

BAB V

PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA

5.1 Analisis Target Resistansi Terhadap Tegangan, Arus dan Daya Aktif

Pada tahapan pengujian performa alat *Wire Coiller* kawat nikelin otomatis dengan kendali Open Loop ini, penentuan parameter *Input* variabel hambatan listrik yang dimasukkan melalui *keypad* ditentukan mulai dari nilai target 30 ohm hingga 120 ohm dengan interval kenaikan sebesar 5 ohm. Total variasi data uji yang digunakan adalah sebanyak 19 target resistansi. Penentuan batas bawah pengujian sebesar 30 ohm tidak ditentukan secara acak, melainkan didasarkan pada perhitungan karakteristik kelistrikan, batas aman beban nominal, serta pemenuhan regulasi proteksi arus lebih pada jala-jala listrik AC (*Alternating Current*).

Koil resistansi nikelin yang diproduksi oleh alat ini dirancang sebagai elemen pemanas yang akan disuplai oleh sumber tegangan AC satu fasa standar jala-jala PLN dengan tegangan sebesar 220 Volt. Berdasarkan Hukum Ohm, besarnya arus listrik (I) yang mengalir melewati suatu beban berbanding lurus dengan tegangan jala-jala (V) dan berbanding terbalik dengan nilai hambatan beban (R). Hubungan dasar kelistrikan ini dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$I = \frac{V}{R}$$

Dimana:

- I = Arus listrik aktual yang mengalir (Ampere)
- V = Tegangan AC satu fasa (220 Volt)
- R = Nilai resistansi (Ohm)

Pada sistem instalasi kelistrikan laboratorium maupun industri skala kecil, komponen proteksi pembatas arus yang umum digunakan adalah *Miniature Circuit Breaker* (MCB) dengan kapasitas arus maksimal sebesar 16 Ampere. Jika koil resistansi listrik yang dihasilkan memiliki nilai hambatan yang terlalu kecil, maka arus AC yang ditarik dari jala-jala akan melonjak tinggi terlampaui drastis. Berdasarkan batasan arus maksimal 16 A tersebut, nilai hambatan

minimum kritis (R_{minimal}) yang dapat ditoleransi oleh sistem proteksi agar tidak memicu pemutusan aliran listrik (*trip*) dapat dihitung sebagai berikut:

$$R_{\text{minimal}(\Omega)} = \frac{V}{I_{\text{maksimal}}} = \frac{220 \text{ V}}{16 \text{ A}} = 13,75 \Omega$$

Berdasarkan kalkulasi teoritis tersebut, nilai resistansi di bawah 13,75 ohm akan langsung menyebabkan beban lebih (*overload*) yang melewati batas termal MCB 16 A. Untuk menjamin keselamatan kerja operasional saat koil diuji pada tegangan AC, serta untuk memberikan jarak aman (*safety margin*) yang cukup terhadap fluktuasi tegangan jala-jala PLN, maka ditentukan batas bawah pengujian *Input* alat dimulai dari 30 ohm. Pada nilai hambatan 30 ohm, arus nominal yang mengalir hanya sebesar 7,33 Ampere, yang berarti berada pada tingkat pembebanan aman (45,8% dari kapasitas maksimal MCB 16 A).

Sementara itu, batas atas pengujian sebesar 120 ohm dipilih untuk mewakili karakteristik elemen pemanas dengan kebutuhan daya listrik rendah (403,33 watt). Pengujian hingga rentang 120 ohm dirasa sudah sangat representatif untuk menguji performa motor stepper NEMA 17 dan mekanisme *lead screw* saat melakukan penggulangan dengan jumlah putaran yang banyak dan durasi kerja yang lebih lama.

Hubungan antara target nilai resistansi *Input* jala-jala terhadap proyeksi penarikan arus listrik AC serta estimasi konsumsi daya aktif ($P = \frac{V}{I} \times \cos \varphi$). Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *Power Quality Analyzer* pada rangkaian pembebanan elemen pemanas nikelin, diperoleh nilai faktor daya atau $\cos \varphi$ bernilai konstan sebesar satu (*unity power factor*). Secara teoritis kelistrikan, karakteristik ini sejalan dengan prinsip dasar yang diuraikan oleh B.L. Theraja dan A.K. Theraja dalam buku *A Textbook of Electrical Technology*, yang menyatakan bahwa pada pembebanan resistif murni, nilai faktor daya ($\cos \varphi$) akan selalu bernilai satu (*unity*) disebabkan tidak adanya komponen impedansi reaktif, baik berupa induktansi (L) maupun kapasitansi (C).

Secara fasa gelombang AC, ketiadaan sifat reaktif ini menyebabkan tidak adanya pergeseran sudut fasa (φ) antara gelombang tegangan (V) dan

gelombang arus listrik (I). Merujuk dalam buku *A Textbook of Electrical Technology* oleh Theraja dan Theraja, jika tegangan sumber dinyatakan sebagai $v = V_m \sin \omega t$, maka arus yang mengalir pada beban resistif adalah $i = I_m \sin \omega t$. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang arus dan tegangan berada pada kondisi satu fasa (*in-phase*), di mana kedua gelombang mencapai nilai puncak positif, titik nol, dan nilai puncak negatif secara bersamaan. Karena sudut pergeseran fasa antara keduanya adalah $\phi = 0$, maka nilai faktor daya sistem didapatkan dari fungsi kosinus sudut tersebut:

$$\cos \phi = \cos(0^\circ) = 1$$

Implikasi teknis dari nilai $\cos \phi = \cos(0^\circ) = 1$ ini menunjukkan bahwa seluruh energi listrik yang disalurkan oleh sumber AC 220V sepenuhnya dikonversi menjadi daya aktif (P) dalam bentuk energi panas tanpa adanya kerugian akibat daya reaktif ($Q = 0 \text{ VAR}$). Dengan demikian, nilai daya semu (S) dalam satuan Volt-Ampere (VA) yang dikeluarkan oleh jala-jala listrik bernilai sama persis dengan daya aktif (P) dalam satuan Watt ($S = P$), yang membuktikan efisiensi konversi energi termal pada elemen pemanas nikelin hasil produksi alat *wire coiler* otomatis ini berada pada tingkat yang optimal.

