

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini akan membahas terkait teori dan komponen-komponen yang digunakan untuk perancangan sistem lengan robot 4 DOF (*Degree of Freedom*) untuk *pick and place* berbasis STM32 dengan sistem kendali melalui HMI *Nextion*.

2.1. Tinjauan Pustaka

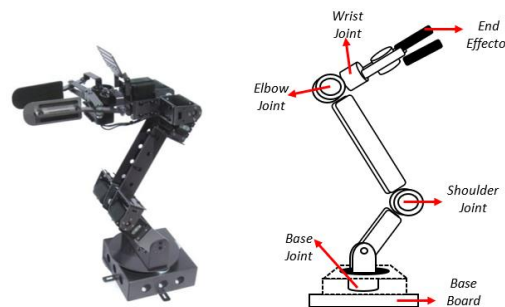
Tinjauan pustaka ini mencakup beberapa referensi yang telah dievaluasi terkait perancangan sistem lengan robot 4 DOF (*Degree of Freedom*) untuk *pick and place* berbasis STM32 dengan sistem kendali melalui HMI *Nextion* dalam rangka pembuatan proyek tugas akhir. Hasil dari tinjauan pustaka dapat dilihat pada **Tabel 2.1.** berikut ini.

Tabel 2.1. Tinjauan Pustaka

No	Judul Penelitian	Penulis/Tahun	Kesimpulan
1.	<i>Chess Robot Arm 4 Degree Of Freedom Trajectory Planning With Inverse Kinematics Method</i>	Ahmad Farih Qolyubie Rosief, Indrazno Siradjuddin, dan Hari Kurnia Safitri, 2023	Referensi metode <i>inverse kinematics</i> .
2.	Rancang Bangun Lengan Robot Pada Troli Belanja Berbasis Visi Komputer	Shandy Rustandy, 2020	Referensi komponen penyusun lengan robot. dan pengaplikasiannya di lengan robot.
3	Sistem Kontrol Suhu Pada <i>Reflow Oven</i> Menggunakan STM32	Ajeng Rahma Aprilia, 2023	Referensi untuk pengoperasian STM32F4 dan LCD TFT

2.2. Lengan Robot

Lengan robot adalah perangkat mekanis yang dirancang menyerupai gerak lengan manusia, seperti mengambil dan menempatkan objek (*pick and place*), mengemas, hingga proses pengelasan. Variasi bentuk dan jenisnya disesuaikan dengan kebutuhan proses serta jumlah *Degree of Freedom* (DoF) yang dimiliki [7]. Gambar lengan robot terdapat pada **Gambar 2.1.**



Gambar 2.1. Lengan Robot

Sumber: [7]

Secara umum, lengan robot tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu:

2.2.1. Batang (*Link*)

Link merupakan kerangka yang bersifat kaku dalam sistem mekanik yang berfungsi sebagai struktur utama. *Link* ini saling terhubung membentuk rangkaian kinematik untuk mentransmisikan gerak dan gaya antar bagian sistem.

2.2.2. Sendi (*Joint*)

Joint berfungsi untuk menghubungkan dua *link* dalam lengan robot dan memungkinkan gerakan terbatas di antara keduanya. Berdasarkan gerakannya, terdapat dua jenis *joint*, yaitu *revolute joint* yang memungkinkan rotasi seperti engsel, dan *prismatic joint* yang memungkinkan gerakan lurus atau translasi.

2.2.3. End-effector

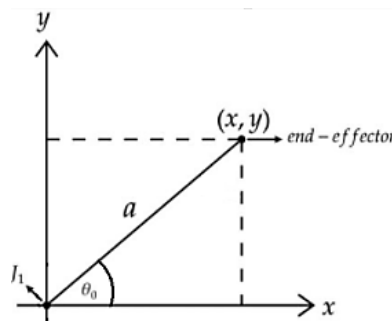
End-effector adalah alat yang dipasang di ujung akhir lengan robot dan fungsinya sesuai dengan tugas yang ingin dilakukan, seperti untuk menggenggam, memindahkan, atau memproses objek.

2.3. DOF (*Degree Of Freedom*) dan Metode *Invers Kinematics*

Degrees of Freedom (DoF) menggambarkan jumlah gerakan bebas yang dilakukan oleh suatu sistem mekanik. Dalam aplikasi lengan robot, DoF merepresentasikan banyaknya sumbu gerak yang memungkinkan ujung lengan (*end-effector*) menjangkau posisi. Setiap sendi atau *joint* pada lengan robot memberikan satu DoF, baik itu berupa rotasi (*rotary joint*) maupun gerakan linier (*prismatic joint*) [7]. Jumlah DOF lengan robot umumnya ditentukan oleh jumlah motor servo yang menggerakkan setiap sendi pada lengan robot. Namun, motor servo yang digunakan untuk mengoperasikan *gripper* tidak dihitung sebagai bagian dari DoF, karena *gripper* hanya bertugas mengambil objek, bukan mengatur posisi lengan.

Pada perancangan lengan robot tugas akhir ini dilakukan perhitungan dengan metode *Invers Kinematics*. Metode *inverse kinematics* digunakan untuk menghitung setiap *joint* lengan robot berdasarkan posisi *end-effector* yang diinginkan. Kemudian menghitung sudut yang diperlukan setiap *joint* untuk mencapai tujuan tersebut. Menurut teori, bahwa *inverse kinematics* lengan robot menggunakan dua sudut pandang, yaitu tampak atas dan tampak samping [6]. Perhitungan yang digunakan pada perancangan lengan robot seperti berikut:

2.3.1. Sudut pandang tampak atas



Gambar 2.2. Sudut Pandang Tampak Atas Untuk Mencari θ_0

Pada **Gambar 2.2.** tersebut, nilai sudut pertama (θ_0) dapat ditentukan menggunakan rumus *pythagoras* pada persamaan 2.1 dan panjang lengan (a) pada persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (2.1)$$

$$\alpha = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.2)$$

Keterangan:

