pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v22i4.xxxxx

RANCANG BANGUN MESIN *COIL WINDING* OTOMATIS BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO NANO DAN MOTOR STEPPER NEMA17 UNTUK *COIL* SKALA KECIL

Uwaeis Bima Pangestu[1)], Fakhruddin Mangkusasmito[2)]

[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmail.com*

ABSTRACT

The coil-winding process is still largely performed manually, particularly in small-scale industries, assembly workshops, and educational laboratories, resulting in several drawbacks such as reliance on operator skill, relatively long production times, and inconsistent winding quality. This study aims to design and build an automatic coil-winding machine based on an Arduino Nano with a NEMA 17 stepper motor drive. The developed system uses two stepper motors—one to rotate the spool and the other to guide the wire—with the number of windings and wire diameter controlled via input buttons connected to an LCD as the user interface, as well as a limit switch to restrict the movement of the wire-guiding mechanism. Testing was conducted using 0.15 mm diameter enameled wire of Brand A, 0.15 mm of Brand B, and 0.30 mm wire. System performance was evaluated by measuring coil resistance, analyzing the winding distribution at four measurement points (P1, P2, P3, and P4), and performing statistical analysis using mean, standard deviation, and coefficient of variation. The test results showed that all measurement points had relatively small standard deviations, indicating that the resulting winding distribution was uniform, while the accuracy calculations showed values above 98% for all wire variations tested. Based on these results, the developed automatic coil winder is capable of performing the winding process automatically.

Keywords: Arduino Nano, coil winder, NEMA 17 stepper motor, coil distribution, precision.

PENDAHULUAN

Proses pembuatan kumparan (*Coil*) merupakan salah satu tahap penting dalam berbagai aplikasi perangkat elektronik dan elektromagnetik, seperti motor listrik, transformator kecil, solenoid, sensor induktif, hingga perangkat telekomunikasi. Kualitas hasil *Coil* sangat dipengaruhi oleh ketepatan jumlah lilitan, kerapian susunan kawat, serta konsistensi proses penggulungan. Ketidakteraturan dalam proses *winding* dapat menyebabkan penurunan performa elektromagnetik dan ketidakstabilan karakteristik listrik dari *Coil* yang dihasilkan.

Pada industri skala kecil, bengkel perakitan, maupun laboratorium pendidikan, proses penggulungan *Coil* masih banyak dilakukan secara manual. Metode manual tersebut memiliki beberapa kelemahan, antara lain waktu produksi yang relatif lama, ketergantungan pada keterampilan operator, serta variasi kualitas hasil lilitan yang sulit dikendalikan secara konsisten. Kondisi ini mendorong perlunya penerapan sistem otomasi yang mampu meningkatkan presisi dan efisiensi proses pembuatan *Coil*.

Perkembangan teknologi sistem tertanam (*embedded system*) dan mikrokontroler membuka peluang besar dalam mengotomatisasi proses mekanik yang sebelumnya dilakukan secara manual. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan otomasi berbasis mikrokontroler mampu meningkatkan akurasi gerak, kestabilan proses, serta konsistensi hasil produksi pada berbagai aplikasi manufaktur [1]. Otomasi juga memungkinkan pengaturan parameter kerja secara terprogram dan berulang (*repeatable*), sehingga mengurangi kesalahan akibat faktor manusia.

Salah satu contoh keberhasilan penerapan otomasi berbasis mikrokontroler dapat ditemukan pada sistem *conveyor* otomatis yang banyak digunakan dalam industri manufaktur. Pada sistem *conveyor*, proses penggerakan material dikendalikan secara terprogram melalui pengaturan kecepatan motor, waktu operasi, serta urutan kerja sistem, sehingga alur produksi dapat berjalan secara konsisten dan efisien. Penerapan otomasi pada sistem conveyor terbukti mampu meningkatkan produktivitas, mengurangi kesalahan akibat intervensi manusia, serta menjamin keseragaman proses pemindahan material dalam jangka waktu yang panjang. Keberhasilan penerapan otomasi *conveyor* tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali berbasis mikrokontroler sangat efektif untuk menangani proses mekanik yang bersifat berulang dan terstruktur, sehingga konsep otomasi serupa berpotensi untuk diterapkan pada proses

pembuatan *Coil* yang juga membutuhkan ketelitian dan konsistensi kerja [2].