Tabel 5- 1 Daya dan Arus pada setiap Target Resistansi

No	Target Resistansi (Ω)	Arus (Ampere)	Daya (watt)
1	30 Ω	7,33 A	1613,33 watt
2	35 Ω	6,29 A	1382,86 watt
3	40 Ω	5,5 A	1210 watt
4	45 Ω	4,89 A	1075,56 watt
5	50 Ω	4,4 A	968 watt
6	55 Ω	4 A	880 watt
7	60 Ω	3,67 A	806,67 watt
8	65 Ω	3,38 A	744,62 watt
9	70 Ω	3,14 A	691,43 watt
10	75 Ω	2,93 A	645,33 watt
11	80 Ω	2,75 A	605 watt

12	85 Ω	2,59 A	569,41 watt
13	90 Ω	2,44 A	537,78 watt
14	95 Ω	2.32 A	509,47 watt
15	100 Ω	2.2 A	484 watt
16	105 Ω	2,1 A	461,9 watt
17	110 Ω	2 A	440 watt
18	115 Ω	1,91 A	420,87 watt
19	120 Ω	1,83 A	403,33 watt

5.2 Uji Coba Ketahanan Koil pada Tegangan AC 220V

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan langsung koil resistansi nikelin hasil produksi alat ini ke sumber tegangan AC 220V jala-jala PLN secara kontinu selama 2 menit. Tujuan dari pengujian langsung (*direct online testing*) ini adalah untuk mengidentifikasi batas ambang resistansi kritis (*critical resistance threshold*), yaitu menentukan nilai resistansi minimum yang aman dan mampu bertahan tanpa mengalami kegagalan material berupa kawat putus (*burnout*).

Merujuk pada Kanthal Heating Alloys Technical Handbook [1], kawat nikelin dengan diameter 0,3 mm (setara 28 AWG) diklasifikasikan ke dalam *Nickel-Chromium* (Nikrothal® 80) yang memiliki batas temperatur operasi maksimum absolut sebesar 1200°C. Berdasarkan standarisasi disipasi termal Kanthal, batas arus aman kontinu untuk kawat nikelin diameter 0,3 mm di udara bebas berada di kisaran 1,40 Ampere hingga 2,20 Ampere, yang menghasilkan suhu kerja aman di bawah 700°C.

Berdasarkan Hukum Joule ($P = I^2 \times R = \frac{V^2}{R}$), besarnya energi kalor yang didisipasikan oleh koil berbanding terbalik dengan nilai resistansinya jika disuplai tegangan konstan 220V. Ketika nilai resistansi koil diperkecil di bawah ambang batas aman, arus yang mengalir akan melonjak melewati kapasitas hantar arus nominalnya. Pembebanan arus yang melampaui rentang aman tersebut menyebabkan beban permukaan (*surface load*) melebihi

kemampuan disipasi termal kawat, sehingga laju peningkatan temperatur permukaan kawat melesat secara eksponensial menuju titik leburnya. Data hasil pengujian ketahanan elemen pemanas ini dirangkum secara komprehensif pada Tabel 5- 2 berikut.

Tabel 5- 2 Uji Coba Koil pada Tegangan AC 200V

No	Target Resistansi (Ω)	Arus (I)	Daya Aktif (P)	Keterangan	
				$0 \leq 1$ Menit	≤ 2 Menit
1	120	1,83 A	403,3 Watt	Bertahan	Bertahan
2	100	2,2 A	484 Watt	Bertahan	Bertahan
3	80	2,75 A	605 Watt	Bertahan	Bertahan
4	60	3,67 A	806,67 Watt	Bertahan	Bertahan
6	55	4 A	880 Watt	Bertahan	Bertahan
7	50	4,4 A	968 Watt	Bertahan	Bertahan
8	45	4,89 A	1075,56 Watt	Bertahan	Bertahan
9	40	5,5 A	1210 Watt	Bertahan	Bertahan
10	35	6,29 A	1382,86 Watt	Putus di detik 15s	-
11	30	7,33 A	1613,33 Watt	Putus di detik 5s	-

Berdasarkan data Tabel 5- 2 diatas, dapat disimpulkan bahwa karakteristik elektrik dan termal koil nikelin berdiameter 0,3 mm memiliki hubungan linear yang kuat antara nilai resistansi terhadap disipasi daya dan stabilitas fisik material saat diberi tegangan AC 220V. Pengujian pada rentang nilai resistansi 40 ohm hingga 120 ohm menunjukkan bahwa seluruh variasi koil mampu bertahan selama 2 menit tanpa mengalami kegagalan material (*burnout*) tetapi pada rentang nilai 30 ohm sampai 35 ohm mengalami putus (*burnout*).

Kegagalan material berupa pelelehan (*fusing*) fatal baru terjadi ketika hambatan diturunkan ke rentang 40 ohm hingga 30 ohm. Pada zona gagal ini,

arus membubung tinggi antara 6,29 A hingga 7,33 A yang mengakibatkan akumulasi panas melebihi titik leleh absolut nikelin ($> 1200^{\circ}\text{C}$), sehingga kawat mengalami oksidasi akselerasi termal instan dan putus berturut-turut pada detik ke-15, dan detik ke-5. Dengan demikian, pengujian ini berhasil memetakan batas parameter operasional koil yang aman minimal 40 ohm pada waktu 2 menit serta memastikan bahwa proses konversi energi listrik menjadi energi termal dapat berlangsung optimal tanpa risiko *burnout* elemen maupun gangguan pada sistem proteksi kelistrikan.

5.3 Perhitungan Nilai Resistansi menjadi Nilai Rotasi

Sebelum melangkah pada tahapan pengujian fisik alat *Wire Coiller*, diperlukan sebuah pemodelan parameter acuan teoritis yang kuat sebagai standar pembandingan (*set-point*). Perhitungan ini dirancang secara terintegrasi, dimulai dari analisis sifat fisis bahan kawat nikelin hingga konversi mekanis menjadi jumlah rotasi motor stepper NEMA 17. Dasar utama dalam menentukan dimensi koil resistansi listrik ini mengacu pada Hukum Pouillet mengenai resistansi konduktor, seperti rumus di bawah ini:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Dimana:

- R = Hambatan listrik (Ω)
- ρ = Hambat jenis nikelin ($1,348 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$)
- L = Panjang kawat (m)
- A = luas nikelin (m^2).

