

BAB II DASAR TEORI

Pada bab dasar teori ini akan membahas mengenai teori berkaitan dengan topik pembahasan dan komponen-komponen yang digunakan dalam perancangan robot pembersih *solar panel* dengan Raspberry Pi 4 berbasis MobileNetV2 dan TensorFlow Lite.

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada bagian tinjauan pustaka berisi beberapa referensi mengenai perancangan robot pembersih *solar panel* dengan Raspberry Pi 4 berbasis MobileNetV2 dan TensorFlow Lite untuk kebutuhan pembuatan tugas akhir. Berikut adalah hasil tinjauan pustaka yang disajikan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

Judul Penelitian	Penulis / Tahun	Keterangan
Simulasi Pemograman Pengendali PWM Kecepatan dengan Mikrokontroler Arduino berbasis Sensor Ultrasonik HC-SR04 pada Purwarupa Mobil Listrik [1]	Saputra,dkk (2020)	Studi tentang sistem pengendali kecepatan otomatis pada purwarupa mobil listrik menggunakan mikrokontroler Arduino dan sensor ultrasonik HC-SR04, termasuk tahapan pembuatan, pemrograman PWM berbasis Bahasa C, dan pengujian efektivitas pengereman bertahap.

<i>Construction Jobsite Image Classification Using an Edge Computing Framework [2]</i>	Chen,dkk (2024)	Studi tentang klasifikasi citra di lokasi konstruksi menggunakan <i>framework edge computing</i> , menekankan pemanfaatan MobileNet untuk model klasifikasi ringan dan optimisasi model dengan TensorFlow Lite guna mendukung inferensi <i>real-time</i> di perangkat <i>edge</i> seperti Raspberry Pi tanpa koneksi internet.
Rancang Bangun Sistem Monitoring Jarak Jauh Pada Plant Purifikasi Biogas Berbasis Internet of Things [3]	Okke (2017)	Studi tentang sistem monitoring jarak jauh pada plant purifikasi biogas berbasis Internet of Things, yang mengintegrasikan mikrokontroler ATmega128 dan Raspberry Pi melalui komunikasi serial, serta menampilkan data pemantauan secara

		<i>real-time</i> pada aplikasi Android dengan penyimpanan data di <i>database online</i> .
<i>Study on Solar panel Cleaning Robot</i> [4]	Hashim,dkk (2019)	Studi tentang pengembangan robot pembersih panel surya berbentuk mobil, yang dilengkapi dengan sensor tegangan dan arus, kamera IP, serta sistem kontrol berbasis IoT menggunakan mikrokontroler Wemos D1 ESP8266 dan aplikasi Android Blynk, untuk pembersihan otomatis dan monitoring kinerja panel secara <i>real-time</i> .
Rancang Bangun Robot Pembersih <i>Solar Panel</i> Menggunakan Kamera Dengan <i>Microcontroller</i> ESP32 CAM	Romy (2023)	Studi ini menjelaskan tentang konfigurasi arduino Pro mini dengan ESP32 CAM melalui komunikasi serial dan blynk.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Image Classification*

Image classification adalah proses dalam bidang *computer vision* yang bertujuan untuk mengelompokkan atau mengklasifikasikan gambar ke

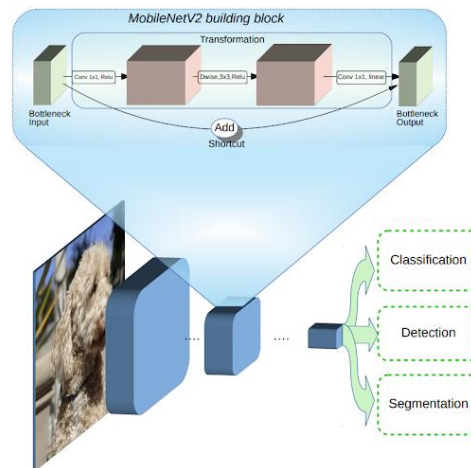
dalam satu atau beberapa kelas berdasarkan objek atau pola visual yang terkandung di dalamnya [5]. Proses ini biasanya melibatkan teknik pembelajaran mesin (*machine learning*) atau pembelajaran mendalam (*deep learning*) untuk melatih model agar mampu mengenali fitur-fitur penting dari gambar. Model yang telah dilatih kemudian dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan gambar baru secara otomatis. *Image classification* banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pengenalan wajah, deteksi objek, sistem keamanan, diagnosis medis, dan pengolahan citra satelit.

Dalam penelitian ini, *image classification* digunakan untuk mendeteksi kondisi permukaan panel surya, apakah dalam keadaan bersih atau kotor. Proses klasifikasi citra dilakukan menggunakan model MobileNetV2 yang telah dioptimalkan dengan TensorFlow Lite agar dapat berjalan secara optimal pada perangkat *embedded* seperti Raspberry Pi 4. Kamera yang terpasang pada robot akan menangkap gambar panel surya, kemudian gambar tersebut diproses dan diklasifikasikan secara *real-time*. Hasil klasifikasi ini digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh sistem, apakah robot perlu melakukan pembersihan pada area tertentu atau tidak. Dengan penerapan *image classification*, sistem robot menjadi lebih cerdas dan mampu beroperasi secara otomatis dalam menjaga kebersihan panel surya.