Dalam penelitian ini, sistem kendali utama dirancang menggunakan Arduino Nano sebagai pengendali pusat. Arduino Nano dipilih karena memiliki arsitektur yang sederhana, mudah diprogram, didukung oleh lingkungan pengembangan yang luas, serta memiliki komunitas pengguna yang besar. Keunggulan tersebut menjadikan Arduino Nano sangat sesuai untuk pengembangan sistem otomasi berskala kecil hingga menengah, terutama pada aplikasi pendidikan dan prototipe mesin otomatis [3].

Dari sisi aktuator, sistem penggerak mesin *Coil winding* menggunakan motor stepper NEMA 17. Motor stepper dipilih karena memiliki kemampuan pengendalian posisi yang presisi, sudut langkah yang tetap, serta mudah dikendalikan melalui sinyal digital dari mikrokontroler. Penggunaan motor stepper NEMA 17 memungkinkan pengaturan jumlah lilitan *Coil* secara akurat tanpa memerlukan sistem umpan balik yang kompleks, sehingga sangat cocok untuk aplikasi penggulungan kawat yang membutuhkan ketelitian tinggi [4]. Penggunaan motor stepper juga memberikan keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, yang umumnya memerlukan rangkaian tambahan untuk pengaturan kecepatan dan posisi secara presisi.

Dalam konteks mesin *Coil winder* otomatis, analisis perhitungan digunakan untuk menilai akurasi sistem dalam menghasilkan jumlah lilitan, kestabilan proses penggulungan, serta kesesuaian pergerakan motor terhadap nilai yang direncanakan. Parameter statistik dan metrik kesalahan digunakan sebagai alat bantu untuk mengevaluasi seberapa besar penyimpangan yang terjadi selama proses kerja sistem.

a. Nilai Rata-Rata (Mean)
   Secara matematis, nilai rata-rata dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1).
   $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$ *Persamaan 2- 1*
   dengan:
   $\bar{x}$ = nilai rata-rata data pengukuran
   $\sum x$ = jumlah data
   n = jumlah data pengukuran
   Pada penelitian ini, perhitungan nilai rata-rata digunakan untuk menentukan nilai rata-rata resistansi *Coil* hasil *winding* serta rata-rata diameter *Coil* pada titik pengukuran P1, P2, P3, dan P4. Nilai rata-rata tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis konsistensi distribusi lilitan dan perhitungan statistik lanjutan seperti standar deviasi dan *coefficient of variation* (CV).

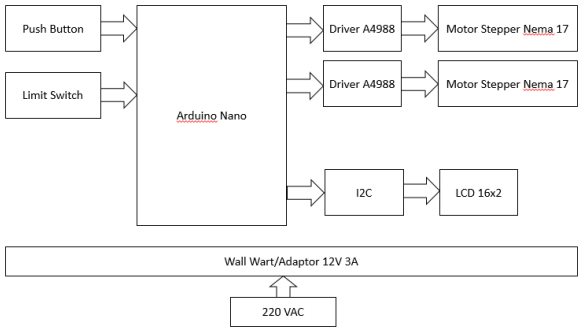
b. Standar Deviasi (Standard Deviation)
   Secara matematis, standar deviasi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:
   $SD = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$ Persamaan 2- 2
   dengan:
   SD = standar deviasi,
   n = jumlah data pengamatan,
   $\bar{x}$ = nilai rata-rata dari seluruh data..
   Pada mesin Coil winder otomatis, standar deviasi dapat digunakan untuk menganalisis variasi jumlah lilitan yang dihasilkan pada setiap pengujian. Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan jumlah lilitan yang konsisten, sedangkan nilai yang tinggi mengindikasikan adanya fluktuasi kinerja yang perlu dianalisis lebih lanjut.

