

BAB II DASAR TEORI

Bab ini membahas landasan teoritis yang menjadi acuan dalam penelitian Rancang Bangun Robot Penyemprot Herbisida Berbasis *Computer Vision* menggunakan *Deep Learning* untuk efisiensi pengendalian gulma di Pertanian.

2.1 Tinjauan Pustaka

Seperti yang telah disebut pada latar belakang, penelitian ini juga mengambil referensi dari berapa penelitian sebelumnya dengan tujuan yang sama. Penelitian ini mengambil algoritma YOLO sebagai deteksi tanaman, paralel dengan penelitian "*Field-based multispecies weed and crop detection using ground robots and advanced YOLO models: A data and model-centric approach*" [10]. Mengangkat topik tentang implementasi *computer vision* pada pertanian dan pengembangan dari robot penyemprot pintar. Penelitian ini fokus pada data akuisisi dan performa YOLO dalam mendeteksi tanaman pertanian dengan gulma.

Penelitian robot pertanian dalam menangani isu gulma menggunakan beberapa cara dalam mengeliminasi gulma. Dari berbagai penanganan selektif terhadap gulma, salah satunya ada penelitian "*Laser Weeding Technology in Cropping Systems: A Comprehensive Review*" [9]. Penelitian ini menggunakan laser untuk mengeliminasi gulma. Pendekatan ini menghasilkan sebuah alat pengendali gulma selektif dengan presisi dan efisiensi yang tinggi namun dengan *trade off* konsumsi energi yang tinggi. Tergantung dengan tipe laser yang digunakan, *range* konsumsi daya yang diperlukan untuk sistem ini berada di nilai 45-100W.

Metode pengendali gulma dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, dari mekanis sampai kimia. "*An Autonomous Pesticide Sprayer Robot with a Color-based Vision System*" [8] mengangkat masalah yang sama tentang penyelesaian permasalahan agrikultur melibatkan otomatisasi penyemprotan bahan kimia, kali ini dengan pendekatan berbasis warna untuk mendeteksi tanaman. Metode ini memungkinkan alat untuk penyemprot gulma dengan otomatis, namun pendekatan

ini juga beresiko menyemprot tanaman utama pada kebun tersebut dalam prosesnya.

Dari tinjauan pustaka yang ada peneliti mengambil referensi dari penelitian sebelumnya untuk membangun robot penyemprot herbisida pada penelitian ini. Fokus dari penelitian ini disusun dari deteksi objek dengan pendekatan *deep learning* menggunakan YOLO, penyemprotan gulma dengan modul *pan-tilt* servo serta rancang bangun gerak robot pada medan pertanian.

2.2 Deteksi Objek dengan pendekatan *Deep Learning*

Deteksi Objek merupakan salah satu cabang *computer vision* yang bertujuan mengidentifikasi dan melokalisasi objek di dalam sebuah citra. Dalam pendekatan *deep learning*, untuk mengekstrak objek pada citra dimanfaatkan pendekatan *Convolutional Neural Network* (CNN) dengan arsitektural seperti *Reginal-Based CNN* (R-CNN), *Single Shot MultiBox Detector* (SSD), dan *You Only Look Once* (YOLO). Setiap arsitektur ini memproduksi nilai *bounding box* yang mengidentifikasi lokasi objek pada citra serta *ground truth* sebagai lokasi objek sebenarnya. Kedua nilai ini melahirkan satuan evaluasi dalam algoritma deteksi objek yang biasa disebut dengan *Intersection Over Union* (IoU) [11]. Persamaan dari IoU bisa ditulis dengan :

$$IoU = \frac{|Predicted\ Box \cap Ground\ Truth|}{|Predicted\ Box \cup Ground\ Truth|} \quad 2.1$$

Persamaan IoU akan menghasilkan nilai antara 0 hingga 1 yang menghasilkan kategori hasil pembacaan deteksi objek. Kategori ini dibagi menjadi berikut :

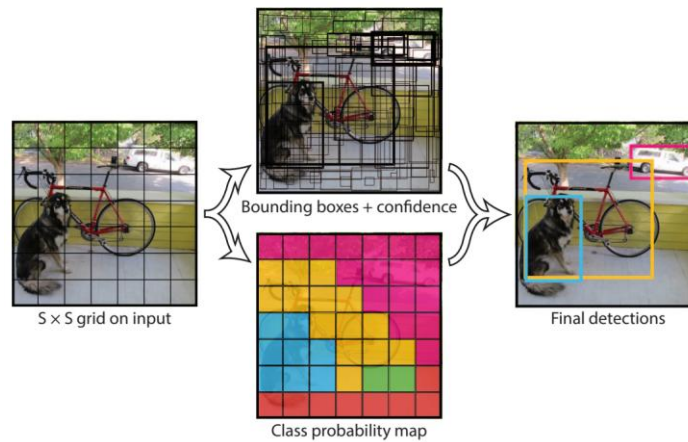
1. *True Positive* (TP) merepresentasikan kondisi dimana *bounding box* sesuai dengan *ground truth* dan nilai IoU lebih besar dengan *threshold* keberhasilan.
2. *False Positive* (FP) merepresentasikan kondisi dimana *bounding box* tidak memiliki pasangan *ground truth* atau nilai IoU lebih kecil dari *threshold*.

