

Pengembangan Purwarupa Kolposkop Dengan Peningkatan Kualitas Citra Untuk Skrining Deteksi Dini Kanker Serviks Menggunakan Raspberry Pi 4

1th Hurin Syatta

Faculty of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

hurinsyatta@student.telkomuniversity.ac.id

2th Hilman Fauzi

Faculty of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

hilmanfauzitsp@telkomuniversity.ac.id

3th Hablul Barri

Faculty of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

mhbarri@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Kanker serviks merupakan penyebab kematian utama wanita di Indonesia. Metode skrining IVA yang digunakan secara luas di layanan primer masih menghadapi keterbatasan akurasi karena bergantung pada pengamatan visual tanpa alat bantu. Penelitian ini mengembangkan purwarupa kolposkop digital berbasis *Raspberry Pi 4* untuk meningkatkan kualitas citra guna mendukung deteksi dini. Sistem dilengkapi kamera *ArduCam 64MP* autofocus, pencahayaan LED dengan kontrol intensitas, dan filter polarisasi untuk mengurangi pantulan. Pengujian dilakukan terhadap performa akuisisi citra, intensitas cahaya, efisiensi daya, serta evaluasi kualitas citra dan validasi deteksi lesi dengan algoritma YOLO. Hasil menunjukkan *frame rate* mencapai 85.5 FPS (VGA), pencahayaan sesuai standar medis (>1000 lux), dan area refleksi minimum (0.01%). Konfigurasi optimal tercapai pada resolusi 16MP, jarak 15 cm, dan pencahayaan maksimum. Deteksi lesi oleh YOLO mencapai *confidence* hingga 97%. Purwarupa ini menunjukkan potensi sebagai alat bantu IVA yang terjangkau dan efektif, mendukung observasi klinis dan dokumentasi visual di layanan primer.

Kata Kunci—Kanker Ovarium, Deteksi Dini, Artificial Intelligent (AI), Kanker serviks, Pemeriksaan IVA, Deteksi dini, Kualitas citra, Kolposkop, *Raspberry Pi 4*

I. PENDAHULUAN

Kanker serviks merupakan ancaman kesehatan global yang menempati urutan keempat dalam jenis kanker paling umum pada wanita, dengan sekitar 660.000 kasus baru dan 350.000 kematian pada tahun 2022 [1]. Human Papillomavirus (HPV) menjadi penyebab utama kanker serviks, dimana infeksi berkelanjutan dengan HPV tipe tinggi dapat menyebabkan perkembangan sel-sel abnormal yang berpotensi menjadi kanker. Di Indonesia, kanker serviks menduduki urutan kedua dari 15 kanker terbanyak berdasarkan data GLOBOCAN tahun 2022 dengan insidens sebesar 16.8% dan mortalitas sebesar 18.1% [2]. Tingginya angka kematian disebabkan oleh keterlambatan deteksi, dimana banyak wanita baru menyadari mengidap penyakit ini pada stadium lanjut. Kolposkop adalah metode untuk mendeteksi dini kanker serviks yang menggunakan alat untuk memeriksa kondisi leher rahim, sehingga dapat diidentifikasi adanya kelainan atau gambaran abnormal pada leher rahim yang kemudian dianalisis melalui pengamatan visual [3]. Namun demikian, kolposkop konvensional memiliki harga yang tinggi dan tidak tersedia di sebagian besar fasilitas layanan primer seperti puskesmas.

World Health Organization merekomendasikan inspeksi visual dengan asam asetat (IVA) sebagai metode deteksi dini kanker serviks untuk negara berkembang seperti Indonesia [4]. IVA dinilai efisien, terjangkau, dan merupakan langkah paling efektif bagi masyarakat Indonesia dalam mendeteksi dini kanker serviks [5], sehingga telah dijadikan program nasional yang diterapkan secara luas di puskesmas [6]. Namun, cakupan pemeriksaan IVA masih rendah di beberapa daerah, termasuk di Puskesmas Salam Bandung yang pada tahun 2022 hanya mencapai 0.2% dari target 944 jiwa [7]. Rendahnya cakupan ini berkaitan dengan keterbatasan alat bantu visual dalam interpretasi hasil pemeriksaan [8], subjektivitas interpretasi, kurangnya tenaga kesehatan terampil, dan ketiadaan dokumentasi visual yang menyulitkan evaluasi ulang medis [9].

Penelitian sebelumnya oleh Adriansyah dkk. telah merancang alat CAVANET sebagai kolposkop terjangkau untuk mengidentifikasi lesi putih pada serviks [10]. Namun, terdapat kendala teknis berupa keterbatasan performa video yang hanya mampu menghasilkan 15 FPS dengan resolusi 720p, yang berdampak pada kualitas citra dan responsivitas alat. *Frame rate* rendah (<30 FPS) mengakibatkan peningkatan kelambatan citra dan noise [11], sementara resolusi rendah menghasilkan detail visual yang kurang tajam [12]. Keterbatasan ini disebabkan penggunaan *Orange Pi Zero* sebagai unit pengontrol utama yang memiliki keterbatasan dalam menangani pengolahan data video secara real-time dengan resolusi tinggi.