c. Coefficient of Variation (CV)
   Secara matematis, koefisien variasi dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-3).
   $CV = \frac{SD}{\bar{x}} x\ 100\%$ Persamaan 2- 3
   dengan:
   CV = *Coefficient of Variation* (%)
   SD = standar deviasi
   $\bar{x}$ = nilai rata-rata data
   Nilai koefisien variasi yang rendah menunjukkan bahwa data memiliki tingkat keseragaman yang tinggi, sedangkan nilai koefisien variasi yang tinggi menunjukkan adanya variasi yang lebih besar di dalam kelompok data yang diamati. Oleh karena itu, koefisien variasi sering digunakan sebagai indikator untuk menilai tingkat presisi atau konsistensi hasil pengukuran dalam suatu penelitian.
   Selain digunakan untuk membandingkan tingkat variasi antar kelompok data, koefisien variasi juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam evaluasi performa suatu sistem pengukuran maupun proses yang menghasilkan data berulang. Dengan demikian, parameter ini menjadi salah satu metode statistik yang efektif untuk menganalisis kualitas dan kestabilan data hasil pengamatan.

METODE PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian, tahapan yang dilakukan meliputi perancangan, pembuatan, dan pengujian mesin *coil winder* otomatis berbasis Arduino Nano. Proses perancangan mencakup pengembangan sistem mekanik, sistem kendali, serta pemrograman motor stepper NEMA 17 sebagai penggerak spool dan pengarah kawat. Pengujian dilakukan dengan membuat coil menggunakan

beberapa variasi diameter kawat, kemudian dilakukan pengukuran resistansi dan distribusi lilitan untuk mengevaluasi konsistensi serta ketelitian sistem. Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 1 Diagram Blok Sistem

Cara kerja alat dari simulasi ini adalah :

1. Pengguna memasukkan jumlah lilitan yang diinginkan melalui tombol input yang terhubung ke Arduino Nano.
2. Pengguna memasukkan diameter kawat email yang digunakan sebagai parameter pergerakan sistem pengarah kawat.
3. Setelah parameter dimasukkan, sistem melakukan proses *homing* dengan menggerakkan mekanisme pengarah kawat menuju limit switch kiri sebagai titik referensi awal.
4. Arduino Nano mengirimkan sinyal STEP dan DIR ke driver A4988 untuk mengendalikan motor stepper pemutar spool dan motor stepper pengarah kawat.
5. Motor stepper pemutar spool memutar spool coil sehingga proses penggulungan kawat dapat berlangsung sesuai jumlah lilitan yang telah ditentukan.
6. Motor stepper pengarah kawat bergerak secara linear melalui mekanisme lead screw untuk mendistribusikan kawat secara merata sepanjang area penggulungan.
7. Besar perpindahan mekanisme pengarah kawat ditentukan berdasarkan diameter kawat yang dimasukkan pengguna sehingga setiap lilitan tersusun berdekatan dan teratur.
8. Ketika mekanisme pengarah kawat mencapai limit switch kanan atau kiri, Arduino Nano secara otomatis membalik arah putaran motor pengarah sehingga proses distribusi kawat dapat berlangsung secara bolak-balik.
9. Sistem terus menghitung jumlah lilitan yang telah dilakukan hingga mencapai nilai target yang dimasukkan pengguna.
10. Setelah jumlah lilitan tercapai, motor stepper berhenti secara otomatis dan proses winding dinyatakan selesai.