3. *False Negative* (FN) merepresentasikan kondisi di mana *ground truth* tidak terdeteksi karena tidak ada prediksi yang memiliki nilai IoU melebihi *threshold*.
4. *True Positive* (TN) tidak secara eksplisit direpresentasikan dalam deteksi objek karena area latar belakang tanpa objek umumnya tidak dihitung sebagai bagian dari evaluasi.

Pada penelitian robot penyemprot herbisida ini, pendekatan deteksi objek menggunakan *deep learning* akan dilakukan menggunakan CNN dengan arsitektur *You Only Look Once* (YOLO).

2.2.1 Algoritma YOLO

You Only Look Once (YOLO) adalah algoritma *object detection real-time* yang bekerja dengan menggabungkan proses klasifikasi dan lokalisasi dalam satu tahap komputasi. Perbedaan YOLO dengan algoritma *object detection* seperti RCNN adalah pendekatan YOLO yang meninggalkan pendekatan “*region candidate + regression*” dimana umumnya pendekatan ini melalui dua tahap, yaitu proses deteksi dengan menghasilkan sejumlah kandidat wilayah objek (*region proposals*) melalui algoritma seperti *Selective Search*, lalu dilakukan klasifikasi dan regresi *bounding box* pada setiap proposal tersebut. Sebaliknya YOLO melakukan pendekatan lain dengan membagi gambar menjadi beberapa *grid* dimana setiap *grid cell* secara langsung memprediksi posisi *bounding box*, *confidence score*, dan kelas objek. Tanpa tahap proposal wilayah eksplisit, seluruh prediksi dilakukan secara *end-to-end* oleh satu jaringan konvolusional [12].

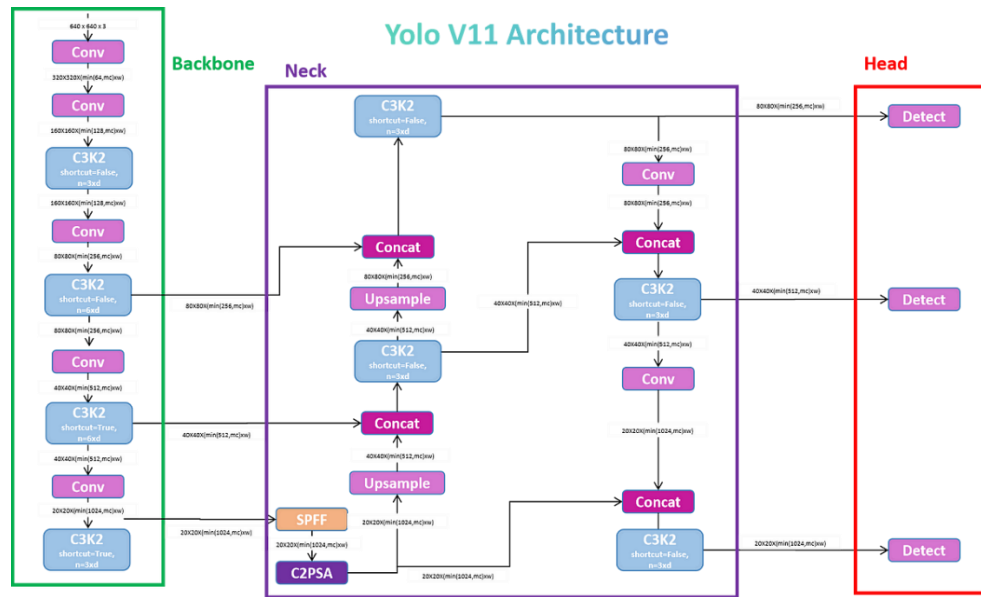


Gambar 2.1 Proses deteksi objek algoritma YOLO [13]

Setiap bounding box berisi lima nilai yang diprediksi yaitu x dan y koordinat yang mewakili koordinat posisi, w dan h yang mewakili lebar dan tinggi serta *Confidence Score* [13]. Hal inilah yang membuat YOLO dapat berjalan dengan efisien dimana YOLO mengubah object detection sebagai masalah klasifikasi+lokalisasi menjadi satu masalah regresi besar.

