

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam proses penyusunan penelitian ini, telah dilakukan studi literatur terhadap berbagai sumber yang dirangkum dalam Tabel 2.1, penelitian terdahulu yang ditinjau menjadi acuan serta inspirasi dalam pengembangan sistem ini.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

Nama	Judul	Keterangan	Perbaikan
Tim IJFMR	<i>Arduino Based Pick and Place Robot with Robotic Arm for Industrial Use</i>	Lengan robot berbasis Arduino Mega 2560 untuk pick and place industri, menggunakan aktuator servo motor stepper pada tiap joint. Belum membahas proses screwing maupun pemantauan sudut joint via encoder.	Dikembangkan menjadi lengan robot 4 DOF khusus proses screwing, menggunakan motor stepper NEMA 17, driver TB6600, dan encoder AS5600 per joint untuk posisi real-time. Dilengkapi GUI Python Tkinter dengan metode teaching untuk menyimpan dan menjalankan waypoint.

Tabel Lanjutan 2.1 Tinjauan Pustaka

Nama	Judul	Keterangan	Perbaikan
R. N. Kurniawan dkk.	<i>Small-scale Robot Arm Design with Pick and Place Mission Based on Inverse Kinematics</i>	Lengan robot 3 DOF berbasis Arduino Mega dan servo, memakai inverse kinematics untuk menentukan sudut joint dari koordinat tujuan. Belum menggunakan encoder untuk pemantauan sudut real-time.	Ditingkatkan menjadi 4 DOF dengan motor stepper NEMA 17, driver TB6600, dan encoder AS5600 real-time. Selain kinematika, ditambahkan metode teaching-playback melalui GUI untuk merekam dan menjalankan posisi sesuai kebutuhan proses screwing.

2.2 Arm robot

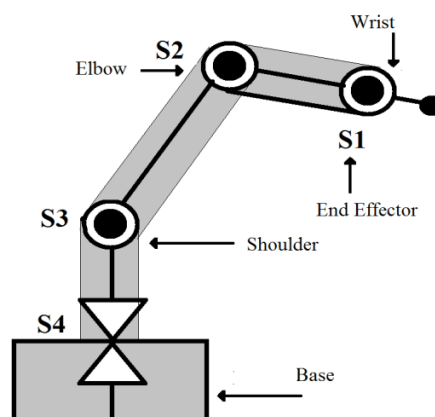
Arm robot merupakan sejenis lengan mekanik yang dirancang untuk meniru pergerakan dan fungsi lengan manusia serta dapat diprogram untuk melakukan berbagai tugas, seperti mengangkat, memindahkan, atau memanipulasi objek. *Arm robot* terdiri atas sejumlah *joint* (sendi), motor servo atau aktuator, dan unit pengendali mikrokontroler untuk mengatur pergerakan setiap segmen lengan. Pengendalian ini memungkinkan lengan bergerak sesuai instruksi yang diberikan berdasarkan jumlah derajat kebebasan (*degree of freedom/DOF*) yang tersedia pada sistem tersebut. Perancangan robot ini menerapkan integrasi prinsip-prinsip rekayasa mekanik dan sistem elektronik guna mencapai

pergerakan yang terkontrol, dengan orientasi utama pada implementasi proses pemasangan baut.



Gambar 2.1 *Arm robot Screwing* [11]

Arm robot screwing adalah aplikasi lengan robot yang dirancang khusus untuk melakukan pemasangan baut (*screwing*) dalam sistem manufaktur atau perakitan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Dalam operasi pemasangan baut, *arm robot* berfungsi sebagai aktuator utama yang memanipulasi *end-effector* berupa *tool head* atau ujung obeng menuju posisi target berdasarkan koordinat spasial. Hal ini memungkinkan proses pengencangan baut dan memastikan konsistensi hasil secara berulang dalam aplikasi produksi massal.



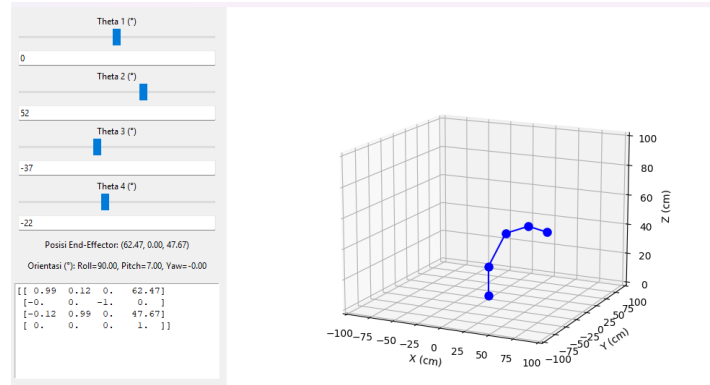
Gambar 2.2 *Arm robot 4 DOF*

Berdasarkan, *arm robot* dengan 4 derajat kebebasan merupakan lengan robot yang memiliki empat sumbu atau sendi yang dapat bergerak secara terpisah sehingga memungkinkan gerakan kompleks di ruang tiga dimensi. Keempat derajat kebebasan ini umumnya terdiri dari kombinasi gerakan

translasi dan rotasi, yang merepresentasikan kemampuan rotasi di pangkal (*base*), naik turun (*shoulder*), maju-mundur (*elbow*), dan rotasi pada *end-effector*. Pada perancangan ini, *arm robot screwing* 4 DOF didesain agar dapat memposisikan *tool head* (*electric screw*) ke titik baut pada komponen kerja, serta mengorientasikan *tool head* dengan sudut yang sesuai agar proses pengencangan baut bekerja konsisten. Rotasi basis ($S4 - Yaw$) memungkinkan lengan melakukan rotasi secara horizontal terhadap sumbu vertikal (Z), sehingga seluruh lengan dapat diarahkan ke berbagai posisi kerja di bidang XY dan menjangkau beragam titik di sekitar area basis robot. Selanjutnya, rotasi *shoulder* ($S3 - Pitch$) sebagai sendi utama menggerakkan lengan ke atas dan ke bawah terhadap sumbu X atau bidang vertikal, memungkinkan penyesuaian ketinggian (Z) serta menjangkau atau menarik lengan dari basis untuk mengatur posisi vertikal dan kedalaman titik kerja. Pada bagian tengah lengan, rotasi *elbow* ($S2 - Pitch$) bertugas mengatur sudut antara segmen lengan bagian atas dan bawah. Kombinasi gerak antara *shoulder* dan *elbow* memungkinkan ujung *tool head* bergerak dalam bidang dua dimensi (XZ atau YZ), sehingga mampu menjangkau titik target dari berbagai sudut dan posisi. Terakhir, rotasi pada *wrist* atau *end-effector* ($S1 - Roll$ atau $Pitch$) umumnya dioptimalkan untuk memutar *tool head*, seperti obeng, pada sumbu panjangnya, sehingga dapat memberikan putaran yang diperlukan untuk proses pengencangan atau pelepasan baut.