2.2.2 MobileNet V2

MobileNetV2 adalah arsitektur jaringan konvolusional yang dirancang untuk meringankan hasil model, terutama pada perangkat dengan sumber daya terbatas. Arsitektur ini terdiri dari blok utama yang disebut *inverted residual block* dengan fitur penting berupa *depthwise separable convolution*, *linear bottleneck*, dan *shortcut connection*. Keunggulan ini membuat MobileNetV2 ringan secara komputasi namun tetap mampu memberikan akurasi yang baik [6]. Selain itu, arsitektur ini dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan parameter sehingga proses inferensi dapat

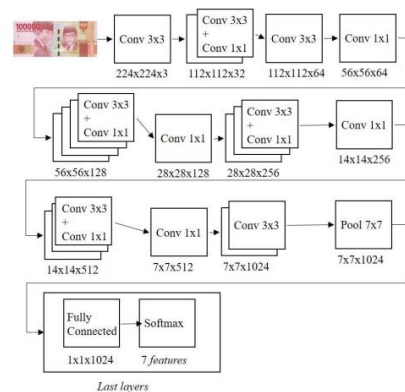
dilakukan dengan lebih cepat dan efisien. Oleh karena itu, MobileNetV2 banyak digunakan pada sistem pengolahan citra yang dijalankan pada perangkat *edge computing* seperti *embedded system* dan *single-board computer*.



Gambar 2.1 Arsitektur MobileNetV2

Sumber : [7]

Arsitektur umum dari MobileNetV2 yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1** digunakan untuk berbagai tugas *computer vision* seperti klasifikasi, deteksi objek, dan segmentasi citra. Di dalam arsitektur ini, komponen utama yang digunakan adalah MobileNetV2 *building block*, yang terdiri dari tiga tahap transformasi utama, yaitu: konvolusi 1x1 dengan aktivasi ReLU (untuk ekspansi dimensi), *depthwise convolution* 3x3 dengan ReLU (untuk ekstraksi fitur), dan konvolusi 1x1 linear (untuk kompresi dimensi tanpa aktivasi). Blok ini menggunakan struktur *inverted residual*, yaitu dengan *shortcut* (jalan pintas) dari *input* ke *output* hanya jika dimensi saling cocok. *Output* akhir dari blok ini digunakan untuk melakukan berbagai tugas seperti klasifikasi, deteksi, dan segmentasi, sebagaimana terlihat dari alur *output* ke tiga fungsi tersebut di sisi kanan gambar. Arsitektur ini dirancang untuk perangkat yang ringan, cocok untuk perangkat *edge* seperti Raspberry Pi.



Gambar 2.2 Layer-layer MobileNetV2

Sumber : [8]

Detail lapisan-lapisan (*layers*) dari jaringan MobileNetV2 yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2** mulai dari *input* citra hingga *output* akhir. Citra *input* berukuran 224x224 piksel dengan 3 kanal warna (RGB) terlebih dahulu diproses melalui konvolusi awal (Conv 3x3), kemudian masuk ke serangkaian blok konvolusi yang memanfaatkan kombinasi Conv 3x3, Conv 1x1, dan *depthwise separable convolution*. Setiap blok melakukan ekstraksi fitur sambil mengurangi resolusi spasial dan meningkatkan kedalaman fitur. Dalam tahap akhir, hasil fitur direduksi melalui *pooling*, kemudian dikirim ke *layer fully connected* dan fungsi aktivasi *softmax* untuk menghasilkan *output* klasifikasi (dalam contoh ini, 7 fitur *output*) [6]. Gambar ini memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana data diproses dan ditransformasikan dalam jaringan MobileNetV2 dari awal hingga akhir klasifikasi. **Gambar 2.2** secara visual memperkuat pemahaman tentang struktur *layer internal* dari arsitektur yang ringan.

2.2.3 Tensorflow Lite

TensorFlow Lite adalah versi ringan dari *framework* TensorFlow yang dirancang khusus untuk menjalankan model pembelajaran mesin pada perangkat *edge* atau *mobile*, seperti *smartphone*, mikrokontroler, dan *single-board computer*. Dengan ukuran model yang lebih kecil dan waktu inferensi yang lebih cepat, TensorFlow Lite memungkinkan *deployment*

model machine learning menjadi lebih ringan pada perangkat dengan sumber daya yang terbatas. *Framework* ini mendukung optimasi model melalui proses *quantization* dan *pruning*, yang bertujuan mengurangi ukuran file dan mempercepat proses eksekusi tanpa mengorbankan akurasi secara signifikan [9]. TensorFlow Lite juga menyediakan penerjemah khusus dan API yang dapat langsung diintegrasikan ke dalam aplikasi Android, iOS, dan perangkat berbasis Linux seperti Raspberry Pi.

Dalam penelitian ini, TensorFlow Lite digunakan untuk mengimplementasikan model klasifikasi citra yang telah dilatih menggunakan arsitektur MobileNetV2. Model tersebut dikonversi dari format TensorFlow biasa ke format TensorFlow Lite agar dapat dijalankan secara optimal pada perangkat Raspberry Pi 4. Penggunaan TensorFlow Lite sangat penting karena memungkinkan proses inferensi citra dilakukan secara lokal oleh robot pembersih panel surya tanpa perlu mengandalkan server eksternal. Dengan demikian, sistem dapat bekerja secara mandiri dan *real-time* dalam mengenali kondisi permukaan panel, sekaligus mengurangi *delay* dan konsumsi daya. TensorFlow Lite menjadi kunci dalam mengintegrasikan kecerdasan buatan ke dalam perangkat keras sederhana yang digunakan dalam penelitian ini.

2.2.4 Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan perangkat fisik ke jaringan internet sehingga perangkat-perangkat tersebut dapat saling berkomunikasi dan bertukar data tanpa interaksi manusia secara langsung. IoT memungkinkan berbagai objek, seperti sensor, aktuator, perangkat elektronik, hingga sistem otomasi, untuk saling terintegrasi melalui jaringan yang didukung oleh teknologi komunikasi nirkabel [10]. Tujuan utama dari IoT adalah menciptakan sistem yang cerdas dan terdistribusi, di mana setiap komponen dapat melakukan pengambilan keputusan berdasarkan data yang diterima dan dikirimkan secara *real-time*.

Dalam penelitian ini, IoT berperan penting dalam proses pengiriman hasil pengolahan citra dari Raspberry Pi 4 ke website, serta sebagai sarana kendali untuk menggerakkan robot pembersih panel surya secara jarak jauh. Raspberry Pi 4 melakukan inferensi model klasifikasi menggunakan MobileNetV2 dan TensorFlow Lite untuk mendeteksi kondisi panel, kemudian hasilnya dikirim ke wemos melalui WIFI. Selain itu, website juga digunakan sebagai antarmuka kendali yang memungkinkan pengguna mengontrol pergerakan robot secara *real-time*, menjadikan sistem ini fleksibel dalam operasionalnya.