Penelitian ini bertujuan mengatasi keterbatasan CAVANET dengan mengembangkan versi terbaru menggunakan *Raspberry Pi 4* yang memiliki kemampuan komputasi lebih tinggi. Pengembangan ini diharapkan dapat menghasilkan citra beresolusi tinggi (minimal 1080p) dengan *frame rate* yang memadai (30 FPS), sehingga memberikan visualisasi yang lebih jelas dan detail. Dengan demikian, purwarupa ini dapat menjadi proof of concept untuk pengembangan teknologi kolposkop yang lebih accessible, memberikan dukungan pencitraan yang lebih baik untuk membantu proses identifikasi visual awal tanda-tanda kanker serviks secara non-invasif

II. KAJIAN TEORI

A. Serviks

Serviks adalah bagian bawah uterus yang berbentuk seperti leher dan menghubungkan rahim dengan vagina. Serviks terdiri dari ektoserviks (bagian luar yang ditutupi sel skuamosa) dan endoserviks (bagian dalam yang dilapisi sel kelenjar kolumnar) [13]. Zona transformasi merupakan area pertemuan kedua bagian ini yang memiliki signifikansi klinis tinggi karena paling rentan terhadap infeksi HPV dan transformasi maligna [14].

B. Kanker Serviks

Kanker serviks disebabkan oleh Human Papillomavirus (HPV) subtype onkogenik, terutama HPV 16 dan 18 [15]. Faktor risiko meliputi hubungan seksual usia dini, merokok, dan penggunaan kontrasepsi oral jangka Panjang. Karsinoma sel skuamosa merupakan jenis yang paling umum (70-80%). Berdasarkan FIGO, kanker serviks diklasifikasikan dalam stadium 1-4 dengan karakteristik penyebaran yang semakin luas [16].

C. Inspeksi Visual Asam Asetat (IVA)

Inspeksi visual asam asetat atau IVA adalah metode skrining kanker serviks yang mudah, murah, dan praktis menggunakan larutan asam asetat 3-5%. Pemeriksaan dilakukan dengan mengamati perubahan warna pada sambungan skuamosa kolumnar dalam 1-2 menit. Hasil positif menunjukkan plak putih acetowhite, sedangkan hasil negatif menunjukkan permukaan halus berwarna merah muda [17].

D. Kolposkopi dan Kolposkop

Kolposkopi adalah prosedur skrining lanjutan menggunakan mikroskop binokuler dengan pembesaran 6-40 kali untuk mengidentifikasi jaringan abnormal pada serviks [18]. Kolposkop digital portabel seperti Pocket Colposcope (resolusi 2-5 MP, \$400-800) dan EVA System (resolusi 13 MP, \$1800-2500) menawarkan aksesibilitas lebih baik namun masih memiliki keterbatasan harga yang relatif tinggi.

E. Filter Cross Polarizing

Sistem *cross polarizing* menggunakan dua filter polarisasi linier yang dipasang tegak lurus untuk mengurangi refleksi cahaya spekulat. Filter pertama dipasang pada LED dengan sudut 90° (vertikal) dan filter kedua pada kamera dengan sudut 0° (horizontal) [10]. Sistem ini efektif mengurangi pantulan cahaya dari jaringan serviks yang telah dipulas IVA, meningkatkan kejernihan dan kontras citra.

F. Light Emitting Diode (LED)

LED adalah komponen semikonduktor yang memancarkan cahaya monokromatik saat diberi tegangan maju. Untuk aplikasi medis, LED harus memenuhi standar SNI 6197:2020 dengan intensitas minimum 1000 lux [19]. Dengan mempertimbangkan anatomi vagina wanita Indonesia (6,5-15 cm), sistem pencahayaan LED harus mampu memberikan distribusi cahaya yang merata pada jarak kerja tersebut [20].

G. Sistem Suplai Daya Baterai

Sistem menggunakan baterai lithium-ion dalam konfigurasi seri, paralel, atau kombinasi (misalnya 2S2P)

untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan dan kapasitas. Tegangan meningkat dalam konfigurasi seri, sementara kapasitas meningkat dalam konfigurasi paralel [21]. Konsumsi daya rata-rata dihitung dari total energi dan waktu operasi, lalu digunakan untuk menentukan arus rata-rata dan waktu operasi teoritis. Selain itu, analisis efisiensi antar mode operasi dilakukan dengan menghitung selisih dan persentase peningkatan daya, untuk membandingkan performa sistem secara kuantitatif.