2.3 Forward Kinematics

Forward kinematics (FK) merupakan metode untuk menentukan posisi dan orientasi *end-effector* suatu robot berdasarkan sudut rotasi atau translasi dari setiap sendi (*joint*) pada robot tersebut. Pada sistem robot dengan derajat kebebasan tertentu, FK digunakan untuk menghitung koordinat kartesian titik ujung (*tool center point/ TCP*) terhadap kerangka referensi dasar (*base frame*). Metode ini sangat penting pada perancangan robot *screwing*, karena posisi ujung obeng (*end-effector screwing tool*) harus diketahui agar dapat melakukan pemasangan baut pada lokasi yang telah ditentukan[12] .



Gambar 2.3 Simulasi Forward Kinematics

Prinsip FK mengacu pada transformasi koordinat dari satu *link* ke *link* berikutnya dengan menggunakan parameter geometri serta variabel sendi. Model matematis FK biasanya dibangun menggunakan konvensi *Denavit-Hartenberg (D-H convention)*, di mana setiap *link* direpresentasikan oleh sebuah matriks transformasi homogen berukuran 4×4 . Matriks ini mencakup translasi dan rotasi di ruang tiga dimensi, yang dirumuskan sebagai berikut [13], [14]:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dengan θ_i sebagai sudut rotasi joint ke- i , d_i adalah perpindahan linear sepanjang sumbu z , a_i adalah panjang *link* sepanjang sumbu x , dan α_i adalah sudut torsi antara sumbu z *link* $i-1$ terhadap *link* i . Untuk manipulator dengan n derajat kebebasan, posisi dan orientasi *end-effector* diperoleh dari hasil perkalian berantai semua matriks transformasi, yaitu:

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}T_n$$

Matriks 0T_n mendeskripsikan koordinat dan orientasi TCP relatif terhadap kerangka dasar robot [14]. Dalam konteks perancangan robot *screwing* dengan 4 derajat kebebasan (*4-DOF articulated arm*), setiap sendi digerakkan oleh motor stepper yang diatur driver seperti TB6600. Sudut dari masing-masing joint ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) dimasukkan ke dalam model FK untuk menghitung posisi

dan orientasi *end-effector*. Panjang *link* (L1–L4) dirancang sesuai dengan area kerja, dan transformasi total dapat ditulis sebagai:

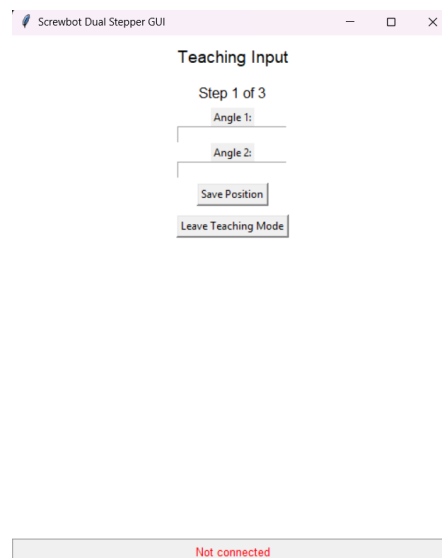
$${}^0T_4 = {}^0T_1(\theta_1, L_1) \cdot {}^1T_2(\theta_2, L_2) \cdot {}^2T_3(\theta_3, L_3) \cdot {}^3T_4(\theta_4, L_4)$$

Setelah seluruh matriks transformasi dikalikan dan dilakukan penyederhanaan terhadap elemen translasi pada kolom terakhir matriks, diperoleh persamaan kinematika maju yang secara langsung menyatakan koordinat posisi *end-effector* sebagai fungsi sudut setiap joint dan panjang link robot. Persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut [12].

$$\begin{aligned} X &= \cos(\theta_1)[L_2\cos(\theta_2) + L_3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L_4\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \\ Y &= \sin(\theta_1)[L_2\cos(\theta_2) + L_3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L_4\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)] \\ Z &= L_1 + L_2\sin(\theta_2) + L_3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L_4\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.4 Metode *Teaching*

Metode *teaching* pada *arm robot* merupakan pendekatan pemrograman di mana posisi dan gerakan robot diajarkan secara langsung oleh operator melalui antarmuka interaktif, kemudian disimpan dalam bentuk data yang dapat dieksekusi ulang oleh sistem kontrol. Secara konseptual, metode ini bertujuan untuk memberikan koordinat atau sudut tertentu pada setiap sendi (*joint angle*) dari robot agar *end-effector* dapat mencapai posisi target. Teknik ini banyak diterapkan pada sistem *industrial robotics* untuk mempermudah pemrograman jalur gerak tanpa memerlukan pengkodean manual yang kompleks [15].



Gambar 2.4 GUI *Teaching*

Implementasi metode *teaching* melalui komputer dapat dilakukan dengan antarmuka grafis berbasis *GUI toolkit* seperti *Tkinter* pada bahasa pemrograman Python. *Tkinter* menyediakan komponen visual seperti tombol, *slider*, dan label untuk mengatur nilai sudut tiap sumbu motor secara interaktif. Data perintah kemudian dikirimkan melalui komunikasi serial *COM port* ke *firmware* pada mikrokontroler yang mengendalikan motor stepper [16].

Jenis data yang dikirim dari komputer ke *firmware* adalah hasil pemrosesan sudut melalui perhitungan FK. FK digunakan untuk menghitung posisi *end-effector* dalam ruang kerja berdasarkan sudut yang diberikan pada masing-masing *joint*. Sudut-sudut ini kemudian disimpan dalam dua level penyimpanan. Pertama, dalam bentuk file JSON di lokal komputer untuk memungkinkan pengambilan data posisi secara fleksibel. Kedua, dalam bentuk data numerik sederhana yang disimpan pada EEPROM mikrokontroler untuk eksekusi mandiri tanpa ketergantungan pada komputer. File JSON digunakan karena kemudahannya dalam merepresentasikan data terstruktur, seperti pasangan kunci-nilai yang berisi informasi *joint angle* dan urutan *teaching step*.

