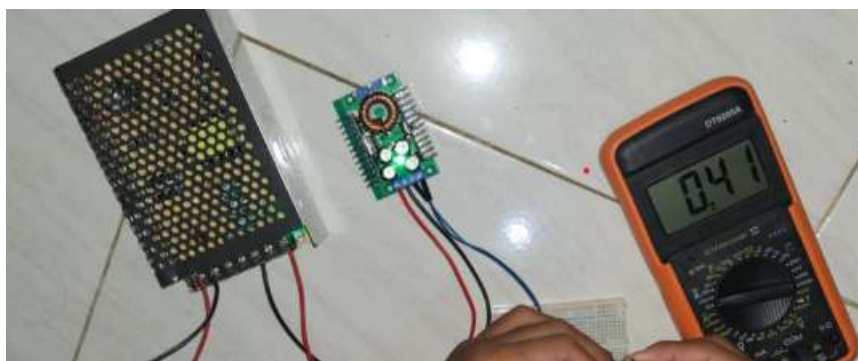


BAB IV ANALISA DAN PENGUJIAN

4.1. Hasil Pengujian Power Supply Unit 12V 20A dan Step Down XL4016

Pengujian dilakukan untuk memastikan kestabilan catu daya 12V dan keluaran 5V dari XL4016 pada kondisi tanpa beban, beban ringan, dan beban penuh. Berdasarkan pengukuran, tegangan keluaran berada pada rentang kerja yang aman dan tidak mengalami penurunan signifikan saat diberi beban yang dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Dengan demikian, *power supply* 12VDC 20A dan step-down XL4016 dinyatakan layak digunakan sebagai sumber daya sistem. Berikut hasil pengujian yang dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.



Gambar 4. 1 Pengujian Power Supply dan Stepdown XL4016

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Power Supply dan Stepdown XL4016


No	R (Ω)	Powe Supply 12V 20A			Stepdown XL4016			Efisiensi (%)
		$V_{in}(V)$	$I_{in}(A)$	$P_{in}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{out}(A)$	$P_{out}(W)$	
1	10	12,13	0,2	2,43	5	0,41	2,05	84,5
2	20	12,13	0,16	1,94	5	0,33	1,65	85,02
3	100	12,13	0,05	0,61	5	0,1	0,5	82,44
4	180	12,13	0,01	0,12	5	0,02	0,1	82,44

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.1**, *Stepdown* XL4016 mampu menjaga kestabilan tegangan *output* meskipun terjadi perubahan pada arus beban yang digunakan. Dengan nilai efisiensi yang berada pada kisaran 82% hingga 85% menunjukkan kinerja pada *Stepdown* XL4016 berjalan dengan baik.

4.2. Hasil Pengujian Arduino Mega 2560 dan RAMPS 1.6 Board

Pengujian dilakukan pada mikrokontroler Arduino Mega 2560 dengan RAMPS 1.6 Board dengan tujuan memastikan bahwa perangkat berada dalam kondisi baik dan dapat beroperasi sebagaimana mestinya. Metode pengujian yang digunakan adalah dengan melakukan upload program pada Arduino Mega 2560 yang telah dipasangkan Board RAMPS 1.6, yang berfungsi untuk melihat apakah komunikasi serial dan pengukuran tegangan suplai berfungsi dengan baik. Hasil pengujian fungsional terdapat pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4.2 Pengujian Fungsional Arduino Mega 2560 dengan RAMPS 1.6 Board

Hasil Pengujian	Keterangan
	LED uploader pada Arduino Mega dan RAMPS 1.6 Board menyala dan berkedip ketika upload program dilakukan, yang menandakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan RAMPS 1.6 Board dapat berfungsi dan bekerja dengan baik.

Pada **Tabel 4.2**, terlihat LED pada Arduino Mega ON yang menyatakan bahwa pada RAMPS 1.6 Board tidak terdapat short, arus terlalu besar, atau tegangan balik yang membuat tegangan pada Arduino Mega turun. Hal ini menunjukkan proses upload berjalan tanpa error dan komunikasi serial stabil. Tegangan 5V dan 12V terukur sesuai spesifikasi, sehingga Arduino Mega dan RAMPS 1.6 dinyatakan berfungsi normal. Hasil pengujian terdapat pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Pengujian Parameter Fungsional Arduino Mega 2560 dengan RAMPS 1.6 Board

No	Parameter	Hasil
1	Upload Program	Berhasil
2	Serial Komunikasi	Stabil
3	Tegangan 5V	5.03V
4	Tegangan 12V	12V

4.3. Hasil Pengujian HMI Nextion

Pengujian dilakukan pada perangkat HMI Nextion tipe NX8048P050 dengan tujuan untuk memastikan perangkat dalam kondisi baik. Pengujian dilakukan

dengan cara menggunggah rancangan antarmuka HMI menggunakan Nextion Editor, kemudia mengoperasikannya secara langsung pada perangkat, untuk menguji setiap *function* yang digunakan. Proses ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa HMI dapat menerima dan menjalankan program melalui komunikasi UART. Dokumentasi hasil pengujian ditampilkan pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Hasil Pengujian HMI Nextion NX8048P050