2.2.5 Arduino IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) adalah perangkat lunak sumber terbuka yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler Arduino [11]. IDE ini menyediakan antarmuka yang sederhana dan intuitif sehingga memudahkan pengguna, baik pemula maupun profesional, dalam melakukan pemrograman perangkat *embedded*. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah turunan dari C/C++, dan Arduino IDE dilengkapi dengan berbagai pustaka (*libraries*) serta dukungan untuk banyak jenis papan mikrokontroler. Selain itu, Arduino IDE juga menyediakan fitur *serial monitor* dan *serial plotter* yang memungkinkan pengguna untuk memantau data secara *real-time* selama program dijalankan.

Dalam penelitian ini, Arduino IDE digunakan untuk memprogram dan mengendalikan komponen-komponen aktuator serta sensor yang terpasang pada robot pembersih panel surya. Perangkat seperti motor DC, sensor jarak, atau sensor kecepatan dikendalikan melalui mikrokontroler yang diprogram menggunakan Arduino IDE. Program yang ditulis mencakup logika pergerakan robot, pembacaan data sensor, serta komunikasi antar perangkat seperti Raspberry Pi dan mikrokontroler. Arduino IDE dipilih karena kemudahannya integrasinya dengan berbagai jenis sensor dan aktuator yang digunakan dalam sistem robotik, serta

kemampuannya untuk menjalankan instruksi di lingkungan dengan sumber daya terbatas.

2.2.6 Python

Python adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dikenal karena sintaksnya yang sederhana, mudah dipahami, dan fleksibel [12]. Python bersifat *open source* dan mendukung berbagai paradigma pemrograman seperti prosedural, berorientasi objek, dan fungsional. Bahasa ini sangat populer di kalangan pengembang perangkat lunak, peneliti, dan ilmuwan data karena memiliki ekosistem pustaka yang sangat kaya, seperti NumPy untuk komputasi numerik, OpenCV untuk pemrosesan citra, dan TensorFlow atau PyTorch untuk pengembangan model kecerdasan buatan. Selain itu, Python juga mendukung integrasi lintas platform dan banyak digunakan dalam bidang seperti otomasi, pengolahan data, pengembangan web, hingga *Internet of Things* (IoT).

Dalam penelitian ini, Python digunakan sebagai bahasa utama dalam pemrograman sistem pengolahan citra dan klasifikasi objek menggunakan model MobileNetV2 yang telah dioptimalkan dengan TensorFlow Lite. Python dijalankan pada perangkat Raspberry Pi 4 untuk melakukan pengambilan gambar dari kamera, preprocessing citra, menjalankan inferensi model, serta mengontrol alur logika pengambilan keputusan oleh robot pembersih panel surya. Selain itu, Python juga digunakan untuk mengatur komunikasi antara komponen perangkat keras dan platform *cloud* atau antarmuka pengguna seperti website. Pemilihan Python memberikan fleksibilitas dan kemudahan dalam pengembangan, integrasi, serta *debugging* sistem secara keseluruhan.

2.2.7 Google Colaboratory

Google Colaboratory atau lebih dikenal sebagai Google Colab adalah platform berbasis cloud yang disediakan oleh Google untuk menjalankan dan berbagi kode Python secara interaktif melalui *notebook*

berbasis Jupyter [13]. Google Colab mendukung penggunaan GPU dan TPU secara gratis, sehingga sangat cocok untuk pelatihan model pembelajaran mesin (*machine learning*) dan *deep learning* skala kecil hingga menengah. Platform ini memungkinkan pengguna untuk menulis, mengeksekusi, dan mendokumentasikan kode dalam satu dokumen terintegrasi yang mudah dibagikan dan dikolaborasikan secara daring.

Dalam penelitian ini, Google Colab digunakan sebagai lingkungan pemrograman untuk pelatihan dan konversi model MobileNetV2 menggunakan TensorFlow. Model yang telah dilatih kemudian dikonversi menjadi format TensorFlow Lite (.tflite) agar dapat dijalankan pada perangkat *edge* seperti Raspberry Pi 4. Penggunaan Google Colab mempercepat proses pengembangan dan pelatihan model karena ketersediaan sumber daya komputasi yang memadai dan integrasi langsung dengan Google Drive, sehingga memudahkan penyimpanan serta pemindahan model ke perangkat target.

2.2.8 Kaggle

Kaggle adalah sebuah *platform* komunitas data *science* yang dimiliki oleh Google, yang menyediakan sarana untuk berbagi *dataset*, *notebook* interaktif, serta mengikuti kompetisi terkait *machine learning* dan analisis data [14]. Kaggle juga menawarkan akses ke lingkungan pemrograman berbasis Jupyter *Notebook* yang dapat dijalankan langsung di *cloud* tanpa perlu instalasi lokal. Selain itu, Kaggle memungkinkan pengguna untuk berkolaborasi, berdiskusi, dan membangun portofolio data *science* mereka melalui berbagai proyek terbuka dan *dataset* yang telah dikurasi.

Dalam penelitian ini, Kaggle dimanfaatkan sebagai sumber *dataset* citra yang digunakan untuk pelatihan model MobileNetV2. *Dataset* yang diperoleh dari Kaggle berisi gambar kondisi panel surya yang bersih dan kotor, yang kemudian digunakan untuk melatih model klasifikasi dalam mendeteksi tingkat kebersihan permukaan panel. *Dataset* tersebut diproses

dan dianalisis menggunakan lingkungan pemrograman yang tersedia di Google Colab, lalu hasil model dilanjutkan untuk dikonversi ke format TensorFlow Lite dan dijalankan pada Raspberry Pi 4 sebagai bagian dari sistem cerdas pada robot pembersih panel surya.

