pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v22i3.xxxxx

RANCANG BANGUN *6-DOF WELDING ARM MANIPULATOR ROBOT* BERBASIS STM32

Alfonsus Giovanni[1)], Fakhruddin Mangkusasmito[*2)]
Progam Studi D-IV Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmail.com*

ABSTRACT

In the era of Industry 4.0, the demand for automation in the manufacturing sector continues to grow, particularly in welding processes that require high efficiency, consistency, and quality. Robotic arm manipulators have become a widely adopted solution in various countries, including Indonesia. However, the dominance of imported products poses challenges such as high investment costs and limited customization capabilities. This research aims to design and develop a six-degree-of-freedom (6-DoF) welding robotic arm manipulator using the STM32H7 microcontroller as the main control system. The STM32H7 was selected for its high processing performance, low power consumption, and flexibility in integrating sensors and actuators. The outcomes of this study are expected to contribute as an alternative solution for the development of domestic industrial robotics, thereby reducing reliance on imported technologies and supporting national technological self-sufficiency. Several tests were conducted on the developed system, including repeatability testing. The results indicate that the prototype achieved a repeatability value of ±0.225 mm, which is still lower than that of comparable industrial-grade systems (±0.02 mm). This finding suggests that while the system shows promise, further refinement is required to meet industrial performance standards

Keywords*: arm manipulator robot, welding, STM32H7, 6-DoF, automation, Industry 4.0.*

PENDAHULUAN

Dalam era Industri 4.0, otomatisasi dan digitalisasi menjadi faktor utama dalam peningkatan efisiensi dan produktivitas di sektor manufaktur. Salah satu teknologi yang banyak diterapkan dalam industri adalah robot manipulator lengan untuk proses pengelasan, yang berperan dalam meningkatkan kecepatan, konsistensi, dan kualitas hasil produksi. Penggunaan robot manipulator lengan untuk pengelasan telah banyak diterapkan di berbagai negara, termasuk di Indonesia. Namun, hingga saat ini, sebagian besar robot yang digunakan di industri dalam negeri masih merupakan produk impor. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun teknologi tersebut sudah diterapkan, Indonesia belum memiliki produsen lokal yang mampu membuat robot manipulator lengan dengan 6 derajat kebebasan (DOF) untuk keperluan pengelasan.

Ketergantungan terhadap produk impor menimbulkan berbagai tantangan, di antaranya adalah biaya investasi yang tinggi, keterbatasan dalam kustomisasi teknologi, serta ketergantungan terhadap suku cadang dan layanan purna jual dari negara produsen. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengembangkan robot manipulator lengan dalam negeri guna mengurangi ketergantungan impor dan mendukung pertumbuhan industri robotika dan otomatisasi di Indonesia.

Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan dalam pengembangan ini adalah penggunaan kontroler berbasis STM32H7 sebagai sistem kendali utama. Mikrokontroler STM32H7 dipilih karena memiliki kecepatan pemrosesan yang tinggi, sehingga dapat menangani algoritma kendali gerak secara real-time dengan presisi tinggi. Selain itu, STM32H7 juga menawarkan efisiensi daya yang baik, memungkinkan sistem bekerja secara optimal dengan konsumsi energi yang lebih rendah, serta dilengkapi dengan jumlah pin masukan dan keluaran yang lengkap, yang mendukung fleksibilitas dalam integrasi berbagai sensor dan aktuator pada robot manipulator. Dengan menggunakan STM32H7 sebagai kontroler utama, robot manipulator lengan yang dikembangkan diharapkan memiliki sistem kendali yang akurat, responsif, dan fleksibel, serta dapat diintegrasikan dengan berbagai komponen pendukung dalam proses pengelasan otomatis.

Kinematika Maju

Kinematika maju atau biasa disebut dengan *forward kinematics* merupakan suatu metode kinematika yang sering digunakan dalam robotika, khususnya robot lengan. Pada robot lengan, *forward kinematics* digunakan untuk mendapatkan posisi *end effector* pada robot dengan memberikan nilai parameter yang spesifik terhadap tiap sudut pada lengan robot. *Forwad kinematics* menggunakan prinsip dari matriks rotasi dan translasi yang membentuk suatu matriks transformasi. Di mana untuk merepresentasikan hubungan posisi atau orientasi antar segmen dilakukan dengan mengalikan secara berurutan matriks transformasi setiap sendi dari base robot hingga *end effector*.

