# BAB II
# DASAR TEORI

Pada bab dasar teori ini akan membahas teori terkait dan komponen-komponen yang digunakan untuk perancagan Alat Penghitung Dan Identifikasi Pil Otomatis Berbasis Image Processing Terintegrasi *Website* Menggunakan Raspberry Pi.

## 2.1. Tinjauan Pustaka

Pada tinjauan pustaka ini berisi referensi yang telah ditinjau mengenai perancangan alat penghitung dan identifikasi pil otomatis berbasis *image processing* terintegrasi *website* menggunakan raspberry pi. Berikut merupakan hasil dari tinjauan pustaka yang dapat dilihat pada **Tabel 2. 1**.

**Tabel 2. 1** Tinjauan Pustaka

| Judul Penelitian | Penulis/Tahun | Keterangan | Persamaan dan Perbedaan |
|---|---|---|---|
| *Real-Time Pill Counting on Low-Power Device: A* YOLOv5 *Pipeline with Confidence Thresholding and* NMS. | Galih Prakoso Rizky A, Rifka Widyastuti, 2025. | Penelitian ini membahas implementasi metode deteksi objek menggunakan algoritma YOLOv5 untuk menghitung jumlah pil secara real-time dengan mengoptimalkan komputasi pada perangkat berdaya rendah. | Penelitian ini sama-sama berfokus pada penghitungan pil secara *real-time* pada perangkat berdaya rendah seperti Raspberry Pi. Perbedaannya terletak pada penggunaan metode pengolahan citra berbasis *Deep Learning* (YOLOv5), tanpa integrasi sistem getar mekanik maupun fitur web monitoring. |

**Tabel 2. 1** Lanjutan Tinjauan Pustaka

| Judul Penelitian | Penulis/Tahun | Keterangan | Persamaan dan Perbedaan |
|---|---|---|---|
| *Color and Shape Recognition of Pills using Image Processing.* | Ranjitha, Swati Shripad Kulkarni, Rashmi K. H., Athmashree A. T, 2019 | Penelitian ini membahas metode pengenalan dan klasifikasi pil berdasarkan ekstraksi fitur fisik, yaitu warna dan bentuk geometris, menggunakan teknik image processing konvensional. | Penelitian ini sama-sama menggunakan image processing berupa ekstraksi kontur dan ruang warna untuk mengidentifikasi pil berdasarkan warna dan bentuk tanpa AI. Perbedaannya, penelitian penulis mengintegrasikan aktuator motor getar serta sinkronisasi data ke *web server*. |
| CNN-*Based Automatic Tablet Classification Using a Vibration-Controlled Bowl Feeder with Spiral Torque Optimization*. | Kicheol Yoon, Sangyun Lee, Junha Park, Kwang Gi Kim, 2025. | Penelitian ini membahas sistem klasifikasi tablet otomatis berbasis CNN yang dipadukan dengan mekanisme *vibration bowl feeder* untuk memisahkan pil yang menumpuk. | Penelitian ini sama-sama menggunakan modul getaran untuk mengatasi tumpukan pil *(clumping*) sebelum pengambilan citra. Perbedaannya, penelitian tersebut ditujukan untuk skala industri dengan *bowl feeder* besar dan CNN, sedangkan penelitian penulis berskala portabel untuk apotek berbasis Raspberry Pi dan OpenCV. |

**Tabel 2. 1** Lanjutan Tinjauan Pustaka

| Judul Penelitian | Penulis/Tahun | Keterangan | Persamaan dan Perbedaan |
|---|---|---|---|
| Deteksi Objek *Real Time* Dengan *YOLOv4-tiny* Dan Antarmuka Grafis Menggunakan OpenCV Python. | Anzari, Y., F. Novriadi, N. Rahmawati, R. N. Akta, F. H. Aminuddin, dan T. Djauhari, 2024. | Penelitian ini membahas sistem pendeteksi objek *real-time* berbasis OpenCV dan Python yang terintegrasi dengan GUI interaktif. | Penelitian ini sama-sama menggunakan OpenCV, Python, video *real-time*, dan GUI. Perbedaannya, penelitian tersebut mendeteksi objek umum, sedangkan penelitian penulis berfokus pada pil medis dengan output printer *thermal* serta integrasi REST-API ke *web server*. |
| *Development and Validation of a Digital Image Processing-Based Pill Detection Tool for an Oral Medication Self-Monitoring System*. | Holtkötter, J., R. Amaral, A. Pereira, C. Jácome, dan M. Pereira. 2022. | Penelitian ini membahas pengembangan dan validasi alat deteksi pil berbasis pengolahan citra digital dengan sinkronisasi untuk pemantauan pengobatan mandiri jarak jauh. | Perbedaannya terletak pada sistem perangkat keras, penelitian ini memproses gambar pil di dalam wadah blister statis menggunakan smartphone, sedangkan penelitian penulis menggunakan baki dinamis dengan modul getar yang dikendalikan sepenuhnya oleh *Single Board Computer* (Raspberry Pi). |

## *2.2. Embedded System*

*Embedded System* adalah sistem komputasi khusus yang dirancang untuk menjalankan fungsi-fungsi tertentu dalam sistem mekanis atau elektronik yang lebih besar. Sistem ini mengintegrasikan perangkat keras dan *firmware* menjadi satu unit yang dioptimalkan untuk tugas-tugas spesifik daripada komputasi umum. Integrasi ini memungkinkan pemanfaatan sumber daya yang efisien, ringkas dan interaksi langsung dengan dunia fisik melalui sensor dan aktuator. Komponen ini biasanya mencakup mikroprosesor atau mikrokontroler, memori dan antarmuka input atau output, yang semuanya bekerja secara terpadu untuk menjalankan operasi yang telah ditentukan sebelumnya dengan keandalan tinggi [8]. Berikut merupakan tabel karakteristik utama yang membedakan *Embedded System* pada **Tabel 2. 2**.

**Tabel 2. 2** Karakteristik Utama yang Membedakan Sistem Tertanam

| Karakteristik | Deskripsi | Relevansi dengan Alat Farmasi |
|---|---|---|
| **Desain Tugas Khusus** | Perangkat keras dan perangkat lunak dirancang bersama untuk fungsi khusus. | Memungkinkan operasi yang presisi dan dapat diulang seperti perhitungkan pil dan identifikasi pil. |
| **Operasi Waktu Nyata** | Sistem ini menjamin waktu respons yang dapat diprediksi dalam batas waktu yang ketat. | Sangat penting untuk pengambilan gambar, pemrosesan dan kontrol aktuator yang tepat waktu (misalnya pada modul getar). |
| **Keterbatasan Sumber Daya** | Dioptimalkan untuk daya pemrosesan, memori dan konsumsi energi yang terbatas. | Penting untuk desain perangkat atau yang hemat biaya. |
| **Keandalan Tinggi** | Dirancang untuk pengoprasian yang berkelanjutan dan tahan dari kesalahan di lingkungan yang menuntut. | Wajib untuk keselamatan pasien dan penanganan obat yang akurat. |
| **Integrasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak yang Ketat** | Perangkat lunak terintegrasi erat dengan komponen perangkat keras fisik. | Sayang penting untuk mengoordinasikan antarmuka, modul kamera, modul getar, LED dan printer secara mulus. |

Dalam aplikasi medis dan farmasi, keandalan *Embedded System* sangatlah penting karena berdampak langsung pada keselamatan pasien dan efektivitas pengobatan. Sistem ini harus memenuhi persyaratan ketat terkait integritas data, konsistensi operasional dan toleransi kesalahan [9]. Kasus historis mesin terapi radiasi Therac-25 menjadi contoh penting akan konsekuensi bencana yang dapat timbul akibat kekurangan dalam keandalan perangkat lunak dan desain keselamatan yang menekankan kebutuhan kritis akan praktik rekayasa yang ketat pada perangkat medis.

Untuk alat seperti penghitung dan pengidentifikasi pil otomatis keandalan bisa memenuhi beberapa persyaratan konkret seperti:

1. Akurasi dan Presisi: Algoritma pemrosesan gambar harus menghasilkan penghitungan pil yang akurat secara konsisten dan identifikasi yang benar. Kesalahan apa pun dapat menyebabkan pemberian obat yang salah.
2. Perilaku Deterministik: Respon sistem mulai dari penekanan tombol hingga pengambilan gambar, getaran, dan tampilan hasil harus dapat diprediksi dan diulang di bawah semua kondisi operasi yang diharapkan.
3. Penanganan Kesalahan yang Tangguh: Sistem harus dapat menangani potensi kegagalan dengan baik, seperti pencahayaan yang buruk, tumpang tindih pil (diminimalkan oleh modul getaran), atau masalah jaringan saat mengirim data ke server web.
4. Kepatuhan terhadap Standar: Meskipun prototipe mungkin tidak memerlukan sertifikasi penuh, desainnya harus mengacu pada standar perangkat medis yang relevan seperti IEC 62304 tentang siklus hidup perangkat lunak dan IEC 60601 tentang keselamatan, yang mewajibkan proses manajemen risiko dan validasi yang komprehensif [8].

Raspberry Pi 4B, sebagaimana digunakan dalam alat penghitung dan pengidentifikasi pil ini, secara tepat diklasifikasikan sebagai sistem tertanam dalam konteks ini. Meskipun dibangun berdasarkan sistem-on-achip (SoC) serbaguna, perangkat ini menjadi sistem tertanam ketika digunakan untuk fungsi khusus dengan perangkat keras periferal yang terintegrasi erat dan perangkat lunak khusus.

Beberapa faktor mendukung klasifikasi ini dan kesesuaiannya untuk pembuatan prototipe medis:

1. Fungsionalitas Khusus: Dalam prototipe ini, Raspberry Pi bukanlah komputer serba guna. Perangkat ini dikonfigurasi untuk melakukan satu tugas utama yaitu mengotomatiskan penghitungan dan identifikasi pil. Sistem operasi dan perangkat lunaknya dirancang khusus untuk aplikasi ini, mengendalikan perangkat keras khusus seperti modul kamera, motor getaran, dan LED HPL.
2. Integrasi Perangkat Keras-Perangkat Lunak yang Dimudahkan: Pin GPIO (*General Purpose Input/Output*) dan antarmuka standar (CSI, USB) Raspberry Pi memungkinkan integrasi fisik langsung dan kontrol perangkat lunak terhadap komponen khusus. Hal ini memfasilitasi perilaku sistem yang kohesif yang diperlukan untuk aplikasi tertanam [8].
3. Prototipe dan Jalur Regulasi: Raspberry Pi menyediakan platform yang kokoh dan didukung dengan baik untuk mengembangkan dan menguji konsep perangkat medis. Penggunaannya dalam perangkat medis yang diatur telah terbukti, dengan implementasi yang berhasil mencapai kepatuhan dengan mengintegrasikan kerangka kerja manajemen risiko yang sesuai. Hal ini sering melibatkan penggunaan Raspberry Pi untuk fungsi tingkat tinggi sementara pemantauan keamanan kritis diimplementasikan pada mikrokontroler terpisah yang lebih sederhana untuk mengelola risiko sistem secara keseluruhan [8].

Efektivitas sistem tertanam, terutama di bidang sensitif seperti farmasi, secara fundamental bergantung pada integrasi perangkat keras-perangkat lunak yang mulus. Ini bukan sekadar soal konektivitas, melainkan mewakili *filosofi co-design*. Algoritma perangkat lunak (untuk pemrosesan gambar dan penghitungan) harus dikembangkan secara bersamaan dengan desain perangkat keras (penempatan kamera, intensitas getaran, pencahayaan melalui LED HPL) untuk mencapai kinerja optimal dan andal.

Dalam alat penghitung pil ini, integrasi yang sukses terlihat dalam beberapa aspek perangkat lunak memicu modul getaran untuk mencegah tumpang tindih pil sebelum pengambilan gambar, memproses umpan kamera menggunakan algoritma khusus dan mengontrol layar sentuh LCD untuk interaksi pengguna dan tampilan hasil. Keterkaitan yang erat ini memastikan sistem beroperasi sebagai alat yang terpadu dan andal, mengubah komponen-komponen individual seperti Raspberry Pi, kamera, dan getar menjadi sistem tertanam yang kohesif yang didedikasikan untuk satu tugas kritis. Pendekatan terintegrasi ini membentuk fondasi untuk membangun sistem yang memenuhi standar keandalan dan akurasi tinggi yang diharapkan dalam aplikasi medis dan farmasi [8].

## 2.3. Pengelolaan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan tahapan krusial dalam sistem identifikasi objek visual. Dalam proses pendeteksian warna pil, representasi ruang warna memegang peranan penting. Meskipun model warna *Red, Green, Blue* (RGB) umum digunakan dengan prinsip penambahan tiga spektrum warna primer, model ini memiliki keterbatasan karena representasi warnanya sangat bergantung pada intensitas pencahayaan. Oleh karena itu, citra RGB yang ditangkap oleh kamera dikonversi menjadi ruang warna *Hue, Saturation, Value* (HSV). Model HSV lebih unggul karena secara sistematis memisahkan informasi warna murni (krominan) dari intensitas cahaya (*luminans*), sehingga deteksi warna pil menjadi jauh lebih stabil terhadap fluktuasi pencahayaan ruangan. Berdasarkan Saniah dan Furqan [10], persamaan matematis untuk mengkonversi nilai normalisasi RGB (R', G', B' dengan rentang 0-1) ke HSV adalah dengan mencari nilai maksimum ($C_{max}$) dan minimum ($C_{min}$) dari ketiga warna dasar tersebut, beserta selisihnya ($\Delta = C_{max} - C_{min}$). Nilai *Value* (V) merepresentasikan kecerahan tertinggi ($V = C_{max}$), nilai *Saturation* (S) dikalkulasi dari rasio selisih warna terhadap nilai maksimum ($S = \Delta / C_{max}$), dan *Hue* (H) merepresentasikan derajat warna dari 0° hingga 360° menggunakan perbandingan R, G, dan B terhadap nilai delta. Berikut merupakan persamaan yang digunakan:

### 2.3.1. Rumus konversi ruang warna RGB ke HSV

Untuk membedakan warna objek fisik secara stabil di bawah cahaya lampu atau kamera yang berbeda, citra perlu dikonversi dari RGB (*Red, Green, Blue*) ke HSV (*Hue, Saturation, Value*) [10].

Pertama, nilai R, G, B (rentang 0-255) dinormalisasi menjadi skala 0-1, seperti pada persamaan (2.1) sampai (2.3):

$$R' = \frac{R}{255} \tag{2.1}$$

$$G' = \frac{G}{255} \tag{2.2}$$

$$B' = \frac{B}{255} \tag{2.3}$$

Kemudian dicari nilai maksimum ($C_{max}$) dan minimum ($C_{min}$) dari ketiga nilai tersebut, serta selisihnya ($\Delta = C_{max} - C_{min}$).