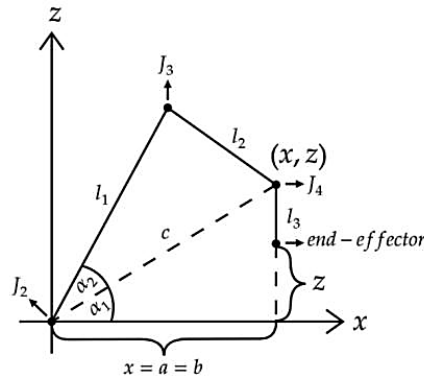
θ_0 : Nilai sudut pertama

x : Nilai panjang lengan robot pada sumbu x

y : Nilai panjang lengan robot sumbu y

α : Nilai panjang lengan robot

2.3.2. Sudut pandang tampak samping



Gambar 2.3. Sudut Pandang Tampak Samping Untuk Mencari θ_1

Pada **Gambar 2.3.** tersebut, digunakan untuk mencari sudut θ_1 . Sudut θ_1 terbagi menjadi dua yaitu α_1 dan α_2 . Nilai sudut α_1 dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.3 dan mencari nilai c menggunakan rumus *pythagoras* seperti pada persamaan 2.4. Kemudian nilai sudut α_2 dapat menggunakan rumus *cos* segitiga tidak beraturan seperti pada persamaan 2.5. Setelah mengetahui nilai α_2 , maka nilai sudut θ_1 dapat diketahui dengan cara menjumlahkan nilai α_1 dan α_2 seperti pada persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{l_3 + z}{x} \right) \quad (2.3)$$

$$c = \sqrt{b^2 + (l_3 + z)^2} \quad (2.4)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + c^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot c} \right) \quad (2.5)$$

$$\theta_1 = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (2.6)$$

Keterangan:

θ_1 : Nilai sudut kedua

x : Nilai panjang lengan robot pada sumbu x

z : Nilai panjang lengan robot sumbu z

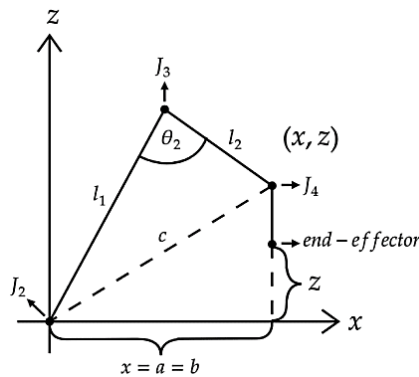
c : Nilai panjang lengan robot titik pusat ke titik ujung lengan ketiga

l_1 : Nilai panjang lengan pertama

l_2 : Nilai panjang lengan kedua

l_3 : Nilai panjang lengan ketiga

Setelah mengetahui nilai sudut θ_1 , maka selanjutnya dapat mencari nilai sudut θ_2 seperti **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4. Sudut Pandang Tampak Samping Untuk Mencari θ_2

Pada **Gambar 2.4.** tersebut, digunakan untuk mencari sudut θ_2 dengan menggunakan rumus $\cos$ segitiga tidak beraturan seperti pada persamaan 2.7. sebagai berikut:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - c^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_2} \right) \quad (2.7)$$

Keterangan:

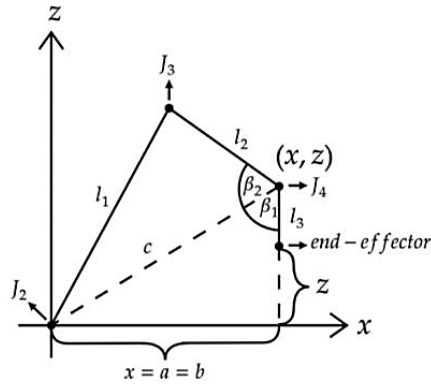
θ_2 : Nilai sudut ketiga

c : Nilai panjang lengan robot titik pusat ke titik ujung lengan ketiga

l_1 : Nilai panjang lengan pertama

l_2 : Nilai panjang lengan kedua

Setelah mengetahui nilai sudut θ_2 , kemudian dapat mencari nilai sudut θ_3 . Agar lebih mudah untuk mencari nilai sudut θ_3 , maka dapat membagi sudut θ_3 menjadi sudut β_1 dan β_2 seperti **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5. Sudut Pandang Tampak Samping Untuk Mencari θ_3

Dari **Gambar 2.5.** tersebut, untuk mencari nilai sudut β_1 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.8 dan nilai sudut β_2 dapat dihitung menggunakan rumus $\cos$ segitiga tidak beraturan. Setelah mengetahui nilai sudut β_1 dan β_2 , maka nilai sudut θ_3 dapat diketahui dengan cara menjumlahkan nilai sudut β_1 dan β_2 sebagai berikut:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{x}{l_3 + z} \right) \quad (2.8)$$

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{c^2 + l_2^2 - l_1^2}{2 \cdot l_2 \cdot c} \right) \quad (2.9)$$

$$\theta_3 = \beta_1 + \beta_2 \quad (2.10)$$

Keterangan:

θ_3 : Nilai sudut keempat

x : Nilai panjang lengan robot pada sumbu x

z : Nilai panjang lengan robot sumbu z

c : Nilai panjang lengan robot titik pusat ke titik ujung lengan ketiga

l_1 : Nilai panjang lengan pertama

l_2 : Nilai panjang lengan kedua

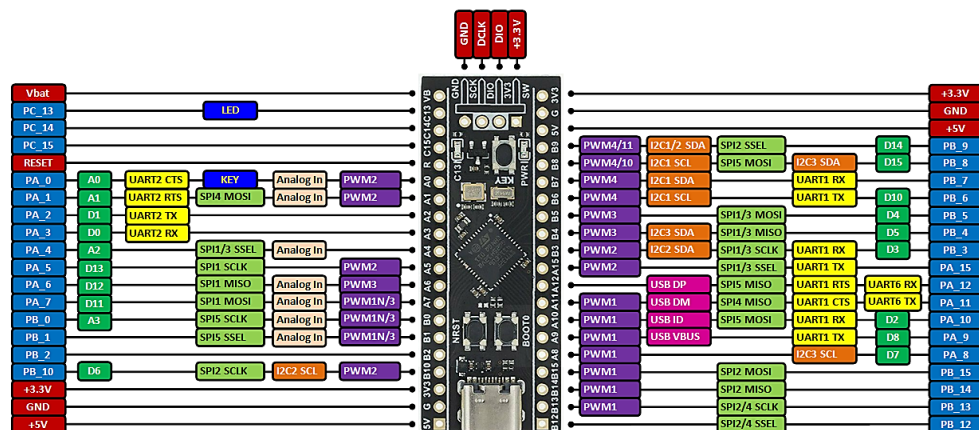
l_3 : Nilai panjang lengan ketiga

2.4. STM32F411CEU6

STM32F411CEU6 merupakan mikrokontroler 32-bit berbasis Arm® Cortex®-M4 yang dilengkapi dengan *unit floating point* (FPU) dan mampu bekerja hingga 100 MHz. Dengan performa mencapai 125 DMIPS, mikrokontroler ini mendukung pemrosesan sinyal digital secara efisien dan

hemat daya. Perangkat ini memiliki memori internal sebesar 512 KB *Flash* dan 128 KB SRAM, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti I2C, USART, SPI, dan USB 2.0 OTG.