Terdapat istilah DH parameter atau Denavit-Hartenberg parameter pada penerapan kinematika maju. DH parameter digunakan sebagai referensi kinematika robot dalam menghubungkan posisi dan

orientasi antar hubungan satu sendi ke sendi berikutnya pada robot lengan (*link*). Parameter ini mencakup 4 parameter yang didapat berdasarkan hubungan antara sumbu *x* dan *z*, parameter tersebut adalah

1. **Rotasi Sendi** ($\boldsymbol{\theta}$). Merupakan parameter sudut rotasi pada sumbu z_i antara sumbu x_i ke sumbu x_{i+1}
2. **Sudut Link** ($\boldsymbol{\alpha_i}$). Merupakan parameter sudut rotasi pada sumbu x_{i+1} antara sumbu z_i ke sumbu z_{i+1}
3. **Pergeseran Link** ($\boldsymbol{d_i}$). Merupakan parameter jarak translasi sepanjang sumbu z_i yang menghubungkan link x_i ke link x_{i+1}
4. **Panjang Link** ($\boldsymbol{r_i}$). Merupakan parameter jarak translasi sepanjang sumbu x_i yang menghubungkan sumbu z_i ke sumbu z_{i+1}

Dengan menggunakan parameter tersebut maka matriks transformasi setiap sendi dapat diketahui dengan melakukan perkalian antara ke empat parameter, Berikut rumus untuk mendapatkan transformasi pada setiap sendi,

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & r_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & r_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Kinematika Balik

Kinematika balik atau biasa disebut dengan *inverse kinematics* merupakan suatu metode kinematika yang sering digunakan dalam robot lengan selain kinematika maju atau *forward kinematics*. Berbeda dengan kinematika maju, kinematika balik digunakan untuk mendapatkan nilai sudut pada setiap sendi robot dengan memberikan parameter posisi *x,y,* dan z pada end *effector*. Kinematika balik menggunakan prinsip dasar geometri dan trigonometri. Di mana untuk mendapatkan nilai sudut berdasarkan prinsip dasar tersebut dapat digunakan beberapa rumus sesuai dengan analisa pada model kinematika robot seperti aturan cosinus, aturan pythagoras, trigonometri dasar, trigonometri balik, penjumahan sudut, hingga matriks rotasi.

Sebagai contoh jika suatu lengan robot bergerak dari titik (*x*, *y*) menuju titik (*x'*, *y'*) dengan sendi pada lengan tersebut berputar pada sumbu *z* maka dapat digunakan rumus trigonometri balik. Berikut merupakan contoh rumus yang umum digunakan pada kinematika balik berdasarkan prinsip geometri dan trigonometri,

1. Rumus aturan cosinus

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \times cosA \quad (2)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \times cosB \quad (3)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \times cosC \quad (4)$$

2. Rumus Pythagoras

$$a = \sqrt{b^2 + c^2} \quad (5)$$

3. Trigonometri Dasar

$$\sin(\theta) = \frac{sisi\ depan}{sisi\ miring} \quad (6)$$

$$\cos(\theta) = \frac{sisi\ samping}{sisi\ miring} \quad (7)$$

$$\tan(\theta) = \frac{sisi\ depan}{sisi\ samping} \quad (8)$$

4. Trigonometri Balik

$$\theta = arcsin \frac{sisi\ depan}{sisi\ miring} \quad (9)$$

$$\theta = arccos \frac{sisi\ samping}{sisi\ miring} \quad (10)$$

$$\theta = arctan\ \frac{sisi\ depan}{sisi\ samping} \quad (11)$$

Singularitas

Singularitas pada robot lengan merupakan suatu titik atau koordinat dalam area kerja robot yang menyebabkan robot kehilangan salah satu atau lebih derajat kebebasan, di mana saat *end effector* robot mendekati titik ini robot dapat bergerak dengan kecepatan tak terhingga dan bahkan berhenti secara mendadak. Singularitas terjadi di saat robot tidak bisa menyelesaikan perhitungan sudut pada salah satu sendi atau lebih yang disebabkan oleh hasil perhitungan yang tak terhingga pada suatu titik di dalam area kerja robot. Hasil perhitungan yang tak terhingga disebabkan oleh banyaknya probabilitas sudut yang dapat dilakukan untuk mencapai titik tersebut. Berikut merupakan contoh singularitas yang ada pada robot lengan dengan 6 derajat kebebasan,

1. **Singularitas pergelangan (*wirst singularity*)**
   Singularitas pergelangan terjadi di saat sendi ke-4 dan ke-6 berada pada bidang yang sama dan paralel satu sama lain. Pada titik singularitas ini sendi ke-4 dan ke-6 pada robot memiliki probabilitas sudut yang tak terhingga.
2. **Singularitas siku (*elbow singularity*)**
   Singularitas siku terjadi apabila titik tengah pada pergelangan robot (sendi 4, 5, 6) berada pada bidang yang sama dengan sendi 2 dan 3. Pada titik sinuglaritas ini sendi 3 pada robot memiliki probabilitas sudut yang tak terhingga.
3. **Singularitas bahu (*shoulder singularity*)**
   Singularitas bahu terjadi apabila titik tengah pada pergelangan robot (sendi 4, 5, 6) sejajar dengan sendi 1. Pada titik singularitas ini

sendi 1 dan 4 pada robot memiliki probabilitas sudut yang tak terhingga.

Singularitas yang terjadi pada robot dapat berakibat buruk pada robot khusunya aktuator robot, dikarenakan adanya kemungkinan pada sendi untuk bergerak dengan kecepatan tak terhingga hingga berhenti secara mendadak. Oleh karena hal tersebut, diperlukan cara untuk menghindari terjadinya singularitas pada robot, metode yang digunakan untuk menghindari terjadinya singularitas pada robot lengan biasa disebut dengan *singularity avoidence* atau pencegahan singularitas. Salah satu metode untuk mencegah terjadinya singularitas adalah dengan menggunakan metode Matriks Jacobian.