### 2.3.2. Rumus Value (V)

Mengambil nilai intensitas cahaya tertinggi menggunakan persamaan (2.4):

$$V = C_{max} \tag{2.4}$$

### 2.3.3. Rumus Saturation (S)

Mengukur tingkat kepekatan warna menggunakan persamaan (2.5):

$$S = \begin{cases} 0, & \text{jika } C_{max} = 0 \\ \dfrac{\Delta}{C_{max}}, & \text{jika } C_{max} \neq 0 \end{cases} \tag{2.5}$$

### 2.3.4. Rumus Hue (H)

Menentukan jenis warna dominan dalam derajat lingkaran warna menggunakan persamaan (2.6):

$$H = \begin{cases} 0°, & \text{jika } \Delta = 0 \\ 60° \times \left(\dfrac{G' - B'}{\Delta} \; mod \; 6\right), & \text{jika } \mathrm{C_{max}} = \mathrm{R}' \\ 60° \times \left(\dfrac{B' - R'}{\Delta} + 2\right), & \text{jika } \mathrm{C_{max}} = \mathrm{G}' \\ 60° \times \left(\dfrac{R' - G'}{\Delta} + 4\right), & \text{jika } \mathrm{C_{max}} = \mathrm{B}' \end{cases} \quad (2.6)$$

Setelah proses segmentasi warna (*thresholding*) dilakukan, citra biner yang dihasilkan seringkali tidak sempurna dan masih mengandung *noise* (gangguan), seperti titik-titik putih kecil pada latar belakang. Untuk mengoptimalkan kualitas citra, diterapkan operasi morfologi citra matematis *Minkowski Set Operations* yang bertumpu pada erosi (*erosion*) dan dilasi (*dilation*) [10]. Proses erosi berfungsi untuk menghilangkan *noise* putih berukuran kecil dengan mengikis tepi objek. Secara matematis erosi dirumuskan sebagai berikut.

### 2.3.5. Rumus Erosi

Rumus erosi digunakan untuk mengikis tepi luar objek dan menghilangkan *noise* kecil, berikut persamaan (2.7) yang digunakan.

$$\mathrm{A} \ominus \mathrm{B} = \{z \,|(\mathrm{B})_z \subseteq \mathrm{A}\} \quad (2.7)$$

Translasi *z* dari matriks B harus sepenuhnya berada di dalam matriks A.

### 2.3.6. Rumus Dilasi

Rumus dilasi digunakan untuk menebalkan kembali objek yang terkikis agar bentuknya kembali utuh, berikut persamaan (2.8) yang digunakan.

$$\mathrm{A} \oplus \mathrm{B} = \{z \,|\left(\widehat{\mathrm{B}}\right)_{\mathrm{z}} \cap \mathrm{A} \neq \emptyset\} \quad (2.8)$$

Setidaknya ada satu piksel dari matriks B yang tumpang tindih dengan matriks A.

Tahapan analitis selanjutnya adalah mendeteksi dan mengklasifikasikan bentuk geometris pil menggunakan metode ekstraksi kontur. Algoritma Ramer-

Douglas Peucker diimplementasikan untuk melakukan aproksimasi kontur, yakni mengurangi jumlah titik koordinat lengkungan menjadi himpunan titik sudut (*vertices*) poligon yang lebih sederhana. Untuk membedakan jenis pil (misalnya, tablet bundar konvensional dengan kapsul berbentuk lonjong), sistem melakukan ekstraksi fitur geometri dasar. Dua parameter utama yang dihitung adalah luas area menggunakan *Shoelace Formula*, dan Rasio Aspek (*Aspect Ratio*). Area digunakan untuk memfilter objek yang terlalu kecil yang bukan pil, sedangkan Rasio Aspek diformulasikan sebagai rasio antara lebar kotak pembatas terhadap tingginya (*Aspect Ratio* = w / h). Nilai rasio yang mendekati angka 1 mengindikasikan objek berbentuk lingkaran sempurna atau bujur sangkar, sementara nilai yang jauh lebih besar dari 1 mengindikasikan bentuk memanjang seperti kapsul [11].

### 2.3.7. Rumus Luas Area (*Shoelace Formula* / Teorema Green)

Rumus luas area digunakan untuk menghitung besaran piksel di dalam kontur sebagai acuan untuk mengabaikan benda yang terlalu kecil. Jika kontur objek memiliki titik-titik sudut (x1, y1), (x2, y2), ..., (xn, yn) menggunakan persamaan (2.9) seperti berikut.

$$\text{Area} = \frac{1}{2}\sum_{i=i}^{n-1}\left(x_i y_i + 1 - x_i + 1 y_i\right) + (x_n y1 - x_i y_n) \tag{2.9}$$

### 2.3.8. Rumus Rasio Aspek (*Aspect Ratio*)

Digunakan untuk mengenali bentuk. Pil bulat akan memiliki rasio mendekati 1, sedangkan kapsul akan memiliki rasio > 1 misalnya 1.5 atau 2 [11], menggunakan persamaan (2.10) seperti berikut.

$$Aspect\ Ratio = \frac{w}{h} \tag{2.10}$$

dimana *w* adalah lebar kotak pembatas kontur, dan *h* adalah tingginya.

## 2.4. Computer Vision dan OpenCV

Computer vision merupakan cabang ilmu kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang memungkinkan sistem komputer untuk menginterpretasikan dan memahami informasi visual dari dunia nyata secara otomatis. Dalam pembuatan alat ini, pustaka OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) digunakan sebagai kerangka kerja utama karena efisiensinya dalam mengolah data citra pada perangkat dengan sumber daya terbatas seperti Raspberry Pi 4B [12]. Implementasi OpenCV dalam sistem ini melibatkan serangkaian fungsi spesifik yang mengonversi teori pemrosesan citra ke dalam eksekusi perangkat lunak sebagai berikut:

1. Akuisisi citra melalui `cv2.VideoCapture()` yaitu tahap awal sistem dimulai dengan pembukaan aliran data (*stream*) dari sensor kamera. Fungsi ini bertugas menginisialisasi modul kamera Raspberry Pi dan menangkap setiap *frame* video secara berkelanjutan. Efektivitas sistem pada tahap ini sangat bergantung pada kecepatan prosesor dalam melakukan *sampling* gambar agar tidak terjadi keterlambatan (*latency*) pada analisis *real-time*.
2. Konversi ruang warna melalui `cv2.cvtColor()` yaitu data visual yang ditangkap dalam format RGB (*Red, Green, Blue*) dikonversi menjadi model warna HSV *(Hue, Saturation, Value*). Fungsi ini mengeksekusi perhitungan normalisasi matematis sesuai dengan logika pada persamaan (2.1) s.d. (2.6), guna memisahkan informasi warna dari gangguan intensitas cahaya yang seringkali tidak stabil pada area pengujian [10].
3. Segmentasi objek melalui `cv2.inRange()` yaitu untuk mengisolasi objek pil dari latar belakang, sistem menggunakan metode *Color Thresholding*. Fungsi `cv2.inRange()` bekerja dengan cara memeriksa setiap piksel jadi apabila nilai piksel berada di antara rentang batas bawah (*lower boundary*) dan batas atas (*upper boundary*) warna yang telah ditentukan, maka piksel tersebut akan diubah menjadi putih (255), sedangkan piksel lainnya menjadi hitam (0). Hasil dari proses ini adalah sebuah citra biner atau *mask* yang merepresentasikan keberadaan objek target.

4. Reduksi gangguan melalui `cv2.erode()` dan `cv2.dilate()` yaitu citra biner hasil segmentasi seringkali mengandung *noise* berupa bintik-bintik putih kecil. Operasi morfologi diterapkan untuk menyempurnakan bentuk objek. Fungsi `cv2.erode()` (Erosi) bekerja berdasarkan persamaan (2.7) untuk mengikis tepi luar objek sehingga piksel *noise* yang lebih kecil dari ukuran kernel akan terhapus [13]. Sebaliknya, fungsi `cv2.dilate()` (Dilasi) bekerja berdasarkan persamaan (2.8) untuk mempertebal kembali tepi objek utama yang terkikis agar bentuk pil kembali utuh dan solid sebelum dilakukan penghitungan.
5. Ekstraksi fitur geometri melalui `cv2.findContours()` dan `cv2.approxPolyDP()` yaitu identifikasi akhir dilakukan dengan mendeteksi batas luar objek atau kontur. Fungsi `cv2.findContours()` menerapkan algoritma pelacakan tepi untuk menemukan kurva tertutup pada citra. Untuk menyederhanakan data geometri, fungsi `cv2.approxPolyDP()` mengimplementasikan Algoritma Ramer-Douglas Peucker. Proses ini mereduksi jumlah titik koordinat pada kurva menjadi himpunan titik sudut (*vertices*) yang lebih ringkas. Dengan menganalisis jumlah titik sudut ini bersamaan dengan nilai *Aspect Ratio* pada persamaan (2.10), sistem dapat mengklasifikasikan apakah pil berbentuk bulat (lingkaran) atau lonjong (kapsul).

Integrasi antara algoritma computer vision ini dengan desain mekanik modul vibrasi sangatlah krusial. Getaran yang dihasilkan oleh modul vibrasi berfungsi untuk mengurangi densitas atau tumpukan objek (*clumping*) yang dapat menyebabkan kegagalan deteksi tepi (*edge detection*). Dengan kondisi fisik yang terurai, fungsi-fungsi OpenCV dapat bekerja dengan akurasi maksimal dalam menghitung dan mengidentifikasi pil secara deterministik sesuai standar keamanan medis [14].

## 2.5. Perangkat Keras

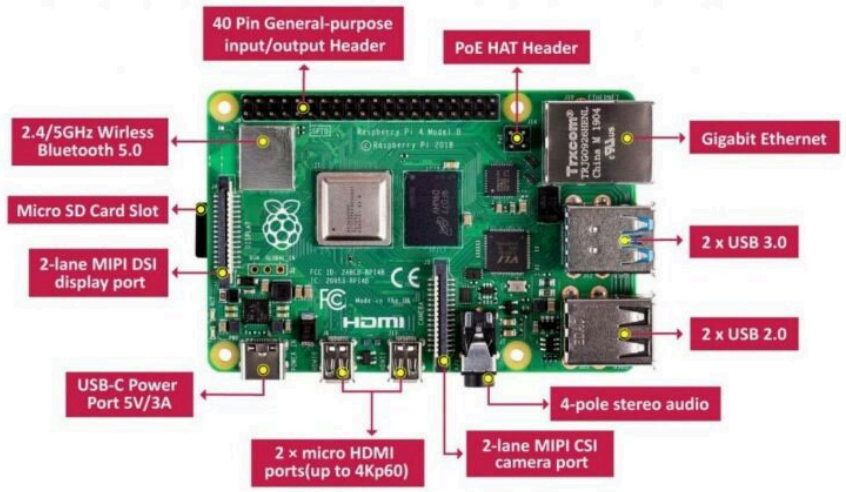
Perangkat keras (*hardware*) merupakan keseluruhan komponen fisik yang dapat diamati dan disentuh secara langsung, yang secara bersama-sama membentuk suatu kesatuan sistem fungsional yang terintegrasi. Berbeda dengan perangkat lunak yang bersifat abstrak berupa instruksi dan logika, perangkat keras adalah wujud nyata dari sistem yang menjalankan fungsi akuisisi data, pemrosesan sinyal, pengendalian aktuator, dan penyajian informasi kepada pengguna. Dalam perancangan alat penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini, pemilihan setiap komponen perangkat keras dilakukan secara cermat dengan mempertimbangkan aspek kompatibilitas antarkomponen, kemampuan komputasi yang memadai untuk menjalankan algoritma *image processing*, konsumsi daya yang efisien, serta keandalan operasional dalam lingkungan penggunaan. Perancangan alat ini mengintegrasikan beberapa komponen utama yang dikendalikan oleh unit pemroses pusat untuk melakukan tugas akuisisi citra, pengolahan data visual, pengendalian mekanis, dan penyajian hasil kepada pengguna. Untuk mendukung kinerja sistem, dipilih beberapa komponen perangkat keras dengan spesifikasi yang sesuai dengan kebutuhan pemrosesan citra real-time sebagai berikut.

### 2.5.1. Raspberry Pi 4 Model B

Raspberry Pi 4 Model B adalah *Single Board Computer* (SBC) berperforma tinggi yang dikembangkan oleh Raspberry Pi Ltd. Perangkat ini berfungsi sebagai unit pemroses pusat (*central processing unit*) atau "otak utama" dari seluruh sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis. Sebagai SBC, Raspberry Pi 4B mengintegrasikan seluruh komponen komputasi esensial termasuk prosesor, memori, antarmuka jaringan, dan port input/output ke dalam satu papan sirkuit tunggal berukuran kompak 85 mm × 56 mm, sehingga sangat sesuai untuk diimplementasikan pada sistem tertanam (*embedded system*) yang membutuhkan efisiensi ruang dan daya [17].

Raspberry Pi 4 Model B dilengkapi dengan prosesor Broadcom BCM2711, yaitu *System on Chip* (SoC) dengan arsitektur *quad-core* Cortex-A72 (ARM v8)

64-bit yang beroperasi pada kecepatan 1,8 GHz. Kemampuan komputasi ini menjadikan Raspberry Pi 4B mampu menjalankan algoritma *image processing* yang kompleks termasuk konversi ruang warna HSV, operasi morfologi, dan ekstraksi kontur secara mandiri tanpa bantuan PC eksternal. Untuk mendukung kebutuhan pemrosesan data visual yang intensif, perangkat ini tersedia dalam beberapa pilihan kapasitas memori LPDDR4 dengan *on-die* ECC, yaitu 1GB, 2GB, 3GB, 4GB, hingga 8GB, bergantung pada varian model yang dipilih (Raspberry Pi Ltd, 2026). Pada penelitian ini digunakan varian dengan kapasitas memori yang memadai untuk menjalankan sistem operasi Raspberry Pi OS, pustaka OpenCV, dan server web secara bersamaan [17]. Gambar *Pinout* Raspberry Pi Model B dapat dilihat pada **Gambar 2. 1**.

