

Pengembangan Miniatur Mesin Bubut Otomatis Berbasis CNC Untuk Pembuatan Motif Spiral Pada Kayu

Ruminto Subekti^{(1,a)*}, Duddy Arisandi^(2,b) dan Dzaky Akmal Hakim^(3,c), Abdul Tahir⁽⁴⁾
^(1,2) Teknologi Rekayasa Sistem Aerial Nirawak, Politeknik Manufaktur Bandung, Banding, 40135, Indonesia,
^(3,4) Perbaikan dan Perawatan Mesin. Politeknik Sorowako

⁽²⁾ Teknologi Rekayasa Mekatronika, Politeknik Manufaktur Bandung, Banding, 40135, Indonesia

Email : ^(a*)ruminto_s@polman-bandung.ac.id, ^(b)duddy_a@polman-bandung.ac.id,
^(c)dzaky4866@gmail.com, ⁽⁴⁾abdultahir0101@gmail.com

ABSTRAK

Industri kayu olahan di Indonesia mengalami perkembangan pesat, namun masih menghadapi tantangan dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi. Salah satu teknik produksi bernilai tambah adalah pembuatan motif spiral pada kayu, yang memerlukan keterampilan tinggi dan memakan waktu lama. Penelitian ini bertujuan mengembangkan mesin bubut konvensional Sherline Model 4410 menjadi mesin otomatis berbasis CNC. Metode yang digunakan adalah VDI 2206, yang mencakup perancangan mekanik, elektrik, dan informatika. Dengan penambahan motor stepper, mikrokontroler Arduino Uno, dan motor pemotong DC, kinerja mesin serta fleksibilitas produksi diharapkan meningkat. Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan retrofitting mesin, di mana pengujian akurasi gerak sumbu X dan Z memiliki rata-rata eror sebesar 0,385% dan 0,609%. Pengujian repeatability juga menunjukkan presisi yang baik. Mesin ini mampu menghasilkan motif spiral, namun kualitas hasilnya sangat dipengaruhi oleh kondisi material kayu dan konsistensi proses pemotongan. Inovasi ini diharapkan dapat meningkatkan produktivitas dan kualitas produk kayu olahan sekaligus sebagai sarana edukasi teknologi manufaktur berbasis CNC.

Kata kunci: Retrofit mesin, Sherline Model 4410, Motif spiral, VDI 2206, Arduino Uno.

ABSTRACT

The processed wood industry in Indonesia is experiencing rapid growth, but still faces challenges in improving production efficiency and quality. One value-added production technique is the creation of spiral patterns on wood, which requires high skill and is time-consuming. This study aims to develop the conventional Sherline Model 4410 lathe into an automated CNC-based machine. The method used is VDI 2206, which covers mechanical, electrical, and computer design. By adding a stepper motor, an Arduino Uno microcontroller, and a DC cutting motor, the machine's performance and production flexibility are expected to improve. The research results demonstrate the success of the machine retrofitting, with accuracy tests of the X and Z axes yielding average errors of 0.385% and 0.609%, respectively. Repeatability testing also demonstrated good precision. The machine is capable of producing spiral patterns, but the quality of the results is significantly influenced by the condition of the wood material and the consistency of the cutting process. This innovation is expected to enhance productivity and the quality of processed wood products while also serving as an educational tool for CNC-based manufacturing technology.

Keywords: Machine retrofit, Sherline Model 4410, Spiral pattern, VDI 2206, Arduino Uno.

Submit:
07.08.2025

Revised:
11.09.2025

Accepted:
22.10.2025

Available online:
31.10.2025

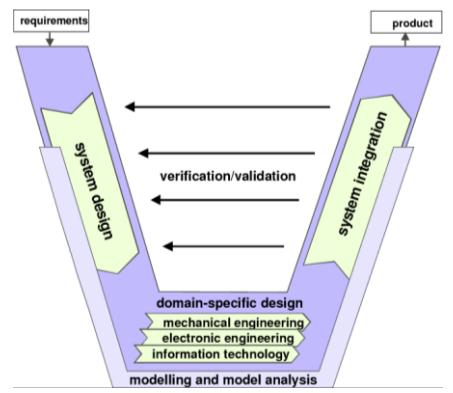
PENDAHULUAN

Indonesia memiliki kawasan hutan seluas 120,4 juta hektar (63% daratan) yang berkontribusi besar terhadap perekonomian melalui bahan baku industri, lapangan kerja, dan devisa ekspor, dengan nilai USD 75,3 miliar pada periode 2018 – 2023[1]. Permintaan pasar global terhadap produk kayu olahan dengan nilai estetika tinggi, seperti motif spiral, mengalami peningkatan. Namun, proses produksi motif tersebut umumnya masih dilakukan secara manual, membutuhkan waktu lama, keterampilan tinggi, dan kurang efisien untuk produksi massal. Inovasi yang berkelanjutan menjadi kunci untuk menjaga daya saing dan memenuhi perubahan pasar[2].