Matriks Jacobian

Matriks Jacobian adalah sebuah matriks multidimensional yang berisi turunan parsial dari fungsi-fungsi keluaran terhadap variabel-variabel masukannya. Sebagai contoh terdapat fungsi $f_1(x, y) = x^2 + y$ dan $f_2(x, y) = xy$, maka matriks jacobian dari fungsi tersebut adalah,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2x & 1 \\ y & x \end{bmatrix} \quad (12)$$

Pada robot manipulator lengan, matriks jacobian sering digunakan sebagai metode untuk mendeteksi titik singularitas pada lengan robot. Nilai determinan dari matriks jacobian akan bernilai 0 di saat titik singularitas tercapai. Berikut merupakan contoh fungsi yang merepresentasikan suatu posisi pada sistem ruang cartesian (x, y),

$$y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (13)$$

$$y_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (14)$$

$$y_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad (15)$$

Dikarenakan ruang cartesian merupakan ruang yang menggambarkan suatu posisi, maka kecepatan pada ruang cartesian dapat diibaratkan sebagai differensiasi antar dua posisi, maka didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$\partial y = \frac{\partial F}{\partial X} \times \partial x = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = J \times \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

Melihat persamaan sebelumnya serta mengetahui matriks jacobian dapat merepresentasikan posisi kecepatan sudut dan kecepatan pada ruang cartesian maka didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \end{bmatrix} = J \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

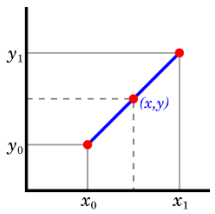
Perencanaan Lintasan

Perencanan lintasan atau *trajectory planning* merupakan suatu metode yang digunakan untuk melakukan pemosisian dari satu titik ke titik yang lain dengan pola tertentu agar mendapatkan pergerakan robot yang efisien, halus, dan mudah dikontrol. Dalam pengembangan robot manipulator lengan terdapat beberapa jenis perencanaan trayektori yang umum digunakan antara lain,

1. *Cartesian Based Trajectory*
   Merupakan jenis perencanaan trayektori berdasarkan posisi *end effector* pada ruang kartesian (x, y, z), metode ini membutuhkan setidaknya 2 posisi yaitu posisi awal (x, y, z) dan posisi akhir (x', y', z'), dari dua posisi tersebut pergerakan robot dapat ditentukan dengan memilih jenis interpolasi yang akan digunakan.
2. *Joint Based Trajectory*
   Merupakan jenis perencanaan trayektori berdasarkan besar sudut pada setiap sendi, metode ini membutuhkan nilai sudut awal dan nilai sudut akhir dari setiap sendi pada lengan robot. Dari dua nilai sudut tersebut pergerakan robot dapat ditentukan dengan memilih jenis interpolasi yang akan digunakan.

Kedua jenis trayektori tersebut sama-sama membutuhkan model interpolasi antar nilai posisi atau sudut yang akan menentukan karakteristik pergerakan robot. Berikut merupakan jenis-jenis interpolasi yang umum diterapkan pada robot manipulator lengan,

1. Interpolasi Linear



Gambar 1. Pola Interpolasi Linear

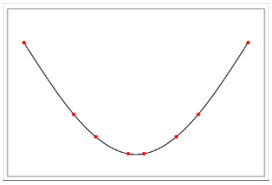
Interpolasi linear adalah interpolasi yang menggunakan metode *curve fitting* dengan polinomial linear, interpolasi ini menghubungkan dua atau lebih titik dalam garis lurus atau linear, karena antar titik terhubung secara garis lurus, pergerakan yang dihasilkan pada interpolasi ini cenderung memiliki sifat yang kaku atau patah-patah. Nilai y (posisi yang dicari) pada interpolasi linear dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut dengan x sebagai nilai dalam interval $[x_i, x_{i+1}]$,

$$\frac{y-y_i}{x-x_i} = \frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i} \quad (18)$$

Jika y merupakan posisi yang dicari pada interval x maka rumus di atas dapat disederhanakan menjadi,

$$y = y_i + (x - x_i) \times \left(\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}\right) \quad (19)$$

2. Interpolasi Spline



Gambar 2. Pola Interpolasi Spline

Interpolasi Spline merupakan sebuah metode untuk menghubungkan sejumlah titik data tertentu (*knots*) dengan menggunakan polinomial derajat rendah (*low-degree polynomial*) yang menghasilkan garis yang halus dan memiliki error interpolasi yang kecil. Dalam mendapatkan nilai y (posisi yang dicari) pada interpolasi spline dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan *cubic spline*, di mana jika terdapat n+1 titik data (x_0, y_0), (x_1, y_1), ..., (x_i, y_i), maka *cubic spline* $S_{(x)}$ di setiap interval [x_i, x_i+1],

$$S_i(x) = a_i(y)^3 + b_i(y)^2 + c_i(y) + d_i \quad (20)$$

$$y = x - x_i \quad (21)$$

Pada robot manipulator lengan dengan 6 derajat kebebasan kedua interpolasi tersebut memiliki masing – masing fungsi, interpolasi linear biasa digunakan pada gerak robot yang tidak membutuhkan pergerakan yang terlalu halus seperti bergerak dari titik pengelasan satu ke titik pengelasan yang lainnya. Sedangkan untuk interpolasi spline biasa digunakan pada gerak robot yang membutuhkan pergerakan yang halus seperti gerakan saat melakukan pengelasan yang membutuhkan pola pengelasan tertentu.