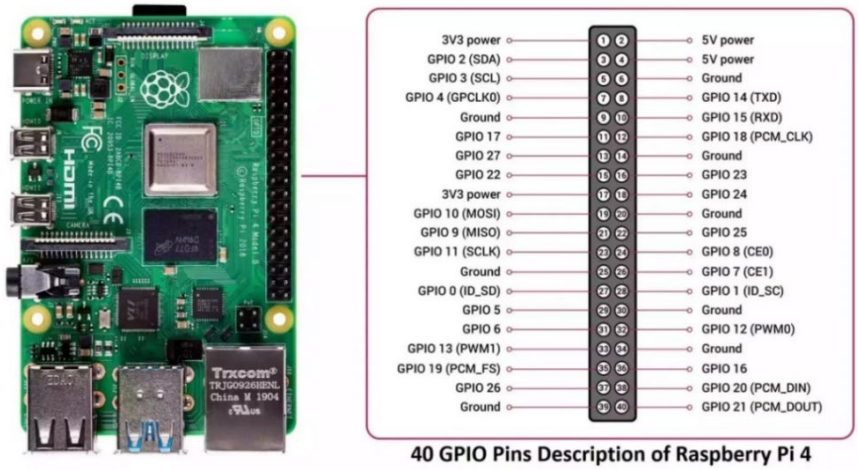



**Gambar 2. 1** *Pinout* Raspberry Pi 4B [18]

Dari sisi konektivitas, Raspberry Pi 4B menyediakan antarmuka yang sangat lengkap dan relevan untuk kebutuhan sistem ini. Konektivitas nirkabel mencakup Wi-Fi *dual-band* 2,4 GHz dan 5,0 GHz (IEEE 802.11b/g/n/ac) serta Bluetooth 5.0 dan BLE, yang memungkinkan pengiriman data hasil identifikasi pil ke *web server* secara nirkabel. Selain itu, tersedia pula antarmuka Gigabit Ethernet untuk koneksi jaringan berkabel, 2 port USB 3.0 dan 2 port USB 2.0 untuk koneksi periferal, serta 2 port micro-HDMI yang mendukung resolusi hingga 4Kp60 untuk koneksi layar LCD *touchscreen* 7 inci yang digunakan

sebagai antarmuka pengguna sistem (Raspberry Pi Ltd, 2026) [17]. Untuk keperluan multimedia, perangkat ini mendukung dekode video H.265 hingga 4Kp60 dan H.264 hingga 1080p60, serta grafis OpenGL ES 3.0 yang memperkuat kemampuan rendering antarmuka visual secara *real-time* [17].

Dari sisi konektivitas, Raspberry Pi 4B menyediakan antarmuka yang sangat lengkap dan relevan untuk kebutuhan sistem ini. Konektivitas nirkabel mencakup Wi-Fi *dual-band* 2,4 GHz dan 5,0 GHz (IEEE 802.11b/g/n/ac) serta Bluetooth 5.0 dan BLE, yang memungkinkan pengiriman data hasil identifikasi pil ke *web server* secara nirkabel. Selain itu, tersedia pula antarmuka Gigabit Ethernet untuk koneksi jaringan berkabel, 2 port USB 3.0 dan 2 port USB 2.0 untuk koneksi periferal, serta 2 port micro-HDMI yang mendukung resolusi hingga 4Kp60 untuk koneksi layar LCD *touchscreen* 7 inci yang digunakan sebagai antarmuka pengguna sistem (Raspberry Pi Ltd, 2026). Untuk keperluan multimedia, perangkat ini mendukung dekode video H.265 hingga 4Kp60 dan H.264 hingga 1080p60, serta grafis OpenGL ES 3.0 yang memperkuat kemampuan rendering antarmuka visual secara *real-time* [17]. Gambar *pinout* 40 GPIO Raspberry Pi Model B dapat dilihat pada **Gambar 2. 2**.




**Gambar 2. 2** *Pinout* Raspberry Pi 4B 40 GPIO [18]

Komponen yang paling krusial dalam konteks integrasi sistem adalah *header* GPIO (*General Purpose Input/Output*) standar 40-pin yang sepenuhnya

kompatibel dengan papan generasi sebelumnya. Pin GPIO pada Raspberry Pi 4B memungkinkan komunikasi dan pengendalian langsung terhadap komponen elektronik eksternal, termasuk Modul Vibrasi untuk menggetarkan wadah pil dan LED HPL sebagai sumber pencahayaan area pengambilan citra, melalui sinyal digital maupun sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*). Untuk catu daya, Raspberry Pi 4B membutuhkan suplai 5V DC melalui konektor USB-C dengan arus minimum 3A, atau melalui header GPIO dengan spesifikasi yang sama (Raspberry Pi Ltd, 2026) [17]. Spesifikasi teknis lengkap Raspberry Pi 4 Model B dirangkum pada **Tabel 2. 3** berikut.

**Tabel 2. 3** Spesifikasi Raspberry Pi 4B

| **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|
| Prosesor | Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1,8 GHz |
| Memori | 1GB / 2GB / 3GB / 4GB / 8GB LPDDR4 dengan *on-die* ECC |
| Wireless LAN | 2,4 GHz & 5,0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac |
| Bluetooth | *Bluetooth* 5.0, BLE |
| Ethernet | Gigabit Ethernet |
| USB | 2× USB 3.0, 2× USB 2.0 |
| Video Output | 2× micro-HDMI (hingga 4Kp60) |
| Display Port | 2-lane MIPI DSI |
| Camera Port | 2-lane MIPI CSI |
| GPIO | *Header* 40-pin standar |
| Multimedia | H.265 (4Kp60 decode), H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode), OpenGL ES 3.0 |
| Penyimpanan | Slot Micro SD |
| Catu Daya | 5V DC via USB-C / GPIO header (min. 3A) |
| Suhu Operasi | 0°C – 50°C |
| Dimensi | 85 mm × 56 mm |
| MTBF | 211.000 jam (*Ground Benign*) |
| Masa Produksi | Hingga minimal Januari 2034 |

Dari aspek keandalan, Raspberry Pi 4B memiliki nilai MTBF (*Mean Time Between Failure*) sebesar 211.000 jam pada kondisi *Ground Benign*, yang mengindikasikan tingkat keandalan operasional yang sangat tinggi untuk penggunaan dalam sistem tertanam jangka panjang [17]. Raspberry Pi 4 Model B akan tetap diproduksi hingga setidaknya Januari 2034, sehingga ketersediaan komponen untuk keperluan pengembangan dan pemeliharaan sistem di masa mendatang dapat terjamin. Dengan kombinasi kemampuan komputasi tinggi, konektivitas lengkap, antarmuka GPIO yang fleksibel, dan faktor bentuk yang kompak, Raspberry Pi 4 Model B merupakan pilihan yang paling tepat dan optimal sebagai unit pemroses pusat dalam sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis berbasis *image processing* ini.

### 2.5.2. Modul Kamera Raspberry Arducam IMX219 B0390

Modul Kamera Arducam B0390 merupakan modul kamera beresolusi tinggi yang dirancang secara spesifik untuk kompatibilitas penuh dengan papan *Single Board Computer* Raspberry Pi. Modul ini terhubung ke antarmuka MIPI CSI (*Camera Serial Interface*) pada Raspberry Pi menggunakan kabel pita fleksibel (*ribbon cable*) yang memastikan transfer data citra berkecepatan tinggi dengan latensi yang sangat rendah, sehingga tidak membebani jalur komunikasi USB perangkat utama [19]. Kecepatan transmisi ini sangat krusial dalam mendukung kelancaran aliran video pratinjau (*live preview*) dan pemrosesan citra *real-time* oleh pustaka OpenCV. Gambar Modul Kamera Raspberry Arducam IMX219 B0390 dapat dilihat pada **Gambar 2. 3**.

**Gambar 2. 3** Modul Kamera Raspberry Arducam IMX219 B0390 [19]

Inti Inti dari modul kamera Arducam B0390 adalah sensor gambar Sony IMX219. Sensor ini memiliki resolusi diam (*still resolution*) sebesar 8 Megapiksel dengan resolusi maksimal 3280 × 2464 piksel. Sensor gambar berukuran optis 1/4 inci ini memiliki area pencitraan seluas 3,68 × 2,76 mm, di mana masing-masing piksel memiliki ukuran presisi sebesar 1,12 × 1,12 µm [19]. Kombinasi antara resolusi tinggi dan ukuran piksel mikroskopis ini memungkinkan kamera untuk menangkap detail fisik dari objek berukuran kecil seperti pil medis dengan tingkat ketajaman (*sharpness*) yang sangat baik. Kualitas citra awal ini menjadi prasyarat mutlak sebelum data visual diproses lebih lanjut menggunakan algoritma konversi warna HSV dan ekstraksi batas kontur.

Dari sisi kapabilitas perekaman gerakan, sensor Sony IMX219 pada modul ini mendukung *frame rate* yang bervariasi tergantung pada mode resolusi video yang dipilih. Kamera ini mampu merekam pada kecepatan 30 fps untuk mode 1080P, 60 fps untuk mode 720P, dan mendukung mode video VGA90 [19]. Dalam implementasi sistem otomasi penghitung pil, resolusi dan *frame rate* kamera dikonfigurasi melalui kerangka kerja libcamera pada sistem operasi Raspberry Pi OS teranyar (Bullseye) untuk mendapatkan keseimbangan yang optimal antara detail gambar dan beban komputasi prosesor Raspberry Pi 4.

Lensa yang digunakan pada modul B0390 adalah lensa *Fixed Focus* (fokus tetap) bawaan standar dengan panjang fokus (*focal length*) 3,04 mm dan *Focal ratio* (F-Stop) 2.0. Lensa ini memberikan bidang pandang (*Field of View*/FOV) horizontal sebesar 62,2 derajat dan FOV vertikal sebesar 48,8 derajat [19]. Sudut pandang ini dirancang sedemikian rupa agar, apabila modul kamera diposisikan secara vertikal dengan jarak tembak yang tepat dari atas wadah pil, lensa mampu mencakup keseluruhan area pengujian tanpa distorsi *fisheye* yang berlebihan pada tepi gambar. Bentuk fisik modul ini juga sangat ringkas dengan dimensi 25 × 24 × 9 mm dan berat hanya 3 gram, memudahkannya untuk dipasang (*mounting*) secara kokoh pada struktur mekanik di atas motor getar. Spesifikasi teknis lengkap dari Modul Kamera Arducam IMX219 B0390 dirangkum pada **Tabel 2. 4** berikut:

**Tabel 2. 4** Spesifikasi Modul Kamera Arducam IMX219 B0390

| **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|
| Model Sensor | Sony IMX219 |
| Resolusi Gambar (*Still Resolution*) | 8 Megapiksel (3280 × 2464 piksel) |
| Ukuran Optis | 1/4 inci |
| Ukuran Piksel | 1,12 µm × 1,12 µm |
| Area Pencitraan Sensor | 3,68 × 2,76 mm (4,6 mm diagonal) |
| *Frame Rate* Video Maksimal | 30 fps @ 1080P |
| | 60 fps @ 720P |
| | VGA90 *video modes* |
| Tipe Lensa | *Stock Lens Fixed Focus* |
| Panjang Fokus (*Focal Length*) | 3,04 mm |
| Rasio Fokus (F-Stop) | 2.0 |
| Bidang Pandang Horizontal (FOV-H) | 62,2 derajat |
| Bidang Pandang Vertikal (FOV-V) | 48,8 derajat |
| Dimensi Fisik | 25 × 24 × 9 |
| Berat | 3 g |

Dalam sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini, modul kamera ditempatkan secara vertikal di atas area penampungan pil dengan jarak dan sudut yang dikalibrasi untuk memastikan seluruh area wadah pil masuk ke dalam *field of view* kamera.

Posisi kamera yang tetap dan tegak lurus terhadap permukaan wadah pil bertujuan untuk meminimalkan distorsi perspektif pada citra yang ditangkap, sehingga perhitungan luas area kontur menggunakan persamaan (2.9) dan nilai rasio aspek menggunakan Persamaan (2.10) dapat menghasilkan nilai yang akurat dan representatif terhadap dimensi fisik pil yang sebenarnya.

### 2.5.3. Modul Motor Getar RS-130

Modul motor getar (*vibration motor module*) yang diimplementasikan pada perancangan sistem ini adalah motor arus searah (DC) tipe RS-130 yang beroperasi pada rentang tegangan 3,0V hingga 6,0V DC. Modul ini difungsikan sebagai aktuator mekanis bertenaga tinggi yang bertugas menghasilkan getaran mekanis pada nampan penampungan pil. Tujuan utama dari pemberian getaran ini adalah untuk memecah kepadatan objek dan memastikan setiap butir pil tersebar secara merata tanpa ada yang tumpang tindih (*overlapping* / *clumping*) sebelum proses akuisisi citra dilakukan oleh modul kamera. Kondisi persebaran pil yang terisolasi satu sama lain merupakan prasyarat absolut bagi keberhasilan algoritma segmentasi OpenCV, karena kontur objek yang saling bersentuhan akan dideteksi oleh fungsi `cv2.findContours()` sebagai satu entitas tunggal, yang secara langsung akan menyebabkan kesalahan fatal pada hasil akhir penghitungan jumlah pil [15]. Modul Motor Getar dapat dilihat pada **Gambar 2. 4**.

**Gambar 2. 4** Modul Motor Getar RS-130

Prinsip kerja motor RS-130 sebagai penghasil getaran didasarkan pada mekanisme *Eccentric Rotating Mass* (ERM) atau ketidakseimbangan massa rotasi. Berbeda dengan motor koin (*coin* motor) konvensional yang memiliki torsi rendah, motor RS-130 berbentuk silinder dan menggerakkan sebuah massa eksentris berbahan logam padat yang dipasang secara tidak simetris pada ujung poros rotornya. Ketika arus searah dialirkan, motor berputar dan massa eksentris tersebut menghasilkan gaya sentrifugal yang arah vektornya berubah secara periodik seiring dengan kecepatan rotasi. Fluktuasi vektor gaya inilah yang ditransmisikan ke

kerangka alat sebagai energi getaran kinetik (Mabuchi Motor, 2018). Besar gaya sentrifugal *F* yang dihasilkan oleh massa eksentris tersebut diformulasikan berdasarkan Hukum Newton II untuk gerak melingkar, seperti ditunjukkan pada persamaan (2.11) berikut [15].

$$F = m \cdot e \cdot w^2 \tag{2.11}$$

di mana *m* adalah massa eksentris (kg), *e* adalah jarak eksentrisitas dari pusat rotasi (*m*), dan *omega* adalah kecepatan sudut rotasi (rad/s). Kecepatan sudut *omega* sendiri memiliki hubungan dengan kecepatan rotasi *n* dalam satuan RPM sebagai persamaan (2.12) berikut:

$$w = \frac{2\pi n}{60} \tag{2.12}$$

Dengan kecepatan rotasi nominal motor sebesar 6.000 RPM pada tegangan 3.7V DC [15]. jika dihitung menurut persamaan (2.12) nilai kecepatan sudut yang dihasilkan adalah:

$$w = \frac{2\pi \times 6000}{60} = 628{,}32\ rad/s$$

Kecepatan sudut yang masif ini mampu mentransfer energi torsi mekanik yang sangat kuat dan presisi, memastikan bahwa getaran yang merambat cukup untuk mengatasi gaya gesek statis pada pil bermassa berat seperti kapsul padat atau kaplet, sehingga objek-objek tersebut dipaksa untuk bergeser dan merata di atas nampan.