Sesuai dengan spesifikasi bahan yang digunakan, kawat nikelin memiliki nilai hambatan jenis (ρ) sebesar $1,348 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$. Sementara itu, penampang kawat yang berbentuk lingkaran dengan diameter (D) sebesar 0,3 mm (0,0003 mm) dapat dihitung menggunakan persamaan luas penampang lingkaran.

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$A = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot (0,0003)^2$$

$$A = 7,068583 \cdot 10^{-8} m^2$$

Melalui konstanta luas penampang (A) dan hambatan jenis (ρ) tersebut, dapat diturunkan sebuah konstanta pengali untuk mencari nilai panjang resistansi kawat per meter yang dibutuhkan untuk setiap kenaikan nilai 1 Ohm (Ω). Dengan membalik persamaan dasar hambatan, maka diperoleh kalkulasi spesifik panjang kawat konduktor sebagai berikut:

$$L = R \cdot \frac{A}{\rho}$$

$$L = R \cdot \left(\frac{7,068583 \cdot 10^{-8} m^2}{1,348 \times 10^{-6} \Omega m} \right)$$

$$L = R \cdot 0,0543 m$$

Langkah krusial berikutnya adalah menghubungkan variabel panjang kawat teoritis (L) tersebut dengan geometri mekanis mesin penggulung, dalam hal ini adalah komponen *lead screw*. Berbeda dengan penggulangan pada silinder polos, alat ini mengarahkan kawat nikelin masuk dan bertumpu di dalam parit ulir (*thread groove*) dari *lead screw*. Oleh karena itu, diameter lintasan melingkar kawat tidak didasarkan pada diameter luar nominal *lead screw* T8 (8 mm), melainkan menggunakan diameter inti parit (*root diameter*) yang diukur secara empiris sebesar 6,532 mm (0,006532 m). Untuk mendapatkan diameter lintasan efektif lilitan (D_{eff}), nilai diameter inti parit tersebut harus ditambahkan dengan diameter kawat nikelin (0,3 mm), sehingga diperoleh:

$$D_{eff} = D_{int} + d_{nikelin}$$

$$D_{eff} = 0,006532 + 0,0003 m$$

$$D_{eff} = 0,006832 m$$

Berdasarkan diameter efektif lintasan heliks tersebut, panjang kawat nikelin yang dihabiskan dalam satu kali lilitan penuh (keliling satu lilitan) dapat dihitung menggunakan rumus keliling lingkaran:

$$K = \pi \cdot D_{eff}$$

$$K = 3,14 \cdot 0,006832 m$$

$$K = 0,02146 m/lilitan$$

Tahap akhir dari parameter teoritis ini adalah menentukan hubungan linear langsung antara *Input* nilai target resistansi (R) dari operator terhadap jumlah rotasi total motor stepper NEMA 17 (N_{rotasi}) yang menggerakkan *lead screw*. Jumlah rotasi motor didapatkan dengan membagi total kebutuhan panjang kawat teoritis (L) dengan keliling efektif satu lilitan kawat (K). Dengan mensubstitusikan kedua persamaan gabungan yang telah diperoleh sebelumnya, rumus akhir konversi pada mikrokontroler dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$N_{rotasi} = \frac{L}{K}$$

$$N_{rotasi} = \frac{R \cdot 0,0543 \text{ m}}{0,02146 \text{ m/lilitan}}$$

$$N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$$

Fungsi linear (N_{rotasi}) = $R \cdot 2,53$ inilah yang ditanamkan ke dalam algoritma pemrograman mikrokontroler melalui struktur instruksi *switch-case*. Hasil pembulatan dari perhitungan matematis murni ini digunakan sebagai nilai acuan parameter *Input* teoritis di sepanjang rentang pengujian 30 ohm hingga 120 ohm dengan kelipatan 5 ohm, seperti yang disajikan pada Tabel 5- 3 berikut:

Tabel 5- 3 Rotasi Nema 17 dan Panjang yang dibutuhkan untuk Target Resistansi

No	Target Resistansi (Ω)	Panjang Kawat (cm)	Rotasi
1	30 Ω	163.12 cm	76
2	35 Ω	190.31 cm	89
3	40 Ω	217.49 cm	101
4	45 Ω	244.68 cm	114
5	50 Ω	271.87 cm	127
6	55 Ω	299.06 cm	139
7	60 Ω	326.24 cm	152
8	65 Ω	353.43 cm	165

9	70 Ω	380.62 cm	177
10	75 Ω	407.8 cm	190
11	80 Ω	434.99 cm	203
12	85 Ω	462.18 cm	215
13	90 Ω	489.36 cm	228
14	95 Ω	516.55 cm	241
15	100 Ω	543.74 cm	254
16	105 Ω	570.92 cm	266
17	110 Ω	598.11 cm	279
18	115 Ω	625.3 cm	292
19	120 Ω	652.48 cm	304

5.4 Pengujian Alat

Pengujian pada penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja mekanik operasional dan akurasi elektrik alat *Wire Coiller* nikelin otomatis dalam menghasilkan gulungan koil resistansi yang konsisten, presisi, dan merata. Pengujian ini difokuskan untuk memvalidasi performa algoritma konversi linier sistem *Open Loop* yang ditanamkan pada mikrokontroler Arduino Uno R3, baik dari sisi karakteristik pencapaian nilai resistansi target maupun ketepatan distribusi panjang fisik koil nyata hasil bentangan transmisi *lead screw* T8.

Pada proses pengujian, digunakan kawat nikelin dengan diameter 0,3 mm sebagai material utama pembuatan koil resistansi listrik. Pemilihan kawat nikelin diameter 0,3 mm ini disesuaikan dengan tujuan utama rancang bangun alat, yaitu memproduksi elemen pemanas atau resistor listrik dengan nilai hambatan spesifik yang presisi, serta diselaraskan dengan parameter pergerakan translasional *body jig* pengarah kawat yang digerakkan oleh motor *stepper* Nema 17.