Standar Deviasi

Standar deviasi adalah ukuran yang digunakan untuk melakukan perhitungan terhadap variasi data dalam suatu kumpulan nilai. Standar deviasi digunakan untuk mengetahui seberapa variatif suatu data terhadap nilai rata-rata dari semua data. Standar deviasi pada umumnya digunakan untuk melakukan pengujian terhadap keluaran pada suatu sistem, jika suatu sistem menghasilkan standar deviasi yang tinggi, maka dapat diketahui bahwa variasi nilai data yang terjadi pada sistem tersebut semakin besar, begitu juga sebaliknya. Berikut merupakan rumus standar deviasi untuk sampel,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N}} \quad (22)$$

Keterangan
σ : Standar Deviasi
x_i : Nilai individu dalam dataset
$\bar{x}$: Nilai rata-rata dataset
N : Jumlah data

Root Mean Square Error

Dalam sistem kontrol, Root Mean Square Error (RMSE) adalah suatu metode yang biasa digunakan untuk mengukur perbedaan nilai antara nilai yang diprediksi dengan nilai yang telah diukur pada suatu sistem. Metode ini dapat digunakan untuk memberikan gambaran mengenai seberapa baik model dalam memprediksi nilai aktual dan memberikan informasi mengenai besar nilai kesalahan rata-rata prediksi tersebut. Di mana jika semakin kecil nilai RMSE maka sistemm tersebut memiliki ksesalahan yang semakin rendah yang menunjukan bahwa sistem tersebut memiliki akurasi yang baik. Berikut merupakan rumus untuk menghitung RMSE,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (23)$$

Keterangan
y_i : Nilai aktual yang diukur
$\hat{y}_i$: Nilai prediksi
N : Jumlah data

Repeatability

Repeatability adalah kemampuan suatu sistem atau perangkat, seperti robot manipulator, untuk secara konsisten kembali ke posisi atau kondisi yang sama dalam kondisi operasi yang identik dan berulang kali. Dalam konteks sistem robotik, *repeatability* merujuk pada sejauh mana ujung efektor (*end effector*) dapat mengulangi pergerakan ke titik yang sama setelah melakukan serangkaian siklus pergerakan yang sama, dengan input yang identik.

Secara kuantitatif, *repeatability* sering diukur sebagai deviasi standar *(standard deviation)* dari posisi aktual yang dihasilkan oleh sistem ketika perintah yang sama diberikan secara berulang kali. Nilai *repeatability* yang kecil menunjukkan bahwa robot mampu mengulangi gerakannya dengan konsistensi tinggi, meskipun belum tentu tepat pada posisi target yang sebenarnya. Oleh karena itu, repeatability berbeda dengan akurasi, yang menggambarkan seberapa dekat hasil pengukuran terhadap nilai sebenarnya atau target.

Repeatability sangat penting dalam aplikasi robotik yang membutuhkan konsistensi tinggi, seperti proses perakitan presisi, pengelasan otomatis, atau manufaktur skala besar, di mana ketepatan pengulangan lebih kritis daripada kesalahan absolut terhadap target. Menurut standar ISO 9283:1998, repeatability pada robot dapat dinyatakan sebagai,

$$Repeatability = \pm 3\sigma \quad (24)$$

±3σ adalah simpangan baku dari pengukuran posisi ujung efektor terhadap titik yang sama selama beberapa kali pengulangan (ISO, 1998). Penggunaan ±3σ mencakup sekitar 99.7% dari semua pengukuran dalam distribusi normal, memberikan estimasi keandalan posisi yang dapat dicapai oleh sistem robot.

Motor Stepper Bipolar



Gambar 3. Motor Stepper Bipolar

Motor stepper bipolar adalah salah satu jenis aktuator yang paling sering digunakan pada pengaplikasian robot menipulator lengan dengan 6 derajat kebebasan. Jenis motor ini bergerak atau berputar berdasarkan langkah / step yang diterima dari masukan pulsa digital pada tiap kumparan. Motor stepper bipolar memiliki 2 buah kumparan tiap fasanya tanpa center tap. Karena hal tersebut motor stepper bipolar biasanya memiliki 4 buah kabel. Berbeda dengan motor stepper unipolar, motor stepper bipolar membutuhkan arus balik yang melalui setiap kumparan untuk menghasilkan putaran.