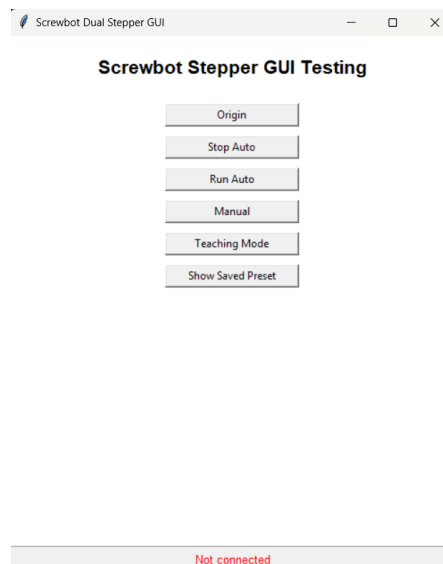
Dalam proses eksekusi pergerakan, *firmware* menerima input sudut untuk setiap *joint* dan menggerakkan *end-effector* sesuai dengan hasil perhitungan FK. Untuk menjamin akurasi posisi, sistem menggunakan *feedback* dari *magnetic encoder* AS5600 yang bekerja dengan prinsip sensor *hall effect*, mampu memberikan resolusi posisi hingga 12 bit atau setara dengan 4096 langkah per putaran [17]. Data *feedback* ini dapat digunakan untuk kalibrasi atau koreksi kesalahan posisi akibat *backlash* atau slip pada *gearbox cycloidal*.

2.5 Python

Python merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang bersifat *open-source*, mudah dipelajari, dan memiliki sintaks yang sederhana namun powerful, sehingga sangat cocok digunakan untuk berbagai aplikasi, mulai dari *scripting*, pengolahan data, hingga pengembangan perangkat lunak kompleks. Python juga memiliki komunitas yang besar dan ekosistem pustaka yang lengkap untuk berbagai kebutuhan teknis, termasuk pengembangan *Graphical*

User Interface (GUI) yang memudahkan interaksi antara manusia dan komputer.

Dalam bahasa pemrograman Python terdapat pustaka bawaan yang dapat memudahkan pengguna untuk mengembangkan antarmuka grafis yaitu *Tkinter*. *TKinter* adalah salah satu pustaka GUI standar yang sudah terintegrasi secara native dalam bahasa Python. Pustaka ini memungkinkan pengembang membuat antarmuka grafis yang interaktif dengan sangat mudah menggunakan widget dasar seperti tombol, *slider*, dan *entry box*. Berbeda dengan pustaka GUI lain yang memerlukan instalasi tambahan, *Tkinter* langsung dapat digunakan, sehingga cocok untuk *prototyping* maupun aplikasi yang membutuhkan respons cepat dan performa cukup baik pada berbagai platform. Dalam implementasinya, melalui *Tkinter*, pengguna dapat memasukkan sudut secara langsung untuk mengatur posisi sendi pada *arm robot* dan membaca data sudut secara *real-time*, yang kemudian dapat disimpan sebagai *teaching log*. Hal ini meningkatkan efisiensi operasi karena data *teaching* tersimpan dan dapat diakses kembali untuk pengulangan tugas.



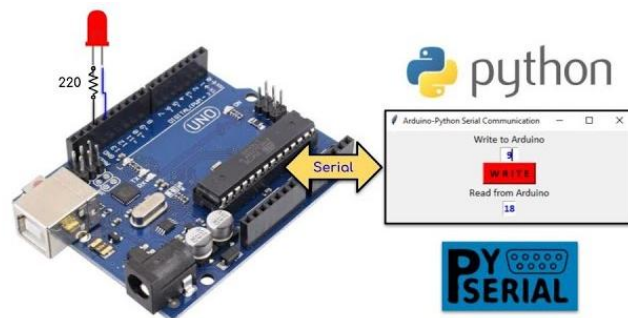
Gambar 2.5 GUI TKinter

GUI merupakan jembatan penghubung antara pengguna dan sistem perangkat lunak, yang menggantikan perintah berbasis teks dengan elemen grafis sehingga interaksi menjadi lebih intuitif dan mudah dipahami. Dalam

konteks *robotic arm screwing*, GUI yang dibangun dengan Tkinter memungkinkan penyesuaian sudut sendi, visualisasi *real-time* status robot, serta pencatatan data teaching untuk analisis dan pengoperasian berkelanjutan.

2.6 Komunikasi Serial COM Port

Komunikasi serial melalui COM port merupakan metode transmisi data secara berurutan dari satu bit ke bit lainnya menggunakan satu jalur komunikasi, yang umum digunakan untuk menghubungkan perangkat komputer dengan perangkat eksternal seperti mikrokontroler. COM *port* (*Communication Port*) berfungsi sebagai antarmuka komunikasi serial yang memungkinkan pertukaran informasi antara PC dan perangkat *embedded*, termasuk mikrokontroler. Dalam sistem komunikasi ini, data dikirim secara berurutan melalui sinyal digital yang dapat berupa level logika TTL (*Transistor-Transistor Logic*) atau RS-232 yang distandarisasi untuk komunikasi jarak pendek [18].



Gambar 2.6 PYSerial

Dalam konteks komunikasi antara PC dan mikrokontroler, komunikasi serial COM port memanfaatkan protokol UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), di mana data dikirim secara asinkron tanpa sinyal *clock* terpisah, menggunakan parameter seperti baud rate, data bit, parity, dan stop bit untuk sinkronisasi pengiriman dan penerimaan data [18].

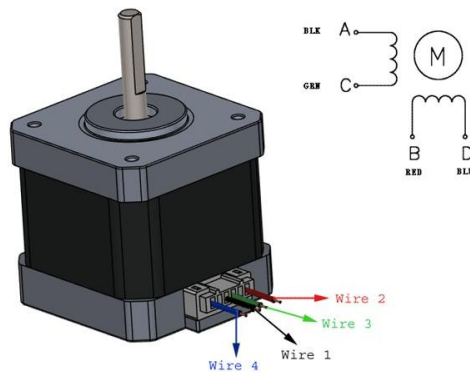
Aplikasi komunikasi serial COM *port* dalam *embedded systems* meliputi pengendalian perangkat, monitoring, dan debugging. Mikrokontroler yang terkoneksi melalui COM *port* ke PC dapat menerima perintah untuk mengontrol aktuator, membaca sensor, atau mengirim data sensor kembali ke

PC untuk dianalisis lebih lanjut. Hal ini memungkinkan pengembangan sistem *embedded* yang interaktif dan *real-time*, serta integrasi dengan aplikasi perangkat lunak di PC untuk mempermudah pengelolaan sistem kompleks [18].

Selain itu, utilisasi komunikasi COM *port* antara PC dan mikrokontroler memegang peranan krusial dalam implementasi *hot detection firmware* dan *upload* posisi *teaching joint* ke *firmware* secara *real-time*. Komunikasi serial ini memungkinkan deteksi saat *firmware* mengalami pembaruan (*hot detection*), sehingga memastikan proses *upload firmware* atau data *teaching* berjalan tanpa gangguan dan meminimalkan *downtime* sistem. Penggunaan COM *port* sebagai media transfer data juga mempercepat pengiriman posisi sudut sendi yang telah direkam pada GUI ke *firmware* ESP32, memungkinkan robot untuk melakukan reproduksi gerakan secara akurat sesuai data *teaching* yang diterima. Pendekatan ini memperkuat integrasi antara sistem perangkat lunak dan *embedded*, dan meningkatkan keandalan pengoperasian *robotic arm*.