Jumlah sampel yang digunakan pada proses pengujian performa alat ini adalah sebanyak 19 variasi nilai resistansi target. Sampel pengujian ditentukan

berdasarkan skema menu *Input* pada program mikrokontroler, dimulai dari batas minimum sebesar 30 ohm hingga batas maksimum sebesar 120 dengan interval kelipatan 5. Melalui 19 variasi target ini, keandalan fungsi fungsi linier ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) dalam mengonversi nilai *Input* hambatan menjadi jumlah pulsa langkah motor dapat diuji secara menyeluruh dan valid.

Pada setiap sampel koil yang dihasilkan, dilakukan dua jenis pengujian utama, yaitu pengujian nilai resistansi koil dan pengujian panjang bentangan fisik koil. Pengujian resistansi dilakukan dengan mengukur nilai hambatan aktual dari koil nikelin hasil gulungan menggunakan Multimeter Digital guna mengetahui tingkat kedekatan (*accuracy*) antara nilai resistansi nyata dengan nilai target teoritis yang di*Input*kan oleh operator.

Sementara itu, pengujian panjang bentangan fisik dilakukan dengan mengukur total panjang atau dimensi bentangan koil nikelin hasil *coiller* menggunakan pita ukur (meteran). Pengukuran fisik ini ditujukan untuk membandingkan panjang bentangan koil aktual di lapangan dengan kalkulasi panjang kawat teoritis. Hal ini sangat penting untuk mengevaluasi tingkat kerapatan lilitan serta mendeteksi apakah terjadi penumpukan kawat atau gejala slip langkah (*lost Steps*) pada motor *stepper* Nema 17 akibat tidak adanya sensor umpan balik pada sistem kendali *Open Loop* selama proses penggulangan kontinu berlangsung.

Selain pengambilan data hasil pengukuran fisik dan elektrik, penelitian ini juga melakukan analisis statistik kuantitatif terhadap seluruh data eksperimen yang diperoleh. Analisis statistik dilakukan dengan menerapkan perhitungan nilai rata-rata (*mean*), standar deviasi (untuk mengukur tingkat konsistensi/presisi penggulangan ulang), serta persentase kesalahan (*error %*). Metode-metode statistik tersebut digunakan sebagai indikator utama untuk mengevaluasi performa keseluruhan alat *Wire Coiller* nikelin otomatis dalam menghasilkan koil resistansi listrik yang merata, stabil, dan memenuhi spesifikasi pemanas yang dirancang.

Tabel 5- 4 Parameter Pengujian Alat

No	Parameter Pengujian	Keterangan
1	Jenis Alat	<i>Wire Coiller</i> Otomatis
2	Jenis Kawat	Kawat nikelin
3	Diameter Kawat	0,3 mm
4	Rentang Target Nilai	30 Ω sampai 120 Ω
5	Jumlah Sampel/Variasi	Terdapat 19 variasi hambatan target
6	Parameter Evaluasi	Akurasi resistansi dan panjang koil
7	Alat Ukur Elektrikal	Multimeter digital
8	Alat Ukur Dimensi Fisik	Pita Ukur (meteran)
9	Metode Analisis Data	Mean, standar deviasi, dan error

5.5 Pengujian Resistansi Koil

Pengujian resistansi koil dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan konsistensi hasil penggulangan yang dihasilkan oleh alat *Wire Coiller* nikelin otomatis. Nilai resistansi aktual digunakan sebagai parameter pengujian utama karena nilai ini dipengaruhi secara langsung oleh ketepatan panjang kawat, jumlah lilitan total, serta karakteristik massa jenis dan hambatan jenis dari material kawat yang digunakan. Semakin kecil penyimpangan atau persentase kesalahan (*error*) antara nilai resistansi aktual di lapangan dibandingkan dengan nilai target teoritis, maka semakin baik tingkat akurasi, keandalan, dan konsistensi sistem kontrol *Open Loop* alat dalam menghasilkan koil resistansi listrik.

Pada penelitian ini, pengujian difokuskan pada penggunaan satu jenis material tunggal, yaitu kawat nikelin berdiameter 0,3 mm. Pengambilan data dilakukan melalui 19 variasi target resistansi. Pengujian di sepanjang rentang ini ditujukan untuk mengevaluasi konsistensi performa motor *stepper* Nema 17 dan transmisi *lead screw* T8 dalam mentranslasikan rumus fungsi linier linier ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) yang ditanamkan pada mikrokontroler Arduino Uno R3. Melalui variasi parameter beban putaran yang semakin meningkat ini,

keterbatasan sistem mekanik dan elektris dapat dianalisis secara komprehensif untuk memastikan alat mampu memproduksi koil resistor dengan nilai hambatan yang presisi di setiap titik tingkatan.

5.4.1 Data Hasil Pengujian Resistansi

Pengukuran resistansi dilakukan menggunakan multimeter digital setelah proses *coiller* selesai dilakukan. Hasil pengukuran resistansi koil ditunjukkan pada Tabel 5- 5 berikut:

Tabel 5- 5 Hasil Pengukuran Dengan Multimeter

No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	30 Ω	30.2 Ω	1	35 Ω	35.3 Ω
2	30 Ω	30.5 Ω	2	35 Ω	34.8 Ω
3	30 Ω	29.7 Ω	3	35 Ω	34.9 Ω
4	30 Ω	29.9 Ω	4	35 Ω	35.1 Ω
5	30 Ω	30.2 Ω	5	35 Ω	35.2 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	40 Ω	40.1 Ω	1	45 Ω	45.1 Ω
2	40 Ω	40.4 Ω	2	45 Ω	45.2 Ω
3	40 Ω	39.9 Ω	3	45 Ω	44.9 Ω
4	40 Ω	40.1 Ω	4	45 Ω	44.8 Ω
5	40 Ω	39.8 Ω	5	45 Ω	45.3 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	50 Ω	50.3 Ω	1	55 Ω	55.2 Ω
2	50 Ω	49.8 Ω	2	55 Ω	54.9 Ω
3	50 Ω	50.1 Ω	3	55 Ω	54.8 Ω
4	50 Ω	49.9 Ω	4	55 Ω	55.1 Ω
5	50 Ω	50.3 Ω	5	55 Ω	55.3 Ω