Driver Motor Stepper



Gambar 4. Driver Motor Stepper

Untuk mengendalikan motor stepper diperlukan driver khusus, hal ini dikarenakan motor stepper memerlukan arus dan tegangan yang tidak tinggi sehingga tidak memungkinkan untuk menghubungkan motor stepper langsung ke mikrokontroler. Dengan bantuan driver stepper motor, mikrokontroler hanya membutuhkan 2 pin saja untuk melakukan kontrol yaitu pin pulse dan pin direction, selain itu driver stepper motor juga berfungsi untuk mengatur jumlah step yang diperlukan untuk menyelesaikan satu kali putaran pada motor stepper.

Rotary Encoder

Rotary encoder adalah sebuah komponen yang berfungsi untuk mengetahui gerakan atau posisi berupa putaran. Rotary encoder memiliki peran yang sangat penting pada robot manipulator lengan dengan 6 derajat kebebasan, rotary encoder berfungsi untuk melakukan pengukuran terhadap kecepatan dan arah perputaran pada motor stepper. Secara umum rotary encoder memiliki 2 jenis yaitu,

1) *Absolute Encoder*
   Absolute Encoder memiliki pola unik pada posisi tertentu (absolute). Di mana pola ini dapat memberikan jumlah posisi-posisi absolute yang muncul pada satu putaran poros. Pola unik ini berupa kode biner yang terletak pada piringin absolute encoder.
2) *Incremental Encoder*
   Berbeda dengan absoulte encoder, incremental encoder tidak memiliki pola unik pada piringannya, namun incremental encoder memiliki pola yang sama pada piringannya seperti yang dapat memberikan arah putar dan jumlah perputarannya dan tidak memberikan keluaran berupa posisi absolute.

Dari kedua jenis encoder tersebut, incremental encoder merupakan jenis encoder yang paling sering digunakan karena harga yang relatif murah. Incremental encoder terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan cara pembacaan arah dan jumlah putaran, namun optical incremental encoder dan magnetic incremental encoder adalah jenis incremental encoder yang paling sering digunakan dalam berbagai aplikasi.

Mikrokontroler STM32H743VIT6

STM32H742VIT6 adalah sebuah mikrokontroler kelas atas dari STMicroelectronics, berbeda dengan mikrokontroler kelas atas pada umumnya seperti Arduino DUE, mikrokontroler STM32H742VIT6 memiliki lebih banyak fitur dan spesifikasi yang lebih mumpuni dengan standar industri. Mikrokontroler ini dapat diprogram dengan bahasa C, dan CPP. Untuk melakukan pemrograman pada STM32H742VIT6 dapat menggunakan perangkat lunak seperti STM32Cube IDE, Keil U Vision, hingga Arduino IDE, namun *software* yang disarankan adalah STM32Cube IDE dan Keil U Vision untuk dapat memaksimalkan fitur yang ada. Berikut merupakan spesifikasi lengkap dari Mikrokontroler STM32H743VIT6,

Tabel 1. Spesifikasi STM32H743VIT6

No	Atribut	Keterangan
1	Mikrokontroler	ARM Cortex-M7 Single Core
2	*Clock Speed*	480 MHz (Maks)
3	Tegangan Masukan	1,62 – 3,6V
4	Memori *Flash*	2 MB
5	SRAM	1 MB
6	GPIO Pin	82

7	USART/UART Interface	5
8	SPI Interface	6
9	I2C Interface	4
10	Can Bus	2
11	ADC	36 *channels* 16-bit
12	DAC	2 *channels* 12-bit
13	Timer	22 *channels*

Mikrokontroler STM32F103C8T6

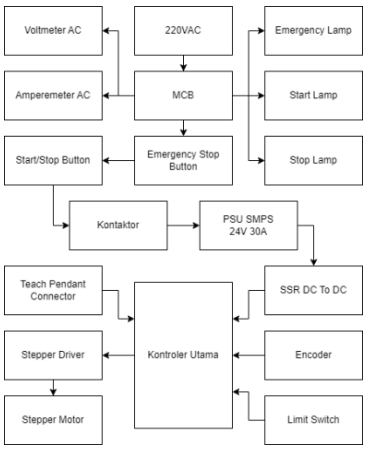
STM32F103C8T6 adalah sebuah mikrokontroler kelas menengah dari STMicroelectronics, berbeda dengan mikrokontroler kelas menengah pada umumnya seperti Arduino UNO R3 dan Arduino Nano, mikrokontroler STM32F103C8T6 memiliki lebih banyak fitur dan spesifikasi yang lebih mumpuni. Mikrokontroler ini dapat diprogram dengan bahasa C, dan CPP. Sama seperti STM32H742VIT6, untuk melakukan pemrograman pada STM32F103C8T6 dapat menggunakan perangkat lunak seperti STM32Cube IDE, Keil U Vision, hingga Arduino IDE, namun software yang disarankan adalah STM32Cube IDE dan Keil U Vision untuk dapat memaksimalkan fitur yang ada. Berikut merupakan spesifikasi lengkap dari STM32H743VIT6,