HASIL PENGUKURAN ALAT DAN ANALISIS

1. Pengujian Resistansi *Coil*

Pengukuran resistansi dilakukan menggunakan multimeter digital setelah proses *winding* selesai dilakukan. Hasil pengukuran resistansi *Coil* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Hasil Pengujian Resistansi Coil

No	Ukuran Kawat/Merk	Resistansi (Ω)
1	0,15 mm/A	64,5
2	0,15 mm/A	65,1
3	0,15 mm/A	64,9
4	0,15 mm/A	64,7
5	0,15 mm/A	65,1
6	0,15 mm/A	63,4
7	0,15 mm/A	63,8
8	0,15 mm/A	64,3
9	0,15 mm/B	66,6
10	0,15 mm/B	66,2
11	0,15 mm/B	66,9
12	0,15 mm/B	67,7
13	0,15 mm/B	66,4
14	0,15 mm/B	66,4
15	0,15 mm/B	66,6
16	0,30 mm	5,0
17	0,30 mm	5,0
18	0,30 mm	5,0
19	0,30 mm	5,0
20	0,30 mm	5,0

Berdasarkan data hasil pengujian terlihat bahwa nilai resistansi Coil yang menggunakan kawat tembaga merk A berada pada rentang 63,4 Ω hingga 65,1 Ω, dan nilai resistansi Coil yang menggunakan kawat tembaga merk B berada pada rentang 66,2 Ω hingga 67,7 Ω. Perbedaan rentang nilai resistansi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik material kawat yang digunakan dapat mempengaruhi nilai resistansi akhir Coil yang dihasilkan. Sedangkan pada pengujian kawat email 0,30 mm resistansi dari lilitan bernilai sama yaitu 5 Ω yang menunjukkan bahwa hasil dari lilitan sangat konsisten.

Analisis resistansi dilakukan menggunakan parameter rata-rata, standar deviasi, dan persentase error untuk mengetahui tingkat konsistensi hasil winding pada masing-masing jenis kawat.

Tabel 2 Hasil Perhitungan Koefisien Variasi

Ukuran/Merk	Rata-rata (Ω)	Standar Deviasi (Ω)	CV (%)
0,15 mm/A	64,475	0,616	0,96
0,15 mm/B	66,686	0,498	0,75
0,30 mm	5	0	0

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh koefisien variasi sebesar 0,96% untuk kawat tembaga merk A dan 0,75% untuk kawat tembaga merk B. Nilai CV pada kedua kelompok berada di bawah 1%, yang menunjukkan bahwa variasi data resistansi antar sampel sangat kecil.

2. Pengujian Distribusi Coil

Data distribusi lilitan Coil diperoleh dengan mengukur diameter luar Coil pada setiap titik pengukuran menggunakan jangka sorong. Hasil pengukuran distribusi lilitan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Data Distribusi Lilitan Coil

No	Ukuran/Merk	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)
1	0,15 mm/A	21,40	21,40	20,75	20,75
2	0,15 mm/A	21,00	21,15	20,75	20,70
3	0,15 mm/A	21,50	21,50	20,75	20,75
4	0,15 mm/A	21,50	21,30	21,00	20,75
5	0,15 mm/A	22,00	21,45	21,00	20,60
6	0,15 mm/A	21,35	21,15	20,80	20,75
7	0,15 mm/A	21,60	21,40	21,85	21,80
8	0,15 mm/A	21,30	21,10	20,75	20,75
9	0,15 mm/B	22,00	21,80	21,20	20,80
10	0,15 mm/B	22,20	21,75	20,90	20,80
11	0,15 mm/B	22,00	21,50	21,00	20,70
12	0,15 mm/B	22,10	21,25	21,00	20,85
13	0,15 mm/B	22,00	21,65	21,00	21,00
14	0,15 mm/B	22,00	21,65	21,00	20,40
15	0,15 mm/B	22,00	21,90	20,90	20,75
16	0,30 mm	21.9	21.9	21.3	21
17	0,30 mm	21.4	21.4	20.95	21.9
18	0,30 mm	21.8	21.2	21.2	20.85
19	0,30 mm	21.55	21.55	20.9	20.85
20	0,30 mm	21.8	21.8	20.85	20.2

Berdasarkan hasil pengukuran terlihat bahwa diameter Coil pada titik P1 cenderung memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan titik pengukuran lainnya. Sementara itu titik P4 cenderung memiliki diameter yang lebih kecil. Kondisi ini menunjukkan adanya kecenderungan distribusi lilitan yang lebih banyak berada pada sisi kanan spool dibandingkan sisi kiri spool.