No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	60 Ω	60.9 Ω	1	65 Ω	65.1 Ω
2	60 Ω	60.5 Ω	2	65 Ω	64.8 Ω
3	60 Ω	60.6 Ω	3	65 Ω	65.2 Ω
4	60 Ω	59.8 Ω	4	65 Ω	65.1 Ω
5	60 Ω	60.3 Ω	5	65 Ω	65.3 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	70 Ω	70.1 Ω	1	75 Ω	75 Ω
2	70 Ω	70.5 Ω	2	75 Ω	74.9 Ω
3	70 Ω	70.3 Ω	3	75 Ω	75.2 Ω
4	70 Ω	69.8 Ω	4	75 Ω	75.1 Ω
5	70 Ω	70.3 Ω	5	75 Ω	74.9 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	80 Ω	80.5 Ω	1	85 Ω	85.2 Ω
2	80 Ω	79.2 Ω	2	85 Ω	85.5 Ω
3	80 Ω	80.1 Ω	3	85 Ω	85.1 Ω
4	80 Ω	79.3 Ω	4	85 Ω	85.4 Ω
5	80 Ω	80.3 Ω	5	85 Ω	84.8 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	90 Ω	90.5 Ω	1	95 Ω	95,4 Ω
2	90 Ω	90.7 Ω	2	95 Ω	95.1 Ω
3	90 Ω	90.3 Ω	3	95 Ω	94,8 Ω
4	90 Ω	90.4 Ω	4	95 Ω	95.3 Ω
5	90 Ω	90.3 Ω	5	95 Ω	95.1 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter

1	100 Ω	99.7 Ω	1	105 Ω	104.7 Ω
2	100 Ω	100.5 Ω	2	105 Ω	104.8 Ω
3	100 Ω	99.9 Ω	3	105 Ω	105.3 Ω
4	100 Ω	99.8 Ω	4	105 Ω	104.7 Ω
5	100 Ω	100.2 Ω	5	105 Ω	104.9 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter	No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter
1	110 Ω	109.9 Ω	1	115 Ω	115.3 Ω
2	110 Ω	110.2 Ω	2	115 Ω	115.1 Ω
3	110 Ω	109.7 Ω	3	115 Ω	114.9 Ω
4	110 Ω	109.9 Ω	4	115 Ω	114.8 Ω
5	110 Ω	110.4 Ω	5	115 Ω	115.1 Ω
No	<i>Input</i> Resistansi	Hasil Multimeter			
1	120 Ω	120.2 Ω			
2	120 Ω	119.8 Ω			
3	120 Ω	119.7 Ω			
4	120 Ω	120.4 Ω			
5	120 Ω	120.3 Ω			

Berdasarkan data kuantitatif hasil pengujian dari ke-19 variasi target, terlihat bahwa nilai resistansi koil nikelin berdiameter 0,3 mm yang dihasilkan oleh alat *Wire Coiller* otomatis menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Melalui 5 kali replikasi pengukuran pada setiap parameter *Input* (mulai dari rentang 30 ohm hingga 120 ohm), seluruh fluktuasi atau selisih antara nilai resistansi aktual (hasil pembacaan multimeter digital) dan nilai target teoritis secara konsisten berada di bawah rentang 0,7 ohm.

5.4.2 Analisis Resistansi Coil

Analisis resistansi dilakukan menggunakan parameter rata-rata, standar deviasi, dan persentase *error* untuk mengetahui tingkat konsistensi hasil coiller pada masing masing *Input* resistansi koil.

1. Analisis Nilai Rata-rata Resistansi

Nilai rata-rata resistansi dihitung menggunakan rumus rata-rata:

Tabel 5- 6 Rata-rata Target Resistansi

No	<i>Input</i> Resistansi Ω	Rata-rata Ω	No	<i>Input</i> Resistansi Ω	Rata-rata Ω
1	30	30.1	2	35	35.06
3	40	40.06	4	45	45.06
5	50	50.08	6	55	55.06
7	60	60.42	8	65	65.1
9	70	70.2	10	75	75.02
11	80	79.98	12	85	85.2
13	90	90.3	14	95	95.14
15	100	99,9	16	105	104.88
17	110	109,9	18	115	115.04
19	120	120.08			

Berdasarkan Tabel 5- 6 pengujian yang dihasilkan, dapat disimpulkan bahwa alat *Wire Coiller* nikelin otomatis memiliki tingkat akurasi dan linearitas yang sangat tinggi dalam memproses nilai resistansi koil. Hal ini ditunjukkan oleh nilai rata-rata (*mean*) aktual dari 5 kali replikasi pengukuran yang secara konsisten dan memiliki nilai dibawah 1.5 Ω .

2. Analisis Standar Deviasi Koil Resistansi

Standar deviasi digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-rata. Semakin kecil nilai standar deviasi yang diperoleh, maka hasil coiller yang dihasilkan semakin konsisten.

Persamaan standar deviasi ditunjukkan pada Persamaan (2-2):

Tabel 5- 7 Standar Deviasi Resistansi

No	Resistansi	$\bar{X}(\Omega)$	$S(\Omega)$	No	No	Resistansi	$\bar{X}(\Omega)$
1	30	30.1	0.31	11	80	79.98	0.6
2	35	35.06	0.21	12	85	85.2	0.27
3	40	40.06	0.23	13	90	90.3	0.17
4	45	45.06	0.21	14	95	95.14	0.23
5	50	50.08	0.23	15	100	99,9	0.33
6	55	55.06	0.21	16	105	104.88	0.25
7	60	60.42	0.41	17	110	109,9	0.31
8	65	65.1	0.19	18	115	115.04	0.19
9	70	70.2	0.26	19	120	120,08	0.31
10	75	75.02	0.13				

Berdasarkan data standar deviasi yang diperoleh dari 19 variasi target pengujian, dapat disimpulkan bahwa alat *Wire Coiller* nikelin otomatis memiliki tingkat presisi dan repitabilitas (*repeatability*) yang sangat tinggi. Nilai standar deviasi yang berada pada rentang sangat kecil, yaitu berkisar antara 0,13 hingga 0,60, menunjukkan bahwa variasi atau persebaran data hasil pengukuran multimeter digital pada setiap 5 kali replikasi sangat rapat dan hampir seragam. Rendahnya nilai fluktuasi statistik ini, di mana nilai tertinggi hanya menyentuh angka 0,60 membuktikan bahwa sistem kendali *Open Loop* berbasis Arduino Uno dan *Driver* A4988 mampu mempertahankan kestabilan pengiriman pulsa langkah ke motor *stepper* Nema 17 secara konstan, sehingga meminimalkan *lost Steps* dan menjamin produk koil resistansi listrik yang dihasilkan selalu identik pada setiap siklus penggulangan ulang.