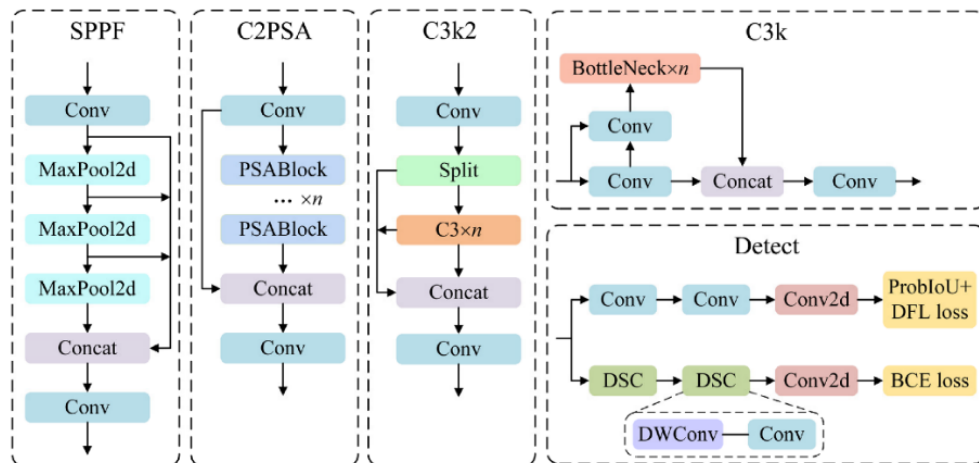
2.2.2 YOLOv11n

Algoritma YOLOv11 merupakan evolusi dari algoritma YOLO yang rilis pada tahun 2024 berada satu generasi diatas versi YOLOv10 yang rilis di tahun yang sama. Seperti pendahulunya YOLOv11 menyediakan kemampuan deteksi objek secara real-time. YOLOv11 memiliki fitur *object detection*, *instance segmentation*, *image classification*, *pose estimation*, *oriented object detection* dan *object tracking* dengan peningkatan dari versi sebelumnya yaitu komputasi yang lebih efisien, peningkatan performa, dan peningkatan akurasi dengan parameter yang lebih sedikit [14].



Gambar 2.2 Arsitektur YOLOv11n [15]

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, pada dasarnya arsitektur YOLO terdiri dari tiga komponen meliputi *backbone*, *neck*, dan *head*. Didalam susunan pondasi yang telah dibangun sejak YOLOv8 ini, YOLO11 menyediakan optimasi baru yang dibawakan melalui 3 blok baru meliputi, *Spatial Pyramid Pooling - Fast (SPPF)*, *Cross Stage Partial with Spatial Attention (C2PSA)*, dan C3K2 block [16].



Gambar 2.3. Blok optimasi YOLOv11 [16]

2.2.3 Evaluasi Performa *Object Detection*

Untuk mengetahui performa dan mengevaluasi kapabilitas dari suatu model *object detection*, digunakan nilai matriks *precision*, *recall*, *mean Average Precision* (mAP) serta metode evaluasi klasifikasi *confusion matrix* untuk mengetahui nilai akurasi dan performa klasifikasi dari suatu model [17][18]. *Confusion matrix* berbentuk sebuah tabel matrix yang berisi klasifikasi yang menggambarkan prediksi yang dihasilkan model dengan ground truth. Menurut metode ini untuk menghitung tingkat akurasi dan mengetahui performa model dibutuhkan nilai *True Positive (TP)*, *True Negative (TN)*, *False Positive (FP)*, *False Negative (FN)*. Parameter ini digambarkan kedalam sebuah tabel matrix seperti yang tunjukan pada Gambar 2.4.

		Actual Values	
		Positive (1)	Negative (0)
Predicted Values	Positive (1)	TP	FP
	Negative (0)	FN	TN

Gambar 2.4 Tabel confusion matrix [19]

Untuk mengetahui performa sebuah model, dibutuhkan persamaan untuk mengetahui nilai mAP, *precision*, *recall*, dan *F1-score*. Persamaan dari nilai-nilai tersebut meliputi:

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (2.2)$$

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (2.3)$$

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (2.4)$$

Persamaan diatas kemudian digunakan untuk menghitung nilai *Mean Average Precision* (mAP). Nilai mAP menjadi penting karena nilai ini menjadi standar umum yang digunakan untuk menilai peforma dari model sebuah objek deteksi. Nilai mAP sendiri didapat dari menghitung rata-rata nilai *Average Percision* (AP). Nilai AP didapat dari nilai area dibawah kurva *precision-recall* yang dihitung menggunakan integral [19]. mAP dapat didefinisikan sebagai :

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \int_0^1 p_i(r) dr \quad (2.5)$$

Dimana nilai N adalah jumlah kelas, nilai $p_i(r)$ adalah fungsi precision terhadap recall untuk kelas i. Nilai mAP inilah yang akan menjadi pembanding akhir dan kerangka dalam evaluasi kuantitatif untuk mengukur efektifitas sebuah model.