Dari tinjauan karakteristik elektris, motor RS-130 menarik arus nominal yang cukup besar, yakni sekitar 0,9A pada kondisi operasi normal, dan dapat melonjak hingga menyentuh angka 1,5A hingga 2,0A pada kondisi stall atau saat rotor tertahan saat awal menyala [15]. Pengendalian intensitas dan durasi getaran pada motor RS-130 dilakukan menggunakan teknik ON dan OFF melalui MOSFET yang dikendalikan oleh raspberry pi melalui pustaka GPIO. Dengan memodulasi rasio siklus kerja (*Duty Cycle*), mikrokontroler dapat mengatur tegangan efektif rata-rata yang mengalir ke terminal motor tanpa menggunakan komponen resistor daya yang tidak efisien. Hubungan matematis antara rasio *Duty Cycle* dan tegangan efektif

yang diterima oleh beban induktif dirumuskan pada persamaan (2.13) sebagai berikut:

$$V_{eff} = D \times V_{cc} \quad (2.13)$$

Dimana *D* adalah nilai *duty cycle* dalam rentang 0 hingga 1 (atau 0% hingga 100%), dan $V_{cc}$ adalah tegangan suplai sebesar 5,0 VDC. Sebagai contoh, pada *duty cycle* 100%, tegangan efektif yang diterima motor adalah $V_{eff}$ = 1 x 5,0 = 5 VDC, yang menghasilkan kecepatan rotasi dan intensitas getaran operasi penuh. Pengaturan *duty cycle* ini dilakukan secara terprogram melalui pustaka RPi GPIO atau pigpio pada Python yang berjalan di Raspberry Pi. Spesifikasi teknis lengkap modul motor getar dirangkum pada **Tabel 2. 5** berikut [15].

**Tabel 2. 5** Spesifikasi Modul Motor Getar RS-130

| **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|
| Tipe Motor | *Brushed DC Motor* Seri RS-130 |
| Tegangan Suplai (Vcc) | 3,7 VDC |
| Rentang Tegangan Input | 3,0 – 6 VDC |
| Kecepatan Rotasi | 6.000 RPM pada 3,7V |
| Frekuensi Getaran | ±150 Hz |
| Arus Operasi Rata-rata | 900 mA |
| Arus Surge | 1,5 – 2 A |
| Resistansi Isolasi | 10 MΩ |
| Metode Kendali | Sinyal PWM melalui MOSFET |
| Antarmuka Kendali | GPIO Raspberry Pi |
| Dimensi Modul | 25 mm × 20 mm |

Secara integrasi sistem, siklus operasional motor getar RS-130 diatur ON OFF nya secara ketat oleh skrip arsitektur perangkat lunak Python. Saat pengguna menekan tombol "Mulai" pada GUI layar sentuh, saat ada tumpukan sebuah thread khusus akan mengeksekusi sinyal PWM menuju sirkuit MOSFET untuk menyalakan motor selama durasi yang telah dikalibrasi. Sesaat setelah motor dimatikan dan osilasi nampan telah berhenti sepenuhnya, sistem secara sekuensial

menginstruksikan modul kamera Arducam IMX219 untuk menangkap frame citra. Pengaturan perangkat keras-perangkat lunak yang presisi ini menjamin bahwa setiap proses akuisisi citra selalu dilakukan pada kondisi objek pil yang statis dan telah terurai secara optimal, sehingga mendongkrak tingkat akurasi matematis sistem secara keseluruhan.

### 2.5.4. *High Power* LED 1 Watt

*Light Emitting Diode* (LED) tipe *High Power* (HPL) diimplementasikan sebagai sumber iluminasi utama pada purwarupa mesin penghitung pil ini. Secara prinsip fisik, LED mengubah energi listrik secara langsung menjadi energi cahaya atau foton melalui proses elektroluminesensi pada sambungan semikonduktor p-n *junction*. Dalam aplikasi machine vision, kualitas pencahayaan bukan sekadar instrumen pendukung, melainkan parameter absolut yang menentukan keberhasilan sistem. Cahaya yang tidak stabil atau memunculkan bayangan pekat akan merusak pembacaan nilai Value (V) dan Saturation (S) pada ruang warna HSV. Oleh karena itu, LED HPL dipilih untuk menggantikan LED DIP konvensional karena kemampuannya dalam memancarkan intensitas fluks cahaya yang sangat tinggi untuk mengekspos detail permukaan, warna, dan tepi objek secara sempurna sebelum citra dieksekusi oleh pustaka OpenCV. Gambar HPL putih dapat dilihat pada **Gambar 2. 5**.

**Gambar 2. 5** HPL *Warm White* [16]

Berdasarkan spesifikasi optisnya, setiap unit LED HPL 1 Watt yang digunakan mampu memancarkan fluks cahaya sebesar 110 hingga 130 lumen.

Varian warna pancaran yang dipilih berada pada spektrum *White* hingga *Warm White* dengan temperatur warna 2800K - 5500K yang terbukti efektif dalam memantulkan warna-warna pil kontras tanpa menyebabkan distorsi rona warna (*hue shift*). Salah satu keunggulan mekanis utama dari LED HPL ini adalah sudut pandang (*Viewing Angle*) penyebaran cahaya yang mencapai 120°. Sudut pancaran yang sangat lebar ini menghasilkan karakteristik cahaya *floodlight* (menyebar) alih-alih *spotlight* (terpusat). Penggunaan empat buah LED HPL dengan sudut 120° yang diposisikan di sudut-sudut plafon wadah penampungan mampu mengeliminasi kemunculan titik silau (*hotspots*) pada permukaan objek pil yang mengkilat (seperti kapsul *softgel*), sehingga operasi morfologi citra (erosi dan dilasi) dapat menghasilkan penutupan *masking* biner yang utuh [16].

Dari tinjauan karakteristik elektris, LED HPL 1 Watt membutuhkan tegangan maju (*Forward Voltage* / $V_F$) yang spesifik agar sambungan semikonduktornya aktif. Tegangan operasi HPL ini berada pada rentang 3,2V hingga 3,4V DC dengan penarikan arus nominal (*Forward Current* / $I_F$) absolut sebesar 350 mA [16]. Mengingat sumber daya utama menyuplai tegangan sebesar 5,0V DC, maka penyambungan LED secara langsung ke sumber tegangan akan memicu lonjakan arus yang merusak cip LED seketika (*Absolute Maximum Ratings* terlampaui). Untuk mencegah hal tersebut, diimplementasikan resistor seri sebagai pembatas arus (*current limiting resistor*). Berdasarkan Hukum Ohm, nilai resistansi minimum *R* untuk membuang kelebihan tegangan diformulasikan pada persamaan (2.14) berikut:

$$R = \frac{V_{supply} - V_F}{I_F} \tag{2.14}$$

di mana $V_{supply}$ adalah tegangan suplai sistem 5V dari *Power Supply*, $V_F$ adalah tegangan maju LED tipikal 3,3V, dan $I_F$ adalah arus operasi yang direkomendasikan yaitu 0,35A. Dengan demikian, berdasarkan persamaan (2.14) nilai resistor yang diperlukan adalah:

$$P_{resistor} = I_F^2 \times R \tag{2.15}$$

Kalkulasi daya disipasi menghasilkan nilai $P_{resistor}$ = $(0{,}35)^2$ × 4,7 = 0,57 Watt. Dengan demikian, perancangan sirkuit perangkat keras mengharuskan penggunaan resistor daya misalnya tipe *metal oxide film* dengan spesifikasi rating minimum sebesar 1 Watt atau lebih tinggi untuk mendampingi setiap unit HPL. Karakteristik termal (*Thermal Characteristics*) juga merupakan isu krusial pada HPL arus 350 mA menghasilkan panas konduktif yang signifikan. Oleh karena itu, modul HPL ini telah dipabrikasi menyatu dengan plat *Star PCB* berbahan dasar aluminium heksagonal yang berfungsi sebagai *heatsink* (pendingin) pasif untuk menjaga suhu persimpangan (*Junction Temperature*) tetap stabil dan mencegah degradasi intensitas cahaya selama alat beroperasi secara terus-menerus. Spesifikasi komprehensif dari LED HPL 1 Watt dijabarkan pada **Tabel 2. 6** berikut.

**Tabel 2. 6** Spesifikasi LED High Power (HPL) 1 Watt

| **Parameter** | **Spesifikasi Teknis** |
|---|---|
| Tipe Komponen | *High Power LED Emitter* (Star PCB) |
| Daya Nominal Maksimum | 1 Watt |
| Tegangan Maju ($V_F$) | 3,2V – 3,4V DC |
| Arus Maju ($I_F$) | 350 mA (*Typical* / Maksimal) |
| Fluks Cahaya | 110 – 130 Lumen |
| Sudut Pandang | 120° (*Wide Angle*) |
| Temperatur Warna | *Warm White* (2800K-3000K) |
| Material Pendingin | Aluminium *Star PCB Base* dengan diameter ± 1,5 cm |
| Karakteristik Termal ($T_J$ Maks) | Membutuhkan disipasi *heatsink* bawaan untuk usia pakai panjang |
| Absolute Maximum Ratings | Suhu Operasi: -40°C s/d +80°C |

Secara integrasi fungsional, penggunaan 4 buah HPL 1 Watt secara paralel akan menarik total arus sebesar 4 × 350 mA = 1.400 mA (1,4 Ampere). Penarikan beban listrik berskala masif ini tidak mungkin disuplai atau diswitching langsung oleh pin antarmuka GPIO Raspberry Pi 4B yang memiliki ambang batas keluaran

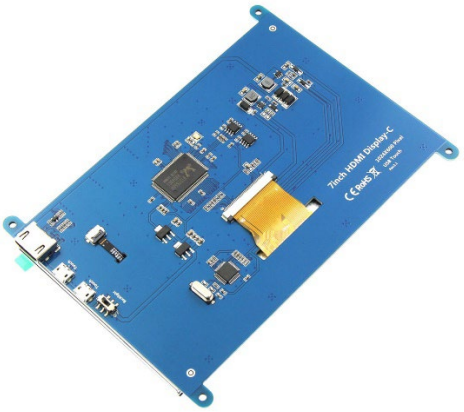
absolut sebesar 16 mA. Layaknya mekanisme aktuasi pada motor getar RS-130, orkestrasi nyala dan mati keempat modul pencahayaan ini dikendalikan melalui sebuah sakelar daya berbasis semikonduktor seperti MOSFET. Melalui arsitektur ini, antarmuka logika 3,3V pada Raspberry Pi mampu menginstruksikan sinkronisasi pencahayaan secara instan saat siklus frame capture dimulai, menghasilkan kondisi penerangan yang sangat stabil untuk proses komputasi tanpa mengorbankan keamanan sistem kelistrikan mikrokontroler.

### 2.5.5. Modul Layar Sentuh

Modul layar sentuh yang digunakan pada sistem ini adalah 7inch MPI7002 HDMI Display-C. Perangkat ini merupakan modul tampilan (*display module*) berbasis panel IPS (*In-Plane Switching*) berukuran 7 inci yang dilengkapi dengan fungsi layar sentuh kapasitif (*capacitive touchscreen*), sehingga berfungsi ganda sebagai antarmuka keluaran visual sekaligus antarmuka masukan pengguna (*user input interface*) dalam sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini. Keberadaan modul layar sentuh dalam sistem ini memungkinkan pengguna untuk berinteraksi langsung dengan antarmuka grafis (*Graphical User Interface*/GUI) yang menampilkan pratinjau kamera secara *real-time*, memulai proses penghitungan dan identifikasi pil, serta melihat hasil identifikasi berupa jumlah dan jenis pil yang terdeteksi, semuanya tanpa memerlukan perangkat masukan eksternal seperti *keyboard* atau *mouse* [21].

Modul MPI7002 menggunakan teknologi panel IPS (*In-Plane Switching*) yang merupakan generasi lanjutan dari teknologi LCD (*Liquid Crystal Display*). Berbeda dengan panel TN (*Twisted Nematic*) konvensional, teknologi IPS mengatur orientasi kristal cair secara horizontal dan sejajar dengan bidang panel, sehingga menghasilkan sudut pandang yang sangat lebar ke segala arah tanpa mengalami penurunan kualitas warna atau inversi gambar yang signifikan [21]. Karakteristik sudut pandang penuh ini sangat relevan dalam konteks penggunaan sistem di lingkungan laboratorium atau industri farmasi, di mana operator mungkin perlu membaca hasil identifikasi dari berbagai posisi dan sudut pandang yang berbeda. Panel IPS MPI7002 mampu mereproduksi hingga 16,7 juta warna (*True Color* 24-

bit) dengan kecerahan tipikal sebesar 300 cd/m², yang menjamin tampilan antarmuka sistem terlihat jelas dan akurat dalam kondisi pencahayaan ruangan normal [21]. Gambar Modul Layar Sentuh dapat dilihat pada **Gambar 2. 6**.



**Gambar 2. 6** Tampak Belakang Modul Layar Sentuh [21]

Resolusi layar MPI7002 adalah 1024 × 600 piksel sebagai resolusi fisik panel, dengan kemampuan konfigurasi resolusi perangkat lunak (*software configuration resolution*) hingga 1920 × 1080 piksel melalui pengaturan HDMI (LCDWIKI, 2019). Area aktif (*active area*) panel adalah 154,21 mm (lebar) × 85,92 mm (tinggi) dengan kerapatan piksel (*pixel pitch*) sebesar 0,0502 mm (horizontal) × 0,1432 mm (vertikal). Kerapatan piksel (*Pixel Per Inch* / PPI) layar dapat dihitung menggunakan rumus persmaan (2.16) berikut.

$$PPI = \frac{\sqrt{R_H^2 + R_V^2}}{d} \tag{2.16}$$

Dimana $R_H$ adalah resolusi horizontal (1024 piksel), RV adalah resolusi vertikal (600 piksel), dan d adalah ukuran diagonal layar dalam satuan inci (7 inci). Dengan demikian saat menggunakan peramaan (2.16) nilai PPI layar MPI7002 adalah:

$$PPI = \frac{\sqrt{1024^2+600^2}}{7} = \frac{\sqrt{1048576+360000}}{7} = \frac{\sqrt{1408576}}{7} = \frac{1186{,}84}{7} \approx 1$$

Nilai kerapatan piksel sebesar ±169,55 PPI ini menghasilkan tampilan teks dan grafis yang cukup tajam dan nyaman dibaca pada jarak operasi normal, sehingga informasi hasil identifikasi pil dapat disajikan dengan jelas kepada operator sistem.

Antarmuka koneksi modul MPI7002 ke Raspberry Pi 4B menggunakan dua jalur terpisah yang bekerja secara bersamaan. Pertama, sinyal video ditransmisikan melalui antarmuka Mini-HDMI yang terhubung ke salah satu dari dua port Micro-HDMI yang tersedia pada Raspberry Pi 4B sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 2.5.1. Antarmuka HDMI memungkinkan transmisi sinyal video digital beresolusi tinggi beserta sinyal audio dalam satu kabel secara bersamaan, tanpa degradasi kualitas sinyal yang terjadi pada antarmuka analog. Kedua, data sentuhan (*touch data*) ditransmisikan melalui konektor Micro-USB yang terhubung ke port USB Raspberry Pi 4B, sekaligus berfungsi sebagai jalur suplai daya (*power supply*) bagi modul layar. Modul ini membutuhkan tegangan suplai 5,0V DC dengan konsumsi daya total sebesar 3,1 Watt, yang dapat dipenuhi langsung dari port USB Raspberry Pi 4B atau dari adaptor daya eksternal [21].

