux, 800 lux, dan 1000 lux, sebagai *representasi* dari variasi pencahayaan yang mungkin terjadi dalam kondisi penggunaan nyata. Tahap pertama yang dilakukan dalam proses pengujian ini adalah mengimplementasikan hasil dari *edge impulse* ke perangkat ESP32-*Cam*. Model diunduh dan dimuat ke ESP32-*Cam* melalui proses kompilasi *firmware*. Perangkat kemudian dapat menangkap gambar secara langsung, memprosesnya, dan melakukan inferensi menggunakan model yang telah diintegrasikan. Hasil klasifikasi ditampilkan melalui serial monitor. Dari pengujian langsung, perangkat mampu mengidentifikasi warna kemerahan dengan nilai *confidence* di atas 85%, serta memberikan hasil prediksi secara *real-time*, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada Gambar 3, tampak bahwa setiap kali ESP32-*cam* menangkap citra dari objek phantom yang menunjukkan indikasi kanker, sistem berhasil menampilkan hasil deteksi berupa *bounding box* yang diberi label "Terindikasi Kanker Payudara" beserta nilai *confidence score*-nya yang berada di atas 0.80 atau 80%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki sensitivitas yang cukup tinggi dalam mengenali pola visual kemerahan pada kulit phantom [11]. Nilai koordinat dan ukuran *bounding box* yang stabil juga menandakan bahwa area yang terdeteksi relatif konsisten pada setiap inferensi, memperlihatkan kestabilan performa dalam proses identifikasi [12]. Hasil pengujian pada serial monitor dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 3. Tampilan serial monitor deteksi kanker payudara.

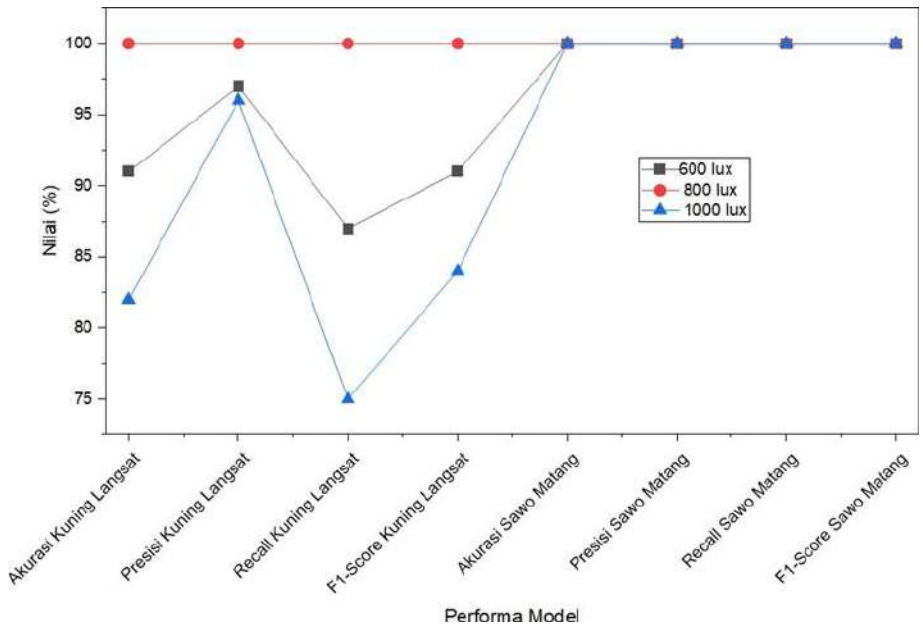
Tabel 3. Hasil pengujian pada serial monitor.