Fitur unggulannya mencakup ART Accelerator™ untuk eksekusi cepat dari *flash memory* tanpa penundaan dan *Batch Acquisition Mode* (BAM) untuk pengambilan data melalui DMA. Selain itu, tersedia berbagai mode hemat energi seperti *Sleep*, *Stop*, dan *Standby*. Dengan 11 timer (termasuk PWM), ADC 12-bit hingga 16 kanal, serta fitur RTC berdaya rendah, mikrokontroler ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan performa tinggi namun tetap efisien daya, seperti kontrol motor, perangkat medis, sistem industri otomatis, dan sensor portabel [8]. Mikrokontroler STM32F411CEU6 memiliki format *pinout* seperti pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6. Pinout STM32F411CEU6

Sumber : [9]

Dari **Gambar 2.6.** merupakan diagram *pinout* dari STM32F411CEU6 yang berfungsi sebagai panduan informasi untuk memahami konektivitas serta fungsi masing-masing pin. Diagram ini mempermudah pemahaman terhadap konfigurasi GPIO yang digunakan sebagai *input* dan *output* digital, serta dapat dikonfigurasi PWM, ADC, dan komunikasi melalui berbagai protokol. Pin ADC digunakan untuk menerima sinyal analog, sedangkan pin PWM umum digunakan dalam pengendalian motor atau aktuator. Berikut juga terdapat spesifikasi dari STM32F411CEU6 pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2. Spesifikasi STM32F411CEU6

Spesifikasi STM32F411CEU6	
<i>Flash Memory</i> – Kbytes	512
SRAM - Kbytes	128
<i>Peripheral</i>	STM32F411xC
<i>Core</i>	ARM32 Cortex-M4
<i>CPU Frequency</i>	100 MHz
<i>Operating Voltage</i>	1,7 - 3,6 VDC
GPIO	50 pin
PWM	12 pin
ADC	16 <i>channel</i> (12 bit)
Koneksi	UART/USRT, USB, I2C, SPI

Tabel 2.2. merupakan tabel *datasheet* mikrokontroler STM32F411CEU6 yang memiliki beberapa spesifikasi pada memorinya yang dapat digunakan. STM32F411CEU6 tidak dilengkapi dengan *downloader*, sehingga untuk memasukkan kode program pada STM32F411CEU6 perlu menambahkan modul ST-Link V2 seperti pada **Gambar 2.7.**

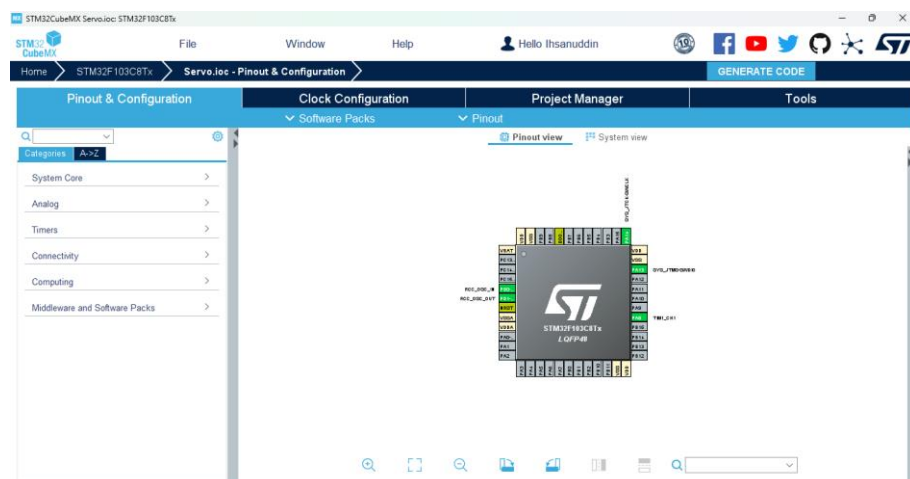
**Gambar 2.7.** ST-Link V2

2.5. Perangkat Lunak STM32F411CEU6

2.5.1. STM32CubeMX

STM32CubeMX adalah perangkat lunak berbasis antarmuka grafis dari STMicroelectronics yang memudahkan konfigurasi dan inisialisasi mikrokontroler STM32. Dengan aplikasi ini, pengguna dapat dengan mudah mengatur pin GPIO, *clock*, serta mengaktifkan berbagai *peripheral* seperti ADC, UART, I2C, dan SPI. Selain itu, STM32CubeMX mampu menghasilkan kode inisialisasi otomatis yang

kompatibel dengan berbagai IDE populer seperti STM32CubeIDE, Keil, dan IAR. Fitur visualisasi pin dan *clock* yang interaktif membantu perancangan sistem *embedded* secara efisien dan mengurangi kesalahan konfigurasi. Aplikasi ini juga mendukung pengaturan *middleware* seperti USB, RTOS, dan FATFS, sehingga sangat berguna untuk pengembangan dan *prototyping* mikrokontroler STM32 [10]. STM32CubeMX memiliki tampilan *software* seperti **Gambar 2.8**.