2.7 Motor Stepper NEMA 17 17HS4401 dengan Cycloidal Gearbox

Motor stepper merupakan perangkat elektromekanis yang mengubah pulsa listrik digital menjadi gerakan mekanis langkah demi langkah (diskrit). Motor stepper berputar secara bertahap pada sudut tertentu berdasarkan urutan pulsa *input* yang diterima. Jenis motor stepper yang digunakan dalam penelitian ini adalah motor stepper NEMA 17, seperti pada Gambar 2.7. NEMA 17 mengacu pada ukuran motor stepper yang memiliki *flange* depan berukuran 1,7 inci atau 42 mm. Nema 17 adalah motor stepper hibrida yang menggabungkan prinsip motor stepper magnet permanen dan motor stepper reluktansi variabel [19], [20]. Motor stepper NEMA 17 ini merupakan motor stepper bipolar yang memiliki dua kumparan (fase) terpisah, dan setiap kumparan dihubungkan dengan dua kabel sehingga total ada empat kabel (*coils*) yang berfungsi untuk mengendalikan medan magnet pada statornya secara bergantian sehingga rotor bergerak secara bertahap sesuai urutan pengaliran listrik.



Gambar 2.7 Motor Stepper Nema 17

Tabel 2.2 Spesifikasi Motor Stepper Nema 17 17HS4401

Subjek	Spesifikasi
Step Angle	1.8° (200 langkah/putaran)
Holding Torque	45 N·cm (0.45 Nm)
Rated Current	1.68 A per fase
Resistansi	1.65 Ω per fase
Induktansi	3.2 mH (1 kHz)
Voltase	12 – 24 Volt

Jenis motor stepper yang digunakan dalam penelitian ini adalah motor stepper NEMA 17 tipe 17HS4401. Berdasarkan Tabel 2.2, motor stepper NEMA 17 17HS4401 memiliki spesifikasi, yaitu sudut langkah 1.8° per step, artinya motor melakukan 200 langkah untuk satu putaran penuh, torsi holding sebesar 40-45 N·cm yang menunjukkan torsi maksimum saat motor berhenti tetap mengunci posisinya, arus nominal sebesar 1.68A per fase, resistansi kumparan sekitar 1,65 Ω per fase, serta induktasni 3,2 mH pada frekuensi 1kHz. Motor ini dapat bekerja pada tegangan sebesar 12 hingga 24 V.



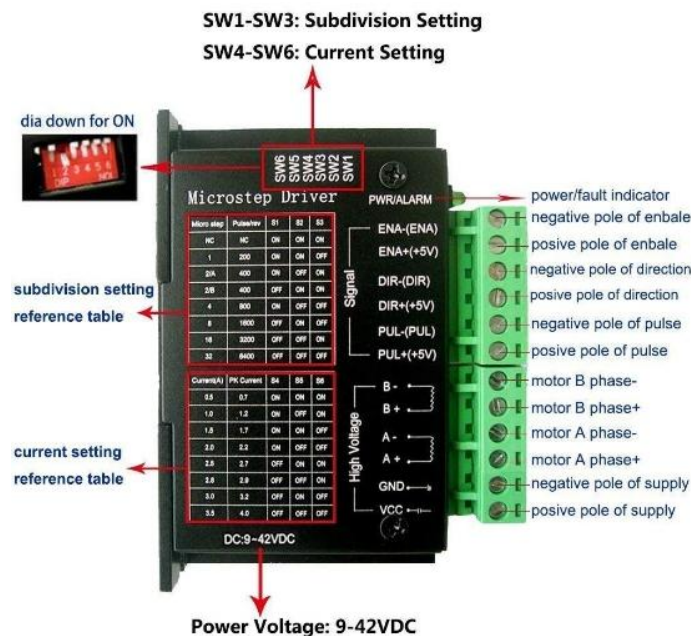
Gambar 2.8 Cycloidal Gear [21]

Cycloidal gearbox merupakan mekanisme reduksi putaran yang bekerja berdasarkan interaksi antara cakram *cycloidal* dengan susunan pin atau *roller* yang tersusun melingkar di dalam rumah *gearbox*. Mekanisme ini menghasilkan rasio reduksi yang tinggi melalui gerakan eksentrik, sehingga mampu menghasilkan torsi besar dengan dimensi yang relatif kompak [22]. Fungsi utama *cycloidal gearbox* pada sistem motor *stepper* adalah meningkatkan torsi keluaran (*output torque*) serta menurunkan kecepatan putar motor melalui rasio reduksi yang tinggi. Selain itu, *cycloidal gearbox* memiliki karakteristik *backlash* yang rendah, kapasitas beban yang tinggi, serta distribusi beban yang merata pada beberapa titik kontak, sehingga mampu meningkatkan kekakuan dan kehalusan gerakan pada aplikasi yang memerlukan kontrol posisi secara akurat, seperti lengan robot (*robotic arm*) [22].

2.8 Driver Motor TB6600

Driver Motor adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengatur dan mengendalikan arus serta sinyal yang masuk ke motor agar motor dapat beroperasi sesuai kebutuhan. Pada Gambar 2.9 driver motor TB6600 merupakan salah satu jenis driver motor yang dapat digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* dalam aplikasi seperti *robotic arm*. Prinsip kerja driver motor TB6600 dimulai dengan penerimaan sinyal pulsa (*step*) dan sinyal arah (*direction*) dari mikrokontroler atau perangkat kontrol lainnya. Driver ini kemudian mengubah sinyal tersebut menjadi aliran arus yang bergantian ke kumparan motor *stepper* sesuai pola penggerakan yang ditentukan. Melalui

pengaturan arus dan teknik *microstepping*, TB6600 mampu mengontrol kecepatan, torsi, dan posisi motor tanpa kehilangan langkah (*step loss*). Teknik *microstepping* merupakan metode pembagian langkah penuh motor menjadi beberapa sub-langkah lebih kecil, seperti 1/2, 1/4, 1/8, hingga 1/16 dan seterusnya, sehingga meningkatkan resolusi gerakan dibandingkan mode *full step*. Dengan penggunaan *microstepping*, arus yang dialirkan ke kumparan dikontrol secara lebih halus dan bertahap, menghasilkan perpindahan langkah motor yang halus, meminimalkan getaran dan suara saat beroperasi, serta memberikan ketepatan posisi motor.