2.2.9 Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4 merupakan komputer papan tunggal (*Single Board Computer/SBC*) yang dirancang untuk menyediakan kemampuan komputasi layaknya komputer desktop dalam ukuran mini [15]. Perangkat ini menggunakan prosesor Broadcom BCM2711, yaitu quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit yang berjalan pada kecepatan hingga 1.5 GHz, dan tersedia dalam varian RAM 2 GB, 4 GB, dan 8 GB LPDDR4. Raspberry Pi 4 dilengkapi dengan berbagai port seperti HDMI ganda, USB 3.0, Ethernet Gigabit, dan GPIO 40-pin yang menjadikannya sangat fleksibel untuk digunakan dalam aplikasi *embedded*, *edge computing*, otomasi industri, serta sistem visi komputer berbasis kecerdasan buatan seperti MobileNetV2 dengan TensorFlow Lite.



Gambar 2.3 Raspberry Pi 4 Model B

Sumber : [16]

Dalam penelitian ini, Raspberry Pi 4 yang ditunjukkan pada gambar **Gambar 2.3** digunakan sebagai pemroses utama dalam pengolahan citra yang ditangkap oleh *webcam* eksternal. Dengan dukungan pustaka seperti TensorFlow Lite, Raspberry Pi 4 mampu menjalankan inferensi model *deep learning* secara optimal, tanpa membutuhkan server eksternal. Kombinasi

ini menjadikan Raspberry Pi 4 sangat cocok untuk tugas pengenalan objek secara *real-time* di lapangan, seperti pada sistem robot pembersih panel surya otomatis.

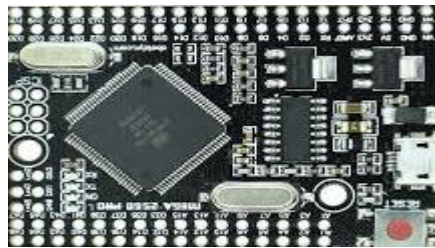
Tabel 2.1 Spesifikasi Raspberry Pi 4 Model B

Komponen	Spesifikasi
Prosesor	Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1.5 GHz
RAM	8 GB LPDDR4
GPU	Broadcom VideoCore VI
Port HDMI	2x micro HDMI (dukungan hingga 4K)
Port USB	2x USB 3.0, 2x USB 2.0
Ethernet	Gigabit Ethernet
Wireless	802.11 b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0
GPIO	40-pin header GPIO (kompatibel dengan model sebelumnya)
Penyimpanan	microSD card slot
Daya Masuk	5V via USB-C (3.0A minimum) atau GPIO header
Dimensi Fisik	85.6 mm × 56.5 mm
Sistem Operasi	Raspberry Pi OS (Linux-based), kompatibel dengan Ubuntu, Debian, dsb.

2.2.10 Arduino Mega 2560 Mini

Arduino Mega 2560 Mini adalah versi ringkas dari papan mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang berbasis chip ATmega2560 [17]. Papan ini dirancang untuk menghadirkan kapabilitas tinggi dalam ruang fisik yang lebih kecil, menjadikannya ideal untuk sistem tertanam dengan kebutuhan I/O yang kompleks namun terbatas ruang. Arduino Mega 2560

Mini dilengkapi dengan 54 pin digital I/O, 16 *input* analog, memori flash sebesar 256 KB, SRAM 8 KB, serta mendukung berbagai protokol komunikasi seperti UART, SPI, dan I2C. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuannya untuk mengontrol banyak sensor dan aktuator secara simultan, menjadikannya cocok untuk sistem otomasi dan robotika skala menengah. Arduino Mega Mini juga kompatibel dengan Arduino IDE, sehingga memudahkan proses pemrograman dan integrasi dengan berbagai perangkat keras lainnya.



Gambar 2.4 Arduino Mega 2560 Mini

Sumber : [18]

Dalam penelitian ini, Arduino Mega 2560 Mini pada **Gambar 2.4** berperan sebagai pengendali utama sistem perangkat keras tingkat rendah, seperti motor DC, sensor ultrasonik, sensor rotary encoder, dan beberapa aktuator lain yang digunakan dalam robot pembersih *solar panel*. Fungsi-fungsi ini mencakup penggerakan mekanik, pembacaan jarak dan rotasi, serta pengendalian pembersih otomatis. Sementara tugas pemrosesan citra dan klasifikasi visual dilakukan oleh Raspberry Pi 4 dengan bantuan model MobileNetV2 dan TensorFlow Lite, Arduino Mega 2560 Mini bekerja sebagai *slave controller* yang merespons perintah dari Raspberry Pi melalui komunikasi serial. Kolaborasi ini memungkinkan sistem robot beroperasi secara lebih terstruktur dan modular, di mana beban komputasi tinggi ditangani oleh Raspberry Pi, sedangkan tugas *real-time* dan interaksi langsung dengan perangkat keras dilakukan oleh Arduino.

Tabel 2.2 Spesifikasi Arduino Mega 2560 Mini

Komponen	Spesifikasi
Mikrokontroler	ATmega2560
Tegangan Operasional	5V
Tegangan <i>Input</i> (disarankan)	7–12V
Tegangan <i>Input</i> (batas)	6–20V
Pin Digital I/O	54 (15 dapat digunakan sebagai PWM)
Pin <i>Input</i> Analog	16
Clock Speed	16 MHz
Flash Memory	256 KB (8 KB digunakan oleh bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Komunikasi	UART, SPI, I2C

2.2.11 Webcam

Webcam adalah perangkat kamera USB yang menawarkan resolusi Full HD 1080p dengan sensor 2 megapiksel. Dilengkapi dengan fitur *autofocus* dan sudut pandang lebar 150°, kamera ini mampu menangkap area yang luas, cocok untuk keperluan konferensi video atau pemantauan ruangan. Desainnya yang ringkas dan kompatibilitas *plug and play*

memudahkan penggunaannya tanpa memerlukan instalasi *driver* tambahan [19].