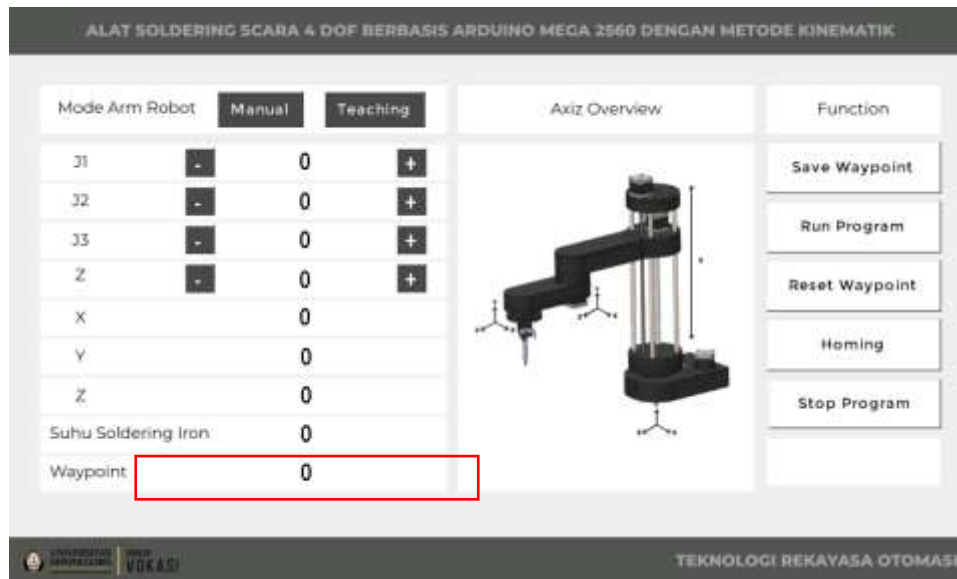
Berdasarkan **Gambar 4.2**, dapat diketahui bahwa HMI Nextion mampu menerima unggahan program dari Nextion Editor dan menampilkan hasil desain tersebut pada layer. Selain itu, perangkat juga berfungsi ketika tombol *function* pada layer ditekan, maka memberikan respons yang sesuai dan nilai posisi dapat ditampilkan secara real-time. Hal ini menunjukkan komunikasi serial antara HMI dan mikrokontroler berjalan dengan baik. Data hasil pengujian untuk setiap *function* yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Function Pada HMI Nextion NX8048P050

No	Fitur	Hasil	Keterangan
1	Tombol <i>Manual</i>	Memberikan Respon Perintah	Menjalankan sistem <i>manual</i> dan mengaktifkan <i>Rotary Encoder KY-040</i> untuk control pergerakan motor
2	Tombol <i>Teaching</i>	Memberikan Respon Perintah	Menjalankan sistem <i>teaching</i> dan mengaktifkan <i>AS5600 Magnetic Encoder</i> untuk control pergerakan motor

3	Tombol <i>Run</i> <i>Program</i>	Memberikan Respon Perintah	Menjalakan sistem <i>Waypoint</i> yang telah disimpan
4	Tombol <i>Stop</i>	Memberikan Respon Perintah	Menghentikan sistem yang sedang berjalan, dan memerintahkan motor Kembali keposisi <i>Home</i>
5	Tombol <i>Save</i> <i>Waypoint</i>	Memberikan Respon Perintah	Menyimpan data hasil perhitungan pergerakan motor pada mode <i>manual</i> maupun <i>teaching</i>
6	Tombol <i>Reset</i> <i>Waypoint</i>	Memberikan Respon Perintah	Menghapus data <i>Waypoint</i> yang tersimpan pada database <i>Waypoint</i> sistem
7	Tombol <i>Homing</i>	Memberikan Respon Perintah	Memerintahkan motor untuk bergerak menuju posisi siap
8	Tombol <i>Jog</i>	Memberikan Respon Perintah	Memberi <i>inputan</i> pwm pada driver motor untuk menggerakan motor secara CW atau CCW
9	Display Monitor	Memberikan Respon Perintah	Menampilkan setiap perubahan data pada setiap display yang digunakan pada antarmuka HMI

Berdasarkan **Tabel 4.4**, dapat diketahui HMI Nextion mampu memberikan respon untuk setiap *function* yang dijalankan, sehingga menunjukkan bahwa fungsi dasar dari sistem yang dirancang pada HMI Nextion sudah berjalan normal dan siap digunakan. Pada saat *function Save Waypoint* ditekan, maka HMI akan mengirimkan data serial ke mikrokontroler Arduino Mega 2560 untuk menyimpan data posisi setiap motor, yang selanjutnya mikrokontroler mengirim data ke HMI untuk menampilkan hasil *Save Waypoint* yang dilakukan dengan menampilkan berupa data angka pada *function Waypoint* pada antarmuka HMI, yang dapat dilihat pada **Gambar 4.3**.



Gambar 4.3 Function Waypoint Pada Antarmuka Nextion NX8048P050

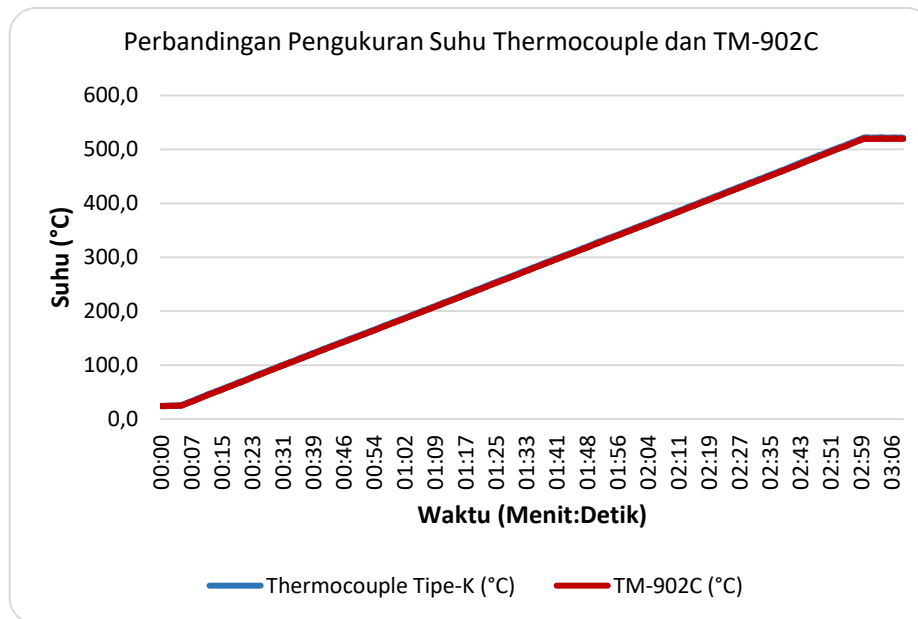
4.4. Hasil Pengujian Sensor *Thermocouple* Tipe-K dan MAX6675

Pengujian Sensor *Thermocouple* Tipe-K dan MAX6675 bertujuan untuk melihat hasil pembacaan MAX6675 dengan membandingkan suhu referensi TM-902C. Dalam proses ini MAX6675 akan membaca besaran arus yang diberikan oleh sensor *Thermocouple* Tipe-K yang selanjutnya dikonversikan dalam bentuk angka desimal oleh MAX6675, selanjutnya pengguna akan melakukan pembacaan suhu referensi menggunakan TM-902C. dengan demikian, tingkat akurasi pembacaan MAX6675 dapat dievaluasi secara langsung, hingga suhu mencapai nilai yang stabil. Hasil pembacaan dapat dilihat pada **Gambar 4.4**.