Gambar 2.9 Driver Motor TB6600 [19]

Tabel 2.3 Konfigurasi Terminal TB6600 [20]

Terminal	Fungsi
ENA-	Negative enable pin of the module
ENA +	Positive enable pin, which is the +5V pin of the module
DIR -	Negative direction of the motor
DIR +	Positive direction of +5V
PUL -	Negative pulse (for controlling rotations step of the motor)
PUL +	Positive pulse of the motor

Tabel Lanjutan 2.3 Konfigurasi Terminal TB6600 [20]

Terminal	Fungsi
B -	Negative lead of stepper motor coil wire 2
B +	Positive lead of stepper motor coil wire 2
A -	Negative lead of stepper motor coil wire 1
A +	Positive lead of stepper motor coil wire 1
GND	Common ground connection of the module
VCC	Input supply voltage for the stepper motor driver module

Berdasarkan

Tabel 2.3, konfigurasi pin pada driver motor TB6600 terdiri dari beberapa pin yang berperan sebagai antarmuka kendali motor stepper. Pin *Pulse* (PUL+ dan PUL-) berfungsi menerima sinyal pulsa yang menentukan jumlah langkah rotasi motor. Pin *Direction* (DIR+ dan DIR-) digunakan untuk mengatur arah putaran motor sesuai kebutuhan aplikasi. Pin *Enable* (ENA+ dan ENA-) berfungsi untuk mengaktifkan atau menonaktifkan *output* driver secara keseluruhan. Selain itu, terdapat pin *output* motor (A+, A-, B+, B-) yang tersambung langsung ke kumparan motor stepper dua fase. TB6600 juga menyediakan opsi pengaturan mikrostep melalui sakelar DIP *switch* yang memungkinkan konfigurasi pembagian langkah motor menjadi pecahan yang lebih kecil, sehingga menghasilkan pergerakan motor yang lebih halus.

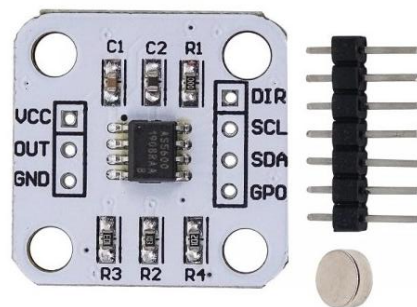
Tabel 2.4 Spesifikasi TB6600 [20]

Subjek	Spesifikasi
Operating Voltage	9 – 40V DC
Input Current	0 – 5.0 A
Output Current	0.5 – 4.0 A
Power (max)	160 W
Micro Step	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32

Berdasarkan Tabel 2.4 spesifikasi driver motor TB6600 mencakup tegangan kerja antara 9V hingga 40V DC. Driver ini mampu menangani arus input dari 0 sampai 5,0 ampere dan mengatur output arus ke motor antara 0,5 hingga 4,0 ampere. Daya maksimal yang dapat ditangani TB6600 mencapai 160 watt, sehingga dapat digunakan untuk menggerakkan motor dengan torsi besar. Fitur *microstepping* pada TB6600 menyediakan mode pembagian langkah mulai dari 1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, hingga 32, yang mendukung pengontrolan gerakan motor dengan resolusi tinggi dan perpindahan langkah yang lebih halus. Rentang suhu kerja operasional driver ini adalah antara -10 hingga 45 derajat Celsius.

2.9 Magnetic Encoder AS5600

Magnetic encoder AS5600 adalah sensor posisi magnetik yang memanfaatkan prinsip pemantauan medan magnet dari sebuah magnet permanen yang dipasang pada poros atau elemen bergerak untuk menentukan posisi sudut secara akurat dalam rentang 0 hingga 360 derajat. Sensor ini bekerja berdasarkan teknologi *hall effect*, di mana sensor mendeteksi perubahan medan magnet yang dipancarkan oleh magnet permanen yang berputar, lalu mengubahnya menjadi sinyal digital yang merepresentasikan posisi sudut secara absolut. Hal ini membuat AS5600 sangat relevan dalam aplikasi robotika yang membutuhkan pengukuran posisi dan non-kontak tanpa mengalami keausan mekanis[23].



Gambar 2.10 Sensor Posisi AS5600 [24]

Tabel 2.5 Konfigurasi Pin AS5600 [25]

Pin	Fungsi
DIR	Direction Configuration
SCL	I2C clock line
SDA	I2C data line
GPO	Output mode configuration
VCC	Catu daya
OUT	Analog output
GND	Ground

Dari

Tabel 2.5 dan Gambar 2.10 Sensor Posisi AS5600 [24] AS5600 memiliki sejumlah pin dengan fungsi spesifik, yaitu pin *VCC* untuk catu daya, *GND* sebagai referensi ground, pin *SCL* dan *SDA* yang merupakan jalur komunikasi *I2C* untuk pengiriman data posisi ke mikrokontroler, pin *OUT* yang dapat memberikan keluaran sinyal PWM sebagai representasi posisi sudut, serta pin *DIR* yang dapat digunakan untuk kontrol arah rotasi. Setiap pin ini dirancang untuk memberikan kemudahan integrasi dengan sistem lain dalam perangkat robotik dan memastikan komunikasi data yang handal serta konsumsi daya yang rendah[23].

Konsep penentuan arah dengan magnet pada magnetic encoder AS5600 didasarkan pada orientasi kutub magnet permanen terhadap sensor, di mana

perubahan posisi putaran magnet menghasilkan variasi medan magnet yang terdeteksi oleh sensor sebagai perubahan sudut putaran. Sensor mampu menentukan arah dan besar sudut rotasi secara absolut karena manufaktur magnet dan sensor telah dikalibrasi untuk membaca perubahan arah medan magnet secara tepat dan tidak ambigu. Teknologi ini memungkinkan pembacaan posisi dilakukan secara *real-time* tanpa noise mekanis serta menghindari kesalahan akibat *slippage*[23].

2.10 DWIN HMI

Human-Machine Interface (HMI) merupakan perangkat yang mendukung interaksi antara manusia dan mesin atau perangkat elektronik. HMI digunakan untuk memfasilitasi kontrol, monitoring, dan pengoperasian sebuah sistem oleh pengguna. DWIN HMI adalah jenis HMI yang menyediakan tampilan visual, input kontrol, dan umpan balik secara real-time.