Analisis distribusi lilitan dilakukan untuk mengetahui tingkat pemerataan hasil winding pada masing-masing kelompok kawat tembaga. Analisis dilakukan menggunakan rata-rata diameter pada setiap titik pengukuran dan selisih distribusi diameter pada setiap Coil.

Tabel 4 Tabel Perhitungan SD Keseluruhan

Titik	Mean 0,15mm/A (mm)	SD 0,15mm/A (mm)	Mean 0,15mm/B (mm)
P1	21,46	0,285	22,04
P2	21,31	0,155	21,64
P3	20,96	0,377	21,00
P4	20,86	0,385	20,76

	SD 0,15mm/B (mm)	Mean 0,30mm (mm)	SD 0,30mm (mm)
P1	0,079	21,69	0,21
P2	0,219	21,57	0,29
P3	0,100	21,04	0,20
P4	0,189	20,76	0,32

Berdasarkan hasil perhitungan standar deviasi, seluruh titik pengukuran pada pengujian kawat email 0,30 mm memiliki nilai standar deviasi kurang dari 0,35 mm. Nilai standar deviasi terkecil terdapat pada titik P3 sebesar 0,20 mm, sedangkan nilai terbesar terdapat pada titik P4 sebesar 0,32 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi diameter Coil antar pengujian relatif kecil sehingga alat Coil winder mampu menghasilkan distribusi lilitan yang konsisten pada setiap proses winding. Meskipun terdapat sedikit variasi pada titik P4, secara keseluruhan distribusi lilitan masih berada pada rentang yang seragam.

3. Analisis Ketelitian Alat

Ketelitian distribusi Coil digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem pengarah kawat dalam menghasilkan distribusi lilitan yang konsisten pada setiap proses winding. Analisis ketelitian dilakukan menggunakan metode Coefficient of Variation (CV), yaitu perbandingan antara standar deviasi terhadap nilai rata-rata hasil pengukuran. Semakin kecil nilai CV yang diperoleh, maka semakin tinggi tingkat ketelitian distribusi Coil yang dihasilkan.

Tabel 5 Rekapitulasi Ketelitian Distribusi Coil Kawat Tembaga Email 0,15 mm Merk A

Titik Pengukuran	Mean (mm)	SD (mm)	CV (%)	Ketelitian (%)
P1	21,46	0,285	1,33	98,67

P2	21,31	0,155	0,73	99,27
P3	20,96	0,377	1,80	98,20
P4	20,86	0,385	1,85	98,15

Ketelitian rata-rata sistem dihitung menggunakan Persamaan 2-1 dan diperoleh:

$$\bar{x}Ketelitian = 98{,}57\%$$

Secara keseluruhan diperoleh nilai ketelitian rata-rata sebesar 98,57%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem pengarah kawat pada alat Coil winder otomatis mampu menghasilkan distribusi lilitan yang konsisten dan memiliki tingkat ketelitian yang tinggi pada pengujian menggunakan kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk A.

Tabel 6 Rekapitulasi Ketelitian Distribusi Coil Kawat Tembaga Email 0,15 mm Merk B

Titik Pengukuran	Mean (mm)	SD (mm)	CV (%)	Ketelitian (%)
P1	22,04	0,079	0,36	99,64
P2	21,64	0,219	1,01	98,99
P3	21,00	0,100	0,48	99,52
P4	20,76	0,189	0,91	99,09

Ketelitian rata-rata sistem dihitung menggunakan Persamaan 2-1 dan diperoleh:

$$\bar{x}Ketelitian = 99{,}31\%$$

Secara keseluruhan diperoleh nilai ketelitian rata-rata sebesar 99,31%. Jika dibandingkan dengan kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk A yang memiliki ketelitian rata-rata sebesar 98,57%, maka kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk B menunjukkan tingkat ketelitian distribusi yang lebih tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa alat Coil winder otomatis mampu menghasilkan distribusi lilitan yang sangat konsisten pada pengujian menggunakan kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk B.