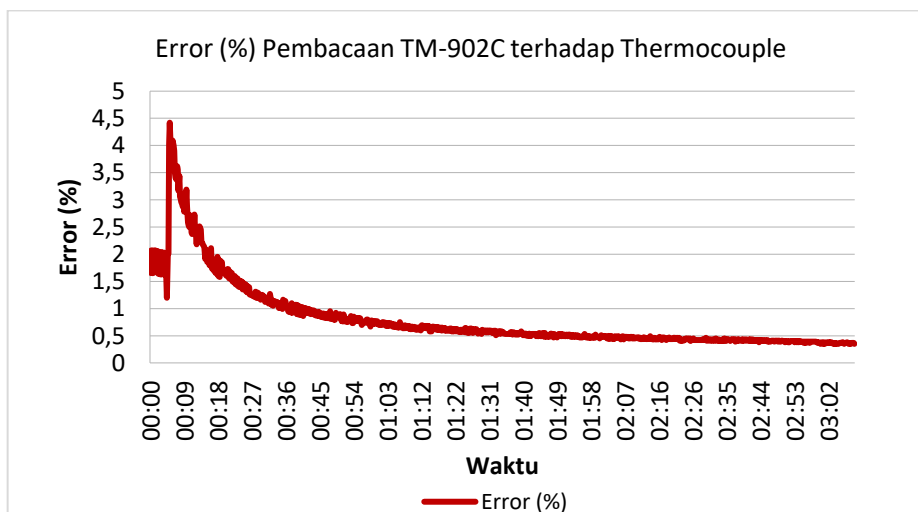


Gambar 4.4 Pembacaan Suhu Solder Tip

Pada **Gambar 4.4**, dapat dilihat pembacaan suhu menggunakan sensor *Thermocouple Tipe-K* dengan MAX6675 mengalami perubahan signifikan dalam pembacaan suhu pada solder tip jika dibandingkan pembacaan suhu menggunakan TM-902C. Perbedaan pembacaan suhu dapat dilihat pada **Gambar 4.5**, sebagai berikut.



Gambar 4. 5 Perbandingan Hasil Pengukuran Suhu Solder Tip



Gambar 4. 6 Error Pembacaan TM-902 Terhadap Thermocouple Tipe-K

Pada **Gambar 4.5**, hasil pengujian menunjukkan hubungan antara waktu terhadap perubahan temperatur yang diukur menggunakan *thermocouple tipe-k* dan alat ukur referensi TM-902C. pengukuran dilakukan dengan mengaktifkan SSR sehingga memberikan tegangan kepada *soldering iron*, kemudian *thermocouple tipe-k* dan TM-902C akan melakukan pengukuran pada perubahan suhu yang terjadi pada *soldering iron*.

Pada awal proses pemanasan temperatur meningkat secara bertahap dari suhu ruang menuju *set point* atau suhu maksimal dari *soldering iron*. Kenaikan temperatur pada fase awal cenderung cepat karena perbedaan temperatur antara *soldering iron* dan lingkungan masih sangat besar, sehingga perpindahan kalor berlangsung lebih efektif. Seiring meningkatnya temperatur, laju kenaikan mulai melambat akibat berkurangnya selisih temperatur dan meningkatnya kehilangan panas ke lingkungan, yang mana error pembacaan dari suhu awal hingga suhu akhir dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.

Setelah temperatur mendekati maksimal suhu dari *soldering iron*, grafik menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan temperatur di sekitar nilai *set point*. Walaupun masih terdapat sedikit fluktuasi, perubahan tersebut relatif kecil dan masih berada dalam batas yang dapat diterima. Fluktuasi ini merupakan karakteristik normal pada sistem pengendalian temperatur menggunakan metode ON-OFF melalui Solid State Relay (SSR), di mana elemen pemanas akan aktif ketika temperatur berada di bawah *set point* dan berhenti ketika temperatur telah mencapai atau melebihi batas yang ditentukan.

Selisih pembacaan antara *thermocouple tipe-K* dan TM-902C pada setiap detik pengujian relatif kecil. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain toleransi sensor *thermocouple*, akurasi modul MAX6675 sebagai konverter sinyal, waktu *sampling data*, serta ketelitian alat ukur referensi TM-902C. Selain itu, distribusi panas yang tidak sepenuhnya merata pada permukaan sensor *thermocouple tipe-k* dan TM-902C juga dapat menyebabkan kedua sensor menerima temperatur yang sedikit berbeda.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian temperatur mampu mencapai suhu maksimal dari *soldering iron* serta

mempertahankan temperatur di sekitar nilai tersebut dengan stabil. Kesesuaian antara data thermocouple tipe-K dan TM-902C membuktikan bahwa sistem pengukuran yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai sistem monitoring temperatur pada lengan robot yang dikembangkan.