Gambar 2.11 DWIN HMI 4.3 Inch

Berdasarkan Gambar 2.11, modul ini dilengkapi dengan *Real Time Clock* (RTC) yang berfungsi memberikan penunjuk waktu akurat bahkan ketika perangkat dalam kondisi mati karena adanya baterai cadangan. Untuk proses pemrograman atau pembaruan *firmware*, modul ini memiliki *PGT05 Interface* yang digunakan untuk menghubungkan kabel downloader khusus DWIN. Selain itu, terdapat slot ekspansi untuk modul USB atau WiFi yang mendukung perluasan fungsi komunikasi perangkat melalui koneksi nirkabel atau melalui

media penyimpanan USB. Komponen *buzzer* tersedia sebagai output audio untuk alarm atau notifikasi sistem. Slot kartu SD dapat digunakan untuk menyimpan file konfigurasi, data log, atau sumber grafis secara eksternal. Penyimpanan internal dapat ditingkatkan melalui area Expand FLASH yang mendukung penambahan chip memori flash. Perangkat ini juga memiliki saklar ON-TTL / OFF-RS232 untuk memilih mode komunikasi serial, baik menggunakan level tegangan TTL maupun RS232. *Interface TP* (*Touch Panel*) berfungsi menghubungkan layar sentuh sebagai antarmuka utama bagi pengguna. *Liquid Crystal Module* (LCM) menghubungkan panel tampilan LCD/TFT untuk output visual yang interaktif. Selain itu, terdapat *User Interface* yang dapat dikustomisasi sesuai kebutuhan, seperti tombol atau indikator LED. Seluruh fungsi tersebut dikendalikan oleh chip prosesor utama T5L ASIC dari seri DWIN, yang bertugas memproses sistem operasi, pengolahan grafis, input/output, dan komunikasi data pada modul.

Tabel 2.6 Spesifikasi DWIN HMI [28]

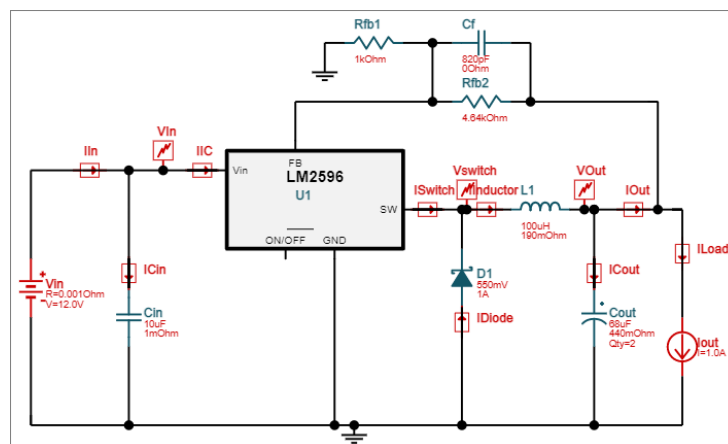
Subjek	Spesifikasi
Tegangan Operasi	9 – 36V, nilai tipikal 12V
Arus Operasi	200 mA, Vcc = 12V lampu latar maks
	65 mA, Vcc = 12V lampu latar mati
Suhu Operasional	-10°C - 60°C
Tipe LCD	Layar IPS, TFT LCD
Sudut Pandang	Sudut pandang lebar, 85°/85°/85°/85° (L/R/U/D)
Resolusi	480×800 piksel (mendukung 0°/90°/180°/270°)
Warna	18-bit 6R6G6B

Berdasarkan Tabel 2.6, DWIN HMI beroperasi pada tegangan suplai antara 9V hingga 36V dengan nilai tipikal sebesar 12V. Arus operasinya mencapai 200 mA saat lampu latar menyala pada tegangan 12V, sementara saat lampu latar mati, arus yang diperlukan menurun menjadi 65 mA. Modul ini berfungsi optimal dalam rentang suhu operasional antara –10 hingga 60 derajat Celcius. Layar yang digunakan adalah tipe IPS TFT LCD, dengan sudut pandang lebar

yaitu 85 derajat ke kiri, kanan, atas, dan bawah (L/R/U/D). Resolusi layar mencapai 480 x 800 piksel dan mendukung orientasi tampilan dalam sudut 0°, 90°, 180°, dan 270°. Selain itu, layar menampilkan warna dengan kedalaman 18-bit, menggunakan format 6 bit untuk masing-masing warna merah (R), hijau (G), dan biru (B), sehingga menghasilkan reproduksi warna yang kaya dan akurat. Dalam perancangan ini, DWIN HMI berfungsi sebagai antarmuka pengendali sehingga pengguna dapat melakukan proses *teaching* atau pelatihan sudut *joint* robot.

2.11 Regulator Tegangan

Regulator tegangan adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk menjaga tegangan keluaran agar tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban atau fluktuasi tegangan pada sumber. Regulator tegangan berfungsi untuk menjaga perangkat atau sistem yang menggunakan sumber listrik mendapatkan tegangan yang konstan sesuai kebutuhan untuk mencegah kerusakan komponen. Dengan demikian, IC regulator tegangan digunakan sebagai komponen pengatur tegangan di dalam rangkaian elektronik.



Gambar 2.12 LM2596 Schematic [29]

Gambar 2.12 LM2596 Schematic merupakan rangkaian *schematic switching regulator step-down (buck converter)* berbasis IC LM2596. Prinsip kerja *buck converter* LM2596 didasarkan pada teknik *switching step-down* yang mengubah tegangan *input* (V_{in}) menjadi tegangan *output* (V_{out}) yang lebih

rendah dengan menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM). Saat MOSFET internal aktif (*switching* ON), arus mengalir dari sumber tegangan melalui induktor menuju beban, sehingga energi tersimpan dalam medan magnet induktor secara bertahap. Ketika MOSFET dimatikan (*switching* OFF), induktor melepaskan energi yang tersimpan melalui dioda *flyback* ke beban, menjaga aliran arus tetap berkelanjutan. Kapasitor output kemudian melakukan filtering untuk meratakan tegangan dan mengurangi *ripple*, menghasilkan keluaran DC yang stabil. Proses *switching* ini terjadi secara berulang ribuan kali per detik sesuai frekuensi PWM yang diatur oleh kontroler PWM internal IC LM2596, yang mengontrol duty cycle untuk menyesuaikan tegangan output sesuai kebutuhan. Selain itu, potensiometer atau resistor pembagi tegangan bisa digunakan untuk mengatur nilai tegangan output [29].



Gambar 2.13 Regulator Tegangan LM2596

Tabel 2.7 Spesifikasi Step-down LM2596 [30]

Subjek	Spesifikasi
<i>Input Voltage</i>	4 - 40V
<i>Output Voltage</i>	1.25V - 37V (<i>Adjustable</i>)
<i>Output Current Max</i>	3A
Frekuensi Operasional	150 kHz
Efisiensi Konversi	Hingga 92%

Berdasarkan Tabel 2.7, spesifikasi *step-down* regulator LM2596 memiliki rentang tegangan input antara 4 hingga 40 V, dengan tegangan keluaran yang dapat diatur mulai dari 1,25 V hingga 37 V. Regulator ini mampu memberikan

arus keluaran maksimum sebesar 3 A. Frekuensi operasionalnya mencapai 150 kHz, memungkinkan switching yang cepat. Selain itu, efisiensi konversi daya pada LM2596 dapat mencapai hingga 92% yang membantu meminimalkan kehilangan energi selama proses penurunan tegangan.