Tabel 2. Spesifikasi STM32F103C8T6

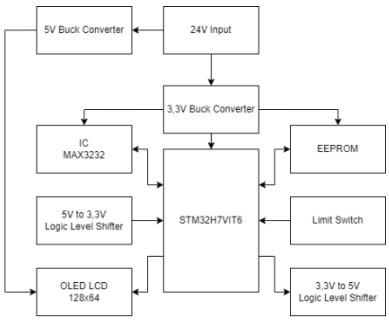
No	Atribut	Keterangan
1	Mikrokontroler	ARM Cortex-M3
2	*Clock Speed*	72 MHz (Maks)
3	Tegangan Masukan	2,0 – 3,6V
4	Memori *Flash*	128 KB
5	SRAM	20 KB
6	GPIO Pin	37
7	USART/UART Interface	3
8	SPI Interface	2
9	I2C Interface	2
10	Can Bus	1
11	ADC	10 *channels* 12-bit
12	Timer	7 *channels*

METODE PENELITIAN

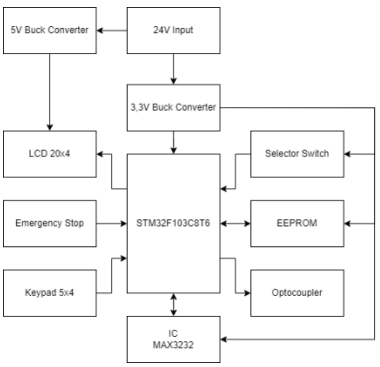
Agar target penelitian tercapai sesuai harapan, tahapan penelitian ini meliputi perancangan, pembuatan, dan pengambilan data pengujian alat. Perancangan alat meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pembuatan alat meliputi pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak, dan pengambilan data pengujian meliputi pengambilan data pengujian akurasi, presisi, dan repeatability, pengujian singularitas, pengujian gerak pengelasan, pengujian suhu, dan pengujian konsumsi energi.



Gambar 5. Diagram Blok Panel Kontrol



Gambar 6. Diagram Blok Kontroler Utama



Gambar 7. Diagram Blok Kontroler Teach Pendant

HASIL PENGUJIAN

1. Pengujian Akurasi, Presisi, dan Repeatability

Pengujian kepresisian dilakukan dengan menggerakan *end effector* atau *toolframe* pada robot dari satu posisi awal ke posisi akhir yang telah ditentukan. Setiap pengujian dilakukan sebanyak 5 kali dengan setiap pengujian diambil 10 data pengukuran. Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan hasil sebagai berikut,

Tabel 3. Akurasi Sistem

No	Nilai Setiap Percobaan	Nilai
1	0,032	
2	0,273	
3	0,122	0,192
4	0,355	
5	0,175	

Tabel 4. Kepresisian Sistem

No	Nilai Setiap Percobaan	Nilai
1	0,024	
2	0,089	
3	0,010	0,097
4	0,204	
5	0,159	

Tabel 5. *Repeatability* Sistem

No	Nilai Setiap Percobaan	Nilai
1	0,024	
2	0,089	
3	0,010	0,225
4	0,204	
5	0,159	

2. Pengujian Singularitas

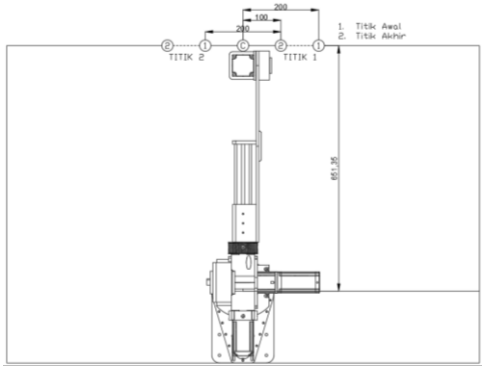
Pada pengujian pencegahan singularitas, bagian *end effector* pada alat akan ditempatkan pada posisi yang telah ditentukan. Setiap posisi yang ditentukan telah diketahui apakah posisi tersebut merupakan posisi singular atau tidak berdasarkan posisi singularitas yang sering terjadi pada robot manipulator lengan pada umumya.

Tabel 6. Pengujian Singularitas

No	Jenis	Posisi (mm)			Singular
		X	Y	Z	
1	Pergelangan	644,281	0,00	366,303	Ya
2	Siku	1161,429	0,00	608,812	Ya
3	Bahu	61,336	0,00	944,284	Ya

3. Pengujian Gerak Pengelasan

Pengujian gerak dilakukan dengan menggunakan 2 titik pengelasan gerak linear yang telah dipetakan sebelumnya. Dari titik pemetaan tersebut kemudian dibandingkan dengan titik aktual alat berdasarkan perhitunganan kinematika maju. Hasil titik aktual kemudian akan dibandingkan dengan titik pemetaan dan dilakukan analisa mengenai seberapa akurat alat dapat bergerak sesuai dengan titik yang telah dipetakan. Berikut merupakan informasi visual terkait area kerja titik pengelasan yang akan dilakukan pengujian,



Gambar 8. Area Kerja Titik Pengelasan

Tabel 7. Posisi Pengelasan Yang Dipetakan

No	Jenis Titik	Pos X (mm)	Pos Y (mm)	Pos Z (mm)
1	Awal	651,347	-200,00	9,131
	Akhir	651,347	-100,00	9,131
2	Awal	654,453	103,256	9,089
	Akhir	654,453	203,256	9,089