4.5. Hasil Pengujian Driver Motor A4988 dan Stepper Motor Nema 17

Pengujian driver motor A4988 dengan stepper motor NEMA 17 bertujuan untuk mengetahui kemampuan driver motor A4988 mampu menggerakkan motor sesuai perintah sinyal STEP dan DIR dari mikrokontroler. Perubahan frekuensi pulsa STEP berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan motor, sementara perubahan logika DIR menghasilkan perubahan arah putaran secara konsisten. Pada proses pengujian ini driver motor diuji dengan pengaturan arys (V_{ref}) yang sesuai, kemudian motor dijalankan pada arah CW dan CCW. Data hasil ujicoba mengendalikan stepper motor menggunakan driver motor A4988 dapat dilihat pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Data Hasil Ujicoba Pengendalian Stepper Motor Nema 17 dengan Driver Motor A4988

No	Parameter	Keterangan
1	V_{ref}	0.78V
2	Motor berputar CW/CCW	Berhasil
3	Holding Torque	Kuat
4	Overheat	Tidak

Pada **Tabel 4.5**, didapati pengukuran V_{ref} yang bekerja disaat stepper motor bergerak sebesar 0.78V, dengan pengaturan sinyal logika DIR yang bekerja dengan baik. Ketika motor bergerak driver motor tidak mengalami overheat, sehingga penggunaan Driver Motor A4988 pada pengendalian stepper motor nema 17 dapat dinyatakan bekerja dengan baik, dan sesuai dengan kebutuhan pada sistem pengendalian stepper motor nema 17.

4.6. Hasil Pengujian Stepper Motor Nema 17 Menggunakan Rotary Encoder KY-040 Pada Mode Manual

Pengujian *Rotary Encoder KY-040* bertujuan untuk memastikan *Rotary Encoder KY-040* mampu mengendalikan pergerakan stepper motor nema 17. Pada proses pengujian ini, *Rotary Encoder KY-040* akan memberikan *input* pulsa pada driver motor, untuk menyesuaikan jumlah pulsa yang dibutuhkan untuk setiap

Langkah motor. Pada setiap putaran knop encoder menghasilkan perubahan sinyal CLK dan DT yang dapat dilihat pada **Gambar 4.6**. CLK sendiri berfungsi untuk menentukan jumlah Langkah yang akan bekerja pa stepper motor, sedangkan DT berfungsi untuk menentukan arah gerak stepper motor. Data hasil ujicoba pengendalian stepper motor menggunakan *Rotary Encoder KY-040* dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.



Gambar 4. 7 Pengujian Pengendalian Gerak Stepper Motor Menggunakan Rotary Encoder KY-040

Tabel 4.6 Hasil Ujicoba Pengendalian Gerak Stepper Motor Menggunakan Rotary Encoder KY-040

No	Arah Gerak Rotary	Respon Motor	Keterangan
1	CW	Sudut Bertambah dan motor bergerak searah jarum jam	Berhasil
2	CCW	Sudut Bertambah dan motor bergerak berlawanan arah jarum jam	Berhasil

Pada **Tabel 4.6** *Rotary Encoder KY-040* mampu menggerakkan stepper motor nema 17 sesuai dengan *inputan* arah gerak yang diberikan oleh *Rotary Encoder KY-*

040. Selain itu pada mode *manual* diuji dengan memberikan perintah gerak pada setiap *Axis* (J1, J2, J3, dan Z) melalui tombol JOG pada HMI serta melalui putaran *Rotary Encoder KY-040*. Pada pengujian JOG, ketika tombol bernilai (+) ditekan, mikrokontroler mengaktifkan arah gerak (DIR) sesuai setpoint dan mengirim pulsa langkah (STEP) secara kontinu sehingga motor bergerak CW, sedangkan saat tombol bernilai (-) ditekan, arah DIR dibalik sehingga motor bergerak CCW. Pada pengujian rotary encoder, perubahan sinyal CLK dan DT yang dihasilkan saat knop diputar berhasil diterjemahkan menjadi penambahan atau pengurangan jumlah pulsa STEP, sehingga sudut atau posisi motor berubah sesuai arah putaran encoder (CW menambah, CCW mengurangi) dan nilai posisi pada tampilan ikut diperbarui. Selama proses pengujian, respon motor terhadap perintah *manual* teramati cepat dan konsisten, tidak terjadi gerakan berlawanan arah, loncatan langkah yang tidak diinginkan, maupun kehilangan langkah pada kecepatan uji. Berdasarkan kesesuaian antara *input* JOG, arah gerak motor, dan pembaruan nilai posisi, maka mode *manual* dinyatakan berfungsi dengan baik dan sistem kontrol *manual* berjalan normal. Data hasil percobaan dapat dilihat pada **Tabel 4.7**.

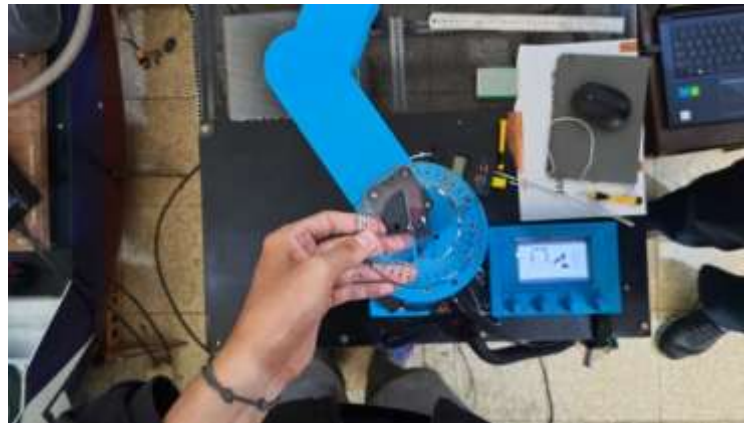
Tabel 4.7 Data Hasil Percobaan Pengendalian Gerak Stepper Motor Nema 17 Menggunakan Function JOG dan Rotary Encoder KY-040

No	Parameter	Nilai	Hasil	Keterangan
1	Jog J1	+	Bergerak CW	Berhasil
		-	Bergerak CCW	
2	Jog J2	+	Bergerak CW	Berhasil
		-	Bergerak CCW	
3	Jog J3	+	Bergerak CW	Berhasil
		-	Bergerak CCW	
4	Jog Z	+	Bergerak CW	Berhasil
		-	Bergerak CCW	