Terindikasi Kanker payudara	Akurasi pada Serial Monitor (%)
Berhasil	90
Berhasil	82
Berhasil	91
Berhasil	94
Berhasil	90
Berhasil	89
Berhasil	94
Berhasil	98
Berhasil	89
Berhasil	92
Rata-rata	90,9

Tabel 3 menyajikan data kuantitatif dari 10 kali pengujian sistem terhadap objek yang terindikasi kanker payudara dan menunjukkan hasil rata-rata akurasi sebesar 90,9%. Nilai akurasi ini dihitung berdasarkan *confidence score* yang ditampilkan pada serial monitor untuk setiap sesi klasifikasi. Beberapa nilai yang tercatat, seperti 94%, 98%, dan 92%, menunjukkan bahwa sistem bekerja sangat baik dalam mendeteksi objek target. Sementara nilai yang sedikit lebih rendah seperti 82% tetap tergolong baik dan masih berada dalam batas toleransi untuk sistem deteksi visual berbasis perangkat *edge* dengan keterbatasan sumber daya seperti ESP32-*cam* [13]. Secara keseluruhan, tampilan hasil pada serial monitor mengindikasikan bahwa sistem deteksi dini kanker payudara yang dikembangkan telah berjalan sesuai dengan fungsi yang diharapkan. Sistem mampu memproses citra secara *real-time* dengan waktu inferensi di bawah satu detik, dan memberikan hasil klasifikasi yang akurat dengan tingkat keyakinan tinggi. Hasil ini menjadi bukti bahwa integrasi model klasifikasi *Edge Impulse* dengan ESP32-*Cam* berjalan dengan baik dan responsif terhadap *input* citra secara langsung [14]. Dengan akurasi rata-rata 90,9%, sistem menunjukkan performa stabil dan menjanjikan untuk aplikasi lapangan. Kecepatan inferensi dan hasil *real-time* memberi keuntungan dalam skrining awal, khususnya di klinik kecil atau daerah terpencil. Deteksi otomatis berbasis visual menggunakan ESP32-*Cam* dan *Edge Impulse* menjadikannya alat bantu diagnosis yang portabel, efisien, dan mudah diterapkan. Keakuratan dalam mengenali pola kemerahan pada citra phantom menjadi kekuatan utama sistem ini [15].

Dalam penelitian ini, terdapat variabel utama yang diuji karena dianggap memengaruhi performa model secara signifikan, yaitu intensitas cahaya saat pengambilan gambar. Pencahayaan merupakan salah

satu faktor fundamental dalam sistem pengambilan citra digital. Dalam konteks sistem deteksi dini kanker payudara berbasis citra warna, intensitas cahaya sangat menentukan kualitas visual yang ditangkap oleh kamera yang pada akhirnya memengaruhi performa klasifikasi oleh model berbasis *Artificial Intelligence* (AI), seperti tampak pada Gambar 4 [16].



Gambar 4. Grafik performa model berdasarkan intensitas cahaya.

Kondisi yang terjadi pada grafik Gambar 4 menunjukkan bahwa pada pencahayaan 600 lux, sistem menghasilkan citra yang cenderung gelap, terutama pada phantom kuning langsat, sehingga menurunkan kontras antara warna kulit dan kemerahan. Akibatnya, nilai *recall* dan F1-*score* menjadi lebih rendah karena model kesulitan membedakan area kemerahan dari latar kulit. Sebaliknya, pada 1000 lux, citra menjadi terlalu terang dan berisiko mengalami *overexposure*, khususnya pada kulit kuning langsat, yang menyebabkan detail warna kemerahan tersamarkan, sehingga mengurangi sensitivitas deteksi [17]. Intensitas cahaya 800 lux memberikan keseimbangan visual terbaik, karena cukup terang untuk menampilkan fitur visual dengan jelas, tanpa menyebabkan hilangnya informasi warna akibat pencahayaan berlebih. Secara prinsip optik, kondisi ini memungkinkan refleksi cahaya yang stabil dan proporsional terhadap karakteristik permukaan kulit, membuat sensor CMOS pada kamera menangkap distribusi warna dengan lebih akurat [18]. Model klasifikasi citra, yang berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN), sangat bergantung pada ketajaman warna dan detail visual dalam mengidentifikasi pola. Oleh karena itu, intensitas cahaya yang optimal secara langsung meningkatkan performa model dalam membedakan citra normal dan citra dengan tanda kemerahan, yang menjadi indikator awal kanker payudara. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin stabil dan optimal intensitas cahaya, semakin tinggi pula nilai akurasi, presisi, *recall*, dan F1-*score* yang dihasilkan sistem. Kondisi pencahayaan 800 lux terbukti menjadi titik optimal dalam mendukung kinerja sistem deteksi dini kanker payudara berbasis ESP32-*Cam* dan *Edge Impulse*. Secara keseluruhan, dengan mengoptimalkan kondisi pencahayaan, sistem ini mampu mencapai performa yang sangat baik. Oleh karena itu, model dapat dikatakan memiliki potensi tinggi untuk digunakan secara praktis di lapangan sebagai alat bantu diagnosis awal yang andal dan efisien. Dengan pendekatan tersebut, sistem klasifikasi citra ini tidak hanya layak dikembangkan lebih lanjut, tetapi juga berpeluang besar untuk diimplementasikan sebagai solusi skrining visual yang tepat guna dalam deteksi dini kanker payudara.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan bahwa penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan sistem deteksi dini kanker payudara berbasis ESP32-*Cam* yang mampu mengenali tanda-tanda awal berupa perubahan warna kemerahan pada kulit. Sistem ini menggunakan perangkat keras ESP32-*Cam* serta perangkat lunak berbasis *platform Edge Impulse* untuk melakukan klasifikasi citra visual. Dirancang secara modular, sistem dapat beroperasi secara mandiri