Era industri 4.0 menghadirkan otomasi dan digitalisasi manufaktur yang mampu meningkatkan efisiensi, konsistensi, dan presisi[3]. Mesin bubut CNC merupakan salah satu teknologi yang umum digunakan dalam industri kayu karena kemampuannya dalam menghasilkan produk dengan akurasi tinggi dan waktu proses yang lebih singkat[4][5][6], tetapi banyak pengrajin kecil belum mampu mengakses teknologi ini karena keterbatasan biaya dan pengetahuan teknis. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan mesin otomatis pembentuk motif spiral berbasis retrofit mesin Sherline Model 4410 dengan integrasi motor stepper pada sumbu X dan Z, Arduino Uno, GRBL, serta motor DC RS715-106 sebagai motor penggerak pemotong. Mesin ini diharapkan mampu menghasilkan produk kayu bermotif spiral secara lebih efisien, optimal, dan konsisten[7].

METODE PENELITIAN

Metode untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini menggunakan metode VDI 2206. Model VDI 2206 digunakan dalam kerangka rancangan berbasis mekatronika, yang melibatkan integrasi antara domain mekanik, elektrik, dan informatika secara sistematis[8]. Gambar 1 menyajikan representasi metodologi penelitian yang digunakan dalam pengembangan sistem.



Gambar 1. V-Shaped model VDI 2206[9]

Metodologi ini terdiri dari beberapa tahapan: *requirement list*, *system design*, *domain-specific design*, *system integration*, serta *verification* dan *validation*[10]. Tahapan yang akan dilakukan meliputi:

1. *Requirement List*

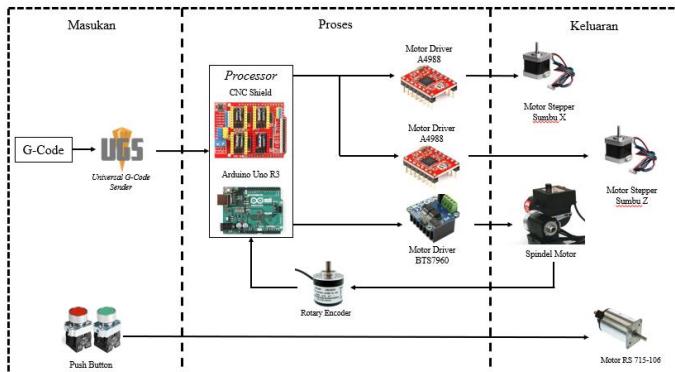
Pada tahap ini, dilakukan analisis kebutuhan sistem untuk mengidentifikasi faktor penyebab utama dari permasalahan yang dihadapi, meliputi ukuran miniatur mesin, spesifikasi motor, resolusi gerak, sistem kontrol, antarmuka pengguna, hingga aspek ergonomis dan keselamatan kerja. Salah satu tuntutan utama adalah kemampuan sistem untuk memproduksi motif spiral dengan presisi dan dapat digunakan oleh pengguna awam seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Persyaratan Sistem

Aspek	Uraian Analisis
Analisis Kebutuhan	Kesulitan membuat motif spiral secara manual karena butuh keterampilan tinggi dan waktu lama.
Analisis Karakteristik Pengguna	Mesin CNC industri mahal dan kompleks dioperasikan.
Analisis Sistem	Memerlukan alat yang bisa menjelaskan konsep CNC secara nyata dari desain ke fisik. Membutuhkan alat yang mudah digunakan, aman, dan efisien. Sistem mekanik; rangka miniatur mesin bubut dengan dudukan benda kerja berbentuk silinder dan mekanisme pemutar benda kerja. Sistem elektrik; driver motor untuk menggerakkan sumbu X dan sumbu Z secara terkoordinasi menggunakan mikrokontroler. Sistem informatik; Program kendali berbasis G-code untuk pengaturan lintasan pahat spiral, GUI atau HMI untuk mengirim G-code dan memantau status mesin.