Fungsi layar sentuh pada modul MPI7002 diimplementasikan menggunakan IC sentuh GT911 dari Goodix Technology, yang merupakan kontroler sentuh kapasitif proyektif (*projected capacitive touch controller*) generasi terkini yang mendukung deteksi hingga 5 titik sentuh simultan (*5-point multi-touch*) [21]. Teknologi sentuh kapasitif proyektif bekerja berdasarkan prinsip perubahan kapasitansi pada lapisan elektroda transparan yang tersusun dalam pola grid di bawah permukaan kaca pelindung. Ketika jari pengguna menyentuh permukaan layar, jari yang bersifat konduktif menyerap sebagian muatan listrik dari elektroda terdekat, menyebabkan perubahan kapasitansi yang terdeteksi oleh IC GT911 dan dikonversi menjadi koordinat posisi sentuhan yang akurat. Berbeda dengan teknologi sentuh resistif yang membutuhkan tekanan fisik, teknologi kapasitif hanya membutuhkan sentuhan ringan dari jari, sehingga menghasilkan pengalaman interaksi yang lebih responsif, akurat, dan intuitif bagi operator sistem. IC GT911 beroperasi secara *plug-and-play* tanpa memerlukan *driver* tambahan

pada sistem operasi Raspberry Pi OS, Ubuntu, maupun Windows 7/10/11, sehingga proses integrasi ke dalam sistem dapat dilakukan dengan cepat dan mudah [21]. Spesifikasi teknis lengkap modul layar sentuh MPI7002 dirangkum pada **Tabel 2. 7** berikut.

**Tabel 2. 7** Spesifikasi Modul Layar Sentuh 7 Inch

| **Kategori** | **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|---|
| Panel LCD | Ukuran Panel | 7 Inch |
| | Tipe Panel | IPS (*In-Plane Switching*) |
| | Resolusi Fisik | 1024 × 600 (RGB) |
| | Resolusi Software | Hingga 1920 × 1080 |
| | Area Aktif | 154,21 (W) × 85,92 (H) |
| | Jumlah Warna | 16,7 Juta (*True Color*) |
| | *Pixel Pitch* | 0,0502 (H) × 0,1432 (V) |
| | Sudut Pandang | ALL 0' CLOCK (Penuh) |
| | Kecerahan Tipikal | 300 |
| | Kerapatan Piksel | ±169,55 |
| | Tipe Backlight | White LED |
| Layar Sentuh | Tipe Sentuh | Kapasitif Proyektif |
| | IC Sentuh | Goodix GT911 |
| | Jumlah Titik Sentuh | 5-*point Multi-touch* |
| | Area Sentuh | 164,90 (W) × 99,17 (H) |
| | Area Visual Sentuh | 154,68 (W) × 87,02 (H) |
| | Instalasi Driver | *Free Drive* (*Plug & Play*) |
| Antarmuka | *Input* Video | Mini-HDMI |
| | Output Sentuh | Micro-USB |
| | Antarmuka Daya | Micro-USB |
| Dimensi Fisik | Ukuran Keseluruhan | 164,90 × 124,27 × 8,88 |
| | Berat (termasuk kemasan) | 405 |

**Tabel 2. 7** Lanjutan Spesifikasi Modul Layar Sentuh 7 Inch

| **Kategori** | **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|---|
| Elektris | Tegangan Suplai | 5,0 |
| | Total Daya | 3,1 |
| Lingkungan | Suhu Operasi | -10 hingga 50 |
| | Suhu Penyimpanan | -20 hingga 60 |
| Kompatibilitas OS | Sistem Operasi | Raspberry Pi OS, Ubuntu, Kali-Linux, Kodi, Win10 IoT, Win7, Win10, Win11 |
| Sertifikasi | Standar | CE, RoHS |

Dalam implementasi sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini, modul layar sentuh MPI7002 ditempatkan sebagai komponen antarmuka utama yang terintegrasi pada badan perangkat. Melalui layar sentuh ini, operator dapat melihat pratinjau citra kamera secara *real-time*, menekan tombol "Mulai" pada antarmuka GUI untuk memulai siklus penghitungan dan identifikasi, serta membaca hasil akhir berupa jumlah pil dan kategori identifikasi yang ditampilkan setelah proses selesai. Selain itu, layar sentuh juga menampilkan status koneksi *web server* dan opsi untuk mencetak label hasil identifikasi melalui *printer* label yang terhubung ke sistem. Dukungan 5-point multi-touch dari IC GT911 memungkinkan interaksi gestur yang lebih kaya seperti *pinch-to-zoom* untuk memperbesar tampilan citra hasil deteksi, meskipun dalam operasi normal sistem cukup menggunakan interaksi sentuh tunggal (*single-touch*) untuk navigasi antarmuka. Kompatibilitas *plug-and-play* modul ini dengan Raspberry Pi OS tanpa memerlukan konfigurasi *driver* tambahan menjadikan proses integrasi perangkat keras ke dalam sistem secara keseluruhan menjadi lebih efisien dan andal. Tingkat responsivitas antarmuka visual yang presisi ini mereduksi latensi interaksi manusia-mesin (*Human-Machine Interface*), sehingga keseluruhan alur operasional otomasi di instalasi farmasi dapat dieksekusi secara lebih cepat dan intuitif.

### 2.5.6. Printer Label Termal

*Printer* label termal merupakan perangkat keluaran (*output device*) yang menghasilkan cetakan pada media label khusus menggunakan prinsip pemanasan termal (*thermal heating*) tanpa memerlukan tinta, toner, maupun pita cetak (*ink ribbon*). Teknologi ini bekerja berdasarkan reaksi kimia yang terjadi pada lapisan termokromik (*thermochromic layer*) yang dilapisi pada permukaan media cetak khusus berbahan dasar kertas termal. Ketika elemen pemanas (*thermal head*) yang terdiri dari susunan titik-titik pemanas (*heating dots*) bersentuhan dengan permukaan media termal dan dipanaskan hingga suhu aktivasi tertentu, lapisan termokromik pada area yang dipanaskan tersebut mengalami perubahan warna secara permanen dari transparan menjadi hitam, sehingga membentuk pola titik-titik yang menyusun karakter teks, angka, maupun simbol kode batang (*barcode*) pada label. Teknologi cetak termal langsung (*direct thermal*) ini memiliki keunggulan signifikan dibandingkan teknologi cetak konvensional berbasis tinta, yaitu mekanisme yang lebih sederhana dengan lebih sedikit komponen bergerak, kecepatan cetak yang lebih tinggi, perawatan yang minimal karena tidak ada tinta yang perlu diganti, serta biaya operasional yang lebih rendah secara jangka panjang [22]. Gambar Printer Label Termal XP-365B dapat dilihat pada **Gambar 2. 7**.

**Gambar 2. 7**Printer Label Termal XP-365B [22]

Dalam sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini, *printer* label yang digunakan adalah Xprinter XP-365B, yaitu *printer* label termal langsung (*direct thermal barcode printer*) yang dikembangkan oleh Xprinter Technology [22]. Perangkat ini berfungsi sebagai komponen keluaran fisik sistem yang mencetak label hasil identifikasi pil secara otomatis setelah proses penghitungan dan identifikasi selesai dilakukan oleh unit pemroses Raspberry Pi 4B. Label yang dicetak memuat informasi penting seperti nama atau jenis pil yang teridentifikasi, jumlah pil, tanggal dan waktu identifikasi, serta kode batang atau kode QR yang dapat dipindai untuk keperluan dokumentasi dan pelacakan farmasi. Integrasi *printer* label ke dalam sistem memungkinkan hasil identifikasi tidak hanya ditampilkan secara digital pada layar sentuh dan dikirimkan ke *web server*, tetapi juga terdokumentasi secara fisik dalam bentuk label adhesif yang dapat ditempelkan langsung pada wadah atau kemasan pil [22].

XP-365B menggunakan mekanisme cetak termal langsung (*direct thermal*) dengan kepala cetak (*thermal head*) yang diimpor dari produsen ROHM Jepang, beresolusi 203 DPI atau setara dengan 8 titik per milimeter (Xprintertech, 2020). Penggunaan kepala cetak ROHM yang merupakan komponen impor berkualitas tinggi menjamin konsistensi dan presisi cetakan dalam jangka panjang, dengan umur kepala cetak yang mencapai 100 km panjang cetak kumulatif. Resolusi cetak 203 DPI merupakan standar industri yang umum digunakan untuk aplikasi pelabelan farmasi, karena mampu menghasilkan cetakan teks berukuran kecil yang tetap terbaca dengan jelas serta kode batang dan kode QR yang dapat dipindai secara akurat. Kualitas cetakan yang dihasilkan pada resolusi ini dapat dinyatakan dalam ukuran satu titik cetak (*dot size*) sebagai berikut:

$$d_{dot} = \frac{25{,}4\ mm}{DPI} = \frac{25{,}4}{203} \approx 0{,}125\ mm/dot$$

Yang berarti setiap titik cetak memiliki dimensi fisik sebesar ±0,125 mm, menghasilkan cetakan yang presisi dan detail. XP-365B mendukung dua mode operasi cetak, yaitu Label Print Mode dengan kecepatan cetak maksimum 127 mm/s, dan Receipt Print Mode dengan kecepatan cetak 90 mm/s (Xprintertech,

2020). Pada sistem ini digunakan Label Print Mode karena media yang digunakan adalah kertas label adhesif termal (*thermal adhesive paper*) [22].

Dari sisi kapabilitas media cetak, XP-365B mendukung dua jenis media yaitu kertas gulungan termal (*thermal roll paper*) dan kertas label adhesif termal (*thermal adhesive paper*) dengan lebar media antara 20 mm hingga 80 mm, tebal media antara 0,06 mm hingga 0,19 mm, serta mampu mengakomodasi gulungan media dengan diameter maksimum 82 mm (Xprintertech, 2020). Lebar cetak efektif maksimum adalah 76 mm. Proses penggantian media dirancang dengan sistem Easy Paper Loading yang memungkinkan penggantian gulungan kertas label dilakukan dengan cepat dan mudah tanpa memerlukan alat bantu. Printer ini dilengkapi dengan empat jenis sensor yaitu sensor suhu kepala cetak (*print head temperature sensor*) untuk mencegah *overheating*, sensor habisnya kertas (*paper end*), sensor penutup terbuka (*cover open*), dan sensor celah label (*gap sensor*) untuk mendeteksi posisi antar label secara otomatis. Dari sisi memori, XP-365B dilengkapi dengan 4MB RAM dan 4MB Flash yang cukup untuk menyimpan format label, font, dan antrian data cetak [22].

Antarmuka koneksi XP-365B ke sistem Raspberry Pi 4B tersedia dalam berbagai konfigurasi yang dapat dipilih sesuai kebutuhan, meliputi USB, USB LAN, USB Serial LAN, USB Bluetooth, USB WiFi, USB Serial LAN Bluetooth, hingga USB Serial LAN WiFi. Pada implementasi sistem ini, koneksi dilakukan melalui antarmuka USB yang merupakan antarmuka paling sederhana dan didukung secara *native* oleh sistem operasi Raspberry Pi OS. XP-365B mendukung dua bahasa pemrograman printer (*printer command language*) yaitu TSPL (*TSC Printer Language*) untuk mode label dan ESC/POS untuk mode struk, serta menyediakan SDK (*Software Development Kit*) untuk platform iOS, Android, dan Windows yang memudahkan pengembangan aplikasi cetak terintegrasi. Dukungan terhadap berbagai format barcode 1D termasuk CODE128, EAN13, EAN8, UPC-A, CODE39, CODABAR, ITF14, dan EAN14 serta barcode 2D meliputi PDF417, QR Code, dan DataMatrix, menjadikan XP-365B sangat

fleksibel untuk berbagai kebutuhan pelabelan farmasi. Spesifikasi teknis lengkap *printer* label termal XP-365B dirangkum pada **Tabel 2. 8** berikut [22].

**Tabel 2. 8** Spesifikasi Printer Label Termal Xprinter XP-365B

| **Kategori** | **Parameter** | **Spesifikasi** |
|---|---|---|
| Mekanisme Cetak | Tipe Cetak | *Direct Thermal* |
| | Kepala Cetak | Imported ROHM Print Head |
| | Resolusi | 203 DPI |
| | Ukuran Titik Cetak | ±0,125 |
| | Kecepatan Label | 127 |
| | Kecepatan Receipt | 90 |
| | Lebar Cetak Maks | 76 |
| Media Cetak | Tipe Media | Thermal Roll Paper, Thermal Adhesive Paper |
| | Lebar Media | 20 – 80 |
| | Tebal Media | 0,06 – 0,19 |
| | Diameter Roll Maks | 82 |
| | Metode Loading | Easy Paper Loading |
| Sensor | Tipe Sensor | Print Head Temperature, Paper End, Cover Open, Gap |
| Memori | RAM | 4 |
| | Flash | 4 |
| Antarmuka | Koneksi | USB / USB+LAN / USB+Serial+LAN / USB+Bluetooth / USB+WiFi / USB+Serial+LAN+BT / USB+Serial+LAN+WiFi |
| | Drawer Port | 1 port (Pin 2 for cashdrawer) |
| Bahasa Printer | *Command Language* | TSPL, ESC/POS |

**Tabel 2. 8** Lanjutan Spesifikasi Printer Label Termal Xprinter XP-365B

| Kategori | Parameter | Spesifikasi |
|---|---|---|
| Barcode 1D | Format | CODE128, EAN128, ITF, CODE39, CODE93, EAN13, EAN8, CODABAR, POSTNET, UPC-A, UPCE, MSI, PLESSEY, ITF14, EAN14 |
| Barcode 2D | Format | PDF417, QR Code, DataMatrix |
| Font | Karakter | FONT 0 – FONT 8, K, TST24.BF2, TSS24.BF2 |
| Keandalan | Umur Kepala Cetak | 100 |
| Elektris | Input | DC 24V / 2,5A |
| Fisik | Dimensi (D×W×H) | 212 × 140 × 144 |
| | Berat | 0,94 Kg |
| Lingkungan | Suhu Operasi | 5 – 45, RH 10 – 80% |
| | Suhu Penyimpanan | -40 – 55, RH 93% |
| Software | Driver | Windows |
| | SDK | iOS, Android, Windows |

Dalam implementasi sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis ini, XP-365B dihubungkan ke Raspberry Pi 4B melalui antarmuka USB dan dikendalikan secara terprogram menggunakan skrip Python dengan memanfaatkan bahasa perintah TSPL. Setelah proses identifikasi pil selesai dan hasilnya ditampilkan pada layar sentuh serta dikirimkan ke *web server*, operator dapat menekan tombol "Cetak Label" pada antarmuka GUI untuk memicu perintah pencetakan secara otomatis. Skrip Python kemudian mengirimkan perintah TSPL yang berisi data hasil identifikasi ke *printer* melalui koneksi USB, dan XP-365B akan mencetak label adhesif dalam waktu singkat berkat kecepatan cetak hingga 127 mm/s. Kemampuan XP-365B untuk mencetak QR Code dan DataMatrix pada resolusi 203 DPI juga membuka peluang pengembangan sistem lebih lanjut, di mana setiap label hasil identifikasi dapat

dilengkapi dengan kode QR yang menyimpan tautan langsung ke halaman detail hasil identifikasi pada *web server* sistem, sehingga informasi dapat diakses secara digital hanya dengan memindai label menggunakan *smartphone*. Fitur proteksi *overheating* melalui sensor suhu kepala cetak yang terintegrasi memastikan keamanan dan keandalan operasional *printer* dalam penggunaan jangka panjang secara kontinu [22].