4.7. Hasil pengujian TCA9548A Multiplexer dan AS5600 Magnetic Encoder Pada Mode Teaching

Pengujian Multiplexer TCA9548A dan sensor *Magnetic Encoder* AS5600 pada mode *teaching* bertujuan untuk memastikan proses pembacaan 4 sensor *Magnetic Encoder* AS5600 untuk setiap join melalui komunikasi satu jalur 12C dapat berjalan dengan benar, serta memastikan nilai sudut dapat direkam sebagai data *teaching*. Pada pengujian ini, menggunakan bujur derajat dan pengaris untuk

mengetahui adanya perbedaan antara sudut untuk J1, J2, dan J3, serta untuk melihat ketinggian sumbu Z yang terbaca oleh TCA9548A, serta pada mikrokontroler melakukan pemilihan kanal TCA9548A secara bergantian, kemudian melakukan pembacaan data sudut dari sensor *Magnetic Encoder* AS5600 pada setiap join. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap kanal multiplexer dapat diakses dengan baik, dan AS5600 pada kanal yang dipilih menghasilkan data sudut yang terbaca sesuai perubahan posisi magnet atau poros dan pembacaan menggunakan bujur derajat, sebagaimana yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.8 Pengujian Sudut Stepper Motor

Berdasarkan **Gambar 4.7**, tersebut stepper motor pada sumbu Z digerakan sebesar +10cm dari posisi 0cm, pada data pengukuran menggunakan AS5600 didapati hasil sebesar 10cm, serta pengukuran pengaris menyatakan pergerakan stepper motor sebesar 10cm dari titik awal 0cm. Dalam hal ini, AS5600 dinyatakan berhasil membaca pergerakan stepper motor sesuai dengan data referensi yang diberikan. Setiap hasil pergerakan dicatat dan dibandingkan dengan nilai *input* data referensi yang diberikan untuk mengetahui perbedaan yang terjadi. Data hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.8**.

Tabel 4.8 Data Hasil Pengujian Pembacaan Gerak Motor Menggunakan Multiplexer TCA9548A dan Sensor Magnetic Encoder AS5600

No	Axis AS5600 <i>Magnetic Encoder</i>	Pembacaan Pergerakan Motor	Susut Referensi	Sudut Terbaca	Error (%)
----	--	----------------------------------	--------------------	------------------	--------------

1	J1	Terbaca	30°	31°	0,03%
2	J2	Terbaca	90°	88°	0,02%
3	J3	Terbaca	180°	181°	0,005%
4	Z	Terbaca	5cm	5cm	0%

Berdasarkan **Tabel 4.8**, hasil pembacaan sudut pada AS5600 yang diakses melalui multiplexer TCA9548A menunjukkan nilai yang stabil dan konsisten pada seluruh *Axis* yang diuji. Setiap *Axis* (J1, J2, J3, dan Z) berhasil terbaca, menandakan proses pemilihan kanal pada TCA9548A berjalan dengan baik dan tidak terjadi konflik alamat I2C maupun kesalahan pembacaan antar kanal. Selain itu, perbandingan antara sudut referensi dan sudut terbaca memperlihatkan kesesuaian yang baik, sehingga dapat disimpulkan bahwa data sudut yang diperoleh dari AS5600 dapat digunakan sebagai umpan balik posisi pada sistem. Pada *Axis* Z, nilai referensi 10 cm terbaca sama dengan hasil pengukuran 10 cm sehingga error pengukuran tercatat 0%, yang mengindikasikan pembacaan posisi berjalan akurat pada kondisi pengujian. Adapun potensi deviasi kecil pada pengujian sudut umumnya dapat dipengaruhi oleh pemasangan magnet (alignment dan jarak magnet–sensor), kestabilan mekanik saat pengambilan data, serta noise pada jalur komunikasi.

4.8. Hasil Pengujian *Solid State Relay* 40DA

Pengujian *Solid State Relay* bertujuan untuk memverifikasi sistem kontrol sinyal pada sisi *input* berupa tegangan DC, untuk mengendalikan beban AC. Dalam proses ini SSR akan menghubungkan beban pada sisi *output* berupa tegangan AC dengan sinyal kontrol dari sisi *input* berupa tegangan DC, ketika sinyal *input* dilepas SSR memutus aliran daya ke beban. Indikator pada SSR akan menyala ketika *input* control aktif yang menandakan SSR berada pada posisi ON, dan akan mati ketika *input* control dinonaktifkan. Hasil percobaan sistem control SSR dapat dilihat pada **Tabel 4.9**.

Tabel 4. 9 Data Hasil Pengujian Sinyal SSR

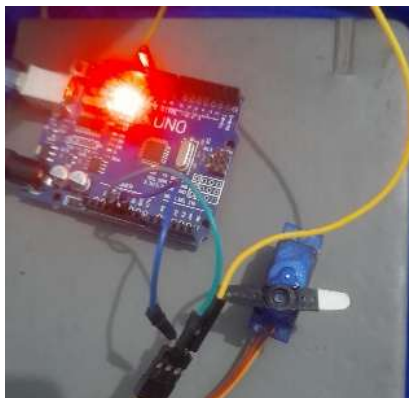
No	<i>Input</i> SSR	<i>Output</i> SSR	Keterangan
1	ON	ON	Berhasil
2	OFF	OFF	Berhasil

Pada **Tabel 4.11**, didapati hasil percobaan kontrol beban AC pada SSR, yang mana ketika SSR diberi *input* sinyal control pada sisi *input*, SSR mampu menghubungkan beban pada sisi *output* dengan melihat indicator berupa LED menyala, dan ketika sinyal *input* di nonaktifkan, maka LED indicator akan mati, menandakan SSR 40DA berfungsi dengan baik untuk sistem switching beban AC.

4.9. Hasil Pengujian Motor Servo MG90s

Pengujian motor servo MG90s bertujuan untuk memverifikasi sistem control sinyal PWM pada putaran dan arah putar motor servo. Pada sistem yang dijalankan untuk proses soldering, servo berfungsi untuk mengeluarkan gulungan timah tembaga menuju solder tip. Oleh karena itu, pada sistem ini motor servo digerakan dengan konfigurasi *continuous rotation*, sehingga motor servo tidak lagi bekerja sebagai *actuator* sudut terbatas, melainkan sebagai motor putar secara terus menerus pada satu arah dengan dikendalikan menggunakan sinyal PWM.