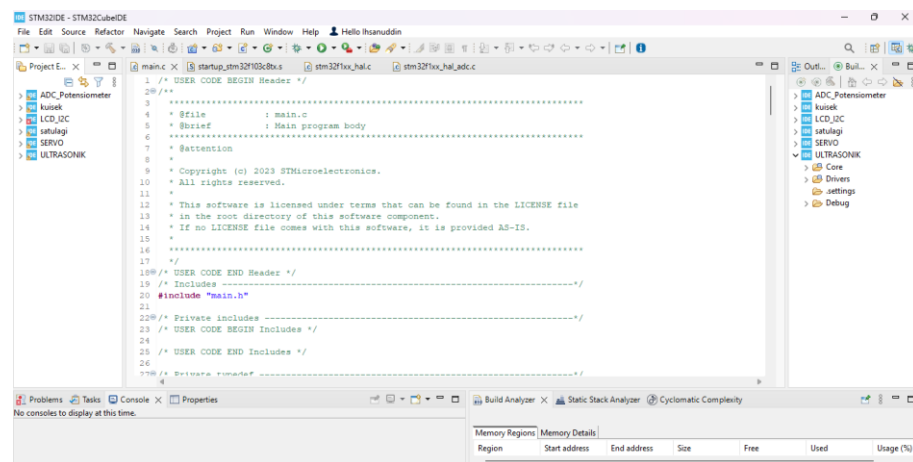
Gambar 2.8. Tampilan *Software* STM32CubeMx

2.5.2. STM32CubeIDE

STM32CubeIDE adalah sebuah *Integrated Development Environment* (IDE) dari STMicroelectronics yang digunakan untuk pemrograman dan debugging mikrokontroler STM32 berbasis Arm Cortex-M. STM32CubeIDE ini mengintegrasikan fitur konfigurasi perangkat keras dari STM32CubeMX dengan kemampuan *coding* dan *debugging*, sehingga memudahkan pengguna dalam mengatur clock, pin, *middleware* seperti USB dan FreeRTOS, serta menulis kode C/C++ dalam satu aplikasi [11].

STM32CubeIDE menyediakan antarmuka grafis yang memudahkan pemetaan pin dan pengaturan *peripheral*, serta otomatis membuat kode inisialisasi sesuai konfigurasi pengguna seperti terlihat pada **Gambar 2.9**. Selain itu, IDE ini juga mendukung kompilasi,

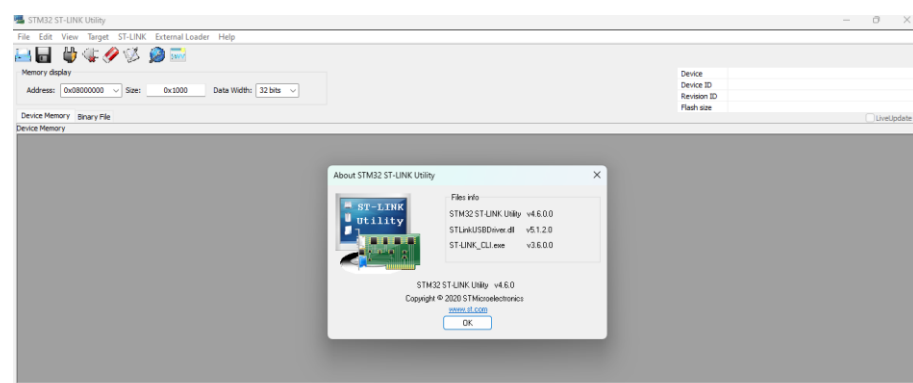
pengunggahan *firmware* ke mikrokontroler, dan *debugging* lewat ST-Link atau J-Link. Dengan fitur integrasi lengkap dari konfigurasi hingga pemrograman, STM32CubeIDE sangat efektif untuk pengembangan sistem *embedded*.



Gambar 2.9. Tampilan *software* STM32CubeIDE

2.5.3. STM32 ST-LINK Utility

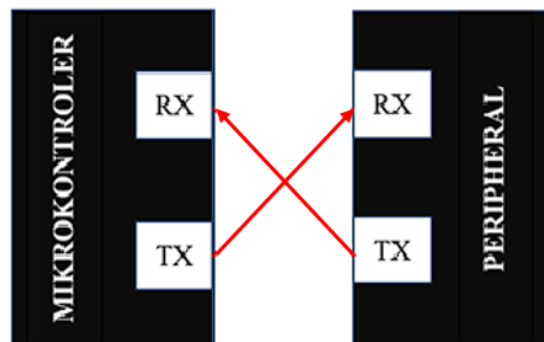
STM32 ST-Link Utility adalah *software* resmi dari STMicroelectronics yang digunakan untuk *debugging* mikrokontroler STM32 melalui ST-Link. *Software* ini memudahkan pengguna dalam membaca, menulis, memverifikasi, serta menghapus memori internal mikrokontroler. Salah satu fitur utamanya adalah dukungan komunikasi *Serial Wire Debug* (SWD) yang efisien, hanya menggunakan dua jalur utama yaitu SWDIO dan SWCLK. [12]. Bentuk tampilan awal aplikasinya dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10. Tampilan *Software* STM32 ST-LINK Utility

2.6. Protokol Komunikasi UART

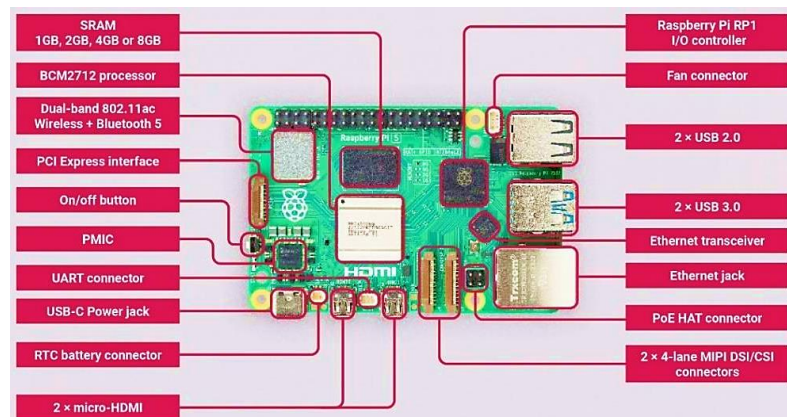
Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART) merupakan protokol komunikasi serial asinkron yang umum digunakan dalam sistem *embedded* untuk transfer data secara serial. UART hanya memerlukan dua jalur utama, yaitu TX (*transmit*) dan RX (*receive*), tanpa membutuhkan sinyal *clock* eksternal seperti pada komunikasi sinkron [13]. Komunikasi UART dilakukan dengan cara mengubah data paralel menjadi data serial pada pengirim, dan kemudian dikembalikan menjadi data paralel di sisi penerima seperti pada **Gambar 2.11**. Dalam proses komunikasinya, pengaturan parameter seperti *baud rate*, jumlah bit data, bit paritas, dan bit stop harus disepakati oleh kedua perangkat yang berkomunikasi agar data dapat ditransmisikan dengan benar. Pada mikrokontroler STM32, UART diimplementasikan melalui peripheral USART yang mendukung baik komunikasi sinkron maupun asinkron.