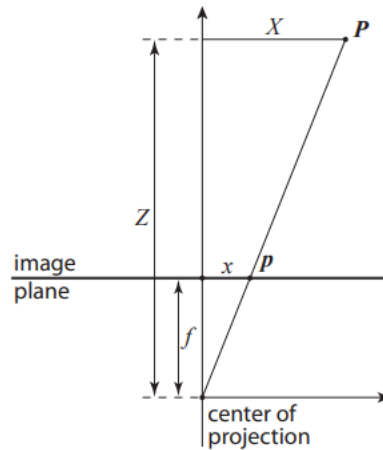
2.3 Penyemprotan Gulma dengan modul *pan-tilt* Servo

Pada penelitian ini, penyemprotan gulma dilakukan oleh *nozzle* penyemprot yang dikendalikan oleh dua servo dengan modul *pan-tilt* dengan dua servo untuk merubah proyeksi titik penyemprotan. Untuk melakukan penyemprotan diperlukan dilakukannya dua tahap yaitu pencarian koordinat gulma di lapangan pada gambar 2 dimensi serta penyemprotan gulma yang dilakukan dengan menggerakkan *nozzle* penyemprot pada modul *pan-tilt* servo ke posisi gulma untuk menembakan cairan herbisida.

2.3.1 Koordinat gulma pada kamera (2 dimensi) terhadap koordinat gulma pada lahan pertanian (3 dimensi)

Untuk mendapatkan koordinat gulma pada sebuah gambar dilakukan pendekatan menggunakan *pinhole camera model* yang menggambarkan titik

3 dimensi di koordinat asli gulma atau 3 dimensi yang dilambangkan dengan $P = (X, Y, Z)$, terproyeksi pada gambar atau 2 dimensi yang dilambangkan dengan $p = (\xi, \eta)$ [20].



Gambar 2.5. Proyeksi posisi objek pada gambar dan koordinat asli gulma [20]

Persamaan ini kemudian diturunkan menjadi sebuah perbandingan seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2.5 Dimana pada nilai ortogonal X dan Z memiliki kemiripan dengan segitiga yang memiliki sisi ortogonal x dan f yang melambangkan jarak fokus. Oleh karena itu berlaku:

$$\frac{X}{Z} = \frac{x}{f} \quad (2.6)$$

Demikian juga, untuk koordinat y , diperoleh:

$$\frac{Y}{Z} = \frac{y}{f} \quad (2.7)$$

Yang memberikan kesimpulan hubungan titik 3 dimensi dengan nilai $P = (X, Y, Z)$ pada 2 dimensi dengan nilai $p = (\xi, \eta)$ serta mempertimbangkan titik tengah gambar sebagai (c_x, c_y) , dengan begitu berlaku:

$$\xi = f_x \cdot \frac{X}{Z} + c_x \text{ dan } \eta = f_y \cdot \frac{Y}{Z} + c_y \quad (2.8)$$

Keterangan:

X, Y, Z = posisi objek di ruang 3 dimensi dalam milimeter

x, y = posisi objek di ruang 2 dimensi

f = nilai fokus kamera

ξ, η = posisi objek di bidang gambar dalam piksel

2.3.2 Mapping gerakan *pan and tilt* servo ke koordinat gulma

Pan-tilt servo merupakan modul aktuator pada penelitian ini yang dibangun dari 2 yang memungkinkan servo bergerak secara vertikal dan horizontal (2 *Degree of Freedom*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Modul *Pan-Tilt* Servo [21]

Untuk menggerakkan kedua servo ke arah koordinat gulma yang telah ditentukan dilakukan pendekatan trigonometri invers ruang 3 dimensi dengan \tan untuk menemukan sudut horizontal dengan nilai θ_{pan} dan vertikal dengan nilai θ_{tilt} [21]. Pada sudut horizontal berlaku:

$$\theta_{pan} = \tan^{-1}\left(\frac{x}{z}\right) \quad (2.9)$$

Pada elevasi vertikal nilai y dihitung dari bidang horizontal x dan z terhadap arah vertikal sehingga berlaku:

$$\theta_{tilt} = \operatorname{atan}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) \quad (2.10)$$

2.3.3 Evaluasi gerakan pan and tilt servo ke koordinat gulma

Untuk menilai ketepatan dari proses penyemprotan, sebelum mengimplementasikannya ke tanaman, pengujian akan dilakukan pada bidang datar bergaris (grid) dengan koordinat yang telah diketahui (satu kotak merepresentasikan 1cm). Akurasi sistem dihitung menggunakan *Euclidean Distance*, yang merepresentasikan jarak antara posisi target dan posisi aktual laser pada bidang dua dimensi [22]. Rumus error untuk setiap titik uji adalah:

$$e_i = \sqrt{(X_{t,i} - X_{l,i})^2 + (Y_{t,i} - Y_{l,i})^2} \quad (2.11)$$

Keterangan :