Pada pengujian sistem yang akan dijalankan pada motor servo, penulis menggunakan besaran sinyal PWM sebesar 100 untuk aktif dan 90 untuk stop yang dapat dilihat pada **Gambar 4.8**. Penggunaan sinyal PWM 100 untuk motor servo dikarenakan pergerakan motor yang diinginkan adalah CCW (*Counter-Clockwise*) atau berlawanan arah jarum jam untuk menyesuaikan mekanik dari *end effector* pada lengan robot. Hasil percobaan dapat dilihat pada **Tabel 4.10**.



Gambar 4. 9 Pengujian Motor Servo MG90s

Tabel 4.10 Data Pengujian Nilai Referensi PWM Motor Servo

No	Waktu (s)	Siklus	Status	PWM	Sudut Kumulatif (°)	Durasi CCW	Panjang Timah Solder Yang Dihasilkan
1	1	Siklus 1	CCW	100	0°	3	-
2	3	Siklus 1	Stop	90	720°	-	3cm
3	7	Siklus 2	CCW	100	0°	3	-
4	10	Siklus 2	Stop	90	0°	-	3cm
5	14	Siklus 3	CCW	100	720°	3	-
6	17	Siklus 3	Stop	90	0°	-	3cm
7	21	Siklus 4	CCW	100	0°	3	-
8	24	Siklus 4	Stop	90	720°	-	3cm
9	28	Siklus 5	CCW	100	0°	3	-
10	31	Siklus 5	Stop	90	720°	-	3cm

Berdasarkan **Tabel 4.10**, penggunaan konfigurasi CCW pada sistem gerak motor servo, setiap permulaan pergerakan motor servo akan dimulai dari sudut 0°, penggunaan PWM 100 berfungsi untuk memastikan pergerakan motor servo pelan, sehingga pada proses penarikan timah tembaga oleh gear pada motor servo tidak mengalami patah pada proses penarikan dilakukan. Serta pada pengujian motor servo dengan PWM 100 pada setiap siklus berlangsung selama 3 detik dengan waktu tunggu untuk siklus selanjutnya yaitu 4 detik menyesuaikan dengan sistem yang bekerja pada *end effector* lengan robot.

4.10. Hasil Pengujian *Limit switch* dan *Homing System*

Pengujian *limit switch* dan *Homing System* dilakukan untuk memastikan *limit switch* mampu mendeteksi batas gerak tiap *Axis*, serta memastikan prosedur *homing* dapat mengembalikan posisi *Axis* ke titik referensi atau *Home* secara konsisten. Pada pengujian ini, ketika *actuator* menyentuh *limit switch*, mikrokontroler menerima perubahan logika *input* dan menghentikan pergerakan *Axis* sesuai arah yang mendekati batas. Pada pengujian *homing*, sistem menggerakkan tiap *Axis* menuju arah *Home* atau titik 0 hingga *limit switch* teraktifkan, kemudian motor berhenti dan mundur sedikit untuk melepaskan tekanan pada *limit switch*, kemudian posisi *Axis* diatur menjadi titik 0. Hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 4.11**.

Tabel 4.11 Data Pengujian *Limit switch* dan *Homing System*

No	Axis	Limit switch	Homing System	Keterangan
1	J1	Aktif	Motor berhenti dan mundur kebelakang untuk melepas tekanan pada <i>limit switch</i>	Berhasil
2	J2	Aktif	Motor berhenti dan mundur kebelakang untuk melepas tekanan pada <i>limit switch</i>	Berhasil
3	J3	Aktif	Motor berhenti dan mundur kebelakang untuk melepas tekanan pada <i>limit switch</i>	Berhasil
4	Z	Aktif	Motor berhenti dan mundur kebelakang untuk melepas tekanan pada <i>limit switch</i>	Berhasil

Pada **Tabel 4.11**, seluruh *limit switch* pada *Axis* J1, J2, J3, dan Z terdeteksi **aktif** saat aktuator menekan *limit switch*, sehingga sistem mampu mengenali kondisi limit secara tepat. Respon *homing* pada setiap *Axis* menunjukkan motor **berhenti** ketika *limit switch* terpicu kemudian **mundur (*back-off*)** untuk melepaskan tekanan pada *limit switch*. Tahapan *back-off* ini menandakan bahwa prosedur *homing* tidak hanya berhenti pada saat *trigger*, tetapi juga memastikan *limit switch* kembali ke kondisi normal sehingga titik referensi atau posisi 0 dapat ditetapkan dengan lebih stabil dan mengurangi risiko switch tertahan.

4.11. Hasil Pengujian *Forward Kinematik* Keseluruhan Posisi Lengan Robot

Pengujian *forward kinematic* dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam menghitung posisi *end-effector* pada robot SCARA 4 DOF berdasarkan nilai sudut *Joint* yang terbaca oleh sensor encoder AS5600. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi sistem gerak lengan robot untuk proses penyolderan otomatis.

Pada robot SCARA 4 DOF ini menggunakan dua segmen lengan dengan Panjang masing-masing $L1 = 213\text{mm}$ untuk segmen pertama dan $L2 = 136.5\text{mm}$ untuk segmen lengan kedua. Untuk sumbu z, sistem menggunakan mekanisme lead screw dengan pitch 8mm per revolusi.

Fungsi `roundf()` diterapkan pada hasil perhitungan x dan y untuk membulatkan nilai ke bilangan bulat terdekat, sehingga terdapat potensi error pembulatan sebesar $\pm 0.5\text{ mm}$. Nilai θ_1 dan θ_2 diperoleh dari pembacaan sensor

encoder magnetik AS5600 yang terpasang pada *output* gear masing-masing *Joint*, dengan resolusi pembacaan sebesar 4096 counts per revolusi.