Gambar 2.5 Webcam

Sumber : [19]

Dalam penelitian ini, *webcam* digunakan sebagai sensor visual utama untuk robot pembersih panel surya. Kemampuan autofocus dan sudut pandang lebar memungkinkan robot untuk memantau permukaan panel secara menyeluruh, membantu dalam mendeteksi area yang memerlukan pembersihan.

Tabel 2.3 Spesifikasi Webcam

Spesifikasi	Keterangan
Resolusi Perekaman	1920 × 1080 (Full HD)
Mikrofon	Mikrofon internal (Built-in Microphone)
Koneksi	USB 2.0
Panjang Kabel	150 cm
<i>Input Daya</i>	5 Volt
Sudut Pandang	120 Derajat

2.2.12 Motor DC Gearbox

Motor DC dengan *gearbox* adalah perangkat elektromekanis yang menggabungkan motor arus searah (DC) dengan sistem transmisi roda gigi (*gearbox*) [20], untuk menghasilkan torsi yang lebih besar dengan kecepatan rotasi yang lebih rendah. *Gearbox* berfungsi sebagai pengurang kecepatan (*gear reduction*) dan pengganda torsi, memungkinkan motor menggerakkan beban yang berat. Sistem ini banyak digunakan dalam aplikasi robotika, otomasi industri, dan kendaraan listrik kecil karena stabilitas kendali dan struktur mekanisnya yang ringkas.



Gambar 2.6 Motor DC Gearbox

Sumber : [18]

Motor DC biasanya memiliki karakteristik kecepatan tinggi dan torsi rendah. Namun, ketika digabungkan dengan *gearbox*, rasio gir akan menurunkan RPM (*rotation per minute*) dan meningkatkan torsi sesuai kebutuhan. Tipe *gearbox* yang umum digunakan meliputi *planetary*, *spur*, dan *worm gear*. Motor DC *geared* juga mendukung sistem pengendali berbasis mikrokontroler, termasuk Arduino maupun Raspberry Pi, dan dapat dikombinasikan dengan sistem kontrol umpan balik seperti rotary encoder untuk keperluan kendali posisi dan kecepatan yang presisi.

Tabel 2.4 Spesifikasi Motor DC Gearbox

Komponen	Spesifikasi Umum
Tegangan Operasional	12 V DC
Tipe Gearbox	Worm
Rasio Gear	37.3
Kecepatan <i>Output</i> tanpa Beban	30 RPM
Torsi Maksimum	2.2 kg.cm

2.2.13 Sensory Rotary Encoder

Rotary encoder adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi posisi sudut (rotasi), kecepatan, dan arah putaran dari poros atau elemen yang berputar [21]. Sensor ini sangat penting dalam sistem kendali posisi dan kecepatan seperti pada robotika, otomasi industri, serta sistem aktuator presisi. Encoder bekerja dengan mendeteksi perubahan posisi dari elemen putar menggunakan prinsip optik, magnetik, atau kapasitif tergantung jenisnya. *Output* yang dihasilkan berupa sinyal pulsa digital atau sinyal digital absolut yang mewakili posisi spesifik.

**Gambar 2.7** Sensory Rotary Encoder

Sumber : [18]

Tipe *rotary encoder* yang paling umum digunakan adalah inkremental encoder, yang menghasilkan pulsa saat poros berputar, dan *absolute encoder*, yang memberikan nilai posisi unik untuk setiap sudut

rotasi. Encoder inkremental sering dipadukan dengan mikrokontroler seperti Arduino untuk keperluan estimasi kecepatan dan arah gerak motor melalui penghitungan pulsa (*quadrature decoding*). Keunggulan sensor ini terletak pada resolusi tinggi, kecepatan respons yang cepat, dan kompatibilitas luas dengan sistem mikrokontroler.

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensory Rotary Encoder

Komponen	Spesifikasi Umum
Tegangan Operasional	5V DC
Tipe Encoder	Incremental
Arus	0.41 A
Resolusi	60 hitungan per resolusi

2.2.14 *Water Level Sensor*

Sensor *water level* adalah perangkat elektronik yang dirancang untuk mendeteksi dan mengukur tinggi permukaan air dalam suatu wadah atau lingkungan terbuka [22]. Sensor ini berperan penting dalam sistem pengontrol cairan otomatis seperti pengisian tangki air, *monitoring* banjir, dan sistem irigasi cerdas. Terdapat berbagai jenis teknologi sensor ketinggian air, antara lain: kapasitif, ultrasonik, optik, dan konduktif.



Gambar 2.8 *Water Level Sensor*

Sumber : [18]

Salah satu tipe yang populer dan terjangkau adalah sensor level air berbasis konduktivitas, yang bekerja dengan mendeteksi keberadaan air melalui jalur konduktif antara elektroda. Alternatif lain adalah sensor ultrasonik, yang mengukur jarak antara sensor dan permukaan air berdasarkan waktu pantulan gelombang suara. Sensor kapasitif juga banyak digunakan dalam aplikasi industri karena mampu mendeteksi variasi tingkat cairan tanpa kontak langsung, dengan prinsip perubahan kapasitansi akibat naik turunnya permukaan cairan. Sensor ini biasa digunakan bersama mikrokontroler seperti Arduino untuk mendeteksi level air dalam bentuk logika digital atau analog, dan dapat diprogram untuk memberi peringatan atau mengaktifkan aktuator seperti pompa atau katup otomatis.

Tabel 2.6 Spesifikasi *Water Level Sensor*

Komponen	Spesifikasi
Tegangan Operasional	3.3V – 5V DC
Arus Operasi	<20 mA
<i>Output</i>	Analog (0–1023 ADC Arduino)
Panjang Area Deteksi	±40 mm – 60 mm

2.2.15 Sensor HC SR 04

Sensor HC-SR04 adalah sensor jarak berbasis ultrasonik yang umum digunakan dalam berbagai sistem *embedded* dan otomasi. Sensor ini bekerja dengan prinsip pemantulan gelombang ultrasonik: mengirimkan gelombang suara dari transmitter, kemudian menangkap pantulannya melalui *receiver*. Berdasarkan waktu tempuh gelombang suara dari pengiriman hingga penerimaan, sensor dapat menghitung jarak objek menggunakan rumus kecepatan suara [23].