Tabel 8. Posisi Pengelasan Aktual

No	Jenis Titik	Pos X (mm)	Pos Y (mm)	Pos Z (mm)
1	Awal	651,348	-200,135	9,077
	Akhir	561,453	-100,12	9,223
2	Awal	654,520	103,333	9,101
	Akhir	654,082	203,194	9,002

Tabel 9. Delta Posisi Pengelasan

No	Jenis Titik	Pos X (mm)	Pos Y (mm)	Pos Z (mm)
1	Awal	0,001	0,135	0,054
	Akhir	0,106	0,120	0,092
2	Awal	0,067	0,077	0,012
	Akhir	0,371	0,062	0,087

4. Pengujian Suhu

Pengujian suhu pada robot dilakukan dengan 2 kondisi yang berbeda yaitu kondisi saat robot dalam posisi diam pada *home position* dan kondisi saat robot bergerak. Kedua kondisi tersebut dipilih agar dapat mengetahui performa suhu robot pada kondisi penggunaan yang sebenarnya. Suhu yang akan diukur adalah suhu dari driver motor stepper dan motor stepper pada setiap sendi.

Tabel 10. Suhu Driver Diam Selama 30 Menit

No	Suhu Driver Stepper (°C)		
	Awal	Akhir	Delta
1	30,3	44,5	14,2
2	30,5	47,7	17,2
3	30,7	42,8	12,1
4	31,2	43,0	11,8
5	30,2	44,2	14,0
6	29,6	39,9	10,3

Tabel 11. Suhu Driver Bergerak Selama 1 Jam

No	Suhu Driver Stepper (°C)		
	Awal	Akhir	Delta
1	30,6	52,7	22,1
2	31,0	53,0	22,0
3	30,6	48,0	17,4
4	30,5	51,8	21,3
5	31,0	51,4	20,4
6	29,7	45,4	15,7

Tabel 12. Suhu Stepper Diam Selama 30 Menit

No	Suhu Stepper (°C)		
	Awal	Akhir	Delta
1	33,1	41,2	8,1
2	30,4	36,2	5,8
3	31	35,3	4,3
4	30,0	33,8	3,8
5	30,0	34,1	4,1
6	30,5	36,7	6,2

Tabel 13. Suhu Stepper Bergerak Selama 1 Jam

No	Suhu Stepper (°C)		
	Awal	Akhir	Delta
1	32,6	45,0	12,4
2	30,8	42,0	11,2
3	31,2	38,7	7,5
4	30,7	39,4	8,7
5	30,4	37,6	7,2
6	31,1	40,0	8,9

5. Pengujian Konsumsi Energi

Pengujian konsumsi energi dibagi menjadi 2 kondisi pengujian tanpa beban yaitu, pengujian konsumsi energi saat robot dalam posisi diam pada *home position* dan pengujian konsumsi energi saat robot bergerak. Berikut merupakan tabel hasil pengujian konsumsi energi pada alat,

Tabel 14. Konsumsi Energi

Kondisi	Tegangan AC (Volt)	Arus AC (A)	Daya (Watt)
Diam	233,0	1,0	186,40
Bergerak		1,4	260,96
Daya Rata-Rata			223,68

Dari tabel di atas dapat diketahui bahwa rata-rata konsumsi energi pada alat adalah sebesar 223,68 Watt. Daya tersebut merupakan rata-rata dari konsumsi daya pada saat alat dalam keadaan diam dan bergerak, konsumsi daya pada robot masih berada dalam batas aman penggunaan catu daya yang dapat memberikan daya sebesar 720 Watt. Namun rata-rata daya pada alat di atas merupakan kondisi alat tanpa beban, sehingga jika alat diberikan beban maka arus yang dibutuhkan oleh alat akan semakin besar.

ANALISIS

1. Analisis Hasil Pengujian Akurasi, Presisi, dan Repeatability

Dari hasil pengujian akurasi, presisi, dan *repeatability* dapat diketahui bahwa nilai *repeatabiliy* pada alat masih kurang baik jika dibandingkan dengan alat yang sama dan dimensi serupa yang tersedia di pasaran seperti merk ABB dengan nomor seri IRB 1600-10/1.2 yang memiliki *repeatability* posisi sebesar ±0,02mm. Hal tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya adalah faktor kepresisian manufaktur pada komponen mekanik lengan robot dan kepresisian gerak robot.

2. Analisis Hasil Pengujian Singularitas

Dari Tabel 6. Pengujian Singularitas, dapat diketahui bahwa algoritma singularitas yang telah dibuat pada bab sebelumnya dapat berjalan dan mengidentifikasi titik singularitas dengan baik.

3. Analisis Hasil Pengujian Gerak Pengelasan

Dari hasil perbandingan antara posisi pengelasan yang telah dipetakan dengan posisi pengelasan aktual dapat diketahui bahwa, pada titik pengelasan pertama dan kedua akurasi pada titik akhir pengelasan kurang baik jika dibandingkan dengan akurasi pada titik awal pengelasan, khususnya pada sumbu X dan Z. Sedangkan untuk rata-rata.