(Xi, Yi) = koordinat target ideal secara matematis

(Xl, Yl): koordinat aktual yang terukur pada bidang uji

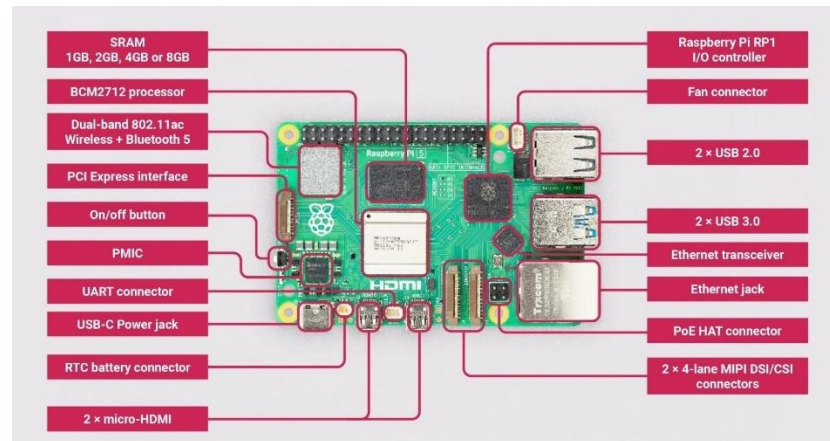
2.4 Komponen Pembangun Robot

2.4.1 Raspberry Pi 5

Raspberry Pi merupakan sebuah komputer tunggal atau single-board computer (SBC) yang di kembangkan oleh Raspberry Pi Fondation di UK pada tahun 2012. Raspberry Pi berjalan sebagaimana komputer pada umumnya yang penggunaannya ditujukan untuk hal-hal seperti penggunaan perkantoran, permainan komputer, memainkan musik atau bahkan memutar video dengan resolusi yang tinggi [23].

Secara komersil Raspberry Pi dirilis dengan beberapa jenis model board demi memenuhi kebutuhan pengguna yang beragam. Model-model ini diantaranya model Zero, ZeroW, ZeroWH, A/A+, 3B/3B+, 4B, 400 [24]. Selain keluar dalam berbagai model, Raspberry Pi juga rilis dalam beberapa generasi. Setiap generasi memiliki spesifikasi yang berbeda, dimana saat

laporan ini ditulis Raspberry Pi generasi terbaru yaitu Raspberry Pi 5 ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Papan Raspberry Pi 5 [23]

Raspberry Pi 5 merupakan perkembangan dari generasi sebelumnya, Raspberry Pi 4 model B. Sebagai versi yang lebih baru dari generasi sebelumnya, Raspberry Pi 5 dilengkapi dengan peningkatan performa dan fitur pada perangkat kerasnya. Diklaim bahwa Raspberry Pi 5 memiliki performa 2 hingga 3 kali lipat dari generasi 4. Beberapa hal yang menonjol dari Raspberry Pi 5 meliputi varian RAM dengan opsi 4GB dan 8GB LPDDR4X. SoC yang digunakan berbasis ARM Cortex-A76 dengan kecepatan 2.4GHz serta GPU VideoCore VII yang mampu berjalan pada kecepatan 800MHz.

Raspberry Pi 5 sebagai SBC memiliki spesifikasi yang memadahi dalam penggunaannya sebagai komponen dari proyek rancang bangun robot penyemprot herbisida. Spesifikasi detail Raspberry Pi 5 ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Raspberry Pi 5

Subjek	Spesifikasi
SoC	Broadcom BCM2712 SoC 2.4GHz quad-core 64-bit Arm Cortex-A76 CPU
CPU	4 Core
<i>Instruction set</i>	ARMv8-2
<i>Display</i>	800MHz VideoCore VII GPU
<i>L2 Cache</i>	2 MB
<i>L3 Cache</i>	2 MB
RAM	4/8 GB LPDDR4X
<i>SD Card</i>	Micro SD
GPIO	2 x 20 Pin
<i>USB Port</i>	2 x USB2 2 x USB3
Jaringan	Gigabit Ethernet port
Konektor	2 x MIPI Camera 2 x 4-Lane MIPI camera/Display PCIe 2.0 Interface UART Port RTC Clock power port Fan Power port
Wi-Fi/Bluetooth	802.11ac, Bluetooth 5/BLE
Tegangan kerja	5V/5A (optimal), USB C
Dimensi	85 x 56 mm

2.4.2 OpenCV

OpenCV adalah pustaka yang banyak digunakan dalam bidang pengolahan visi citra. OpenCV memungkinkan komputer untuk pengolahan, modifikasi, analisis, dan visualisasi gambar. Fungsi yang disediakan oleh OpenCV seperti pembacaan, konversi warna, deteksi tepi, hingga memanipulasi bentuk gambar seperti *resize* dan *crop* menjadikan OpenCV umum digunakan pada bidang computer vision [25]. Pengaplikasian OpenCV

pada penelitian robot penyemprot herbisida adalah sebagai pembangun utama sistem robot penyemprot herbisida dalam memproses gambar seperti orientasi gambar, *resize* dan *interface* pada gambar. OpenCV juga berfungsi untuk melakukan *image processing* demi mencapai hasil pembacaan objek yang optimal.

2.4.3 Raspbian OS

Raspbian OS adalah sebuah sistem operasi berbasis Debian yang didesain secara khusus untuk berjalan pada Raspberry Pi Microcontroller. Raspbian OS dikembangkan oleh Raspberry Pi Foundation menggunakan Python, Node.js dan C/C++ [26]. Raspbian OS memiliki varian 32 bit dan 64 bit. Pada proyek rancang bangun robot penyemprot herbisida digunakan varian Raspbian OS Bookworm 64 bit sebagai sistem operasi.