Gambar 2.9 Sensor HC SR 04

Sumber : [18]

Sensor ini memiliki dua pin penting yaitu *trigger* dan *echo*. Saat pin *trigger* diberi pulsa logika tinggi selama 10 mikrodetik, sensor akan mengirimkan sinyal ultrasonik 40 kHz. Kemudian, jika objek terdeteksi, pin *echo* akan memberikan pulsa yang durasinya proporsional dengan jarak objek tersebut. HC-SR04 banyak dipilih karena memiliki akurasi cukup baik, jangkauan jarak hingga 4 meter, serta biaya yang murah, sehingga menjadi komponen andalan dalam robotika, sistem penghindar tabrakan, pengukur ketinggian air, dan sistem navigasi otonom.

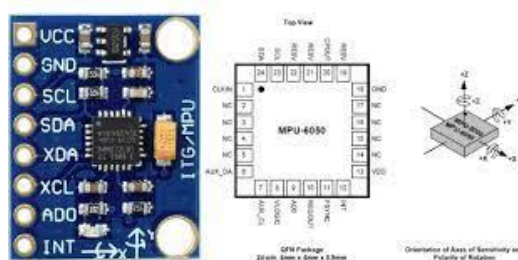
Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor HC SR 04

Komponen	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5V DC
Arus Operasi	15 mA
Frekuensi Ultrasonik	40 kHz
Jangkauan Deteksi	2 cm – 400 cm
Akurasi	±3 mm
Sudut Deteksi	<15°

2.2.16 Sensor IMU

Sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) adalah perangkat pengukuran berbasis inersia yang digunakan untuk mendeteksi percepatan

linier, rotasi sudut (*yaw, pitch, roll*), serta orientasi spasial dari suatu objek. IMU terdiri dari kombinasi akselerometer, *gyroscope*, dan kadang-kadang magnetometer (pada versi 9-DOF), yang masing-masing berfungsi untuk mengukur percepatan, kecepatan sudut, dan arah medan magnet bumi [24]. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem kendali robot, kendaraan otonom, navigasi inersial, dan pelacakan gerakan manusia atau objek.



Gambar 2.10 Sensor IMU

Sumber : [18]

Dalam konteks robotika atau kendaraan bergerak, IMU berperan penting dalam menstabilkan sistem, memperkirakan posisi dan kecepatan tanpa bergantung pada sensor eksternal, dan memberikan informasi gerakan yang dibutuhkan untuk sistem kontrol tertutup. Kombinasi data dari akselerometer dan *gyroscope* juga memungkinkan implementasi filter seperti Kalman atau *complementary filter* untuk estimasi orientasi yang lebih akurat. IMU banyak digunakan karena kompak, ringan, dan hemat energi, serta tersedia dalam berbagai tingkat akurasi dan harga.

Tabel 2.8 Spesifikasi Sensor IMU

Komponen	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5V
Resolusi Akselerometer	$\pm 2g, \pm 4g, \pm 8g, \pm 16g$ (dapat dipilih)

Komponen	Spesifikasi
Resolusi Gyroscope	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ °/s
Akurasi Sensor	$\sim \pm 0.01$ g (akselerasi), $\sim \pm 0.1$ °/s (rotasi)

2.2.17 Driver Motor

Driver Motor adalah rangkaian elektronik yang digunakan untuk mengendalikan arah dan kecepatan putaran motor DC melalui sinyal logika dari mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi [25]. Salah satu prinsip kerja utamanya adalah penggunaan rangkaian H-bridge, yang memungkinkan arus listrik mengalir dalam dua arah berbeda pada motor, sehingga dapat membalik arah rotasinya. Selain itu, driver motor juga dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor melalui PWM (*Pulse Width Modulation*), di mana sinyal pulsa dikontrol untuk menyesuaikan daya yang masuk ke motor.



Gambar 2.11 Driver Motor

Sumber : [18]

Salah satu driver yang paling populer dalam proyek mikrokontroler adalah L298N, yang merupakan *dual full-bridge driver* berbasis transistor dan dapat mengendalikan dua motor DC secara simultan. Driver ini biasanya dilengkapi dengan dioda *flyback* untuk melindungi sirkuit dari arus balik motor dan regulator tegangan internal. Driver motor sangat penting dalam sistem otomasi dan robotika karena memungkinkan mikrokontroler dengan arus kecil mengendalikan beban tinggi dengan aman.

Tabel 2.6 Spesifikasi Driver Motor

Komponen	Spesifikasi
Tegangan Operasi Motor	5V – 35V DC
Tegangan Operasi Logika	5V
Arus Maksimum Per Kanal	2A
Jumlah Kanal	2 (Dual H-Bridge)
Frekuensi PWM Maksimum	40–50 kHz
Proteksi Arus Balik	Ya (internal flyback diodes)
Interface	TTL (EN, IN1, IN2, dsb.)
Dimensi Modul	±43 mm x 43 mm
Fitur Tambahan	Regulator 5V internal (dapat diaktifkan/dinonaktifkan)
Kompatibilitas	Arduino, Raspberry Pi, ESP32, dsb.

2.2.18 Relay Dual Channel

Relay module dua kanal (*dual channel*) adalah perangkat elektronik berbasis saklar elektromekanis yang memungkinkan mikrokontroler seperti Arduino, Raspberry Pi, dan ESP32 untuk mengontrol beban listrik AC atau DC dengan tegangan dan arus tinggi. Relay bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus kecil pada kumparan relay akan menghasilkan medan magnet untuk menutup atau membuka kontak saklar internal [26]. Modul ini dirancang untuk mengisolasi sirkuit kendali rendah (5V atau 3.3V) dari beban tinggi seperti motor AC, lampu, pompa, dan peralatan rumah tangga lainnya.