Gambar 2.11. Serial Komunikasi UART

2.7. Raspberry Pi 5

Raspberry Pi 5 adalah generasi terbaru dari *Single Board Computer* buatan Raspberry Pi Foundation yang dirilis pada tahun 2023. Raspberry Pi secara fungsionalitas tidak berbeda jauh dengan komputer pada umumnya. Dibandingkan dengan pendahulunya, Raspberry Pi 4, model ini menawarkan peningkatan performa, menjadikannya lebih cocok untuk aplikasi komputasi tingkat lanjut, proyek *Internet of Things*, pemrosesan citra, hingga robotika [14]. Gambar modul dan keterangannya dapat dilihat pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12. Raspberry Pi 5

Sumber : [14]

Dari **Gambar 2.12.** Raspberry Pi 5 menggunakan prosesor Broadcom BCM2712 dengan ARM Cortex-A76 berkecepatan hingga 2,4 GHz dan GPU VideoCore VII yang mendukung output video ganda 4K@60Hz melalui dua micro-HDMI. Perangkat ini tersedia dalam varian RAM 4 GB dan 8 GB LPDDR4X. Untuk ekspansi, tersedia jalur PCIe 2.0 single-lane yang bisa digunakan dengan adaptor NVMe SSD. Raspberry Pi 5 juga dilengkapi dengan dua port USB 3.0, dua USB 2.0, port Ethernet gigabit, serta konektivitas nirkabel Wi-Fi 802.11ac dan Bluetooth 5.0. Selain itu, terdapat konektor kamera dan display 22-pin baru yang mendukung antarmuka MIPI berkecepatan tinggi. Spesifikasi detailnya terdapat pada **Tabel 2.3.**

Tabel 2.3. Spesifikasi Raspberry Pi 5

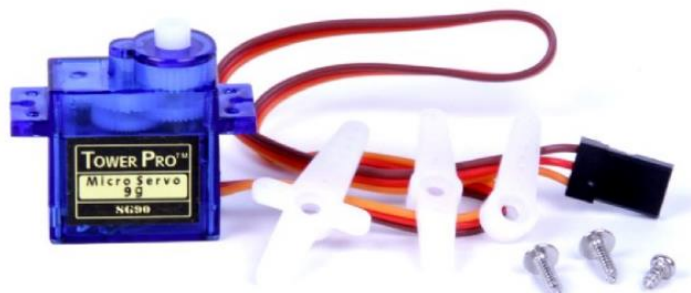
Spesifikasi Raspberry Pi 5	
Prosesor (CPU)	Broadcom BCM2712, Quad-core ARM Cortex-A76 @ 2.4 GHz
GPU	Broadcom VideoCore VII, mendukung dual 4Kp60 HEVC decode
RAM	4 atau 8 GB LPDDR4X-4267 SDRAM
Penyimpanan	- MicroSD card slot (mendukung boot) - Jalur ekspansi PCIe 2.0 (1-lane)
Konektivitas Jaringan	Gigabit Ethernet
Wi-Fi dan <i>Bluetooth</i>	802.11ac dual-band dan <i>Bluetooth</i> 5.0

Konektor	2 MIPI Camera, 2 4-Lane MIPI Display, UART Port, RTC Clock Power port, Fan Power port, 2 USB 3.0, 2 USB 2.0, 2 micro-HDMI, 40 pin GPIO header.
<i>Power Supply</i>	USB-C 5V/5A (diperlukan minimal 27W untuk performa penuh)

Dalam sistem lengan robot ini, Raspberry Pi 5 berfungsi sebagai pemroses utama untuk mendeteksi posisi barang cacat melalui pengolahan citra dari kamera, yang dilakukan oleh Daffa Maulana Fariza. Hasil deteksi berupa koordinat (x, y) kemudian dikirim ke mikrokontroler STM32F411CEU6 melalui komunikasi UART. Selanjutnya, STM32F411CEU6 mengubah data tersebut menjadi perintah untuk menggerakkan lengan robot, dengan modul driver PCA9685 untuk mengendalikan motor servo secara presisi.

2.8. Motor Servo SG90

Motor servo SG90 adalah jenis hobby servo micro dengan sistem kontrol sudut berbasis *closed-loop feedback*. Di dalamnya terdapat motor DC kecil, gearbox plastis, potensio, dan rangkaian kontrol. [15]. Gambar motor *servo* SG90 dapat dilihat pada **Gambar 2.13**.



Gambar 2.13 Motor Servo SG90

Sumber : [15]

Pada **Gambar 2.13**, merupakan tampilan *hardware* dari motor servo SG90. Motor Servo SG90 dapat berputar sekitar 0° hingga 180° (90° ke kiri

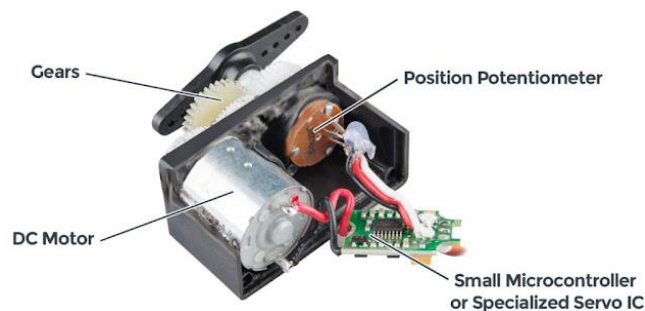
dan kanan dari posisi netral). Rentang ini dikendalikan oleh lebar pulsa PWM pada frekuensi 50 Hz (periode 20 ms). Lebih lengkapnya bisa dilihat pada **Tabel 2.4.** mengenai spesifikasi Motor Servo SG90.

Tabel 2.4. Spesifikasi Motor Servo SG90

Spesifikasi Motor Servo SG90	
Tegangan Kerja	4,8V – 6V
Massa	9 gram
Kecepatan Reaksi	0,1s / 60° (tanpa beban)
<i>Stall Torque</i>	1,6 kg/cm (4,8V)
<i>Dead Band Width</i>	10us (mikro detik)

2.9. Motor Servo MG996R

Motor servo merupakan aktuator rotasi yang mampu mengatur posisi sudut dengan akurasi tinggi. Komponennya mencakup motor DC, sistem kontrol, dan umpan balik seperti potensiometer dapat dilihat pada **Gambar 2.14.** Salah satu contohnya adalah MG996R buatan Tower Pro, yang merupakan versi peningkatan dari MG995 dengan keunggulan pada presisi, kecepatan, dan kemampuan menangani torsi besar [16].