2.4.4 USB Webcam

Digunakan USB Webcam sebagai periperal input untuk menangkap gambar dan video dalam penelitian robot penyemprot herbisida. Webcam dilengkapi dengan interface USB dan mampu dioperasikan secara langsung tanpa melakukan instalasi driver tambahan.



Gambar 2.8 Modul USB Webcam

Webcam dilengkapi dengan fitur automatic low-light correction dan kompatibel dengan berbagai sistem operasi. Pada implementasinya Webcam akan terhubung dengan Raspberry Pi 5 secara langsung menggunakan konektor USB 2.0. Berikut merupakan spesifikasi dari Webcam yang akan digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi Webcam

Subjek	Spesifikasi
Resolusi	1280 x 720
<i>Interface</i>	USB 2.0
<i>Field Angle</i>	150°
Kompatibel OS	Windows / Linux / Mac
Dimensi	95 x 53.5 x 42mm

2.4.5 Python

Python merupakan salah satu bahasa pemrograman yang termasuk dalam bahasa pemrograman tingkat tinggi. Dirancang oleh Guido van Rossum dan rilis pada tahun 1991, Python dirancang dengan filosofi yang menekankan keterbacaan kode dan sintaks yang bersih [27]. Python diklaim menjadi salah satu bahasa pemrograman yang paling populer di dunia. Python juga menjadi bahasa pemrograman yang sering digunakan dalam pengembangan *machine learning* berkat ekosistem pengembangan Python dan dukungan komunitas dunia yang membuat Python mampu menyediakan banyak pustaka. Hal ini sangat membantu dalam pengembangan machine learning yang memiliki logika yang kompleks. Pada penelitian robot penyemprot herbisida Python akan digunakan sebagai bahasa pemrograman utama yang akan menjalankan algoritma pada Raspberry Pi seperti OpenCV dan YOLO.

2.4.6 Google Colaboratory

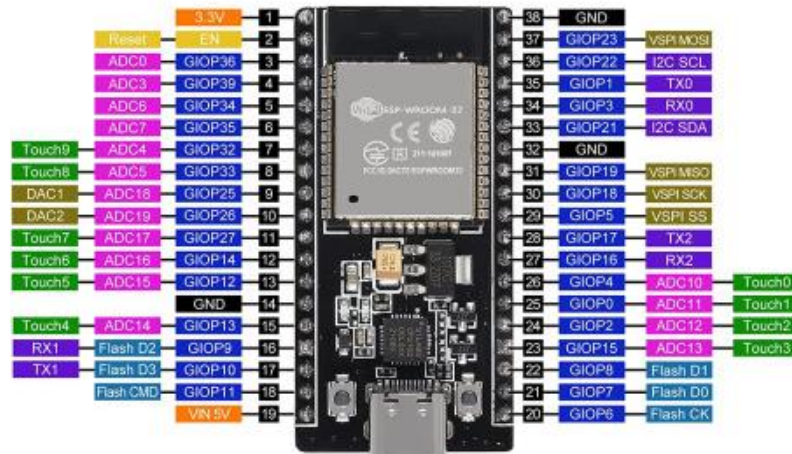
Google Colabotary atau biasa disebut dengan google colab merupakan sebuah layanan cloud computing yang disediakan oleh Google Research. Layanan yang disediakan google colab antara lain memungkinkan pengguna menulis dan mengeksekusi kode Python arbitrer melalui browser. Colab merupakan layanan notebook JupYier yang dihosting dan dapat digunakan tanpa penyiapan, serta menyediakan akses gratis ke resource komputasi termasuk GPU [28]. Layanan ini akan digunakan pada penelitian robot penyemprot herbisida untuk melakukan proses training dataset algoritma object detection.

2.4.7 Roboflow

Roboflow merupakan layanan pengelolaan dan pengolahan dataset komprehensif berbasis *website* yang dimanfaatkan dalam pengembangan model *computer vision* [29]. Roboflow memberikan fungsi seperti *data labeling, pre-process data, model training, dan model deployment* untuk membantu penggunaanya dalam mengembangkan model. Pada penelitian ini Roboflow berperan dalam pengembangan model YOLO berupa manajemen dataset dan pemrosesan dataset dan *version management* sebelum dilakukannya proses *training* data pada google colab. Pemrosesan ini diharapkan dapat memberikan model yang lebih akurat dan responsif.

2.4.8 ESP32

ESP32 adalah modul *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems bergerak dengan kombinasi chip *single* 2.4 GHz Wi-Fi dan Bluetooth [30]. ESP32 banyak digunakan pada proyek Internet of Things (IoT) karena integrasinya pada fitur komunikasi nirkabel. Bentuk dari ESP32 dapat dilihat melalui Gambar 2.9. Pada penelitian ini ESP32 digunakan sebagai komponen yang berperan untuk menggerakkan setiap komponen penggerak robot.