Gambar 2.12 Relay Dual Channel

Sumber : [18]

Dual relay module umumnya memiliki dua rel independen yang dapat dikontrol secara terpisah, lengkap dengan driver transistor, dioda proteksi, LED indikator, dan optoisolator untuk mencegah gangguan tegangan balik yang dapat merusak mikrokontroler. Karena kemampuannya mengendalikan beban besar dan kompatibilitasnya dengan sistem mikrokontroler, relay ini sering digunakan dalam proyek otomatisasi rumah, sistem irigasi otomatis, dan kontrol robotika industri.

Tabel 2.7 Spesifikasi Relay Dual Channel

Komponen	Spesifikasi Umum
Tegangan Operasi Logika	3.3V – 5V DC (TTL Level)
Tegangan Beban Maksimum	250V AC / 30V DC
Arus Beban Maksimum	10A

2.2.19 Water Pump

Pompa air DC adalah perangkat elektromekanik yang digunakan untuk mengalirkan air dengan sumber energi DC (*Direct Current*) [27]. Pompa ini bekerja dengan prinsip perputaran impeller atau rotor yang digerakkan oleh motor DC, menciptakan perbedaan tekanan dan menyebabkan air mengalir dari sisi *input* ke *output*. Jenis pompa ini banyak digunakan dalam sistem otomatisasi seperti sistem penyiraman tanaman, sistem pendingin, dan robot pembersih, karena sederhana dan kompatibel dengan sumber daya rendah seperti baterai atau *output* mikrokontroler.



Gambar 2.13 Water Pump

Sumber : [18]

Dalam sistem *embedded*, pompa air DC biasanya dikendalikan menggunakan transistor *switching* atau modul relay, dan dapat digabungkan dengan sensor level air, sensor kelembaban tanah, atau timer berbasis mikrokontroler (Arduino, Raspberry Pi). Keunggulannya termasuk ukuran kecil, biaya murah, dan mudah diintegrasikan. Penggunaan pompa ini banyak dijumpai pada robot pembersih panel surya otomatis dan sistem irigasi berbasis.

Tabel 2.8 Spesifikasi Water Pump

Komponen	Spesifikasi Umum
Tegangan Operasi	12V DC
Arus Operasi	320 mA
Kapasitas Aliran	1 – 3 liter/menit
Tekanan Maksimum	0.5 bar
Diameter Lubang Pompa	6.5 mm

2.2.20 *Buck Converter* LM2596

Buck converter berbasis IC LM2596 merupakan sebuah modul sirkuit terpadu yang secara khusus difungsikan sebagai penurun tegangan arus searah (step-down DC converter) dengan kemampuan mengalirkan arus keluaran maksimum hingga 3A [28]. Prinsip kerja dari modul ini

didasarkan pada mekanisme pensaklaran (switching) berfrekuensi tinggi, di mana komponen saklar elektronik internal membuka dan menutup aliran arus secara bergantian dan sangat cepat. Pada saat saklar dalam kondisi tertutup (ON), energi dari sumber tegangan masuk akan disimpan di dalam induktor sekaligus diteruskan ke rangkaian beban. Sebaliknya, ketika saklar terbuka (OFF), energi magnetik yang sebelumnya tersimpan pada induktor tersebut dilepaskan untuk menjaga agar arus keluaran tetap stabil mengalir ke beban. Proses ini turut dibantu oleh kapasitor yang berfungsi menyaring riak (ripple) tegangan dan dioda sebagai jalur arus bebas, sehingga modul LM2596 mampu menurunkan level tegangan dengan tingkat efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan regulator linier konvensional.



Gambar 2.14 *Buck Converter LM2596*

Sumber : [28]

Dalam perancangan tugas akhir ini, modul buck converter LM2596 memiliki peran yang esensial dalam sistem distribusi catu daya kelistrikan robot. Modul ini dimanfaatkan secara spesifik untuk menurunkan tegangan sumber utama yang berasal dari baterai 12V menjadi tegangan keluaran yang stabil di level 5V. Penurunan tegangan ini mutlak diperlukan untuk memenuhi spesifikasi daya operasional komponen kendali tingkat rendah, khususnya mikrokontroler Arduino Mega 2560 Mini, beserta sensor-sensor pendukung lainnya agar dapat bekerja secara optimal dan aman dari risiko kerusakan akibat tegangan berlebih (overvoltage). Adapun bentuk fisik dari modul penurun tegangan ini dapat dilihat pada Gambar 2.14 buck converter

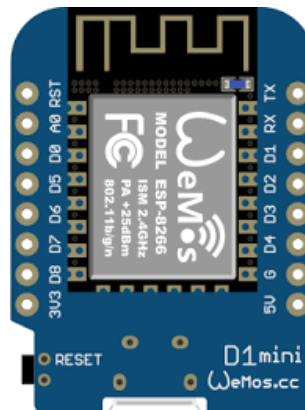
LM2596, sementara penjabaran detail teknis mengenai kemampuan kerjanya disajikan secara lengkap pada Tabel 2.12 spesifikasi buck converter LM2596.