4. Analisis Hasil Pengujian Suhu

Dari hasil pengujian suhu pada Tabel 10 – 13 dapat diketahui bahwa motor stepper pada sendi 1 dan driver motor stepper sendi 2 mengalami kenaikan suhu tertinggi saat alat dalam kondisi diam selama 30 menit. Sedangkan motor stepper dan driver motor stepper pada sendi 1 mengalami kenaikan suhu tertinggi saat alat dalam kondisi bergerak selama 1 jam. Sendi 1 mengalami kenaikan rata-rata tertinggi pada kedua kondisi, hal tersebut dapat disebabkan oleh jenis motor stepper yang digunakan pada sendi 1 merupakan jenis motor stepper dengan torsi paling rendah dibandingkan motor stepper pada sendi yang lain sehingga rasio antara beban sendi dengan beban pada motor stepper yang relatif kecil dapat memberikan beban terhadap motor stepper yang cukup untuk membuat motor stepper dan driver motor stepper pada sendi 1 mengalami kenaikan suhu tertinggi dibandingkan sendi lainnya.

5. Analisis Hasil Pengujian Konsumsi Energi

Dari Tabel 14 diketahui bahwa rata-rata konsumsi energi pada alat adalah sebesar 223,68 Watt. Daya tersebut merupakan rata-rata dari konsumsi daya pada saat alat dalam keadaan diam dan bergerak, konsumsi daya pada robot masih berada dalam batas aman penggunaan catu daya yang dapat memberikan daya sebesar 720 Watt. Namun rata-rata daya pada alat di atas merupakan kondisi alat tanpa beban, sehingga jika alat diberikan beban maka arus yang dibutuhkan oleh alat akan semakin besar.

KESIMPULAN

1. Alat dapat bekerja sesuai dengan algoritma yang telah dirancang, sehingga dapat dilakukan pengujian dan analisa terhadap alat.
2. Nilai *repeatability* pada alat masih kurang baik jika dibandingkan dengan nilai *repeatability* pada alat yang sama dengan standar industri. Alat yang telah dibuat memiliki nilai *repeatability* sebesar ±0,225mm sedangkan pada alat yang sama dengan standar industri memiliki nilai *repetability* sebesar ±0,02mm.
3. Performa suhu kerja pada alat cukup baik dengan suhu tertinggi pada driver motor stepper yaitu 53°C dan suhu tertinggi pada motor stepper yaitu 45°C. Besar nilai suhu tersebut masih berada di bawah batas suhu maksimal pada driver motor stepper dan motor stepper.
4. Alat dapat melakukan gerak pengelasan sesuai dengan titik yang telah ditentukan meskipun terdapat perbedaan kecil antara posisi yang telah dipetakan dengan posisi aktual. Perbedaan posisi paling besar terjadi pada sumbu X dengan delta posisi sebesar 0,371mm.

SARAN

1. Pada algoritma gerak berdasarkan titik trayektori dapat dilakukan riset dan evaluasi lebih lanjut untuk mengatasi masalah *delay* antar titik interpolasi.
2. Dapat ditambahkan sistem *close loop* agar robot dapat bergerak secara lebih presisi.
3. Pada kontroler utama dapat digunakan sistem RTOS atau *Real-Time Operationg System* seperti pada kontroler teach pendant untuk meningkatkan performa mikrokontroler dan memudahkan evaluasi antar fungsi.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmad Didik Setiyadi, Iwan Setiawan. "Perancangan Dan Pengendalian Manipulator Robot 4-DOF Dengan Gripper Berbasis Inverse Kinematics Dan Trajectory Planning Dengan ROS," *Transient,* vol. 10, no.4, pp.552-558, Des, 2021.
2. Almaz Sayyid Hadziq, Munawar Agus Riyadi. "Desain Dan Pembuatan Lengan Artikulasi 5-DOF Sebagai Pemisah Dan Pemindah Benda Berdasarkan Warna," *Transient,* vol. 9, no.3, pp.428-435, Sept, 2020.
3. Altino Louriero, Gunnar Bolmsjo, J. Norberto Pires. (1987). *Welding Robots Technology, System Issues and Application.*
4. Hanfi Fadzillah, Iwan Setiawan. "Perancangan Manipulator Robot Bedah 6-DOF Dengan Remote Center Of Motion Mekanik Berbasis Inverse Kinematics," *Transient,* vol. 12, no. 3, pp.102-108, Sept, 2023.
5. Lee, J., Kim, K., Kim, Y., & Lee, J. "Singularity Avoidance Path Planning on Cooperative Task of Dual Manipulator Using DDPG Algorithm," *The Journal of Korea Robotics Society,* vol. 16, no.2, pp.137-146, Mei, 2021.
6. G. Charmichael, Dika Liu. "A Framework for Singularity-Robust Manipulator Control During Physical Human-Robot Interaction," *The International Journal of Robotic Research,* vol. 36, no. 5-7, pp.861-876, Juni, 2017.
7. Tran Thanh Tung, Nguyen Van Tinh (2023). *Development of A Prototype 6 Degree of Freedom Robot Arm.*