H. Metrik Objektif dalam Evaluasi Kualitas Citra

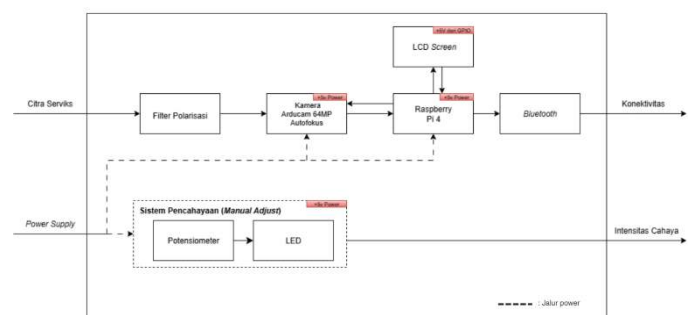
Evaluasi kualitas citra menggunakan metrik objektif meliputi, *sharpness* (ketajaman tepi), *contrast* (perbedaan pencahayaan), *brightness* (persepsi luminansi), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), *edge density* (konsentrasi tepi), dan *focus measure* (kejelasan detail). *Composite score* menggabungkan berbagai metrik untuk memberikan penilaian kualitas citra yang komprehensif [22].

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan rekayasa sistem untuk merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi purwarupa kolposkop digital berbasis *Raspberry Pi 4*. Metodologi yang diterapkan terdiri dari beberapa bagian utama, yang dijelaskan secara rinci berikut ini.

A. Desain Sistem Secara Keseluruhan

Purwarupa kolposkop dirancang sebagai sistem terintegrasi berbasis teknologi akuisisi citra untuk deteksi dini kanker serviks. Sistem ini mengadopsi arsitektur modular dengan tiga komponen utama yang saling terintegrasi: modul akuisisi citra, modul kontrol, dan modul transmisi data. Desain kompak dengan dimensi $17 \times 7 \times 7$ cm memungkinkan portabilitas tinggi untuk penggunaan di lapangan. *Raspberry Pi 4* berfungsi sebagai unit pengontrol utama yang mengkoordinasikan seluruh komponen, mulai dari pengambilan citra hingga transmisi data nirkabel. Sistem ini dilengkapi dengan interface pengguna berbasis touchscreen LCD yang memungkinkan tenaga medis untuk mengoperasikan perangkat secara intuitif dan memantau hasil pemeriksaan secara real-time. Diagram blok keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



GAMBAR 1.

Diagram Blok Keseluruhan Sistem

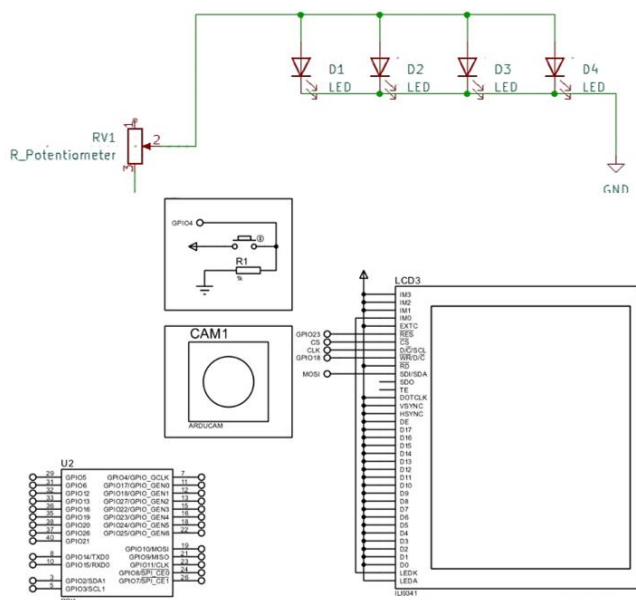
B. Arsitektur Hardware

Komponen hardware dipilih berdasarkan kebutuhan spesifik aplikasi medis yang memerlukan akurasi tinggi dan reliabilitas. *Raspberry Pi 4* dengan spesifikasi Quad Core Cortex-A72 1.5 GHz dan RAM 4GB LPDDR4 menyediakan kemampuan pemrosesan yang memadai untuk menangani

data citra beresolusi tinggi. Kamera *ArduCam* 64MP dengan sensor Sony berukuran 1/1.7 inch mampu menghasilkan citra dengan resolusi 9280×6960 piksel, dilengkapi fitur autofocus untuk memastikan ketajaman optimal. Filter polarisasi manual melalui potensiometer untuk mencapai kondisi pencahayaan optimal. LCD WaveShare 3.5 inch dengan resolusi 480×320 piksel dan panel IPS memberikan tampilan real-time dengan sudut pandang luas hingga 160°. Power supply menggunakan 4 baterai Lithium Ion 18650 berkapasitas 1200-1500 mAh yang disusun untuk memberikan daya stabil ke seluruh komponen sistem.