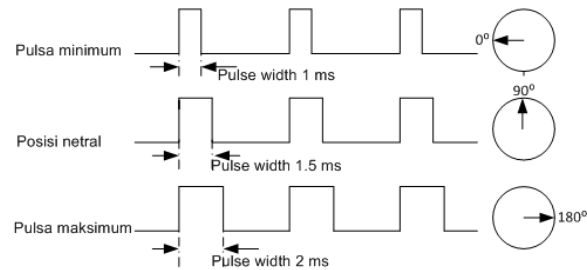


Gambar 2.14. Bagian Motor Servo

Sumber : [17]

Pada **Gambar 2.14**, poros motor DC berkecepatan tinggi dihubungkan dengan rangkaian roda gigi (*gears*) yang berfungsi meningkatkan torsi, meskipun mengurangi putaran (RPM). Potensiometer terpasang pada sistem *gear* tersebut dan berperan sebagai pembagi tegangan. Saat *gear* berputar, nilai resistansi potensiometer berubah, menghasilkan

tegangan keluaran yang mencerminkan sudut rotasi motor. Tegangan ini menjadi umpan balik untuk menentukan posisi motor. Untuk menjaga posisi motor tetap stabil, digunakan sinyal PWM dengan lebar pulsa antara 1 ms hingga 2 ms, di mana sudut rotasi motor berada dalam rentang 0° hingga posisi maksimum. Ilustrasi lebih lanjut ditampilkan pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15. Lebar Pulsa dan Putaran Motor Servo

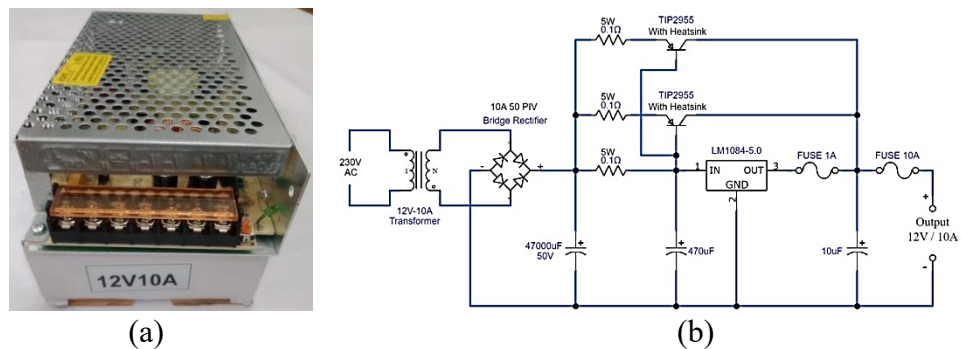
Motor servo MG996R dikendalikan melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang menentukan posisi sudut porosnya. Berdasarkan **Gambar 2.15**, saat pulsa berdurasi 1 ms dikirim, poros berada di posisi 0° , sedangkan pulsa 1,5 ms mengarahkan poros ke tengah (90°), dan 2 ms menggerakkan poros ke posisi maksimum (180°). Pulsa ini dikirim secara berkala setiap 20 ms (50 Hz) untuk menjaga posisi tetap stabil. Ketika motor mendapat beban yang mengganggu posisi sudutnya, sistem umpan balik internal akan menyesuaikan agar posisi tetap sesuai dengan sinyal *input*. Spesifikasi lengkap MG996R ditampilkan pada **Tabel 2.5**.

Tabel 2.5. Spesifikasi Motor Servo MG996R

Spesifikasi MG996R	
<i>Weight</i>	55 gram
<i>Dimension</i>	40,7 x 19,7 x 42,9 mm
Tegangan Operasi	4,8 V – 7,2 V
<i>Stall Torque</i>	9,4kg/cm (4,8V); 11kg/cm (6V)
<i>Operating Speed</i>	0,17s/60° (4,8V); 0,14s/60° (6V)
<i>Running Current</i>	500mA – 900mA (6V)
<i>Stall Current</i>	2,5A (6V)
Temperatur	0°C – 55°C

2.10. Power Supply 12V 10A

Power supply atau catu daya merupakan perangkat yang berfungsi menyediakan tegangan dan arus listrik sesuai kebutuhan sistem elektronik. Umumnya, *power supply* mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) untuk menyalakan komponen seperti mikrokontroler, sensor, dan motor. Prinsip dasarnya melibatkan transformator, dioda, dan kapasitor, dengan tambahan komponen pendukung seperti sakelar, sekering, jack, PCB, dan kabel agar sistem bekerja optimal. Gambar *power supply* 12V 10A ditampilkan pada **Gambar 2.16**.



Gambar 2.16. (a) dan (b) Power Supply dan Skematiknya

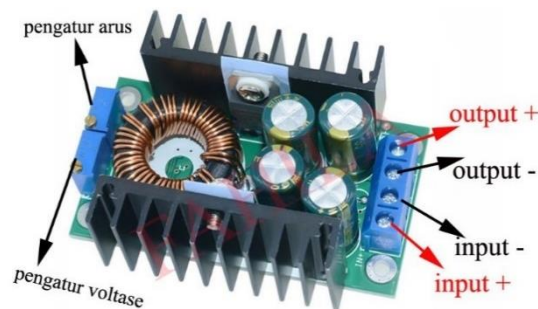
Gambar 2.16 menunjukkan power supply DC 12V 10A, yaitu catu daya dengan tegangan keluaran tetap 12 volt DC dan arus maksimum hingga 10 ampere, setara dengan daya 120 watt. Power supply ini menggunakan teknologi SMPS (*Switched Mode Power Supply*) yang dikenal efisien, berukuran ringkas, dan mampu menangani beban besar. Spesifikasinya tercantum pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2.6. Spesifikasi *Power Supply* 12V 10A

Spesifikasi Power Supply 12V 10A	
Tegangan <i>Input</i>	110/220VAC
Tegangan <i>Output</i>	12VDC
Arus Beban <i>Output</i>	10A
Daya Total	120 watt
Efisiensi	80% - 90%