Tabel 7 Rekapitulasi Ketelitian Distribusi Coil Kawat Tembaga Email 0,30 mm

Titik Pengukuran	Mean (mm)	SD (mm)	CV (%)	Ketelitian (%)
P1	21,69	0,21	0,97	99,03
P2	21,57	0,29	1,34	98,66
P3	21,04	0,20	0,95	99,05
P4	20,76	0,32	1,54	98,46

Ketelitian rata-rata sistem dihitung menggunakan Persamaan 2-1 dan diperoleh:

$$\bar{x}Ketelitian = 98{,}80\%$$

Secara keseluruhan diperoleh nilai ketelitian rata-rata sebesar 98,80%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa alat Coil winder otomatis mampu menghasilkan distribusi lilitan yang konsisten dan memiliki tingkat ketelitian yang tinggi pada pengujian menggunakan kawat tembaga email diameter 0,30 mm.

Jika dibandingkan dengan pengujian kawat tembaga email diameter 0,15 mm, nilai ketelitian yang diperoleh masih berada pada rentang yang sama, yaitu di atas 98%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem pengarah kawat mampu mempertahankan konsistensi distribusi lilitan meskipun digunakan pada diameter kawat yang berbeda.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian alat *Coil winder* otomatis yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Alat *Coil winder* otomatis berbasis Arduino Uno berhasil dirancang dan direalisasikan untuk melakukan proses penggulungan kawat tembaga email secara otomatis dengan pengaturan jumlah lilitan melalui antarmuka LCD dan tombol *input*. Sistem mampu mengendalikan motor pemutar spool dan motor pengarah kawat secara terkoordinasi selama proses *winding* berlangsung.
2. Hasil pengujian resistansi menunjukkan bahwa alat mampu menghasilkan *Coil* dengan tingkat konsistensi yang baik. Pada pengujian menggunakan kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk A diperoleh rata-rata resistansi sebesar 64,48 Ω dengan standar deviasi sebesar 0,67 Ω, sedangkan pada kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk B diperoleh rata-rata resistansi sebesar 66,69 Ω dengan standar deviasi sebesar 0,47 Ω. Pengujian menggunakan kawat tembaga email diameter 0,30 mm menghasilkan nilai resistansi sebesar 5,0 Ω pada seluruh sampel dengan standar deviasi sebesar 0 Ω.
3. Hasil pengujian distribusi *Coil* menunjukkan bahwa sistem pengarah kawat mampu menghasilkan distribusi lilitan yang relatif seragam pada seluruh titik pengukuran. Nilai standar deviasi distribusi *Coil* pada seluruh kelompok pengujian berada di bawah 0,5 mm, yang menunjukkan bahwa variasi diameter *Coil* antar pengujian relatif kecil dan proses *winding* berlangsung secara konsisten.
4. Berdasarkan analisis ketelitian distribusi *Coil* menggunakan metode Coefficient of Variation (CV), diperoleh nilai ketelitian rata-rata sebesar 98,57% pada kawat tembaga email

diameter 0,15 mm merk A, 99,31% pada kawat tembaga email diameter 0,15 mm merk B, dan 98,80% pada kawat tembaga email diameter 0,30 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa alat memiliki tingkat ketelitian distribusi lilitan yang tinggi dengan nilai ketelitian di atas 98% pada seluruh kelompok pengujian.

5. Secara keseluruhan, alat *Coil winder* otomatis yang dirancang telah mampu menghasilkan proses *winding* yang berulang, konsisten, dan memiliki tingkat ketelitian yang baik pada berbagai jenis dan diameter kawat tembaga email yang digunakan.

SARAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, terdapat beberapa pengembangan yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya untuk meningkatkan performa alat *Coil winder* otomatis, yaitu:

1. Menambahkan sistem pengatur tegangan kawat (*wire tensioner*) agar tegangan kawat selama proses *winding* tetap konstan. Penggunaan sistem tensioner dapat membantu meningkatkan kerapatan dan keseragaman distribusi lilitan serta mengurangi kemungkinan terjadinya penumpukan lilitan pada titik tertentu.
2. Menggunakan driver motor stepper dengan pengaturan mikrostep (*microstepping*) yang lebih tinggi sehingga pergerakan motor pengarah kawat menjadi lebih halus dan akurat. Hal ini dapat meningkatkan kualitas distribusi lilitan terutama pada penggunaan kawat dengan diameter kecil.
3. Menambahkan sistem kalibrasi otomatis antara motor pemutar spool dan motor pengarah kawat sehingga sinkronisasi kedua motor dapat dipertahankan secara optimal pada berbagai diameter kawat dan jumlah lilitan.
4. Menambahkan sensor penghitung lilitan independen, seperti sensor optik atau sensor encoder, sehingga jumlah lilitan aktual dapat diverifikasi secara langsung dan tingkat akurasi *winding* dapat dievaluasi dengan lebih baik.
5. Mengembangkan algoritma pengendalian yang mampu menyesuaikan kecepatan motor secara dinamis berdasarkan diameter kawat dan posisi distribusi lilitan. Dengan demikian, proses *winding* dapat berlangsung lebih stabil dan menghasilkan distribusi *Coil* yang lebih merata.
6. Melakukan pengujian pada variasi diameter kawat, jumlah lilitan, dan ukuran spool yang lebih beragam untuk mengetahui batas kemampuan alat serta meningkatkan fleksibilitas penggunaannya pada berbagai kebutuhan aplikasi.
7. Mengembangkan sistem antarmuka pengguna yang lebih lengkap, misalnya dengan penyimpanan parameter *winding*, pemilihan jenis kawat, dan pemantauan proses *winding* secara real-time untuk meningkatkan kemudahan penggunaan alat.

Dengan adanya pengembangan tersebut, diharapkan alat Coil winder *otomatis dapat menghasilkan kualitas* winding *yang lebih baik, memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi, serta mampu digunakan pada berbagai kebutuhan produksi maupun penelitian di bidang elektronika dan elektromagnetik*

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Agmal, J. A. Prakosa and C. Astuti, "Measurement Uncertainty Analysis of the Embedded System of Microcontroler for An Accurate Timer/Stopwatch," 2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Malang, Indonesia, 2021, pp. 290-294, doi: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616813. keywords: {Embedded systems;Microcontrollers;Measurement uncertainty;Cesium;Time measurement;Delays;Calibration;microcontroller;embedded system;timer;stop watch;accuracy;measurement uncertainty},

[2] N. Kiktev, N. Chichikalo, H. Rozorinov and K. Larina, "Infocommunication System of Automated Control of Conveyor Lines," 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 71-76, doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772214. keywords: {Schedules;Databases;Decision making;Loading;Pipelines;Control systems;Software;conveyor line;coal;optimization;method;database;information system;decision making},

[3] Audrey O'Shea, "Introduction to the Arduino Nano," in A Geek Girl's Guide to Electronics and the Internet of Things , Wiley, 2021, pp.53-81, doi: 10.1002/9781119683674.ch4. keywords: {Voltage;Universal Serial Bus;Microcontrollers;Transformers;Pins;Hardware;Fuses},

[4] A. Z. Putri, H. Susanti, M. H. Barri, A. I. Haq and F. F. Fillah, "Implementation of Nema-17 Stepper Motor and SG-90 Servo

Motor as Mechanical Drivers on Spinal Needle Positioning Test Equipment," 2023 IEEE International Biomedical Instrumentation and Technology Conference (IBITeC), Yogyakarta, Indonesia, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/IBITeC59006.2023.10390937.