C. Skema Koneksi dan Wiring

Implementasi koneksi antar komponen menggunakan protokol komunikasi yang berbeda sesuai kebutuhan spesifik masing-masing modul. Koneksi kamera menggunakan antarmuka MIPI CSI-2 yang terhubung langsung ke *Raspberry Pi* untuk transfer data citra berkecepatan tinggi. LCD menggunakan protokol SPI (Serial Peripheral Interface) dengan konfigurasi pin RES→PIN 16, CS→PIN 24, SCL→PIN 23, D/C→PIN 12, dan SDA→PIN 19 untuk memastikan komunikasi data yang stabil dan responsif. Sistem kontrol tombol menggunakan konfigurasi GPIO sederhana dengan tombol capture terhubung ke PIN 13, zoom in ke PIN 5, dan zoom out ke PIN 6, masing-masing dengan ground connection untuk input digital yang reliable. Sistem pencahayaan dirancang dengan konfigurasi manual dimana potensiometer mengontrol intensitas 4 LED secara paralel, dengan VCC potensiometer terhubung ke anoda LED dan wiper (terminal tengah) mengatur distribusi tegangan ke masing-masing LED. Bluetooth menggunakan modul internal *Raspberry Pi* 4 yang mendukung Bluetooth 5.0 untuk transmisi data nirkabel dengan jangkauan dan kecepatan yang memadai. Berikut Gambar 2 merupakan skematik diagram sistem.

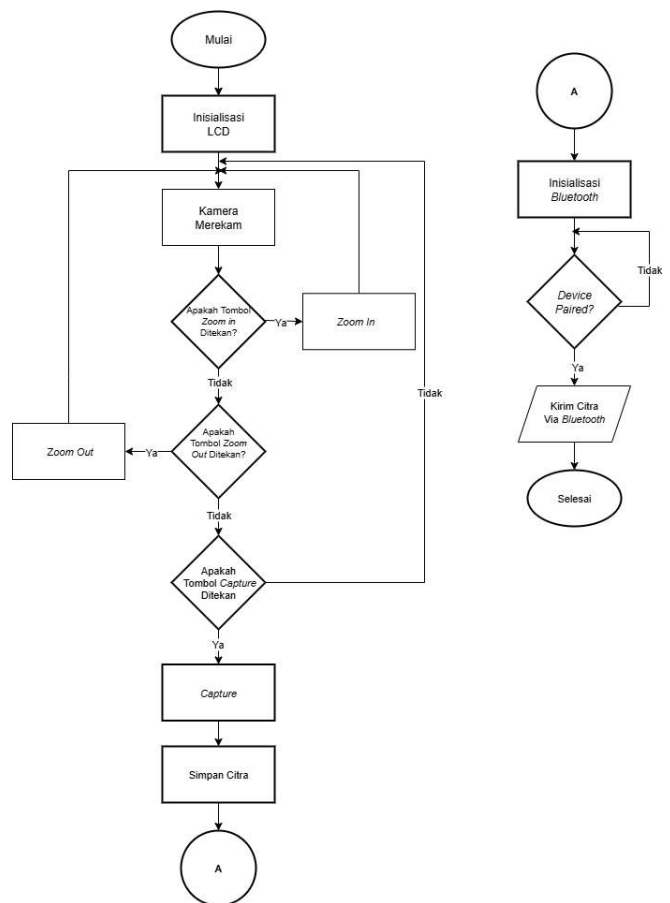


GAMBAR 2.
Skematik Diagram Sistem

dipasang untuk mengurangi pantulan cahaya dan meningkatkan kontras citra. Sistem pencahayaan menggunakan 4 LED yang intensitasnya dapat dikontrol

D. Algoritma Pemrograman

Perangkat lunak sistem dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan library OpenCV untuk pemrosesan citra dan library GPIO untuk kontrol hardware. Algoritma dirancang dalam bentuk loop kontinu yang responsif terhadap input pengguna dengan state machine yang jelas. Sistem dimulai dengan tahap inialisasi yang mencakup konfigurasi LCD, aktivasi kamera, dan setup koneksi hardware. Setelah inialisasi berhasil, sistem masuk ke mode operasi utama yaitu perekaman real-time yang menampilkan citra serviks secara langsung di LCD. Tiga fungsi kontrol utama diimplementasikan, yaitu zoom in/out untuk mengatur tingkat perbesaran citra secara digital, dan capture untuk mengambil serta menyimpan citra ke storage internal. Setiap kali tombol capture ditekan, sistem mengaktifkan modul Bluetooth untuk melakukan proses pairing otomatis jika diperlukan, kemudian mentransmisikan citra yang telah disimpan ke perangkat eksternal yang telah terhubung. Sistem kembali ke mode perekaman setelah transmisi selesai, menciptakan siklus operasi yang seamless dan user-friendly. Berikut Gambar 3 merupakan flowchart algoritma pemrograman.



GAMBAR 3.
Flowchart Algoritma Pemrograman

E. Validasi dan Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan secara modular dan menyeluruh untuk menilai kinerja tiap komponen serta evaluasi integratif sistem purwarupa kolposkop. Berikut Tabel 1 merupakan pengujian sistem.