Berdasarkan parameter diatas, penulis melakukan beberapa pengujian sistem gerak menggunakan fungsi *forward kinematic* guna memverifikasi keberhasilan sistem dalam mengkonversi *input* yang digunakan pada sistem sehingga menghasilkan *output* yang sesuai dengan hasil yang diinginkan sebagai berikut.

a) Pengujian 1 – Posisi *Home* ($\theta_1 = 150^\circ, \theta_2 = 90^\circ, z = 0$)

Pada pengujian pertama dilakukan pada posisi *Home* robot yang merupakan posisi referensi awal setelah proses *homing* selesai dieksekusi, sesuai konstanta $Home_POST_J1_DEG = 150^\circ$ dan $Home_POST_J2_DEG = 90^\circ$ yang diterapkan pada sistem lengan robot. Hasil perhitungan dan perhitungan yang dilakukan oleh sistem yang bekerja pada lengan robot yang dapat dilihat pada **Tabel 4.11** nilai x, y, dan z telah sesuai.

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian 1 Forward kinematic

Koordinat	Nilai Perhitungan <i>Manual (mm)</i>	Nilai Pehitungan Pada Sistem (mm)	Error (%)
x	-252.71 mm	- 252.65 mm	0,024%
y	-11.71 mm	-11.66 mm	0,427%
z	0.00 mm	0 mm	0%
r Planar	253.3 mm	-	

b) Pengujian 2 – Posisi $Z = 50\text{mm}$ ($\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ, z = 50\text{mm}$)

Pada pengujian kedua pengguna mensimulasikan posisi *Waypoint* dengan $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ dan $z = 50\text{mm}$, serta sudut kumulatif sebesar 135° yang diterapkan pada sistem lengan robot. Hasil perhitungan dan perhitungan yang dilakukan oleh sistem yang bekerja pada lengan robot yang dapat dilihat pada **Tabel 4.13** nilai x, y, dan z telah sesuai.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian 2 Forward kinematic

Koordinat	Nilai Perhitungan <i>Manual (mm)</i>	Nilai Pehitungan Pada Sistem (mm)	Error (%)
x	-96.52 mm	- 96,44 mm	0,083%
y	309.52 mm	309,44 mm	0,026%
z	50.00 mm	50 mm	0%

r Planar 324.8 mm -

c) Pengujian 3 – Posisi $z = 50\text{mm}$ ($\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 60^\circ, z = 50\text{mm}$)

Pada pengujian ketiga pengguna mensimulasikan posisi *Waypoint* dengan $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 60^\circ$ dan $z = 50\text{mm}$, serta sudut kumulatif sebesar 90° yang diterapkan pada sistem lengan robot. Hasil perhitungan dan perhitungan yang dilakukan oleh sistem yang bekerja pada lengan robot yang dapat dilihat pada **Tabel 4.14** nilai X, Y, dan Z telah sesuai.

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian 3 Forward kinematic

Koordinat	Nilai Perhitungan <i>Manual (mm)</i>	Nilai Pehitungan Pada Sistem (mm)	Error (%)
X	184.46 mm	184,38 mm	0,043%
Y	243.00 mm	243 mm	0%
Z	50.00 mm	50 mm	0%
r Planar	304.8 mm	-	

Berdasarkan hasil keseluruhan perhitungan dan analisis pengujian *forward kinematic* yang dapat dilihat pada **Tabel 4.15**, implementasi persamaan *forward kinematic* pada fungsi *forward kinematic* telah bekerja dengan benar dan konsisten pada keseluruhan *Waypoint* yang mencakup berbagai konfigurasi *Joint*. Dan error yang terjadi pada sistem terdapat pada pengujian kelima sebesar 0.68 mm akibat penerapan dari `roundf()` masih berada pada batas toleransi yang diterima pada pengaplikasian penyodelderan pada lengan robot. Serta keseluruhan titik pengujian berada dalam workspace robot dengan nilai r planar antara 253mm hingga 324.8 mm, jauh dari batas maksimal dan minimal dari batas gerak lengan robot.

Tabel 4. 15 Rekapitulasi Seluruh Hasil Pengujian Forward kinematic

No	Kondisi	θ_1	θ_2	Turns z	x (mm)	y (mm)	z (mm)	r (mm)	Keterangan
1	Posisi <i>Home</i>	150°	90°	0	-252.71	-11.71	0	253.3	Berhasil
2	<i>Waypoint</i> 1	90°	45°	6.25	-96.52	309.52	50	324.3	Berhasil
3	<i>Waypoint</i> 2	30°	60°	12.5	184.46	243.00	100	304.8	Berhasil

4.12. Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memverifikasi integrasi seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang bekerja dalam sistem Robot Soldering SCARA 4 DOF. Pengujian ini mencakup *Homing System*, eksekusi *Waypoint* secara berurutan, pembacaan posisi melalui sensor *Magnetic Encoder* AS5600 yang diakses melalui multiplexer TCA9548A, kontrol close-loop posisi pada sumbu J1, J2, J3, dan Z, komunikasi serial dengan HMI Nextion, pengendalian suhu *soldering iron* menggunakan MAX6675 dan *Solid State Relay* (SSR), serta proses feeding timah tembaga menggunakan motor servo MG90s sebagai *end effector*.

Prosedur pengujian keseluruhan sistem dilaksanakan secara berurutan sesuai alur operasi normal robot. Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Sistem dinyalakan dan Arduino Mega 2560 melakukan inisialisasi seluruh pin, driver, dan sensor.
- Tombol *Homing* pada HMI Nextion ditekan untuk memulai prosedur *homing* seluruh sumbu secara berurutan (J1 → J2 → J3 → Z).
- Setelah *homing* selesai, setpoint suhu *soldering iron* diatur pada 350°C melalui HMI, dan sistem menunggu suhu tercapai sebelum eksekusi *Waypoint* dimulai.
- Mode Auto diaktifkan melalui HMI. Robot secara otomatis bergerak menuju *Waypoint* pertama menggunakan data yang tersimpan dari mode *teaching*.
- Pada setiap *Waypoint*, *end effector* diturunkan (sumbu Z), motor servo aktif selama 3 detik untuk feeding timah, dwell time 2 detik, kemudian *end effector* diangkat kembali.
- Setelah seluruh *Waypoint* selesai, robot kembali ke posisi *Standby (home)*, SSR dimatikan, dan sistem menunggu perintah selanjutnya.