### 2.5.7. Power Supply Unit 5V 10A

Power Supply Unit (PSU) atau catu daya merupakan komponen yang bertindak sebagai sumber energi sentral bagi seluruh arsitektur kelistrikan sistem. Pada perancangan alat penghitung dan identifikasi pil otomatis ini diimplementasikan catu daya tipe Switching Mode Power Supply (SMPS) AC-DC berkapasitas 50 Watt atau 5V 10A dengan model referensi standar industri *Mean Well* LRS-50-5. Berbeda dengan pencatu daya linier yang membuang kelebihan tegangan dalam bentuk disipasi panas berskala besar, SMPS bekerja menggunakan *switching* regulator frekuensi tinggi untuk mengonversi tegangan bolak-balik (AC) dari jala-jala listrik PLN menjadi tegangan searah (DC) dengan tingkat efisiensi yang jauh lebih superior [23]. Karakteristik tegangan keluaran yang stabil dari SMPS sangat krusial dalam sistem ini, mengingat otak utama sistem Raspberry Pi 4B dan komponen sensorik seperti kamera sangat sensitif terhadap fluktuasi penurunan tegangan, gambar PSU dapat dilihat pada **Gambar 2. 8**.

**Gambar 2. 8** Power Supply 5V 10A [23]

Pemilihan kapasitas arus keluaran sebesar 10 Ampere pada sistem ini didasarkan pada kalkulasi analisis beban puncak (*peak load analysis*). Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen dengan karakteristik penarikan arus yang beragam, baik beban resistif maupun induktif. Estimasi akumulasi arus total $I_{total}$ yang ditarik saat sistem beroperasi secara maksimal (*full load*) dapat dirumuskan sebagai penjumlahan arus individual pada persamaan (2.17) berikut:

$$I_{total} = I_{Raspberry\ Pi} + I_{LCD} + I_{4\ HPL} + I_{Motor} \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan nilai nominal arus spesifikasi masing-masing komponen, yaitu Raspberry Pi 4B 3A, Layar LCD 7 Inci 1A, 4 unit LED HPL 1,4A, dan Motor Getar RS-130 pada kondisi operasi 0,9A, maka total arus maksimum yang ditarik sistem adalah sebesar 6,3 Ampere. Total daya $P_{out}$ yang dikonsumsi sistem dikalkulasi menggunakan Hukum Daya Listrik searah pada persamaan (2.17) berikut:

$$P_{out} = V \times I_{total} = 5\,V \times 6{,}3\,A = 31{,}5\,Watt$$

Penggunaan SMPS dengan kapasitas maksimal 50 Watt memberikan kelebihan keamanan (*headroom*) daya sekitar 37%. Ketersediaan cadangan daya ini merupakan praktik perancangan engineering yang wajib diimplementasikan untuk mengakomodasi penarikan arus kejut sementara (*inrush current / surge current*) yang terjadi sepersekian detik saat motor mekanis pertama kali diaktuasi, sehingga mencegah sistem operasi Raspberry Pi mengalami reboot paksa.

Parameter kualitas kelistrikan lain yang menjadi alasan kuat penggunaan SMPS kelas industri ini adalah nilai *Ripple* and *Noise* (riak tegangan) yang dikendalikan secara presisi hingga ambang maksimal 80 mVp-p. Sinyal tegangan DC yang memiliki riak terlalu tinggi dapat menimbulkan *noise* elektromagnetik. Selain itu, SMPS ini beroperasi dengan tingkat efisiensi energi yang diformulasikan sebagai rasio daya keluaran terhadap daya masukan, seperti pada persamaan (2.18) berikut:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \times 100\% \quad (2.18)$$

Dengan efisiensi tipikal mencapai 79%, kerugian daya konversi yang diubah menjadi panas yang dapat ditekan, sehingga SMPS dapat didesain dengan profil fisik yang kompak dan pendinginan pasif tanpa memerlukan kipas mekanik. Modul daya ini dilengkapi dengan blok terminal pengkabelan terintegrasi yang mencakup pin *Input* L dan N untuk koneksi arus bolak-balik 100-240VAC 50/60Hz, terminal *Ground* pembumian perangkat, dengan +V dan -V untuk keluaran 5V DC 10A yang memudahkan paralelisasi pengkabelan menuju Raspberry Pi dan Layar LCD [23].

Dari segi keamanan perangkat keras, SMPS ini dibekali dengan sirkuit perlindungan proteksi ganda (*Multiple Protection Circuits*), meliputi proteksi tegangan lebih, perlindungan beban lebih yang aktif saat beban melampaui 110%-150% rating daya, dan pelindung hubung singkat bertipe *hiccup mode*. Spesifikasi teknis komprehensif dari Power Supply 5V 10A yang diimplementasikan pada purwarupa alat dijabarkan pada **Tabel 2. 9** berikut [23].

**Tabel 2. 9** Spesifikasi *Power Supply* 5V 10A

| **Parameter** | **Spesifikasi Teknis** |
|---|---|
| Tipe Perangkat | *Enclosed Switching Power Supply* (AC-DC) |
| Tegangan Masukan | 100 – 240 VAC |
| Frekuensi Masukan | 50 / 60 Hz |
| Tegangan Keluaran | 5,0V DC |
| Rentang Regulasi Tegangan | 4,5V – 5,5V DC |
| Arus Keluaran Maksimal | 10 Ampere |
| Daya Keluaran Maksimal | 50 Watt |
| Efisiensi Konversi | 79% |
| Riak Tegangan | 80 mVp-p |
| Sistem Proteksi | *Over Voltage* (OVP), *Over Current / Load* (OLP), *Short Circuit* (SCP) |
| Konfigurasi Terminal | AC L (Fasa), AC N (Netral), FG (*Ground*), -V (GND DC), +V (VCC 5V) |
| Dimensi Fisik (P x L x T) | 110 mm × 78 mm 38 mm Profil tipis |
| Material Pendingin | Rangka Aluminium Berlubang (*Passive Cooling*) |

Catu daya SMPS ini diintegrasikan sebagai pondasi kelistrikan utama yang ditempatkan pada kompartemen bawah purwarupa alat. Kabel keluaran 5V DC didistribusikan melalui jalur paralel untuk menyuplai Raspberry Pi, LCD *Touchscreen*, 4 unit HPL dan Motor Getar secara independen. Isolasi jalur suplai yang mumpuni ini menjamin stabilitas mikrokontroler dari interferensi elektromagnetik aktuator mekanis, sehingga kontinuitas operasional sistem penghitung pil otomatis dapat dipertahankan secara konsisten tanpa risiko penurunan performa komputasi.

### 2.5.8. MOSFET IRLZ44N

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) merupakan komponen semikonduktor yang beroperasi sebagai sakelar elektronik terkendali tegangan (*voltage-controlled switch*). Dalam arsitektur perangkat keras penghitung pil ini, antarmuka logika GPIO pada Raspberry Pi 4B hanya beroperasi pada level tegangan 3,3V DC dengan batas pasokan arus absolut sebesar 16 mA per pin. Spesifikasi mikrokontroler tersebut secara fundamental tidak mampu secara langsung menyuplai atau memutus arus tinggi yang ditarik oleh aktuator Modul Motor Getar RS-130 (900 mA) dan susunan LED HPL (1.400 mA) [24]. Untuk menjembatani jurang spesifikasi kelistrikan ini tanpa merusak sirkuit internal *System on Chip* prosesor, diimplementasikan komponen penggerak daya berupa MOSFET IRLZ44N N-Channel. Gambar MOSFET IRLZ44N dapat dilihat pada **Gambar 2. 9** sebagai berikut.

**Gambar 2. 9** MOSFET IRLZ44N [24]

Berbeda dengan MOSFET daya konvensional yang umumnya membutuhkan tegangan Gate $V_{GS}$ sebesar 10V untuk dapat aktif sepenuhnya, IRLZ44N diklasifikasikan sebagai Logic-Level MOSFET. Karakteristik ini ditandai dengan tegangan ambang gerbang (*Gate Threshold Voltage* / $V_{GS(th)}$) yang sangat rendah, yakni berada pada rentang 1,0V hingga maksimal 2,0V. Spesifikasi ini memungkinkan sinyal logika digital murni 3,3V dari pin GPIO Raspberry Pi untuk memicu transisi status MOSFET menjadi konduktif penuh tanpa memerlukan sirkuit penguat tegangan tambahan. Saat berada pada kondisi aktif jenuh (*fully* ON), resistansi internal antara terminal *Drain* dan *Source* atau $R_{DS(on)}$ akan merosot hingga nilai maksimal 0,022 Ω (pada $V_{GS}$ = 5V) [24]. Nilai resistansi yang sangat kecil ini meminimalisir disipasi daya yang terbuang menjadi energi panas ($P_D$), yang dapat dikalkulasi secara matematis menggunakan persamaan Hukum Joule pada persamaan (2.19) berikut:

$$P_D = I_D^2 \times R_{DS(on)} \tag{2.19}$$

Di mana $I_D$ adalah arus Drain yang mengalir ke beban dalam Ampere, dan $R_{DS(on)}$ adalah hambatan internal MOSFET dalam Ohm. Apabila disubstitusikan dengan arus puncak beban motor getar RS-130 ($I_D$ = 0,9A), maka besar disipasi daya dalam wujud termal adalah $P_D = (0{,}9)^2 \times 0{,}022 = 0{,}0178$ Watt. Nilai disipasi panas yang kurang dari 0,02 Watt ini sangatlah kecil sehingga komponen MOSFET IRLZ44N dapat beroperasi dengan stabilitas termal yang sempurna tanpa memerlukan tambahan keping pendingin mekanis (heatsink) [24].

Ketahanan MOSFET IRLZ44N juga didefinisikan oleh parameter *Safe Operating Area* (SOA), yang menjamin bahwa komponen tidak akan mengalami kerusakan saat menahan tegangan *Drain-to-Source* ($V_{DS}$) hingga 55V dan mendistribusikan arus *Drain* maksimum ($I_D$) hingga 47A. Kemampuan batas atas yang masif ini memberikan kelebihan keamanan (*headroom*) yang sangat luas bagi kelistrikan alat. Selain itu, parameter karakteristik pensaklaran pada komponen ini memiliki waktu tunda nyala yang sangat presisi, yaitu sekitar 15 nanodetik (ns). Kecepatan respon mikrosekon ini sangat esensial untuk mengakomodasi sinyal PWM berfrekuensi tinggi dari Raspberry Pi, sehingga intensitas putaran motor getar

dapat dimodulasi dengan tingkat linearitas yang akurat. Spesifikasi dari MOSFET IRLZ44N ditunjukkan pada **Tabel 2. 10** berikut.

**Tabel 2. 10** Spesifikasi *N-Channel Logic-Level* MOSFET IRLZ44N

| **Parameter** | **Spesifikasi Teknis** |
|---|---|
| Tipe Semikonduktor | *N-Channel Logic-Level Gate* MOSFET |
| Kemasan Fisik (*Package*) | TO-220AB |
| Tegangan *Drain-to-Source* Maksimal | 55V |
| Arus *Drain* Kontinu Maksimal | 47A pada suhu persimpangan 25°C |
| Tegangan Ambang *Gate* | 1,0V – 2,0V |
| Resistansi Internal Hidup | 0,022 Ω (Maksimal absolut) |
| Waktu Tunda Nyala | ± 15 ns |
| Batas Daya Disipasi Maksimal | 110 Watt |
| Konfigurasi Terminal Kelistrikan | Pin 1: *Gate* (G)<br>Pin 2: *Drain* (D)<br>Pin 3: *Source* (S) |
| Referensi Pabrikan | (Infineon Technologies AG, 2012) |

Komponen MOSFET IRLZ44N ini diintegrasikan sebagai sakelar elektronik berkecepatan tinggi yang memisahkan jalur logika mikrokontroler dari jalur daya aktuator. Pin Gate dihubungkan ke GPIO Raspberry Pi, sedangkan pin Drain dan Source membentuk sirkuit tertutup dengan catu daya utama dan beban induktif. Konfigurasi isolasi ini secara krusial menjamin perlindungan prosesor dari lonjakan arus, sekaligus memastikan aktuasinya berjalan sangat presisi dan aman.

### 2.5.9. Dioda 1N4007

Dioda penyearah merupakan komponen semikonduktor pasif dua terminal yang beroperasi menyerupai katup mekanis, di mana arus listrik hanya diizinkan mengalir ke satu arah tertentu dan memblokir aliran arus dari arah sebaliknya. Dalam arsitektur sistem perangkat keras ini, diimplementasikan komponen dioda tipe 1N4007. Komponen ini termasuk dalam kelas *General Purpose Plastic*

*Rectifier* yang secara luas diandalkan dalam sirkuit industri untuk keperluan penyearah arus tegangan tinggi maupun perlindungan rangkaian induktif yang berisiko memunculkan tegangan transien. Gambar Dioda 1N4007 dapat dilihat pada **Gambar 2. 10** sebagai berikut.

**Gambar 2. 10** Dioda 1N4007 [25]

Penggunaan dioda 1N4007 pada sistem ini difungsikan secara spesifik sebagai Dioda *Flyback* untuk mengamankan sirkuit logika dari lonjakan tegangan. Aktuator utama sistem, yaitu motor getar RS-130, pada dasarnya adalah sebuah beban induktif yang tersusun atas lilitan kumparan kawat tembaga atau induktor di bagian rotornya. Saat motor ini beroperasi memutar massa eksentris, arus listrik DC mengalir dan membangun medan magnet di sekitar kumparan tersebut sebagai tempat penyimpanan energi kinetik-elektrik sementara [25].

Berdasarkan Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, sebuah induktor akan selalu menentang perubahan arus yang melewatinya. Masalah kritis muncul ketika MOSFET IRLZ44N tiba-tiba memutus sirkuit untuk mematikan motor, arus yang menyuplai motor merosot ke angka nol secara instan. Penurunan drastis arus terhadap waktu ini memicu kumparan untuk melepaskan sisa energi magnetiknya yang kolaps ke dalam sirkuit dalam wujud tegangan kejut balik.