Tabel 2.9 Spesifikasi *Buck Converter* LM2596

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Masukan	3VDC – 40VDC
Tegangan Keluaran	1.5 VDC – 35VDC
Arus Keluaran Maksimal	3 A
Frekuensi	150 KHz
Tegangan Masukan	3VDC – 40VDC

2.2.19 Wemos D1 Mini

Wemos D1 Mini merupakan papan mikrokontroler ringkas yang terintegrasi penuh dengan modul komunikasi nirkabel berbasis cip ESP8266 [29]. Prinsip kerja dari perangkat ini bertumpu pada kemampuannya sebagai System on Chip (SoC) yang menggabungkan unit komputasi mikro dengan perangkat transceiver Wi-Fi dalam satu modul berukuran kecil. Secara operasional, Wemos D1 Mini mampu terhubung ke jaringan wireless (mode Station) maupun bertindak sebagai titik akses (mode Access Point) untuk memfasilitasi pertukaran data melalui protokol TCP/IP. Mikrokontroler ini menerima instruksi atau membaca data melalui pin Input/Output (I/O) yang dimilikinya, memprosesnya di dalam flash memory internal, dan mentransmisikan informasi tersebut secara nirkabel secara *real-time*. Berkat ukurannya yang efisien serta kompatibilitasnya dengan lingkungan pemrograman Arduino IDE, modul ini menjadi standar yang andal untuk pengembangan perangkat cerdas berbasis Internet of Things (IoT).



Gambar 2.15 Wemos D1 Mini

Sumber : [29]

Pada perancangan tugas akhir ini, Wemos D1 Mini memegang peran krusial sebagai jembatan komunikasi data (communication bridge) antara unit pemrosesan visual dan unit pengendali mekanis. Modul ini difungsikan secara spesifik untuk menghubungkan mikrokontroler Arduino Mega 2560 Mini dengan Raspberry Pi 4. Proses kerjanya berlangsung ketika instruksi hasil klasifikasi citra dari Raspberry Pi 4 dipancarkan secara nirkabel melalui jaringan WiFi menuju Wemos D1 Mini. Modul Wemos kemudian menangkap paket data tersebut dan meneruskannya secara langsung ke Arduino Mega melalui jalur komunikasi serial (UART) agar dapat segera dieksekusi oleh aktuator penggerak robot pembersih. Bentuk fisik dari modul mikrokontroler komunikasi ini dapat dilihat secara jelas pada Gambar 2.15 wemos D1 mini, sedangkan rincian parameter teknis dan batas operasional perangkat disajikan secara komprehensif pada Tabel 2.13 spesifikasi wemos D1 mini.

Tabel 2.10 Spesifikasi Wemos D1 Mini

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Masukan	3.3 VDC
Digital I/O	11

Spesifikasi	Keterangan
Analog Input	1
Kecepatan Clock	80/160MHz
Flash	4M Bytes

2.2.20 Baterai

Baterai merupakan suatu komponen penyimpan energi yang tersusun atas satu maupun beberapa sel elektrokimia, dilengkapi dengan terminal koneksi eksternal yang secara khusus difungsikan untuk menyuplai daya kelistrikan pada berbagai perangkat elektronik, mulai dari peralatan portabel hingga kendaraan listrik [30]. Salah satu jenis baterai tingkat lanjut yang umum digunakan dalam sistem embedded adalah baterai Lithium Polymer (LiPo). Prinsip kerja baterai LiPo didasarkan pada pergerakan ion litium di antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda) yang difasilitasi oleh media elektrolit berupa polimer padat atau gel. Pada saat sistem digunakan atau terjadi proses pengosongan daya (discharging), ion litium bergerak dari anoda menuju katoda sehingga menghasilkan aliran arus listrik yang menggerakkan perangkat. Sebaliknya, ketika dilakukan pengisian daya (charging), energi listrik dari luar akan mendorong ion litium kembali ke anoda, sehingga energi di dalam sel elektrokimia tersebut kembali terisi dan siap digunakan ulang.



Gambar 2.16 Baterai

Sumber : [30]

Dalam perancangan tugas akhir ini, baterai LiPo difungsikan sebagai sumber catu daya kelistrikan utama (main power source) yang menghidupkan keseluruhan sistem robot pembersih panel surya. Pemilihan baterai LiPo didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki rasio kepadatan energi tinggi terhadap bobotnya (high energy-to-weight ratio) serta kemampuannya mengalirkan lonjakan arus yang besar (high discharge rate). Kapasitas ini sangat ideal untuk mengakomodasi dan menggerakkan aktuator berbeban mekanis tinggi secara stabil, seperti driver motor, motor DC penggerak roda, sikat pembersih, hingga modul pompa air (water pump), tanpa memberatkan bobot keseluruhan robot. Bentuk fisik dari sumber tegangan ini dapat dilihat secara jelas pada Gambar 2.16 baterai, sementara rincian kapasitas daya, parameter tegangan, dan batas operasionalnya disajikan secara komprehensif pada Tabel 2.14 spesifikasi baterai.

Tabel 2.11 Spesifikasi Baterai

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan Keluaran	12 VDC
Kapasitas	2800 mAH
Sel	3S
Discharge Rate	30C
Daya	31.1 Wh

2.2.21 Buzzer

Buzzer adalah komponen elektronik yang digunakan sebagai perangkat pemberi sinyal suara dalam berbagai sistem elektronik dan embedded. *Buzzer* dapat berupa mekanis, elektromekanis, atau piezoelektrik, dengan yang terakhir menjadi jenis paling umum dalam

sistem mikrokontroler modern. Prinsip kerja piezo *buzzer* adalah berdasarkan efek piezoelektrik, di mana material piezo akan bergetar dan menghasilkan gelombang suara ketika diberi sinyal listrik berfrekuensi tertentu [31].



Gambar 2.17 *Buzzer*

Sumber : [18]

Buzzer digunakan secara luas dalam sistem peringatan atau notifikasi, seperti alarm keamanan, sistem deteksi kebocoran gas, detektor suhu tinggi, dan sistem berbasis sensor lainnya. Dalam proyek mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi, *buzzer* dapat dikendalikan secara langsung menggunakan *output* digital dengan pulsa frekuensi tertentu (PWM) untuk mengatur nada suara. Keunggulannya adalah konsumsi daya rendah, mudah dikendalikan, dan menghasilkan respons suara yang cepat.

Tabel 2.12 Spesifikasi *Buzzer*

Komponen	Spesifikasi
Tegangan Operasional	5V DC
Arus Operasional	15 mA
Frekuensi Resonansi	3300 Hz
Level Suara <i>Output</i>	85 dB