setelah pemrograman awal sehingga fleksibel untuk digunakan dalam kondisi nyata. Model *machine learning* berhasil diimplementasikan melalui *Edge Impulse* dan terintegrasi dengan ESP32-*Cam* untuk mendeteksi tanda-tanda awal kanker payudara. Sistem bekerja secara efektif dalam mengenali area kemerahan pada kulit dan memberikan hasil klasifikasi yang akurat serta konsisten, sehingga berpotensi menjadi alat bantu deteksi dini yang andal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem deteksi dini ini mampu menjalankan klasifikasi dengan akurasi rata-rata sebesar 90,9%, dengan kemampuan mendeteksi area kemerahan pada kulit phantom secara konsisten dan *confidence score* di atas 80%. Selain itu, sistem mampu menganalisis perubahan warna kulit secara *real-time* menggunakan ESP32-*Cam* yang terintegrasi dengan *Edge Impulse*, dengan performa yang sangat baik ditandai oleh nilai akurasi, presisi, *recall*, dan F1-*score* yang tinggi, terutama pada warna kulit sawo matang. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja secara responsif dan efektif dalam mendeteksi visual kemerahan pada berbagai kondisi pencahayaan dan warna kulit, sehingga layak diterapkan sebagai alat bantu skrining awal kanker payudara.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak Jurusan Fisika dan Universitas Muhammadiyah Lamongan yang telah menyediakan fasilitas, alat, serta tempat penelitian sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, khususnya keluarga dan orang-orang terdekat, atas semangat, do'a, dan motivasi yang diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini selesai.

Pustaka

[1] S. O'Reilly *et al.*, "Climate Therapy: Sustainability Solutions for Breast Cancer Care in the Anthropocene Era," *Clin. Breast Cancer*, p. S1526820924003173, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.clbc.2024.11.010.

[2] R. Hong and B. Xu, "Breast cancer: an up-to-date review and future perspectives," *Cancer Commun.*, vol. 42, no. 10, pp. 913–936, Oct. 2022, doi: 10.1002/cac2.12358.

[3] D. Retnaningsih, *Keperawatan Paliatif*, vol. 169. in Kesehatan, no. 1, vol. 169. Pekalongan, Jawa Tengah: PT. Nasya Expanding Management, 2021. [Online].

[4] A. Borlu *et al.*, "Bridging Lifestyle and Screening for Cancer Prevention: A Comprehensive Analysis of Cancer-Related Lifestyle and Screening Attitudes in Adults," *Medicina (Mex.)*, vol. 61, no. 3, p. 510, Mar. 2025, doi: 10.3390/medicina61030510.