Lonjakan tegangan kejut yang masif ini akan mencari jalur pelepasan terdekat, yang dapat menghantam dan melampaui batas toleransi tegangan *Drain-to-Source* MOSFET, atau lebih buruk lagi, merambat merusak logika GPIO Raspberry Pi. Untuk mencegah hal tersebut, dioda 1N4007 dipasang secara paralel

dengan terminal motor dalam konfigurasi bias mundur (*reverse-biased*). Selama motor menyala normal, tegangan 5V dari catu daya tidak dapat melewati dioda karena tertahan oleh katoda. Namun, saat motor dimatikan dan Back EMF membalikkan polaritas tegangan, dioda 1N4007 akan secara instan berada pada kondisi bias maju (*forward-biased*), menyediakan jalur sirkuit tertutup (hubung singkat) yang aman agar arus sisa induksi dapat bersirkulasi kembali ke kumparan motor hingga habis berdisipasi menjadi panas.

Komponen ini memiliki rating arus maju kontinu sebesar 1A yang memadai untuk menahan lonjakan arus setara rating motor RS-130 (0,9A). Dioda ini memberikan kelebihan keamanan mutlak dari ancaman tembus tegangan akibat *Back* EMF. Disipasi daya sisa pada tegangan jatuh maju (*Forward Voltage* / $V_F$) sebesar ±1,1V akan ditangani secara aman oleh kemasan epoksi plastik DO-41. Spesifikasi Dioda 1N4007 dirangkum pada **Tabel 2. 11** berikut [25].

**Tabel 2. 11** Spesifikasi Dioda Penyearah 1N4007

| **Parameter** | **Spesifikasi Teknis** |
|---|---|
| Tipe Komponen | *General Purpose Plastic Rectifier* P-N Junction |
| Fungsi pada Sistem | Dioda *Flyback* / *Freewheeling* Diode |
| Kemasan Fisik | DO-41 *Axial Through-Hole* |
| Batas Tegangan Balik Maksimal $V_{RRM}$ | 1.000 Volt *Absolute Maximum* |
| Arus Maju Kontinu Maksimal$I_{F(AV)}$ | 1,0 Ampere |
| Peak Surge Current / $V_{FSM}$ | 30 Ampere Durasi *Sine-wave* 8,3 ms |
| Tegangan Jatuh Maju $V_F$ | ±1,1 Volt pada Arus 1A, suhu 25°C |
| *Reverse Current* $I_R$ | 5,0 µA pada tegangan $V_{RRM}$ |
| Kapasitansi Sambungan (*Junction Capacitance*) | 15 pF Tipikal |
| Material Tahan Api | Sesuai standar UL 94 V-0 |
| Identifikasi Terminal (Pinout) | Gelang perak menunjukkan pin Katoda |
| Referensi Pabrikan | Vishay General Semiconductor, 2018 |

Secara praktis, pemasangan komponen dioda 1N4007 dilakukan dengan menyolder kedua kaki terminalnya secara langsung melintasi kutub positif dan negatif pada motor getar RS-130. Cincin penanda perak pada badan dioda (katoda) diorientasikan mengarah ke kutub positif sumber daya. Konfigurasi peredam tegangan ini secara fundamental memastikan sirkuit penggerak MOSFET dan papan utama Raspberry Pi tetap aman dari kerusakan elektromagnetik fatal yang diakibatkan oleh beban induktif.

### 2.5.10. Resistor 4,7 Ohm, 220 Ohm, dan 10k Ohm

Resistor merupakan komponen elektronika pasif dua terminal yang berfungsi untuk membatasi, mengatur, maupun membagi aliran arus listrik di dalam suatu sirkuit tertutup. Berbeda dengan resistor komposisi karbon konvensional, pada perancangan alat ini diimplementasikan resistor daya berjenis *Metal Oxide Film*. Karakteristik fisik resistor ini dilapisi oleh material pelindung tahan api berwarna abu-abu. Gambar Resistor dapat dilihat pada **Gambar 2. 11** sebagai berikut.

**Gambar 2. 11** Resistor *Metal Oxide Film*

Penggunaan resistor *Metal Oxide* Film sangat direkomendasikan untuk sirkuit yang mendisipasikan daya menengah hingga tinggi karena material oksida logam (seperti *Tin Oxide*) memiliki stabilitas termal yang superior dan ketahanan ekstrem terhadap lonjakan arus sesaat atau *surge current*. Meskipun beroperasi dengan tingkat toleransi standar ±5%, karakteristik struktural ini menjamin bahwa nilai hambatan tidak akan menyimpang secara drastis saat komponen mendisipasikan panas terus-menerus [26]. Secara prinsip kerja komponen ini mematuhi Hukum Ohm yang menyatakan bahwa tegangan $V$ berbanding lurus dengan arus $I$ dan hambatan $R$, seperti yang diformulasikan pada persamaan (2.20) berikut:

$$V = I \times R \tag{2.20}$$

Dalam arsitektur kelistrikan alat penghitung pil ini, diimplementasikan tiga nilai hambatan yang memiliki tugas fungsional spesifik. Pertama, resistor 4,7 Ω dengan rating daya 2 Watt difungsikan sebagai resistor pembatas arus atau *current limiting resistor* seri untuk modul *High Power* LED (HPL). Berdasarkan perhitungan kelistrikan, LED HPL menarik arus sebesar 350 mA pada tegangan operasi maksimal 3,3V. Mengingat sumber daya SMPS menyuplai tegangan murni 5V, resistor ini bertugas menyerap sisa kelebihan tegangan sebesar 1,7V. Besaran daya yang didisipasikan menjadi panas oleh resistor ini dapat dihitung menggunakan Hukum Daya Listrik pada persamaan (2.21) berikut:

$$P_R = I^2 \times R \tag{2.21}$$

Dengan substitusi nilai arus ($I$ = 0,35A) dan hambatan ($R$ = 4,7 Ω), didapatkan daya disipasi sebesar $P = (0{,}35)^2 \times 4{,}7 = 0{,}57$ Watt. Oleh karena nilai beban daya secara kontinu mencapai lebih dari setengah Watt, penggunaan resistor *Metal Oxide Film* berukuran fisik lebih besar dengan rating daya maksimal 2 Watt merupakan kewajiban teknis untuk mencegah komponen mengalami kegagalan termal atau terbakar saat LED menyala dalam waktu lama.

Kedua, digunakan resistor 220 Ω yang bertindak sebagai Gate Resistor pada sirkuit MOSFET IRLZ44N. Meskipun MOSFET dikendalikan oleh tegangan, pada saat pertama kali menyala, lapisan internalnya bertindak layaknya sebuah kapasitor kecil atau *parasitic capacitance* yang dapat menyedot arus sementara yang sangat besar. Resistor 220 Ω yang dipasang secara seri pada jalur pin GPIO Raspberry Pi berfungsi menahan lonjakan arus awal tersebut agar tetap berada pada angka aman ±15 mA ($I$ = 3,3 V / 220 Ω), sehingga sirkuit internal *System on Chip* atau SoC mikrokontroler terhindar dari kerusakan fatal.

Ketiga, diimplementasikan resistor 10k Ω sebagai komponen *Pull-Down*. Resistor ini dihubungkan secara paralel dari pin *Gate* MOSFET menuju jalur *Ground*. Fungsinya adalah untuk memastikan bahwa pin *Gate* selalu mendapatkan status logika "Rendah" atau LOW pada saat pin GPIO Raspberry Pi sedang dalam kondisi mengambang atau *floating*. Resistor *Pull-Down* ini secara efektif

mengeliminasi *noise* elektromagnetik statis yang dapat menyebabkan motor getar atau LED menyala sendiri tanpa instruksi atau *false triggering*. Spesifikasi teknis dari komponen resistor yang digunakan dirangkum pada **Tabel 2. 12** berikut.

**Tabel 2. 12** Spesifikasi Resistor *Metal Oxide Film*

| **Parameter** | **Spesifikasi Teknis** |
|---|---|
| Tipe Komponen | *Metal Oxide Film* Resistor |
| Warna Bodi Pelindung | Abu-abu |
| Nilai Hambatan / *R* | 4,7 Ω, 220 Ω, 10.000 Ω |
| Toleransi Presisi | ±5% |
| Rating Daya Maksimal / *P* | 2 Watt untuk LED dan 1 Watt untuk jalur logika |
| Koefisien Suhu (TCR) | ± 200 hingga ± 50 ppm/ ° C |
| Tegangan Operasi Maksimal | 350V |
| Rentang Suhu Operasi | -55°C hingga +155°C |
| Bahan Inti | Batang Keramik berlapis Oksida Timah |
| Referensi Pabrikan | Boylestad & Nashelsky, 2012 |

Secara arsitektural, komponen-komponen pasif ini dipasang secara integratif pada papan sirkuit cetak purwarupa yang menghubungkan mikrokontroler dengan aktuator. Penempatan resistor 220 Ω dan 10k Ω disolder sedekat mungkin dengan pin Gate MOSFET untuk meminimalisir panjang jalur yang dapat menangkap interferensi sinyal elektromagnetik. Sementara itu, resistor daya 4,7 Ω 2 Watt ditempatkan di luar jalur mikrokontroler dengan jarak sirkulasi udara yang cukup untuk mengakomodasi pelepasan panas dari beban LED HPL, menjamin keamanan absolut bagi seluruh sirkuit logika sistem.

## 2.6. Perangkat Lunak dan Antarmuka

Perangkat lunak (*software*) merupakan komponen non-fisik dari suatu sistem komputasi yang terdiri dari sekumpulan instruksi, algoritma, dan data yang mengatur perilaku perangkat keras untuk menjalankan fungsi-fungsi tertentu secara terstruktur dan otomatis. Berbeda dengan perangkat keras, perangkat lunak bersifat

abstrak namun memegang peranan yang sama krusialnya dalam menentukan keberhasilan dan keandalan sistem secara keseluruhan. Dalam konteks sistem penghitungan dan identifikasi pil otomatis berbasis *image processing* ini, perangkat lunak bertindak sebagai lapisan inteligensi (*intelligence layer*) yang mengintegrasikan seluruh komponen perangkat keras mulai dari modul kamera, modul motor getar, LED HPL, layar sentuh MPI7002, hingga *printer* label XP-365B menjadi satu kesatuan sistem yang bekerja secara sinergis, terkoordinasi, dan responsif terhadap masukan pengguna maupun kondisi lingkungan operasional [27].

Arsitektur perangkat lunak sistem ini dirancang dengan mempertimbangkan tiga aspek fundamental yang saling berkaitan. Pertama, kebutuhan akan bahasa pemrograman yang mampu mengintegrasikan pustaka *computer vision*, pengendalian GPIO, dan komunikasi jaringan dalam satu ekosistem yang kohesif. Kedua, kebutuhan akan antarmuka pengguna grafis (*Graphical User Interface*/GUI) yang intuitif dan responsif untuk memfasilitasi interaksi operator dengan sistem melalui layar sentuh kapasitif. Ketiga, kebutuhan akan mekanisme konkurensi yang memungkinkan beberapa proses berjalan secara bersamaan seperti akuisisi citra, pemrosesan *image processing*, pengendalian motor getar, dan komunikasi dengan *web server* tanpa saling menghambat satu sama lain sehingga sistem dapat beroperasi secara *real-time* dengan latensi yang minimal. Ketiga aspek fundamental tersebut diuraikan secara mendalam meliputi Python sebagai bahasa pemrograman utama sistem, Antarmuka Pengguna Grafis (GUI) sebagai lapisan interaksi visual, dan Teori Konkurensi (*Multithreading*) sebagai mekanisme pengelolaan proses paralel dalam sistem akan dijelaskan sebagai berikut.

### 2.6.1. Python

Python merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi (*high-level programming language*) yang bersifat *open source*, interpretatif, dan berorientasi objek. Sejak dikembangkan oleh Guido van Rossum pada tahun 1991, Python telah berevolusi menjadi salah satu bahasa paling dominan dalam dunia penelitian dan industri, terutama karena filosofi desainnya yang menekankan pada keterbacaan

kode (*code readability*). Python menggunakan sintaksis yang jernih dan ekspresif, yang memungkinkan pengembang untuk mengekspresikan konsep logika yang kompleks dalam baris kode yang lebih sedikit dibandingkan dengan bahasa pemrograman lain seperti C++ atau Java [12].

Karakteristik utama yang membedakan Python adalah sifatnya yang *interpreted*, di mana kode program dieksekusi baris demi baris oleh *interpreter* tanpa perlu melalui proses kompilasi manual menjadi bahasa mesin terlebih dahulu. Hal ini memberikan fleksibilitas tinggi dalam proses *debugging* dan pengembangan purwarupa (*prototyping*) yang cepat. Selain itu, Python memiliki manajemen memori otomatis melalui mekanisme *garbage collection* dan sistem pengetikan dinamis (*dynamic typing*), yang memungkinkan pengembang untuk lebih fokus pada logika algoritma daripada pengelolaan teknis memori perangkat keras [12].

Dalam domain komputasi saintifik dan visi komputer, Python menjadi standar *de facto* karena ekosistem pustaka (*library*) yang sangat kaya. Pustaka seperti NumPy menyediakan struktur data *n-dimensional array* yang memungkinkan operasi matriks citra dilakukan dengan kecepatan mendekati bahasa mesin. Hal ini didukung oleh integrasi OpenCV yang menyediakan fungsi-fungsi pemrosesan visi komputer secara *real-time*. Keunggulan ini sangat krusial ketika sistem dijalankan pada perangkat dengan sumber daya terbatas (*low-power devices*), di mana efisiensi kode menentukan keberhasilan implementasi algoritma deteksi objek [12].

Dalam mengevaluasi efektivitas perangkat lunak yang berjalan di atas perangkat tertanam seperti Raspberry Pi, parameter utama yang digunakan adalah waktu pemrosesan dan *throughput* citra. Berdasarkan penelitian Prakoso & Widyastuti [12], performa sistem diukur melalui nilai *Frames Per Second* (FPS) dan latensi inferensi. Secara matematis, hubungan antara waktu eksekusi total dan kecepatan pemrosesan dapat dirumuskan sebagai persamaan (2.22) berikut.

$$FPS = \frac{1}{T_{total}} \tag{2.22}$$

Di mana $T_{total}$ adalah akumulasi waktu yang dibutuhkan oleh perangkat lunak untuk menyelesaikan satu siklus penuh pada persamaan (2.23), yang meliputi:

$$T_{total} = T_{preprocess} + T_{inference} + T_{postprocess} \quad (2.23)$$

$T_{preprocess}$ yaitu waktu untuk akuisisi dan konversi citra (RGB ke HSV), $T_{inference}$ merupakan waktu yang dibutuhkan algoritma untuk mendeteksi objek dan $T_{postprocess}$ merupakan waktu untuk operasi morfologi dan ekstraksi kontur. Semakin kecil nilai $T_{total}$, maka nilai FPS akan semakin tinggi, yang mengindikasikan bahwa sistem perangkat lunak mampu beroperasi secara responsif terhadap pergerakan fisik objek [12].