Gambar 2. 9. Modul papan ESP32 [30]

Ditunjukkan pada Gambar 2.9, modul papan ESP32 dipilih karena spesifikasi dari papan ini yang memiliki jumlah pin yang memadai untuk penelitian ini. Disisi lain papan ESP32 juga memiliki spesifikasi *hardware* sebagaimana yang disebutkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3. Spesifikasi ESP32

Subjek	Spesifikasi
CPU	Dual-core 240 MHz
RAM	~520 KB SRAM
Flash	4 MB SPI Flash
Wi-Fi	2.4 GHz 802.11 b/g/n
Bluetooth	v4.2 + BLE
GPIO	34 pin
ADC	12-bit
UART	3 port
<i>Power Supply</i>	2.2V – 3.6V

2.4.9 MG996R Servo Motor

Servo motor adalah salah satu jenis elektromotor yang memiliki kemampuan untuk mengendalikan posisi sudut (shaft), kecepatan, dan

percepatan secara presisi. Shaft pada servo motor dapat diputar ke sudut tertentu dengan kecepatan yang dikendalikan sesuai kebutuhan aplikasi [31]. Servo motor diproduksi dalam berbagai jenis dan seri untuk memenuhi setiap kebutuhan, dimana untuk kebutuhan penelitian penyemprot herbisida, servo MG996R digunakan sebagai salah satu aktuatornya. Bentuk dari servo motor MG996R dapat dilihat melalui Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Modul MG996 Servo Motor [31].

Digunakan servo motor MG996R dikarenakan seri ini adalah improvisasi dari seri sebelumnya (MG995) serta diyakini dapat mencapai torsi sekitar 10 kgf cm. Spesifikasi lain dari jenis motor servo ini ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi MG996 Motor Servo

Subjek	Spesifikasi
<i>Weight</i>	55 g
<i>Dimension</i>	40.7 x 19.7 x 42.9 mm <i>approx.</i>
<i>Stall torque:</i>	.4 kgf cm (4.8V), 11 kgf cm (6V) ^o
<i>Operating speed</i>	0.17s/60 ^o (4.8 V), 0.14 s/60 ^o (6 V)
<i>Operating voltage</i>	4.8V – 7.2V
<i>Running Current</i>	500mA – 900mA (6V)
<i>Stall Current</i>	2.5A (6V)
<i>Dead band width</i>	5 μ s
<i>Temperature range</i>	0 $^{\circ}$ C – 55 $^{\circ}$ C

2.4.10 PCA9685 Servo Driver

Modul PCA9685 16-Channel PWM Servo Driver merupakan driver berbasis I2C yang dirancang untuk mengontrol hingga 16 perangkat PWM secara independen seperti servo motor. Komunikasi dengan mikrokontroler dilakukan melalui antarmuka I2C, memungkinkan penggunaan hanya dua pin kontrol (SDA dan SCL). Bentuk dari servo motor PCA9685 dapat dilihat melalui Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Modul PCA9685

Modul PCA9685 digunakan dalam aplikasi robotika dan sistem kontrol multi-servo karena mampu menghasilkan sinyal PWM 12-bit secara presisi tanpa membebani mikrokontroler utama. Spesifikasi detail modul ini ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5. Spesifikasi Modul PCA9685

Subjek	Spesifikasi
Channel	16 Channel
Resolusi PWM	12-bit
Frekuensi PWM	24 Hz – 1526 Hz
<i>Communication Interface</i>	I2C
Tegangan Logika (VCC)	3.3V – 5V
Tegangan Catu Daya Servo	4.8V – 6V
Dimensi Modul	±60 mm × 25 mm

2.4.11 Pompa Air DC

Pompa air DC adalah jenis perangkat elektronik yang mampu memompa atau menyembrotkan fluida dari sumber ke *nozzle* output dengan tekanan yang lebih tinggi. Pompa air ini bekerja dengan memompa fluida menggunakan motor DC didalamnya. Bentuk dari motor Pompa air DC dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Modul Pompa air DC

Tujuan dari pemilihan pompa DC ini diharapkan dapat menyembrotkan cairan herbisida dari tanki ke tanaman gulma. Spesifikasi dan kapasitas dari pompa DC ini dapat dilihat pada Tabel 2.6.