TABEL 1.
Pengujian Sistem

No	Komponen Sistem	Tujuan Pengujian	Parameter Evaluasi
1	Kamera & Akuisisi Citra	Menilai FPS dan kestabilan akuisisi citra <i>ArduCam</i> di <i>Raspberry Pi</i>	FPS (avg/min/max)
2	Sistem Pencahayaan	Memastikan intensitas pencahayaan sesuai standar medis (>1000 lux)	Lux (mean, SD, CV) di berbagai jarak
3	Filter <i>Cross Polarizing</i>	Mengurangi pantulan pada objek reflektif	% refleksi, <i>edge density</i>
4	Suplai Daya	Evaluasi daya tahan dan efisiensi baterai 2S2P	Waktu aktif/ <i>standby</i> , konsumsi daya (Wh)
5	Evaluasi Sistem Menyeluruh	Uji kombinasi parameter citra & fungsional deteksi objek	Sharpness, SNR, Contrast, Focus, YOLO <i>Confidence</i>

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi performa setiap komponen utama dari sistem pencitraan kolposkop portabel, mencakup sistem akuisisi citra, pencahayaan, filter polarizing, dan suplai daya. Evaluasi juga dilakukan terhadap kualitas citra secara keseluruhan untuk menentukan konfigurasi optimal guna mendukung diagnosis dini kanker serviks. Hasil pengujian disajikan secara sistematis berdasarkan komponen yang diuji, dilanjutkan dengan analisis kualitatif dan kuantitatif untuk menilai kinerja dan potensi klinis dari sistem yang dikembangkan.

A. Hasil Pengujian Sistem Akuisisi Citra

Pengujian sistem akuisisi citra dilakukan dengan memvariasikan resolusi kamera untuk menganalisis pengaruhnya terhadap *frame rate* menggunakan *Raspberry Pi* 4B dengan kamera *ArduCam* 64MP. Pengujian dilakukan pada tiga resolusi yaitu 640×480 (VGA), 1280×720 (HD), dan 1920×1080 (Full HD) dengan durasi 60 detik untuk setiap resolusi pada kondisi pencahayaan ruangan 550 lux. Berikut Tabel 2 adalah hasil pengujian performa *frame rate* pada berbagai resolusi.

TABEL 2.
Performa *Frame Rate* pada Berbagai Resolusi

Resolusi (pixel)	FPS Rata-rata (fps)	FPS Min (fps)	FPS Max (fps)	Efisiensi (%)
640×480	85.5	85.5	85.5	95
1280×720	56.8	48	57	94.7
1920×1080	28.5	28.5	28.5	95

Hasil menunjukkan korelasi terbalik yang signifikan antara resolusi citra dengan *frame rate*. Pada resolusi VGA, sistem mencapai *frame rate* tertinggi 85.5 FPS dengan stabilitas yang baik, sedangkan pada resolusi Full HD

menghasilkan *frame rate* terendah 28.5 FPS. Efisiensi sistem tetap konsisten tinggi pada rentang 94.7-95% untuk semua resolusi. Validasi pengukuran FPS dilakukan dengan membandingkan metode loop counter dengan FFmpeg. Hasil menunjukkan perbedaan 1.4-1.6% antara kedua metode, yang menunjukkan akurasi dan reliabilitas pengukuran yang baik.

B. Hasil Pengujian Sistem Pencahayaan

Pengujian sistem pencahayaan dilakukan dengan mengukur intensitas cahaya pada lima variasi jarak (10-50 cm) dengan tiga setting intensitas LED (0%, 50%, 100%) menggunakan lux meter. Pengujian mengacu pada standar pencahayaan ruang medis yang mensyaratkan minimum 1000 lux. Berikut Tabel 3 merupakan analisis statistik intensitas cahaya pada 100% LED.

TABEL 3.
Hasil Analisis Statistik Intensitas Cahaya 100% LED

Jarak (cm)	Rata-rata (lux)	Std Deviasi	Koefisien Variasi (%)	Range (lux)
10	1330.7	7.2	0.54	13
20	537.3	11	2.05	22
30	299.3	2.5	0.84	5
40	190.3	1.5	0.79	3
50	133	1	0.75	2

Hasil menunjukkan konsistensi yang sangat baik dengan koefisien variasi kurang dari 2.1%. Sistem pencahayaan memenuhi standar SNI (≥ 1000 lux) hanya pada jarak 10 cm dengan intensitas 1330 lux. Pola penurunan intensitas mengikuti hukum kuadrat terbalik, yang menunjukkan karakteristik point light source.