Pada sistem penghitungan pil otomatis ini, Python berperan sebagai integrator utama yang menyatukan seluruh elemen fungsional. Pada tingkat perangkat keras, Python melalui pustaka RPi.GPIO mengelola sinyal digital dan *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengatur intensitas getaran modul vibrasi guna memisahkan tumpukan pil. Pada tingkat analisis, Python mengeksekusi *pipeline* pemrosesan citra yang telah dirancang, mulai dari penyaringan *noise* hingga klasifikasi geometri pil berdasarkan jumlah *vertices*. Di akhir proses, Python mengelola alur data menuju *output* fisik (printer) dan *output* digital (*web server*). Melalui mekanisme *multithreading*, Python memastikan bahwa proses pemrosesan citra yang berat dapat berjalan berdampingan dengan antarmuka pengguna grafis (GUI) tanpa menyebabkan degradasi performa atau *freeze* pada sistem.

### 2.6.2. Antarmuka Pengguna Grafis

Antarmuka Pengguna Grafis atau *Graphical User Interface* (GUI) merupakan sistem komponen visual interaktif yang digunakan sebagai jembatan komunikasi antara manusia dan perangkat lunak di dalam sebuah sistem komputer. Berbeda dengan antarmuka berbasis teks (*Command Line Interface*) yang mengharuskan pengguna menghafal baris perintah tertentu, GUI menyediakan representasi visual seperti jendela, ikon, menu, dan tombol yang dapat dioperasikan secara intuitif melalui perangkat masukan sensorik seperti *mouse* atau layar sentuh (*touchscreen*).

Dalam perancangan sistem modern, GUI tidak hanya berfungsi sebagai lapisan presentasi, tetapi juga sebagai lapisan kendali operasional yang menentukan tingkat ketergunaan (*usability*) suatu sistem. Berdasarkan penelitian Anzari et al.

[2], antarmuka pengguna yang responsif dengan elemen kontrol seperti tombol memberikan kendali yang lebih besar kepada pengguna, memungkinkan mereka untuk mengatur parameter sistem atau mengaktifkan fitur tertentu secara adaptif sesuai kebutuhan operasional. Hal ini sangat krusial dalam aplikasi yang melibatkan pemrosesan data *real-time*, di mana interaksi pengguna harus terjadi tanpa menghambat aliran data utama [2].

Pada sektor layanan kesehatan, peran GUI menjadi semakin vital untuk menjamin akurasi dan meminimalkan potensi kesalahan manusia (*human error*). Menurut Zubair et al. [28], penggunaan antarmuka grafis cerdas yang terotomatisasi membuat sistem dispensing obat menjadi lebih efisien dan ramah pengguna dibandingkan dengan teknologi tradisional. Antarmuka tersebut memungkinkan pemilihan data secara presisi dan penyajian informasi visual yang mudah dipahami, sehingga memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih cepat bagi petugas medis [28].

Parameter kualitas sebuah antarmuka grafis dalam sistem kendali dapat diukur melalui Waktu Respons Antarmuka $T_{gui}$ yaitu total durasi yang dibutuhkan sistem untuk memproses masukan pengguna hingga menampilkan perubahan visual di layar. Secara matematis, waktu respons ini dapat didefinisikan sebagai persamaan (2.20) berikut.

$$T_{gui} = T_{event} + T_{callback} + T_{render} \quad (2.24)$$

$T_{event}$ yaitu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mendeteksi kejadian seperti sentuhan tombol, $T_{callback}$ merupakan waktu eksekusi fungsi logika yang dipicu oleh kejadian tersebut dan $T_{render}$ merupakan waktu yang dibutuhkan sistem grafis untuk memperbarui tampilan visual pada layar. Dalam standar perangkat medis, nilai Tgui yang rendah sangat diharapkan untuk memastikan bahwa sistem tetap responsif dan memberikan umpan balik instan kepada pengguna saat mengoperasikan alat [28].

Pada alat penghitung dan identifikasi pil otomatis ini, GUI dirancang untuk dijalankan di atas layar sentuh LCD yang terhubung dengan Raspberry Pi 4B

menggunakan kerangka kerja (*framework*) berbasis Python seperti Tkinter atau PyQt. Desain antarmuka difokuskan pada penyajian informasi yang deterministik dan terstruktur, yang mencakup elemen-elemen berikut:

1. Monitor Aliran Video (*Video Stream*) yaitu menampilkan umpan kamera secara langsung sehingga pengguna dapat memverifikasi posisi pil di area deteksi.
2. Panel Statistik yaitu menampilkan jumlah pil yang terdeteksi dan hasil klasifikasi bentuk (bulat atau kapsul) berdasarkan perhitungan geometri.
3. Tombol Kendali Operasional yaitu mengimplementasikan fungsi kontrol terpusat melalui tombol-tombol strategis:
    a. MULAI untuk memicu aliran daya ke modul vibrasi untuk memisahkan pil sekaligus mengaktifkan algoritma deteksi OpenCV.
    b. RESET untuk melakukan pembersihan variabel data pada memori untuk memulai sesi penghitungan baru.
    c. PRINT untuk mengirimkan perintah ke printer label termal untuk mencetak hasil akhir perhitungan.
    d. UPLOAD untuk menjalankan protokol komunikasi jaringan untuk sinkronisasi data ke *database web*.

Dengan mengintegrasikan teori interaksi manusia-komputer dan efisiensi pemrosesan OpenCV, GUI pada sistem ini berfungsi sebagai pusat kendali terpadu yang menjamin operasional alat tetap aman, akurat, dan dapat diulang (*repeatable*) dalam lingkungan farmasi yang dinamis.

### 2.6.3. Teori Konkurensi

Konkurensi merupakan kemampuan sebuah sistem untuk menangani beberapa tugas dalam satu rentang waktu yang sama. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mencapai konkurensi pada tingkat perangkat lunak adalah *multithreading*. *Thread* atau utas adalah unit terkecil dari sebuah proses eksekusi yang dapat dijadwalkan oleh sistem operasi. Dalam arsitektur embedded system, *multithreading* memungkinkan aplikasi untuk membagi beban kerja ke dalam

beberapa jalur eksekusi paralel, sehingga sumber daya CPU dapat dimanfaatkan secara lebih efisien.

Namun, implementasi *multithreading* dalam bahasa pemrograman Python memiliki karakteristik khusus yang dikenal sebagai *Global Interpreter Lock* (GIL). Berdasarkan penelitian Malakhov [29], GIL merupakan mekanisme *mutex* yang memastikan hanya satu utas yang dapat mengeksekusi *bytecode* Python pada satu waktu, guna mencegah konflik manajemen memori. Meskipun hal ini terlihat sebagai batasan untuk paralelisme murni pada CPU multi-inti, *multithreading* tetap sangat efektif untuk operasi yang bersifat *I/O-bound* (seperti pengambilan gambar dari kamera) atau operasi numerik berat yang melepaskan GIL saat dijalankan di pustaka eksternal seperti OpenCV atau NumPy. Koordinasi antar-utas yang baik diperlukan untuk mencegah adanya *overhead* atau ketidakefisienan jika beberapa modul berulir digunakan secara bersamaan dalam satu aplikasi [29].

Penerapan konkurensi pada perangkat dengan sumber daya terbatas, seperti Raspberry Pi 4, memerlukan manajemen beban komputasi yang sangat ketat. Menurut Kamil et al. (2024), keterbatasan daya komputasi pada perangkat kecil sering kali menjadi hambatan utama dalam menjalankan algoritma deteksi objek secara *real-time*. Oleh karena itu, pembagian proses menjadi beberapa utas yang lebih ringan menjadi strategi optimasi yang krusial untuk menjaga stabilitas sistem agar tidak terjadi penumpukan data (*bottleneck*) pada memori inti perangkat [30].

Peningkatan kinerja yang diperoleh dari penggunaan *multithreading* dapat dianalisis secara matematis menggunakan Hukum Amdahl. Rumus ini digunakan untuk memprediksi nilai maksimum percepatan (*speedup*) sistem secara keseluruhan ketika sebagian dari sistem tersebut ditingkatkan kualitas paralelismenya jadi persmaan (2.25) berikut.

$$S_{latency}(s) = \frac{1}{(1-p) + \frac{p}{s}} \tag{2.25}$$

*Slatency* merupakan nilai percepatan eksekusi tugas secara keseluruhan, *p* merupakan proporsi bagian program yang dapat diparalelkan seperti proses

pengolahan citra dan *s* merupakan tingkat percepatan pada bagian program yang diparalelkan tersebut. Melalui rumus ini, pengembang dapat menentukan titik optimal pembagian utas agar beban kerja antara antarmuka pengguna dan pemrosesan gambar tetap seimbang tanpa membebani sistem secara berlebih [29].

Pada rancang bangun alat penghitung pil ini, teori konkurensi diimplementasikan melalui pemisahan utas antara lapisan antarmuka pengguna (GUI) dan lapisan pemrosesan visi komputer (OpenCV). Arsitektur ini dirancang untuk mengatasi masalah *blocking* yang sering terjadi pada sistem sekuensial:

1. Utas Utama (*Main Thread*) yaitu bertanggung jawab sepenuhnya atas siklus hidup GUI, mendeteksi sentuhan tombol (MULAI, Ulangi, Cetak, Simpan Web), dan memperbarui tampilan teks di layar.
2. Utas Pekerja (*Worker Thread*) yaitu berjalan di latar belakang untuk melakukan akuisisi citra secara terus-menerus, mengeksekusi fungsi `cv2.inRange()`, serta menghitung jumlah pil.

Dengan memisahkan kedua proses ini, sistem dapat menjamin bahwa antarmuka pengguna tetap responsif dan deterministik sementara algoritma pengolahan citra mengekstrak fitur geometri objek dengan frekuensi tinggi. Sinkronisasi antar-utas dilakukan melalui mekanisme antrean (*Queue*) yang aman, sehingga data hasil perhitungan dari utas latar belakang dapat ditampilkan pada GUI secara akurat dan *real-time*.

## 2.7. Komunikasi Jaringan dan Web Server

Komunikasi jaringan merupakan fondasi utama dalam ekosistem *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan pertukaran data secara sinkron maupun asinkron antara perangkat *edge* (seperti Raspberry Pi) dengan infrastruktur awan atau *web server*. Dalam sistem otomasi farmasi, kemampuan perangkat untuk mentransmisikan hasil perhitungan dan identifikasi pil ke *database* terpusat sangat krusial untuk keperluan pemantauan (*monitoring*), inventarisasi, dan pelaporan data secara *real-time*. Protokol komunikasi yang paling umum digunakan dalam

integrasi sistem berbasis *website* adalah *Representational State Transfer* (REST) atau sering disebut REST API. REST merupakan gaya arsitektur perangkat lunak yang menggunakan protokol HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) untuk pertukaran data. Berdasarkan penelitian Salsabilla [31], implementasi REST-API memungkinkan sistem informasi untuk melakukan proses administrasi secara lebih efisien dan terorganisir melalui metode permintaan (*request*) standar seperti GET, POST, PUT, dan DELETE. Karakteristik utama REST adalah sifatnya yang *stateless*, di mana setiap permintaan dari klien ke server harus mengandung semua informasi yang diperlukan untuk memahami dan memproses permintaan tersebut tanpa bergantung pada riwayat percakapan sebelumnya [31].

Sejalan dengan arsitektur REST tersebut, diperlukan format pertukaran data yang ringan dan mudah dibaca baik oleh manusia maupun mesin untuk memastikan transmisi data berjalan optimal. *JavaScript Object Notation* (JSON) muncul sebagai standar format pertukaran data yang paling efisien untuk aplikasi IoT. Menurut Kojansow et al. [32], penggunaan format JSON dalam platform IoT sangat disarankan karena ukurannya yang minimalis, sehingga dapat meningkatkan performa aplikasi dan efisiensi komunikasi data, terutama saat dikombinasikan dengan arsitektur REST atau WebSocket [32]. Efisiensi transmisi data ini dapat dievaluasi secara teknis melalui parameter Latensi Komunikasi **(**Lcomm). Secara matematis, total waktu yang dibutuhkan sejak data pil selesai dihitung hingga tersimpan di server didefinisikan sebagai akumulasi dari waktu transmisi, propagasi, dan pemrosesan, jadi persamaan (2.22) sebagai berikut.

$$L_{Comm} = T_{trans} + T_{prop} + T_{proc} \tag{2.26}$$

Lcomm adalah total latensi komunikasi jaringan, Ttrans yaitu waktu transmisi yang dipengaruhi oleh ukuran paket JSON dan bandwidth, Tprop merupakan waktu propagasi sinyal melalui media jaringan, dan Tproc merupakan waktu pemrosesan data oleh *web server* sebelum disimpan ke dalam database.

Data yang telah ditransmisikan dalam format JSON tersebut selanjutnya perlu dikelola oleh sebuah *web server* untuk kemudian disajikan kembali kepada pengguna melalui antarmuka *dashboard*. Berdasarkan penelitian Irawan &

Sibagariang [33], penggunaan Raspberry Pi sebagai *server* utama yang terintegrasi dengan database (seperti MySQL) memungkinkan pencatatan data secara akurat dan otomatis, serta menyediakan fitur notifikasi yang meningkatkan transparansi informasi bagi pemangku kepentingan [33]. Lebih lanjut, dalam konteks perawatan kesehatan dan farmasi, sinkronisasi data secara otomatis memberikan kemampuan pemantauan jarak jauh yang sangat berguna bagi petugas medis. Sebagaimana dijelaskan oleh Shari et al. [34], integrasi sistem dispenser pil dengan platform pemantauan *real-time* memungkinkan akses data antar-perangkat secara berkelanjutan, sehingga kepatuhan terhadap jadwal pengobatan dan keakuratan jumlah stok obat dapat dipantau setiap saat [34].

Dalam implementasi nyata pada rancang bangun alat ini, mekanisme komunikasi jaringan dioperasikan menggunakan protokol HTTP dengan metode POST. Setelah algoritma pengolahan citra berhasil menentukan jumlah dan jenis pil, Python akan menyusun data tersebut ke dalam sebuah objek JSON yang berisi parameter *pill count*, *pill type*, dan *timestamp*. Data ini kemudian dikirimkan ke URL *endpoint* API pada *web server* melalui jalur koneksi internet. Proses transmisi ini dijalankan pada utas latar belakang (*background thread*) sesuai dengan teori konkurensi, sehingga aktivitas pengiriman data tidak mengganggu visualisasi aliran video pada antarmuka alat. Hasil dari sinkronisasi ini memungkinkan apoteker untuk mengakses riwayat peracikan obat melalui *website* monitoring secara fleksibel, menjamin integritas data, dan meningkatkan efisiensi dokumentasi farmasi secara digital.

Keseluruhan teori dan tinjauan pustaka yang telah diuraikan pada bab ini membentuk landasan fundamental yang kokoh bagi perancangan sistem penghitung dan identifikasi pil otomatis. Mulai dari arsitektur Embedded System pada Raspberry Pi, prinsip kerja Computer Vision dengan OpenCV, hingga spesifikasi teknis dari setiap komponen elektronika seperti motor getar, HPL, dan layar sentuh yang saling mendukung satu sama lain.