2.12 Switched-Mode Power Supply 24V 20A

Switched-Mode Power Supply (SMPS) adalah rangkaian elektronik yang berfungsi mengubah tegangan listrik AC dari sumber input menjadi tegangan output DC yang stabil. Prinsip kerja SMPS didasarkan pada teknik *switching*, dimana komponen seperti transistor atau MOSFET bekerja secara ON/OFF dengan frekuensi tinggi sehingga mengatur aliran daya listrik. Energi yang dihasilkan disimpan sementara pada komponen induktor dan kapasitor, kemudian diatur dan dihaluskan agar menghasilkan tegangan keluaran DC yang stabil. Dalam SMPS, terdapat berbagai topologi yang umum digunakan seperti *buck* (penurun tegangan), *boost* (peningkat tegangan), dan *buck-boost converter*.



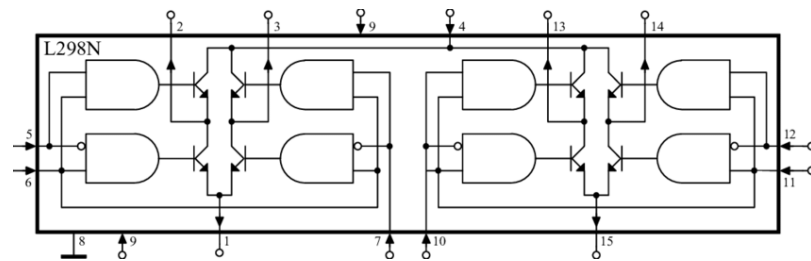
Gambar 2.14 SMPS 24V 20A

Tabel 2.8 SMPS 24V [31]

Subjek	Spesifikasi
Input Voltage	100 – 264V AC, 50/60Hz
Output Voltage	24V DC
Output Current Max	20 A
Daya Output	480 W

2.13 BTS7960 Motor Driver

Modul BTS7960 merupakan salah satu *driver* motor DC berdaya tinggi yang secara spesifik didesain untuk aplikasi dengan beban arus yang besar. Modul ini berfungsi sebagai penguat arus (*current amplifier*) yang mengonversi sinyal logika berdaya rendah dari mikrokontroler agar dapat mengendalikan motor yang membutuhkan arus dan tegangan yang jauh lebih besar. Mikrokontroler umumnya hanya mampu mengeluarkan arus dalam orde miliampere (mA), sedangkan aktuator seperti motor DC bertorsi tinggi pada lengan robot membutuhkan suplai arus hingga beberapa ampere agar dapat beroperasi dan mengatasi beban mekanik secara optimal[32].



Gambar 2.15 Dual H Bridge

Berdasarkan Gambar 2.15, modul BTS7960 pada dasarnya beroperasi menggunakan topologi *Full H-Bridge*, yang tersusun dari gabungan dua buah IC BTS7960 (*Half-Bridge*). Rangkaian ini memungkinkan motor DC berputar ke dua arah (maju dan mundur) hanya dengan mengubah sinyal pada pin kendali masukan. Topologi *H-Bridge* ini memanfaatkan saklar elektronik berupa *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET) yang membentuk konfigurasi menyerupai huruf "H". Dengan memberikan variasi sinyal PWM pada pin *Right PWM* (RPWM) atau *Left PWM* (LPWM), kombinasi MOSFET yang aktif akan membalikkan polaritas arus yang menuju motor [31]. Sebagai contoh, ketika arus mengalir searah, poros motor akan berputar searah jarum jam (*clockwise*), dan ketika arah arus dibalik, motor akan berputar berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise*).



Gambar 2.16 BTS7960

Tabel 2.9 Spesifikasi BTS7960

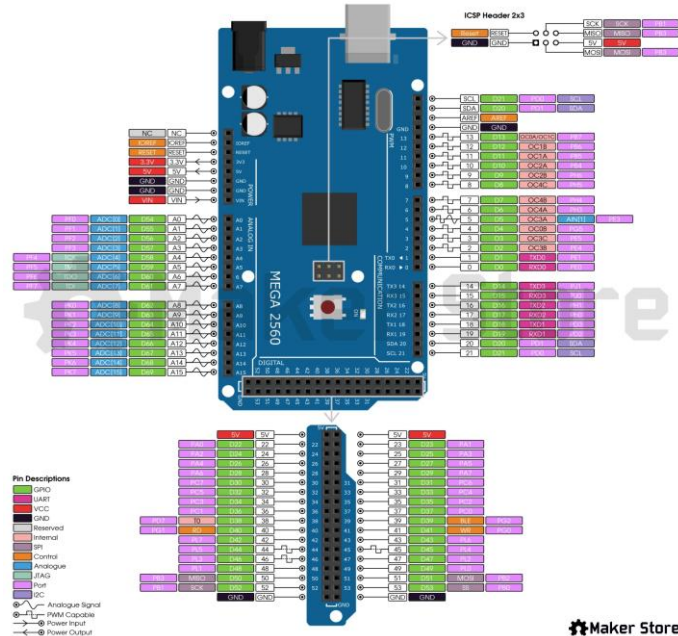
Subjek	Spesifikasi
<i>Motor Supply Voltage</i>	5,5 V – 27 V
<i>Input Voltage</i>	3,3 V – 5 V
Arus	43 A
<i>Channel</i>	1
Dimensi	50 mm x 50 mm x 43 mm

Berdasarkan Tabel 2.9 Spesifikasi , Spesifikasi BTS7960, modul *driver* motor ini memiliki rentang tegangan suplai motor (*motor supply voltage*) antara 5,5V hingga 27V, dengan tegangan logika masukan (*logic input voltage*) sebesar 3,3V hingga 5 V. Keunggulan utama dari *driver* ini dibandingkan *driver* standar lainnya adalah kemampuannya dalam menyuplai arus keluaran maksimum yang sangat besar, yakni mencapai 43A. Selain itu, modul ini dilengkapi dengan sistem keamanan internal berupa proteksi suhu berlebih (*thermal shut-down*) dan proteksi tegangan berlebih (*overvoltage protection*) yang sangat esensial untuk menjaga kestabilan perangkat keras saat sistem beroperasi pada beban tinggi. Setiap satu buah modul BTS7960 didedikasikan secara khusus untuk mengontrol satu buah aktuator motor DC[33].