C. Hasil Pengujian Sistem Filter Cross Polarizing

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas filter dalam mengurangi pantulan cahaya menggunakan objek tangan yang dibasahi dengan air. Evaluasi dilakukan pada empat skenario: tanpa filter dan dengan filter pada resolusi 64MP dan 16MP. Berikut Tabel 4 hasil evaluasi dari pengujian sistem dengan filter dan tanpa filter

TABEL 4.
Hasil Evaluasi dengan Filter dan Tanpa Filter

Skenario	Resolusi	<i>Edge Density</i> (%)	<i>Detection Reflection</i> (%)
Tanpa Filter	64MP	0.92 ± 0.17	0.47 ± 0.20
Tanpa Filter	16MP	0.91 ± 0.16	0.55 ± 0.10
Dengan Filter	64MP	0.04 ± 0.03	0.01 ± 0.01
Dengan Filter	16MP	0.24 ± 0.27	0.49 ± 0.81

Hasil menunjukkan bahwa *filter cross polarizing* sangat efektif dalam mengurangi pantulan cahaya, dengan penurunan *detection reflection* dari 0.47% menjadi 0.01% pada resolusi 64MP. Namun, penggunaan filter menyebabkan penurunan intensitas cahaya keseluruhan yang mencapai sensor kamera, menghasilkan *trade-off* antara eliminasi pantulan dan degradasi kualitas citra.

D. Hasil Pengujian Suplai Daya

Pengujian dilakukan menggunakan 4 baterai lithium 18650 berkapasitas 1500 mAh dalam konfigurasi 2S2P (total 3000 mAh, 7.4V). Evaluasi dilakukan pada dua mode operasi, yaitu aktif dan *standby*. Perbandingan antara kedua

mode operasi menunjukkan karakteristik konsumsi energi yang berbeda secara signifikan, yang dapat dilihat pada Tabel 5.

TABEL 5.
Perbandingan Kedua Mode Operasi

Parameter	Mode Standby	Mode Aktif
Waktu Operasi	2,2 jam	1,6 jam
Konsumsi Daya	10,1 W	13,9 W
Konsumsi Arus	1,36 A	1,88 A
Akurasi Perhitungan	99,55%	100%

Mode aktif mengonsumsi 37.6% lebih besar dibanding mode *standby* dengan selisih 3.8 W. Waktu pengisian baterai dari kondisi kosong hingga penuh memerlukan 1 jam 20 menit, yang menunjukkan performa charging yang baik.

E. Hasil Evaluasi Keseluruhan Sistem

Evaluasi sistem dilakukan menggunakan dataset 159 citra serviks dengan 18 kombinasi parameter (2 resolusi $\times$ 3 jarak $\times$ 3 brightness $\times$ 3 intensitas LED). Total 270 citra dianalisis menggunakan metrik objektif berdasarkan *composite score* dan 1 citra divalidasi menggunakan algoritma YOLO.

1. Analisis *Composite Score*

Hasil menunjukkan bahwa resolusi 16MP memberikan performa yang lebih baik dibandingkan 64MP dengan *composite score* tertinggi 0.231 pada jarak 15 cm dengan pencahayaan maksimal. Hal ini disebabkan oleh *pixel size* yang lebih besar pada sensor 16MP yang mampu menangkap cahaya lebih efisien dan menghasilkan *signal-to-noise ratio* yang lebih baik. Untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter teknis terhadap kualitas citra, dilakukan analisis berdasarkan *composite score* yang ditunjukkan pada Tabel 6.

TABEL 6.
Hasil Evaluasi Berdasarkan *Composite Score*

No.	Resolusi (MP)	Jarak (cm)	Brightness (%)	LED (%)	<i>Composite Score</i>	Jumlah Gambar
1	16	15	100	100	0.231	15
2	16	11	100	100	0.215	15
3	64	11	100	100	0.203	15
4	16	7	100	100	0.199	15
5	16	15	50	50	0.198	15
6	16	11	50	50	0.198	15
7	64	11	50	50	0.194	15
8	16	7	50	50	0.189	15
9	64	7	50	50	0.187	15
10	64	15	50	50	0.187	15

2. Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi kualitas citra yang dihasilkan dengan beberapa metrik yang memberikan gambaran kuantitatif mengenai seberapa baik citra yang dihasilkan dalam aspek visual yang relevan dengan diagnosis klinis. Tabel 7 berikut menyajikan analisis korelasi.

TABEL 7.
Analisis Korelasi

Metrik	Mean	Std	Min	Max
Sharpness	32.01	29.79	6.49	128.91
Contrast	46.86	7.49	32.89	56.72
Brightness	74.63	20.53	43.20	105.64
SNR	1.62	0.38	1.00	2.21
Edge Density	0.008	0.009	0.000	0.029
Focus	12.26	3.03	7.84	21.16
Composite Score	0.185	0.022	0.141	0.231

Hasil menunjukkan Dominasi kontras sebagai faktor penentu kualitas keseluruhan dibuktikan melalui korelasi tertinggi dengan *composite score* ($r=0.808$), *edge density* ($r=0.578$) dan *sharpness* ($r=0.573$) mengindikasikan bahwa optimisasi kontras dapat memberikan efek sinergis terhadap metrik kualitas lainnya, sehingga fokus pengembangan sistem imaging harus diarahkan pada aspek kontras untuk meningkatkan kualitas citra. Nilai *composite score* yang relatif stabil menunjukkan bahwa sistem evaluasi kualitas yang dikembangkan mampu memberikan penilaian yang konsisten.