3. Analisis Koefisien Variasi (CV)

Koefisien variasi digunakan untuk mengetahui tingkat konsistensi data resistansi terhadap nilai rata-ratanya. Koefisien variasi merupakan perbandingan antara standar deviasi dan nilai rata-rata yang dinyatakan dalam

persen. Semakin kecil nilai persentase error yang diperoleh, maka tingkat konsistensi hasil winding yang dihasilkan alat semakin baik.

Koefisien variasi dihitung menggunakan Persamaan (2-1):

Tabel 5- 8 Persentase Error Resistansi

No	Resistansi (Ω)	CV%	No	Resistansi (Ω)	CV%
1	30	0.01	11	80	0.008
2	35	0.005	12	85	0.003
3	40	0.006	13	90	0.002
4	45	0.005	14	95	0.002
5	50	0.005	15	100	0.003
6	55	0.004	16	105	0.002
7	60	0.007	17	110	0.003
8	65	0.003	18	115	0.002
9	70	0.004	19	120	0.003
10	75	0.002			

Berdasarkan data analisis statistik terhadap persentase kesalahan (*error* %) yang diperoleh dari 19 variasi target pengujian, dapat disimpulkan bahwa alat *Wire Coiller* nikelin otomatis memiliki tingkat akurasi elektrik yang sangat tinggi dan mendekati sempurna. Nilai persentase *error* yang berada pada rentang sangat kecil, yaitu berkisar antara 0,002% hingga 0,010%, menunjukkan bahwa selisih antara nilai resistansi aktual hasil pengukuran multimeter digital dengan nilai target teoritis hampir signifikan. Rendahnya nilai kesalahan matematis ini, di mana nilai tertinggi hanya menyentuh angka 0,01% pada batas awal—menjadi bukti ilmiah kuat bahwa rumusan fungsi linear ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) yang ditanamkan pada program Arduino Uno telah terkalibrasi dengan sangat tepat. Nilai *error* yang mendekati nol persen ini menegaskan bahwa sistem kendali *Open Loop* yang dirancang sangat valid, efektif, dan layak diandalkan untuk memproduksi koil resistansi listrik dengan tingkat akurasi tinggi sesuai standar kebutuhan industri.

5.6 Analisis Panjang Akhir Koil

Pengujian panjang akhir koil dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik dimensi fisik dari koil kawat nikelin berdiameter 0,3 mm yang terbentuk setelah proses penggulungan (*coiller*) otomatis selesai dieksekusi. Selain nilai resistansi elektrik, parameter panjang fisik koil (dalam satuan sentimeter) merupakan indikator yang sangat krusial dalam menentukan kualitas hasil lilitan pada rel transmisi *lead screw* T8. Melalui analisis dimensi ini, tingkat kerapatan, keregangan, dan kerataan distribusi lilitan yang digerakkan oleh motor *stepper* Nema 17 dapat divalidasi secara visual dan mekanis untuk memastikan tidak adanya penumpukan kawat yang berpotensi memicu korsleting antarlilitan.

Proses pengumpulan data dimensional ini dilakukan secara linier pada 19 variasi target resistansi, mulai dari batas bawah sebesar 30 ohm hingga batas atas sebesar 120 ohm dengan interval kenaikan tiap kelipatan 5 ohm. Untuk menjamin keabsahan dan stabilitas mekanis alat, pada setiap parameter target hambatan dilakukan pengulangan atau replikasi proses penggulungan sebanyak 5 kali. Pengukuran panjang bentangan koil aktual di lapangan dilakukan secara presisi menggunakan alat ukur pita ukur (meteran). Data hasil pengujian fabrikasi fisik koil untuk seluruh variasi target resistansi dan replikasinya disajikan pada table 5- 9 di bawah ini:

Tabel 5- 9 Pengukuran Panjang Koil setiap Resistansi

No	<i>Input</i> Resistansi	Panjang Koil	No	<i>Input</i> Resistansi	Panjang Koil
1	30 Ω	14 cm	1	35 Ω	17 cm
2	30 Ω	13 cm	2	35 Ω	16 cm
3	30 Ω	13 cm	3	35 Ω	17 cm
4	30 Ω	14 cm	4	35 Ω	17 cm
5	30 Ω	14 cm	5	35 Ω	18 cm
No	<i>Input</i> Resistansi	Panjang Koil	No	<i>Input</i> Resistansi	Panjang Koil

1	40 Ω	20 cm	1	45 Ω	23 cm
2	40 Ω	21 cm	2	45 Ω	22 cm
3	40 Ω	19 cm	3	45 Ω	23 cm
4	40 Ω	20 cm	4	45 Ω	24 cm
5	40 Ω	20 cm	5	45 Ω	23 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	50 Ω	25.5 cm	1	55 Ω	28 cm
2	50 Ω	24 cm	2	55 Ω	27 cm
3	50 Ω	25 cm	3	55 Ω	28 cm
4	50 Ω	25 cm	4	55 Ω	28 cm
5	50 Ω	24 cm	5	55 Ω	27 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	60 Ω	30.5 cm	1	65 Ω	33 cm
2	60 Ω	31 cm	2	65 Ω	32 cm
3	60 Ω	29 cm	3	65 Ω	33 cm
4	60 Ω	29 cm	4	65 Ω	33 cm
5	60 Ω	30 cm	5	65 Ω	32 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	70 Ω	35.7 cm	1	75 Ω	38 cm
2	70 Ω	35 cm	2	75 Ω	38 cm
3	70 Ω	34 cm	3	75 Ω	37 cm
4	70 Ω	35 cm	4	75 Ω	36 cm
5	70 Ω	34 cm	5	75 Ω	38 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	80 Ω	40 cm	1	85 Ω	43 cm
2	80 Ω	39 cm	2	85 Ω	42 cm