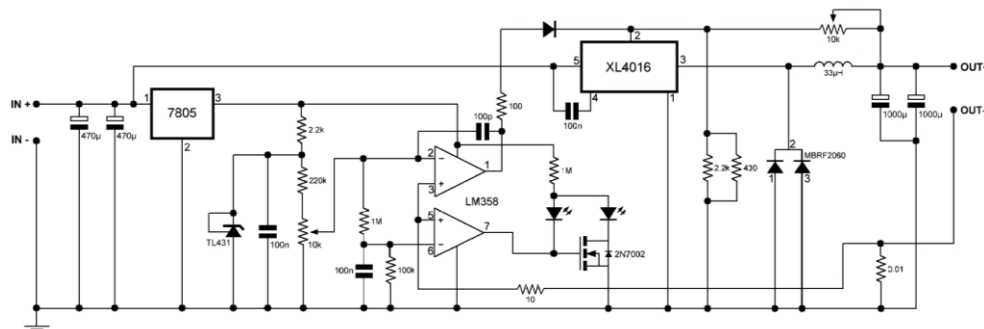
2.11. Modul *Stepdown* XL4016

Modul *stepdown* XL4016 adalah konverter DC-DC yang berfungsi menurunkan tegangan dari sumber *input* ke level yang lebih rendah. Modul ini menggunakan *chip* XL4016 yang bekerja dengan frekuensi PWM tetap 180 kHz dan mampu menangani arus hingga 12A dengan efisiensi sampai 96%. Rentang tegangan *input* modul ini berkisar antara 4V hingga 40V, sementara tegangan *output* dapat diatur dari 1,25V sampai 36V. Modul ini mampu memberikan daya maksimum hingga 300W dengan arus output maksimal 10A [18]. Gambar modul beserta skematiknya dapat dilihat pada **Gambar 2.17.** dan **2.18.**



Gambar 2.17. Modul *Stepdown* XL4016

Sumber : [18]



Gambar 2.18. Skematik Modul *Stepdown* XL4016

Sumber : [18]

Dari **Gambar 2.18.** Modul *stepdown* XL4016 terdiri dari regulator XL4016 serta beberapa. Terdapat regulator 7805 5V yang mengatur tegangan masukan untuk chip LM358 yang berfungsi sebagai komparator tegangan umpan balik. TL431 bekerja memberikan referensi tegangan positif untuk rangkaian komparator. XL4016 adalah regulator *switching* yang beroperasi

sebagai saklar frekuensi tinggi. Dioda berfungsi sebagai penyearah tegangan dengan karakteristik kecepatan tinggi yang penting untuk efisiensi *converter*. Kumparan induktor berperan dalam konversi energi. Selain itu, terdapat kapasitor pada sisi masukan dan keluaran yang berfungsi sebagai filter untuk mengurangi riak tegangan serta menyimpan energi listrik. Spesifikasi lengkap modul XL4016 dapat dilihat pada **Tabel 2.8**.

Tabel 2.7. Spesifikasi *Stepdown* XL4016

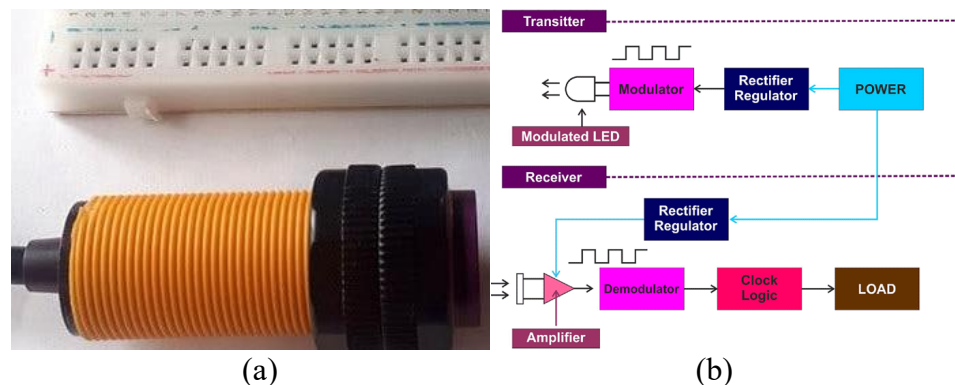
Spesifikasi Modul <i>Stepdown</i> XL4016	
IC Regulator	XL4016
Tegangan <i>Input</i>	4 – 40VDC
Tegangan <i>Output</i>	1,25 – 35VDC
Arus <i>Output</i> Maksimal	10A
Frekuensi <i>Switching</i>	180kHz
Efisiensi Konversi	Up to 96%
Daya Maksimal	300W

Persamaan efisiensi, persamaan (2.11) digunakan untuk mengetahui seberapa baik nilai *input* yang diubah menjadi *output*.

$$\eta = \frac{\text{Daya Output}}{\text{Daya Input}} \times 100\% \quad (2.11)$$

2.12. Sensor *Proximity Infrared* E18-D80NK

Sensor *proximity infrared* (IR) adalah sensor non-kontak yang mendeteksi keberadaan objek berdasarkan pantulan sinyal inframerah. Sensor ini bekerja dengan cara memancarkan sinyal inframerah dari pemancar, yang kemudian dipantulkan kembali dan diterima oleh penerima inframerah. Salah satu contohnya adalah sensor E18-D80NK, yang mampu mendeteksi objek di jarak 10-80 cm dengan sensitivitas yang dapat diatur menggunakan skrup. Sensor ini juga tahan terhadap gangguan cahaya tampak dan memberikan output digital saat objek berada dalam jangkauan deteksi [19]. Gambar sensor infrared E18-D80NK dan diagram bloknya terdapat di **Gambar 2.19**.



Gambar 2.19. (a) dan (b) Sensor Infrared E18-D80NK dan Diagram Bloknya

Dari **Gambar 2.19.** (b) menunjukkan cara kerja sensor *infrared* (IR) yang terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. Pada *transmitter*, tegangan dari sumber daya distabilkan melalui *rectifier* dan regulator sebelum ke modulator yang menghasilkan sinyal pulsa untuk mengendalikan inframerah agar memancarkan cahaya secara berkala. Cahaya akan dipantulkan jika ada objek di depan, dan pantulannya diterima oleh *receiver*.