3. Validasi dengan Algoritma YOLO

Evaluasi menggunakan algoritma YOLO menunjukkan *confidence* deteksi berkisar 90-97% dengan rata-rata 93.5%. *Confidence* tertinggi 97% dicapai pada konfigurasi resolusi 16MP dengan jarak 11 cm dan pencahayaan optimal. Standar deviasi *confidence* yang rendah (1.68%) mengindikasikan konsistensi performa sistem yang baik pada berbagai kondisi operasional. Berikut Tabel 8 yang menyajikan hasil evaluasi *confidence* deteksi YOLO.

TABEL 8.
Hasil Evaluasi *Confidence* Deteksi YOLO

No	Resolusi (MP)	Jarak (cm)	Brightness (%)	LED (%)	<i>Confidence</i> (%)
1	16	7	0	0	94
2	16	7	50	50	92
3	16	7	100	100	91
4	16	11	0	0	93
5	16	11	50	50	94
6	16	11	100	100	97
7	16	15	0	0	94
8	16	15	50	50	94
9	16	15	100	100	93
10	64	7	0	0	95
11	64	7	50	50	95
12	64	7	100	100	95
13	64	11	0	0	91
14	64	11	50	50	93
15	64	11	100	100	94
16	64	15	0	0	90
17	64	15	50	50	94
18	64	15	100	100	94

F. Pembahasan

Penelitian ini berhasil mengembangkan purwarupa sistem pencitraan medis portabel yang menunjukkan performa yang baik untuk aplikasi klinis. Sistem akuisisi citra menunjukkan *trade-off* yang wajar antara resolusi dan *frame rate*, dengan efisiensi tinggi pada semua resolusi yang diuji. Sistem pencahayaan memenuhi standar medis pada jarak operasional 10 cm, yang sesuai dengan kebutuhan pemeriksaan detail serviks. Keterbatasan *working distance* ini dapat diatasi melalui optimasi desain optik dengan penambahan kolimator atau *reflector parabolic*. Filter *cross polarizing* terbukti sangat efektif dalam mengurangi pantulan cahaya dengan penurunan detection reflection hingga 98% pada resolusi 64MP. Namun, *trade-off* berupa penurunan intensitas cahaya perlu diperhitungkan dalam implementasi klinis. Sistem suplai daya portabel menunjukkan performa yang memadai dengan waktu operasi minimum 1.6 jam pada beban penuh, yang memenuhi kebutuhan aplikasi klinis. Rasio konsumsi daya antara mode aktif dan *standby* sebesar 37.6% menunjukkan efisiensi energi yang baik. Evaluasi keseluruhan sistem menggunakan dua pendekatan yang saling melengkapi menunjukkan bahwa resolusi 16MP memberikan performa optimal untuk aplikasi medis. Konsistensi *confidence* YOLO yang tinggi ($\geq 90\%$) memvalidasi kemampuan sistem dalam menghasilkan citra berkualitas untuk mendukung diagnosis klinis.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa purwarupa kolposkop berbasis *Raspberry Pi 4* telah berhasil dikembangkan dengan performa yang memadai untuk aplikasi klinis. Sistem mampu merekam citra dengan *frame rate* mendekati 30 FPS dan mencapai performa optimal pada resolusi VGA (85.5 FPS) serta stabil pada resolusi Full HD (28.5 FPS). Evaluasi kinerja menunjukkan bahwa kualitas citra dipengaruhi oleh parameter resolusi, jarak pengambilan, dan pencahayaan, dengan konfigurasi optimal pada resolusi 16MP, jarak 15 cm, dan pencahayaan LED yang memberikan *composite score* terbaik. Validasi menggunakan YOLO menunjukkan *confidence* deteksi 90-97% dengan performa optimal pada resolusi 16MP jarak 11 cm. Hasil penelitian mengkonfirmasi bahwa resolusi 16MP lebih konsisten dan handal dibandingkan 64MP untuk implementasi klinis, menjadikan sistem ini sebagai alternatif yang viable untuk kolposkop konvensional dengan biaya yang lebih terjangkau.