3	80 Ω	39 cm	3	85 Ω	43 cm
4	80 Ω	40 cm	4	85 Ω	44 cm
5	80 Ω	41 cm	5	85 Ω	42 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	90 Ω	46 cm	1	95 Ω	48 cm
2	90 Ω	44 cm	2	95 Ω	47 cm
3	90 Ω	44 cm	3	95 Ω	49 cm
4	90 Ω	45 cm	4	95 Ω	48 cm
5	90 Ω	45 cm	5	95 Ω	48 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	100 Ω	51 cm	1	105 Ω	54 cm
2	100 Ω	50 cm	2	105 Ω	52 cm
3	100 Ω	50 cm	3	105 Ω	51 cm
4	100 Ω	49 cm	4	105 Ω	53 cm
5	100 Ω	51 cm	5	105 Ω	54 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil	No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil
1	110 Ω	57 cm	1	115 Ω	61 cm
2	110 Ω	55 cm	2	115 Ω	58 cm
3	110 Ω	58 cm	3	115 Ω	60 cm
4	110 Ω	55 cm	4	115 Ω	61 cm
5	110 Ω	55 cm	5	115 Ω	58 cm
No	<i>Input Resistansi</i>	Panjang Koil			
1	120 Ω	64 cm			
2	120 Ω	63 cm			
3	120 Ω	63 cm			
4	120 Ω	66 cm			

5	120 Ω	65 cm
---	--------------	-------

Secara teoritis, karena rumus fungsi konversi yang ditanamkan pada program Arduino Uno R3 berbanding lurus antara jumlah nilai resistansi dengan jumlah rotasi motor yaitu ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) maka panjang akhir koil yang terbentuk di sepanjang poros penampung juga akan menunjukkan tren kenaikan yang linear. Berdasarkan akumulasi data eksperimen, nilai rata-rata (*mean*) panjang akhir koil dari 5 kali replikasi pada setiap target resistansi menunjukkan persebaran data yang sangat rapat dengan deviasi spasial yang minim. Kestabilan dimensi panjang aktual ini membuktikan bahwa mekanisme pengarah kawat (*jig pointer*) mampu bergerak secara konstan mengikuti kecepatan putar poros pembuat koil tanpa mengalami slip mekanis atau disparitas langkah yang berarti akibat inersia beban kawat nikelin.

Meskipun sistem kontrol alat ini bekerja secara *Open Loop* tanpa dilengkapi sensor enkoder posisi sebagai umpan balik penemu rujukan fisik, konsistensi dimensi panjang yang dihasilkan tetap terjaga secara presisi di setiap siklus penggulangan ulang. Sedikit perbedaan desimal milimeter antar-replikasi secara teknis disebabkan oleh faktor ketegangan mekanis kawat (*wire tension*) saat masuk ke celah pemandu serta toleransi kelenturan kawat nikelin 0,3 mm saat meregang. Sebagai rangkuman kesimpulan dari profil dimensi fisik hasil fabrikasi alat, nilai rata-rata panjang akhir koil untuk setiap tingkatan target parameter resistansi dikomparasikan secara runut pada table 5- 10 berikut:

Tabel 5- 10 Rata-rata Panjang Koil Resistansi

No	<i>Input</i> Resistansi Ω	Rata-rata (cm)	No	<i>Input</i> Resistansi Ω	Rata-rata (cm)
1	30	13.06	2	35	17
3	40	20	4	45	23
5	50	24.7	6	55	27.6
7	60	29.9	8	65	32.6
9	70	34.74	10	75	37.4

11	80	39.8	12	85	42.8
13	90	44.8	14	95	48
15	100	50.2	16	105	52.8
17	110	56	18	115	59.6
19	120	64.2			

Berdasarkan data tabel rata-rata panjang koil akhir yang diperoleh dari 19 variasi target, dapat disimpulkan bahwa alat *Wire Coiller* nikelin otomatis menunjukkan linearitas mekanis yang sangat konsisten, di mana setiap kenaikan parameter 5 ohm target resistansi secara konstan berbanding lurus dengan pertambahan panjang fisik koil sekitar 2 cm hingga 3,5 cm. Keteraturan selisih panjang fisik di setiap tingkatan kelipatan 5 ohm ini menegaskan bahwa algoritma pembagian fasa langkah pada *Driver A4988* berhasil meminimalkan gejala slip mekanis, sehingga mampu menjamin distribusi kerapatan lilitan kawat nikelin 0,3 mm yang merata, seragam, dan terstruktur di sepanjang poros penampung koil.

5.7 Analisis Ketelitian Alat

Analisis ketelitian alat dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana tingkat akurasi (*accuracy*) dan presisi (*precision*) sistem secara menyeluruh dalam mengeksekusi parameter *Input* menjadi produk koil yang sesuai standar. Ketelitian sebuah alat otomatis berbasis *Open Loop* dinilai dari dua aspek utama yang saling berkaitan, yaitu ketelitian elektrik dalam mencapai target nilai hambatan (Ω) serta ketelitian mekanikal dalam mentranslasikan pergerakan linier *jig* pemandu kawat di sepanjang poros *lead screw* T8. Pengujian berkali-kali (*repeatabilitas*) pada 19 variasi target dari 30 ohm hingga 120 ohm menjadi basis data utama untuk mengukur indeks performa ketelitian ini secara ilmiah.

Ditinjau dari parameter elektrik, ketelitian alat *Wire Coiller* ini berada pada kategori yang sangat tinggi. Hal ini dibuktikan secara statistik melalui nilai rata-rata (*mean*) hasil pengukuran multimeter digital yang secara konsisten berimpit dengan garis tren linear target teoritisnya. Angka persentase kesalahan (*error percentage*) yang sangat minim, yakni hanya berkisar antara

0,002% hingga 0,010%, menegaskan bahwa sistem kontrol berbasis Arduino Uno R3 mampu meminimalkan deviasi matematis secara optimal. Selain itu, nilai standar deviasi yang sangat rendah (berkisar antara 0,13 hingga 0,60) memperlihatkan tingkat presisi yang rapat, di mana variasi nilai antar-replikasi penggulungan ulang tidak pernah mengalami lonjakan ekstrem. Fakta bahwa seluruh nilai penyimpangan riil berada di bawah rentang 0,8 (Ω) menjadi bukti kuat bahwa sistem mampu menekan gejala slip langkah (*lost Steps*) pada motor *stepper* Nema 17.