2.14 Arduino Mega 2560

Mikrokontroler merupakan komputer yang berukuran mikro dalam satu chip IC (*Integrated Circuit*) yang tersusun atas *processor*, *memory*, dan antarmuka yang dapat diprogram. Arduino Mega 2560 merupakan jenis *board* mikrokontroler yang dipakai untuk pengembangan sistem elektronik. Arduino

Mega 2560 didasarkan pada mikrokontroler ATmega2560, yang merupakan mikrokontroler 8 bit.



Gambar 2.17 Pinout Arduino Mega 2560 [34]

Berdasarkan Gambar 2.17, *board* ini memiliki 54 pin digital *input/output*, dimana 15 di antaranya dapat digunakan sebagai keluaran PWM, serta 16 pin input analog. Arduino Mega juga dilengkapi dengan 4 *port* serial *hardware* (UART) sehingga dapat terhubung ke beberapa perangkat serial secara bersamaan.

Tabel 2.10 Spesifikasi Arduino Mega 2560 [35]

Subjek	Spesifikasi
<i>Clock Speed</i>	16 Mhz
EEPROM	4 KB
SRAM	8 KB
<i>Flash Memory</i>	256 KB of which 8 KB used by bootloader
<i>Operating Voltage</i>	5V

Berdasarkan Tabel 2.10 Spesifikasi Arduino Mega 2560, *board* mikrokontroler ini beroperasi pada kecepatan clock sebesar 16 MHz. Untuk penyimpanan data yang bersifat non-volatile, Arduino Mega 2560 menyediakan EEPROM

sebesar 4 KB. Selain itu, terdapat SRAM sebesar 8 KB yang berfungsi sebagai memori kerja untuk pengolahan data sementara selama program berjalan. Kapasitas *flash memory* yang dimiliki adalah 256 KB, dimana 8 KB di antaranya digunakan untuk *bootloader*. Arduino Mega 2560 beroperasi pada tegangan 5V. Dengan demikian, pada penelitian ini Arduino Mega 2560 digunakan sebagai pengendali utama pada sistem *arm robot screwing*.

2.15 Motor DC JGB37-545

Motor DC JGB37-545 merupakan motor arus searah (DC) yang dilengkapi dengan *gearbox* tipe *spur* sehingga mampu menghasilkan torsi yang lebih besar dengan kecepatan putaran yang lebih rendah dibandingkan motor DC tanpa *gearbox*. Prinsip kerja motor DC JGB37-545 adalah mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik berupa putaran poros melalui interaksi medan magnet pada *stator* dan *rotor*. *Gearbox* yang terpasang berfungsi untuk mereduksi kecepatan putar motor sekaligus meningkatkan torsi keluaran, sehingga motor lebih sesuai digunakan pada aplikasi yang membutuhkan pergerakan yang stabil. Pada penelitian ini, motor DC JGB37-545 digunakan sebagai aktuator *end-effector* untuk memutar mata obeng (*screwdriver bit*) pada proses *screwing*. Kombinasi torsi yang tinggi dan putaran yang stabil memungkinkan motor menghasilkan gaya putar yang cukup untuk mengencangkan maupun melepaskan baut secara efektif.



Gambar 2.18 Motor DC JGB37-545

Berdasarkan Gambar 2.18, konfigurasi pin motor DC JGB37-545 terdiri dari dua terminal utama, yaitu motor (+) dan motor (-) yang digunakan sebagai masukan catu daya. Perubahan polaritas pada kedua terminal tersebut akan mengubah arah putaran motor (*clockwise* dan *counter-clockwise*). Pada penelitian ini, motor

dikendalikan menggunakan *driver* motor BTS7960 sehingga arah putaran dan kecepatan motor dapat diatur melalui sinyal PWM yang dikirimkan oleh mikrokontroler Arduino Mega 2560.

Tabel 2.11 Spesifikasi Motor DC JGA12 N20

Subjek	Spesifikasi
Tegangan Kerja	12 V DC
Rated RPM	47 RPM
Diameter Gearbox	37 mm
Diameter poros	6 mm
Panjang poros	± 14 mm

Berdasarkan Tabel 2.11, motor DC JGB37-545 bekerja menggunakan catu daya 12 Volt DC. Motor ini menggunakan *gearbox* berdiameter 37 mm yang mampu meningkatkan torsi keluaran sesuai dengan rasio reduksi yang digunakan. Diameter poros keluaran sebesar 6 mm dengan bentuk *D-Shaft*, sehingga memudahkan pemasangan *coupling* maupun *holder* mata obeng. Kecepatan putaran keluaran motor 47 RPM.

2.16 TCA9548A

Modul TCA9548A merupakan sebuah I²C multiplexer yang berfungsi untuk memperluas jumlah perangkat yang dapat dihubungkan pada satu jalur komunikasi I²C. Modul ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan sistem I²C konvensional, terutama ketika terdapat beberapa perangkat dengan alamat yang sama sehingga tidak dapat digunakan secara bersamaan pada satu bus. Dengan menggunakan TCA9548A, setiap perangkat I²C dapat dihubungkan ke kanal yang berbeda, sehingga komunikasi antarperangkat menjadi lebih teratur dan bebas konflik.

Prinsip kerja TCA9548A, bekerja dengan mengalihkan sinyal SDA (*Serial Data*) dan SCL (*Serial Clock*) dari mikrokontroler ke salah satu dari delapan kanal I²C yang tersedia. Pemilihan kanal dilakukan melalui perintah I²C, di mana mikrokontroler mengirimkan data konfigurasi untuk menentukan kanal mana yang akan diaktifkan. Dengan cara ini, hanya satu kanal yang aktif dalam

satu waktu, dan data dari mikrokontroler akan diteruskan hanya ke perangkat yang terhubung pada kanal tersebut.



Gambar 2.19 TCA9548A

Tabel 2.12 Spesifikasi TCA9548A

Subjek	Spesifikasi
<i>Input Voltage</i>	1.65V 5.5V
<i>Channel</i>	8
Kecepatan komunikasi	Hingga 400 kHz
Dimensi	25 mm x 25 mm

Berdasarkan Tabel 2.12 Spesifikasi TCA9548A modul TCA9548A memiliki delapan kanal komunikasi I²C yang masing-masing terdiri dari jalur SDA dan SCL. Modul ini bekerja pada rentang tegangan 1,65V hingga 5,5V DC, sehingga dapat digunakan baik pada sistem logika 3,3V maupun 5V. Komunikasi antara TCA9548A dan mikrokontroler menggunakan protokol I²C standar dengan kecepatan transfer data mencapai 400 kHz (mode cepat). Modul ini memiliki rentang alamat I²C dari 0x70 hingga 0x77 yang dapat diatur melalui tiga pin konfigurasi, yaitu A0, A1, dan A2. Dengan konfigurasi tersebut, beberapa modul TCA9548A dapat dihubungkan secara bersamaan dalam satu sistem tanpa terjadi konflik alamat.