REFERENCE

- [1] D. Stelzle *et al.*, "Estimates of The Global Burden of Cervical Cancer Associated with HIV," *Lancet Glob Health*, vol. 9, pp. e161–e169, Feb. 2021, doi: 10.1016/S2214-109X(20)30459-9.
- [2] GLOBOCAN, "Statistics at a Glance, 2022 Top 5 most Frequent Cancers Number of New Cases 408 661 Number of Deaths 242 988 Number of Prevalent Cases (5-year)," 2022.
- [3] P. Rema, A. Mathew, and S. Thomas, "Performance of Colposcopic Scoring by Modified International Federation of Cervical Pathology and Colposcopy Terminology for Diagnosing Cervical Intraepithelial Neoplasia in a Low-Resource Setting," *South Asian J Cancer*, vol. 8, no. 4, pp. 218–220, Oct. 2019, doi: 10.4103/sajc.sajc_302_18.
- [4] "WHO Results Report 2020-2021," <https://www.who.int/about/accountability/results/who-results-report-2020-2021>.
- [5] A. N. Hutabarat and N. Puspitasari, "Spatial Autocorrelation Analysis on Coronavirus Transmission and Population Density in East Java Province 2020," *Jurnal Biometrika dan Kependudukan*, vol. 12, pp. 230–238, Nov. 2023, doi: 10.20473/jbk.v12i2.2023.230-238.
- [6] O. Febriyanti Marantika *et al.*, "Faktor-faktor yang Berpengaruh Terhadap Keikutsertaan WUS (Wanita Usia Subur) Dalam Pemeriksaan IVA (Inspeksi Visual Asam Asetat) Tahun 2021," 2022.
- [7] Dinkes Kota Bandung, "Profil-Kesehatan-Kota-Bandung-Tahun-2022-Combine-V2-24072023 (1)," 2022.
- [8] C. Nakisige *et al.*, "Artificial Intelligence and Visual Inspection in Cervical Cancer Screening," *International Journal of Gynecological Cancer*, vol. 33, pp. 1515–1521, Oct. 2023, doi: 10.1136/ijgc-2023-004397.
- [9] L. Gaffikin, P. D. Blumenthal, J. McGrath, and Z. M. Chirenje, "Visual Inspection with Acetic Acid For Cervical-Cancer Screening: Test Qualities in a Primary-Care Setting," *Lancet*, vol. 353, pp. 869–873, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0140-6736(98)07033-0.
- [10] R. Naufaldiansyah, M. L. Adriansyah, and C. Muda Suparjo, "Desain Kolposkop Kanker Serviks Portabel dengan Pengurangan Pantulan Cahaya Berbiaya Rendah - WRAP Entrepreneurship (Capstone)," <https://openlibrary.telkomuniversity.ac.id/pustaka/204964/desain-kolposkop-kanker-serviks-portabel-dengan-pengurangan-pantulan-cahaya-berbiaya-rendah-wrap-entrepreneurship-capstone-.html>.
- [11] A. Hasegawa and Y. Kondo, "Effect of Frame Rate on Image Quality in Cardiology Evaluated Using an Indirect Conversion Dynamic Flat-Panel Detector," *Radiol Phys Technol*, vol. 17, pp. 947–954, Dec. 2024, doi: 10.1007/s12194-024-00845-3.
- [12] A. M. Jawad, L. Alamro, L. F. Abdulrazak, A. A. B. Abdelrahman, and I. Bezklubenko, "Study of Camera Efficiency and Image Resolution," in *Conference of Open Innovation Association, FRUCT*, IEEE Computer Society, 2024, pp. 294–306. doi: 10.23919/fruct61870.2024.10516363.
- [13] National Cancer Institute, "What Is Cervical Cancer?," <https://www.cancer.gov/types/cervical>. Accessed: Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/types/cervical>
- [14] M. Läsche, H. Urban, J. Gallwas, and C. Gründker, "HPV and Other Microbiota; Who's Good and Who's Bad: Effects of The Microbial Environment on The Development of Cervical Cancer—a Non-Systematic Review," Mar. 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/cells10030714.
- [15] A. Y. Wuringsih, H. Distinarista, and A. J. Laely, "Cervical Cancer Self Management Education (CSME) Meningkatkan Kualitas Hidup Pasien dengan Kanker Serviks," *NURSCOPE: Jurnal Penelitian dan Pemikiran Ilmiah Keperawatan*, vol. 5, p. 45, Jul. 2021, doi: 10.30659/nurscope.5.1.45-51.
- [16] M. A. Jain and F. Limaie, "Cervical Squamous Cell Carcinoma," *StatPearls*, Jan. 2023, Accessed: Jun. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559075/>
- [17] N. N. Anggraini, N. D. Indrawati, and E. Kusumawati, "Pemeriksaan IVA Test Kerjasama PKBI Jawa Tengah di Lapas Bulu Kelas II Semarang Jawa Tengah," *Jurnal Pengabdian Masyarakat Kebidanan*, vol. 2, p. 36, Jan. 2020, doi: 10.26714/jpmk.v2i1.5369.
- [18] L. Gattoc and L. C. Flowers, "Colposcopy," in *Clinical Gynecology, Second Edition*, Cambridge University Press, 2015, pp. 168–186. doi: 10.1017/CBO9781139628938.015.
- [19] Badan Standardisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia Konservasi energi pada sistem pencahayaan," 2020. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [20] A. I. Setyarini *et al.*, "Obstetri dan Ginekologi untuk Kebidanan." [Online]. Available: www.globeleksekitifteknologi.co.id
- [21] S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, and P. Famouri, "Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17051250.
- [22] Y. Rodriguez-Gallo, R. Orozco-Morales, and Marlen Perez-Diaz, "Analysis of Objective Quality Metrics in Computed Tomography Images Affected by Metal Artifacts," *Biomedizinische Technik*, vol. 67, pp. 1–9, Feb. 2022, doi: 10.1515/bmt-2020-0244.