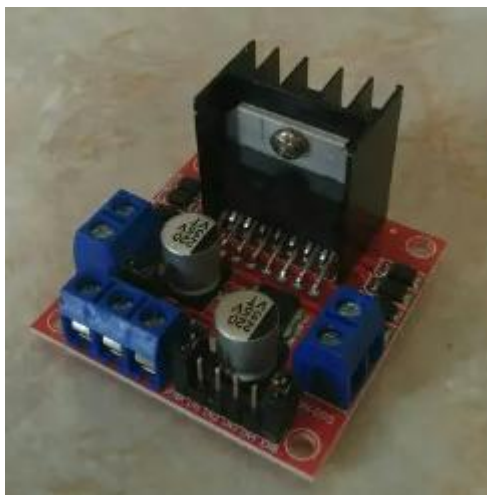
Tabel 2. 6 Spesifikasi Pompa Air DC

Subjek	Spesifikasi
Tegangan Nominal	12V DC
Arus Nominal	1.5A
<i>Litres per minute</i>	4 LPM
<i>Pressure</i>	90 psi auto cutoff
<i>Socket</i>	9MM Socket

2.4.12 L298N Motor Driver

Driver Motor merupakan perangkat elektronik yang berfungsi mengendalikan gerakan motor listrik. Driver motor memungkinkan pengaturan kecepatan, arah putaran dan fungsi lain pada motor. Pada

penelitian robot penyemprot herbisida, digunakan L298N *Dual H-Bridge* Motor Driver untuk mengontrol motor DC yang ada pada robot. Bentuk dari L298N dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Modul L298N Driver Motor

Driver ini dipilih karena sesifikasinya yang diklaim mampu menggerakkan dua motor dengan tegangan 12V dan maksimal arus yaitu 2A ditunjukkan pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Spesifikasi BTS7960B Driver Motor

Subjek	Spesifikasi
<i>Input Voltage</i>	3.2V~40Vdc
<i>Driver</i>	L298N Dual H Bridge DC Motor Driver
<i>Power Supply</i>	DC 5 V - 35 V
<i>Peak current</i>	2 Amp
<i>Operating current range</i>	0 ~ 36mA
<i>Max. power consumption</i>	20W (T = 75 °C)
<i>Storage temperature</i>	: -25 °C ~ +130 °C
<i>Size</i>	: 3.4cm x 4.3cm x 2.7cm

2.4.13 JGY-370 Worm Gear Motor

DC motor merupakan motor listrik yang mengubah energi listrik arus searah atau *direct current* (DC) menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran. Motor DC bekerja dengan prinsip interaksi antara medan magnet yang diproduksi oleh kumparan dan medan magnet lain dari magnet permanen yang ada didalam motor. Disini motor DC yang digunakan adalah motor DC seri JGY-370. Bentuk dari motor JGY-370 dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Modul JGY-370 DC Motor

Pada penelitian robot penyemprot herbisida motor DC digunakan sebagai penggerak utama robot untuk melewati medan pertanian. Adapun Model JGY-370 yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Spesifikasi ZGA37RG DC Motor

Subjek	Spesifikasi
Model	JGY-370
<i>Rated Voltage</i>	DC 12V
<i>No load speed</i>	160rpm
<i>No Load Current</i>	35mA
<i>Gearbox</i>	Worm
<i>Torque</i>	22.5kg.cm
RPM	30RPM

Subjek	Spesifikasi
<i>Stall Ampere</i>	1.3A
<i>Mounting Holes</i>	6 lubang M3 (standard face mount)
<i>Weight</i>	165g

2.4.14 XY3606 DC Converter

DC converter merupakan perangkat elektronik yang bekerja untuk mengubah tegangan arus searah (DC) dari satu level ke level lainnya. Pada suatu sistem, untuk menangani komponen-komponen yang memiliki spesifikasi yang beragam DC converter merupakan perangkat yang penting dalam suatu sistem. Pada penelitian ini DC converter yang digunakan adalah DC converter XY3606. XY3606 merupakan sebuah buck converter yang mampu berjalan pada 6A atau setara dengan 30W [32].



Gambar 2.15 Modul XY3606 DC Converter

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15, modul menyediakan 4 pin, masing-masing merupakan pin set untuk input dan output suplai. Spesifikasi lain dari Modul XY3606 ditunjukkan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Spesifikasi XY3606 DC Converter

Subjek	Spesifikasi
<i>Input Voltage Range</i>	9V to 36V
<i>Output Voltage</i>	5V
<i>Minimum Drop Out</i>	0.3V

Subjek	Spesifikasi
<i>Operating voltage</i>	4.8V – 7.2V
<i>Output Current Capability</i>	6A

2.5 Komunikasi

Pada penelitian robot penyemprot herbisida, digunakan komunikasi antar komponen untuk mencapai tujuan dari penelitian. Komunikasi antar komponen ini meliputi:

1. UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) merupakan protokol komunikasi serial berbasis IC TL16C550 yang digunakan untuk mengirim data dan menerima data secara asinkron [33]. Berdasarkan dengan kapabilitas protokol ini, penelitian ini menggunakan protokol UART untuk menghubungkan modul Raspberry Pi 5 dengan ESP32 untuk bertukar data.
2. TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) merupakan kumpulan protokol komunikasi standar yang digunakan untuk menghubungkan perangkat-perangkat dalam jaringan internet dan intranet. Didukung dengan protokol HTTP untuk menampilkan *User Interface* (UI), pada penelitian ini protokol TCP/IP digunakan untuk mengendalikan robot melewati *web browser* oleh pengguna melalui perantara *hotspot* yang disebarkan oleh Raspberry Pi 5.