[5] J. Luo, P. Cao, B. Yu, M. Zhang and W. Xu, "The *Coil* Auto-lifting System of Intelligent *Winding* Machine," 2021 4th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE), Wuhan, China, 2021, pp. 246-250, doi: 10.1109/RCAE53607.2021.9638781.

[6] Van Tu Duong et al., "Active real-time tension control for *Coil winding* machine of BLDC motors," 2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), Delhi, India, 2014, pp. 765-770, doi: 10.1109/ICACCI.2014.6968514.

[7] W. O. Lujan, "The role of test methods and specifications in *Coil winding*," Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and *Coil Winding* Conference, Rosemont, IL, USA, 1997, pp. 627-640, doi: 10.1109/EEIC.1997.651269.

[8] Y. Cheng and Y. Shu, "A New Analytical Calculation of the Mutual Inductance of the Coaxial Spiral Rectangular *Coil*s," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 4, pp. 1-6, April 2014, Art no. 7026806, doi: 10.1109/TMAG.2013.2290972.

[9] I. Galkin and O. Tetervenoks, "The study of microcontroller based embedded system for smart lighting applications," 2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC), Milan, Italy, 2014, pp. 105-108, doi: 10.1109/EDERC.2014.6924368.

[10] J. F. Patarroyo, G. Beauchamp and A. Santiago, "Design and implementation of a microcontroller based workstation with educational purposes for the control systems area," 2015 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), El Paso, TX, USA, 2015, pp. 1-8, doi: 10.1109/FIE.2015.7344260.

[11] V. Vladinovskis, "Selection of microcontroller *board* and stepper motor driver for FDM 3D printing to reduce power consumption," 2023 IEEE 64th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/RTUCON60080.2023.10413037.

[12] N. P. Gireesh and Deepa, "Designing HMI using RX series RX63N microcontroller," 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017, pp. 1049-1053, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256759.

[13] R. Kalpana, G. Bhuvaneswari, B. Singh and P. S. Prakash, "Design and implementation of high frequency isolated AC-DC converter for switched mode power supplies," 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC), Guwahati, India, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/NPSC.2014.7103804.

[14] K. Milanov, D. Gospodinova and M. Mintchev, "Study of an AC/DC Convertor Powered by DC Voltage," 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10020203.

[15] R. Radzuan, M. A. A. Raop, M. K. M. Salleh, M. K. Hamzah and R. A. Zawawi, "The designs of low power AC-DC converter for power electronics system applications," 2012 International Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE), Kota Kinabalu, Malaysia, 2012, pp. 113-117, doi: 10.1109/ISCAIE.2012.6482080.

[16] J. Qi, J. Du, S. M. Siniscalchi, X. Ma and C. -H. Lee, "On Mean Absolute Error for Deep Neural Network Based Vector-to-Vector Regression," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 27, pp. 1485-1489, 2020, doi: 10.1109/LSP.2020.3016837.

[17] A. S. Abdel-Khalik and S. Ahmed, "Performance Evaluation of a Five-Phase Modular *Winding* Induction Machine," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2654-2669, June 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2163914.

[18] A. Tekade, M. Andhare, M. Savalgi, V. Kumbhar, A. Borgave and S. Raut, "High Precision Stepper Motor and DC Motor Controller Implementation on FPGA," 2025 9th International Conference on

Computing, Communication, Control and Automation (ICCCBEA), Pune, India, 2025, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICCUBEA65967.2025.11284110.
keywords: {Motor drives;Automation;VHDL;Velocity control;Computer architecture;Parallel processing;DC motors;Time factors;Field programmable gate arrays;Robots;FPGA;stepper motor control;DC motor control;high precision;microstepping;pulse-width modulation (PWM);VHDL;Verilog;robotics;automation;parallel processing}