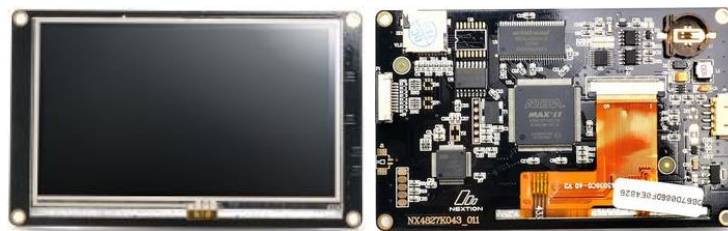
Di bagian *receiver*, sinyal pantulan diterima dan diperkuat *amplifier*, kemudian disaring oleh *demodulator* untuk menghilangkan gangguan cahaya luar. Sinyal yang bersih diteruskan ke *clock logic* yang menentukan keberadaan objek dan mengaktifkan output jika objek terdeteksi. Receiver juga dilengkapi dengan rectifier dan regulator untuk menstabilkan tegangan. Spesifikasi sensor infrared E18-D80NK dapat dilihat pada **Tabel 2.9.**

Tabel 2.8. Spesifikasi Sensor Infrared E18-D80NK

Spesifikasi Sensor Infrared E18-D80NK	
Tegangan <i>Input</i>	5VDC
Jangkauan	3-80cm
Konsumsi Arus	25-100mA
Waktu Respon	< 2ms
Sudut Deteksi	$\pm 15^\circ$
Jenis Sensor	Tipe reflektif difus
Dimensi	Diameter 17mm dan panjang 45 mm

2.13. HMI *Nextion* NX4827K043

Nextion NX4827K043 adalah modul layar sentuh TFT LCD 4,3 inci yang dirancang untuk mempermudah pembuatan antarmuka pengguna pada sistem mikrokontroler dan *embedded*. Sebagai bagian dari seri *Enhanced*, modul ini menawarkan peningkatan seperti prosesor ARM Cortex-M, memori *Flash* 16 MB, serta fitur tambahan berupa EEPROM dan RTC internal. Dengan resolusi 480x272 piksel dan komunikasi melalui UART, modul ini memungkinkan integrasi yang efisien dan sederhana dengan mikrokontroler [20]. Gambar Nextion NX4827K043 pada **Gambar 2.20**.



Gambar 2.20. Nextion NX4827K043

Sumber: [20]

Gambar 2.20. merupakan bentuk fisik modul Nextion NX4827K043. Salah satu kelebihanannya adalah dukungan perangkat lunak Nextion Editor, yang memungkinkan pengguna mendesain antarmuka grafis seperti tombol, *slider*, dan grafik secara praktis. Desain GUI ini diunggah melalui microSD, sehingga seluruh proses tampilan ditangani oleh modul, dan mikrokontroler hanya bertugas mengirim atau menerima instruksi sederhana melalui komunikasi serial. Spesifikasi lengkap modul ini disajikan pada **Tabel 2.10**.

Tabel 2.9. Spesifikasi Nextion NX4827K043

Spesifikasi Nextion NX4827K043	
Tegangan Operasi	4,75 – 7VDC (disarankan 5VDC)
Arus Operasi	250mA (pada kecerahan 100%)
Kecerahan Layar	230 nit
Resolusi	480 x 272 piksel
Tipe Sentuhan	Resistif
<i>Flash Memory</i>	32MB

EEPROM	1024 byte
RAM	8192 byte
Mikrokontroler	ARM Cortex-M 108MHz
Antarmuka Serial	UART TTL
<i>Baudrate</i>	2400 – 921600 (standar 9600 bps)

2.14. Torsi Lengan Robot

Torsi pada lengan robot adalah gaya putar yang bekerja di sekitar sendi (*joint*), dan dinyatakan dalam satuan Newton meter (Nm). Kebutuhan torsi sebuah motor servo dalam menggerakkan lengan robot dipengaruhi oleh berat beban, panjang lengan, serta percepatan sudutnya. Beban yang berada semakin jauh dari titik putar akan memerlukan torsi yang lebih besar, sesuai dengan rumus dasar pada persamaan 2.12. berikut:

$$\tau = F \times r \quad (2.12)$$

Di mana τ adalah torsi (Nm), r adalah jarak dari titik putar (m), dan F adalah gaya (N). Dan untuk mencari nilai besaran F menggunakan persamaan 2.13. berikut:

$$F = m \times g \quad (2.13)$$

Keterangan:

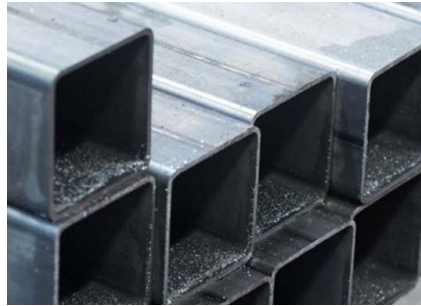
F : Besaran gaya pada benda (N)

m : massa benda (Kg)

g : Percepatan gaya pada gravitasi (9.8 m/s^2)

2.15. *Hollow Galvanis Steel*

Hollow galvanis steel atau baja *hollow galvanis* merupakan material logam berbentuk pipa kotak yang terbuat dari baja ringan dan dilapisi lapisan seng (*zinc coating*) melalui proses galvanisasi. Material ini umum digunakan dalam konstruksi ringan, rangka, serta sebagai bahan uji mekanik karena memiliki karakteristik kekuatan yang baik, bentuk yang presisi, dan bobot yang relatif ringan [21]. Gambar *hollow galvanis steel* pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2.21. Hollow Galvanis Steel

Baja *hollow* galvanis yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dimensi $40 \times 40 \times 40$ mm dengan ketebalan 0,9 mm. Dengan ukuran tersebut, *hollow* galvanis memiliki massa yang cukup ringan namun tetap memberikan beban mekanik yang realistis bagi sistem aktuator, sehingga dapat digunakan untuk menguji kemampuan motor servo dan kestabilan sistem kontrol pada lengan robot. Penggunaan *hollow* galvanis *steel* berukuran $40 \times 40 \times 40$ mm dan ketebalan 0,9 mm pada penelitian ini berfungsi sebagai objek uji (benda cacat) yang merepresentasikan beban kerja nyata dalam sistem *pick and place* lengan robot. Material ini dinilai ideal karena memiliki kombinasi antara kekuatan mekanik, kestabilan bentuk, ketahanan terhadap korosi, serta kompatibilitas terhadap sistem deteksi sensor yang digunakan.