[5] L. Mulyanti, N. N. Anggraini, S. Istiana, and D. A. Paradilla, "Deteksi Dini Kanker Payudara Dengan Pemeriksaan Payudara Klinis (SADANIS) Di Kelurahan Bandarharjo Kota Semarang," *J. Pengabdi. Masy. Kebidanan*, vol. 3, no. 2, p. 1, Jul. 2021, doi: 10.26714/jpmk.v3i2.7852.

[6] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of electric circuits*, Sixth edition. New York, NY: McGraw-hill Education, 2017.

[7] Y. Susanthi, A. Darmawan, and S. B. Suryadi, "Alat Pengenal Gerakan Tangan Menggunakan Algoritma Artificial Neural Network Berbasis ESP32 dan Platform Edge Impulse," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 23, no. 1, pp. 77–94, Apr. 2024, doi: 10.31358/techne.v23i1.434.

[8] R. B. W. Astomo, "Analisis dan Evaluasi Intensitas Pencahayaan pada Penerangan di Lapangan Stadion Gelora Bung Tomo Surabaya," *CYCLOTRON*, vol. 7, no. 01, pp. 84–91, Jan. 2024, doi: 10.30651/cl.v7i01.21722.

[9] U. P. Sanjaya, Z. Alawi, A. R. Zayn, and G. P. Dirgantoro, "Optimasi Convolutional Neural Network dengan Standard Deviasi untuk Klasifikasi Pneumonia pada Citra X-rays Paru," *Gener. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 40–47, Oct. 2023, doi: 10.29407/gj.v7i3.20183.

[10] M. Rodríguez, D. P. Tobón, and D. Múnera, "A framework for anomaly classification in Industrial Internet of Things systems," *Internet Things*, p. 101446, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101446.

[11] S. Cilla *et al.*, "Machine-learning prediction model for acute skin toxicity after breast radiation therapy using spectrophotometry," *Front. Oncol.*, vol. 12, p. 1044358, Jan. 2023, doi: 10.3389/fonc.2022.1044358.

[12] L. Sun, H. Sun, J. Wang, S. Wu, Y. Zhao, and Y. Xu, "Breast Mass Detection in Mammography Based on Image Template Matching and CNN," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2855, Apr. 2021, doi: 10.3390/s21082855.
[13] J. R. Ziliwu, G. C. Setyawan, and H. Budiati, "Penerapan ESP32-CAM dan TinyML dalam Klasifikasi Gambar Buah dan Sayuran," *Jutisi J. Ilm. Tek. Inform. Dan Sist. Inf.*, vol. 13, no. 1, p. 584, Apr. 2024, doi: 10.35889/jutisi.v13i1.1869.
[14] R. I. Firdaus, W. H. Sugiharto, and M. I. Ghozali, "Implementasi Convolutional Neural Network Dalam Sistem Otomatis Pemilahan Sampah Infeksius Berbasis Citra Digital," *SisInfo*, vol. 7, no. 1, pp. 11–22, Feb. 2025, doi: 10.37278/sisinfo.v7i1.1052.
[15] S. Azahra, P. Kusumaningtyas, and M. Rofi'i, "Deteksi Dini Kanker Payudara Menggunakan Citra Ultrasonografi Berbasis Convolutional Neural Networks dan Particle Swarm Optimization," vol. 6, no. 2, 2025.
[16] M. H. Husni, "Klasifikasi Pencahayaan Citra Menggunakan Statistik Histogram dan Pembelajaran Mesin".
[17] Y. Septiyanda, A. Muhtar, and P. Prasetyawan, "Sistem Pendeteksi Target Berdasarkan Warna Pada Autonomous Robot Gun (ARO-GUN)," vol. 2, no. 2, 2022.
[18] Y. Apridiansyah, E. D. Putra, D. Diana, and A. C. Pratama, "Segmentasi Warna Kulit Menggunakan Ruang Warna YCBCR Untuk Deteksi Wajah Manusia," *J. Media Infotama*, vol. 19, no. 1, pp. 205–210, Apr. 2023, doi: 10.37676/jmi.v19i1.3808.