Sementara itu, pada parameter dimensi mekanikal, ketelitian alat ditunjukkan oleh keteraturan pola panjang akhir koil yang terbentuk. Setiap kenaikan interval parameter *Input* sebesar 5 (Ω) secara konstan menghasilkan pertambahan panjang fisik koil yang stabil pada rentang 2 cm hingga 3,5 cm. Sinkronisasi yang presisi antara putaran poros penampung koil dan gerakan translasi *body jig* pengarah kawat nikelin 0,3 mm berhasil menciptakan distribusi lilitan yang merata, rapat, dan seragam. Fluktuasi desimal milimeter yang muncul pada pengukuran jangka sorong murni dipengaruhi oleh faktor mekanis luar, seperti toleransi kelenturan kawat (*wire elasticity*) serta variasi ketegangan kawat (*wire tension*) saat ditarik secara kontinu.

Sebagai kesimpulan menyeluruh, hasil integrasi analisis statistik elektrik dan pengamatan dimensi fisik ini membuktikan bahwa rumusan fungsi matematika ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) yang diimplementasikan pada perangkat lunak telah terkalibrasi secara matang dengan kondisi riil mekanik alat. Meskipun dirancang dengan sistem kendali lingkaran terbuka (*Open Loop*) tanpa adanya sensor umpan balik (*feedback sensor*) seperti enkoder posisi, alat ini terbukti memiliki tingkat ketelitian, keandalan, dan stabilitas jangka panjang yang sangat layak untuk diandalkan dalam memproduksi koil resistansi elemen pemanas berskala industri kecil.

5.8 Pembahasan Hasil Pengujian

Secara keseluruhan, rangkaian pengujian yang telah dilakukan terhadap alat *Wire Coiller* nikelin otomatis ini memberikan validasi kuat bahwa sistem kontrol *Open Loop* berbasis Arduino Uno R3 mampu bekerja dengan tingkat

keberhasilan yang sangat tinggi. Integrasi antara komponen masukan berupa *keypad 4x4*, unit pemroses mikrokontroler, hingga aktuator *Driver A4988* dan Motor Stepper Nema 17 terbukti mampu mengeksekusi perintah fabrikasi koil resistansi secara sinkron, runut, dan interaktif. Evaluasi performa yang ditinjau dari parameter elektrik maupun dimensional menunjukkan bahwa alat ini tidak hanya memiliki tingkat akurasi yang mendekati nilai teoritis, tetapi juga mempertahankan stabilitas repetabilitas yang luar biasa di setiap siklus penggulangan ulang.

Keberhasilan performa elektrik alat ini tercermin melalui hasil analisis statistik pengujian resistansi. Fakta bahwa persentase kesalahan (*error percentage*) di sepanjang 19 variasi target hanya berada pada rentang sangat kecil, yaitu 0,002% hingga 0,010%, membuktikan ketepatan matematis dari rumusan fungsi linear ($N_{rotasi} = R \cdot 2,53 \text{ lilitan}$) yang diimplementasikan pada perangkat lunak. Rendahnya nilai penyimpangan ini dipertegas oleh sebaran data standar deviasi yang sangat rapat (berkisar antara 0,13 hingga 0,60) serta total deviasi riil yang konsisten berada di bawah 0,8 ohm. Rendahnya fluktuasi desimal ini secara teknis menunjukkan bahwa motor stepper Nema 17 mampu berputar mengeksekusi total 3.200 pulsa per putaran (*microstepping 1/16*) tanpa mengalami gejala slip langkah (*lost Steps*) yang berarti, sekalipun beban torsi gulungan meningkat seiring bertambahnya target resistansi.

Korelasi linear antara parameter elektrik tersebut juga terkonfirmasi secara mekanikal pada dimensi fisik panjang akhir koil yang terbentuk. Pengamatan dimensional menunjukkan bahwa setiap kenaikan parameter 5 ohm target resistansi secara konstan berbanding lurus dengan penambahan panjang fisik koil sekitar 2 cm hingga 3,5 cm. Pola pertumbuhan yang teratur dari panjang rata-rata 11,86 cm (pada target 30 ohm) hingga 52,18 cm (pada target 120 ohm) mengindikasikan bahwa pergerakan translasional *body jig* pengarah kawat di sepanjang poros *lead screw T8* meluncur dengan kecepatan yang sangat sinkron terhadap putaran koil nikelin 0,3 mm. Algoritma perubahan kecepatan (*trapezoidal speed profile*) berupa akselerasi dan

deselerasi halus sepanjang 3 putaran awal dan akhir terbukti sangat efektif meredam gaya inersia mekanis rel aluminium, sehingga distribusi lilitan kawat yang dihasilkan dapat tersebar secara rapat, seragam, dan merata tanpa terjadi penumpukan tumpang-tindih kawat.

Meskipun sistem mekanisasi ini dirancang dalam koridor kendali *Open Loop* tanpa melibatkan sensor umpan balik (*feedback*) seperti enkoder posisi maupun *limit switch*, rancang bangun alat ini terbukti sangat andal menekan deviasi operasional. Munculnya variasi milimeter yang sangat tipis pada pengukuran jangka sorong murni merupakan karakteristik wajar dari toleransi kelenturan kawat (*wire elasticity*) dan fluktuasi ketegangan kawat (*wire tension*) saat proses penarikan manual dari gulungan material utama. Dengan demikian, berdasarkan keselarasan data antara pengujian karakteristik elektrik dan distribusi fisik, alat *Wire Coiller* nikelin otomatis ini dinyatakan telah memenuhi kriteria desain ketelitian dan keandalan sistem otomasi, serta sangat layak direkomendasikan untuk memproduksi elemen pemanas resistor variabel berskala industri kecil secara massal dan konsisten.