Dengan menjalankan prosedur untuk menjalankan sistem yang bekerja pada robot *soldering* SCARA 4 DOF didapati hasil pengujian keseluruhan sistem yang dapat dilihat pada **Tabel 4.17**.

Tabel 4. 16 Data Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem Robot Soldering SCARA 4 DOF

No	Posisi Target (x,y,z)	Posisi Aktual (x,y,z)	Error (%)	Solder Iron	Suhu (°C)	Servo Feed	Dwell Time (s)	Homing Status
1	x=-253	x=-253	0%	Tidak Aktif	24	Tidak Aktif	-	Berhasil
	y=-12	y=-12	0%					
	z=0	z=0	0%					
2	x=-97	x=-96,02	1,01%	Aktif	520	Aktif	4	Berhasil
	y=310	y=309,4	0,19%					
	z=50	z=50	0%					
	$\theta_1=90^\circ$	$\theta_1=90^\circ$	0%					
	$\theta_2=45^\circ$	$\theta_2=45^\circ$	0%					
3	x=184	x=183,4	0,33%	Aktif	520	Aktif	4	Berhasil
	Y=243	Y=242,3	0,29%					
	z=50	z=50	0%					
	$\theta_1=30^\circ$	$\theta_1=30^\circ$	0%					
	$\theta_2=60^\circ$	$\theta_2=60^\circ$	0%					
4	x=-253	x=-252,92	0,032%	Aktif	520	Aktif	4	Berhasil
	y=-12	y=-11,9	0,83%					
	z=50	z=50	0%					
	$\theta_1=150^\circ$	$\theta_1=150^\circ$	0%					
	$\theta_2=90^\circ$	$\theta_2=90^\circ$	0%					

Berdasarkan Tabel 4.17, robot SCARA 4 DOF berhasil menjalankan seluruh tahapan operasi sesuai dengan program yang telah dirancang. Proses *homing* berhasil mengembalikan setiap joint ke posisi referensi, kemudian robot bergerak menuju setiap *waypoint* dengan status berhasil. *Soldering iron* mencapai suhu kerja 520°C, motor servo berhasil mengumpankan timah solder, dan *dwell time* selama 4 detik berjalan sesuai pengaturan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada *Waypoint* 1 diperoleh *error* sebesar 1,01% pada sumbu x dan 0,19% pada sumbu y. Pada *Waypoint* 2, *error*

sebesar 0,33% pada sumbu x dan 0,29% pada sumbu y. Sementara itu, *Waypoint 3* memiliki error sebesar 0,032% pada sumbu x dan 0,83% pada sumbu y. Seluruh pengujian pada sumbu z menunjukkan error 0%, sehingga diperoleh rata-rata *error* keseluruhan sistem sebesar 0,23%.

Nilai error yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai posisi target dengan tingkat akurasi yang baik. Error tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu toleransi mekanik pada *pulley*, *timing belt*, dan sambungan antar *joint* yang dapat menyebabkan sedikit pergeseran posisi, resolusi pembacaan sensor AS5600 yang memiliki deviasi pembacaan sudut, serta karakteristik microstepping driver A4988 yang tidak selalu menghasilkan posisi rotor tepat pada nilai teoritis. Selain itu, proses perhitungan menggunakan tipe data *floating-point* pada Arduino Mega 2560 juga menyebabkan pembulatan nilai desimal, sehingga terdapat selisih kecil antara hasil perhitungan manual dan posisi aktual robot. Meskipun demikian, seluruh nilai error masih berada di bawah 1,1%, sehingga robot memiliki tingkat akurasi yang baik dan layak digunakan untuk proses penyolderan PCB secara otomatis.

4.13. Analisa Pengujian

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, sistem Robot Soldering SCARA 4 DOF berbasis Arduino Mega 2560 secara keseluruhan berjalan sesuai dengan spesifikasi perancangan. *Homing System* pada seluruh sumbu (J1, J2, J3, dan Z) berfungsi dengan baik; mekanisme *back-off* setelah *limit switch* terpicu memastikan titik referensi nol ditetapkan secara stabil dan konsisten sebagai dasar perhitungan kinematik.

Sensor *Magnetic Encoder* AS5600 yang diakses melalui multiplexer TCA9548A menunjukkan akurasi yang tinggi dengan error maksimal 0,03% pada sumbu J1 dan 0% pada sumbu z, sehingga layak digunakan sebagai umpan balik posisi pada sistem kontrol. Algoritma *forward kinematic* menghasilkan error pembulatan maksimal 0,68 mm akibat penggunaan fungsi *roundf()*, namun nilai ini masih berada dalam toleransi aplikasi soldering through-hole PCB yang berkisar antara 0,5 mm hingga 1,5 mm.

Sistem kontrol suhu menggunakan sensor *thermocouple* tipe-K, modul MAX6675, dan *Solid State Relay* 40DA berhasil mempertahankan suhu *soldering iron* pada setpoint $\pm 400^{\circ}\text{C}$ dengan fluktuasi $\pm 3^{\circ}\text{C}$ pada kondisi stabil, dengan selisih pembacaan terhadap alat referensi TM-902C tidak lebih dari 2°C . Mode *manual* menggunakan fungsi JOG pada HMI Nextion dan *Rotary Encoder* KY-040 berjalan responsif tanpa terjadi *step skip* maupun *step loss* pada seluruh sumbu. Motor servo MG90s sebagai *end effector* konsisten mengeluarkan timah solder sebesar 3 cm per siklus 3 detik tanpa slip maupun putus. Seluruh protokol komunikasi (I2C, SPI, dan UART) berjalan tanpa konflik selama pengujian integrasi.

Keterbatasan sistem yang teridentifikasi meliputi kapasitas *Waypoint* yang terbatas 50 titik, potensi akumulasi error posisi pada operasi jangka panjang tanpa *re-homing*, dan fluktuasi suhu yang masih dapat diminimalisir dengan implementasi kontroler PID. Keterbatasan-keterbatasan tersebut dapat menjadi arah pengembangan pada penelitian selanjutnya.