2. System Design

Sistem digambarkan secara umum meliputi kontroler, sensor, aktuator, dan antarmuka. Dalam rancang bangun sistem, arsitektur sistem menunjukkan alur komunikasi antar antarmuka, motor, *driver*, dan kontroler.



Gambar 2. Gambaran Umum Sistem (Arsitektur Sistem)

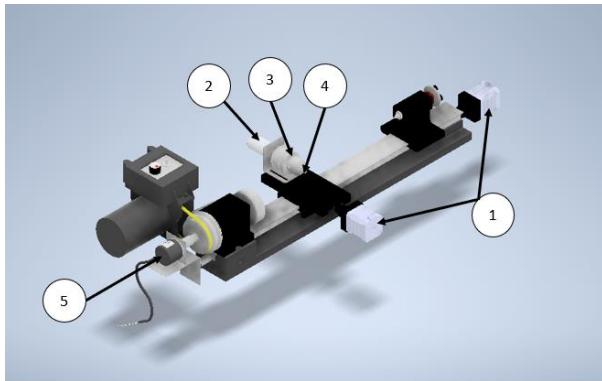
Berdasarkan gambar 2, proses diawali dengan pembuatan desain benda kerja menggunakan perangkat lunak CAD, kemudian dikonversi menjadi G-code melalui perangkat lunak CAM. G-code tersebut dikirimkan ke perangkat lunak UGS di komputer, yang berfungsi untuk mengirim perintah ke sistem kendali berbasis Arduino Uno R3 dan CNC Shield. Arduino menerima perintah G-code dari UGS dan meneruskannya dalam bentuk sinyal kontrol ke masing-masing driver motor. Dua buah driver A4988 digunakan untuk mengatur pergerakan motor stepper sumbu X dan Z, sedangkan driver BTS7960 mengatur motor spindel utama. Selain itu, rotary encoder digunakan sebagai pembacaan putaran spindel yang nantinya akan digunakan sebagai feedback dari sistem. Push button digunakan sebagai input tambahan untuk pengendalian motor RS 715-106 berfungsi sebagai pemutar alat potong spiral. Semua komponen bekerja secara terintegrasi untuk menjalankan proses pemotongan otomatis sesuai jalur spiral yang telah ditentukan.

3. Domain Specific Design

Terdapat tiga domain yang dirancang dalam sistem ini, diantaranya domain mekanik, domain elektrik, dan domain informatik.

3.1 Perancangan Mekanik

Perancangan sistem mekanik melibatkan pemilihan dan penataan komponen yang mendukung proses pembentukan pola spiral. Mesin utama untuk penggeraan kayu adalah Sherline Lathe Model 4410, yang telah diubah menjadi sistem bubut otomatis berbasis CNC.



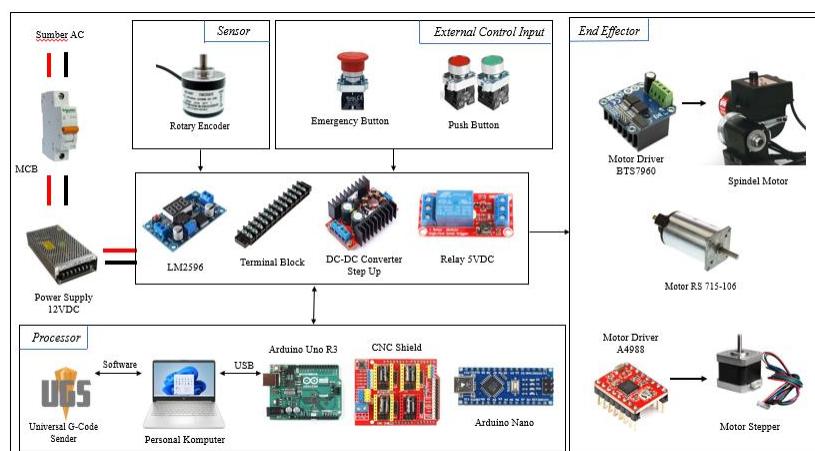
Gambar 3. Perancangan Mekanik

Desain sistem mekanik yang ditampilkan pada gambar 3 merupakan hasil perancangan yang bertujuan untuk mendukung kinerja mesin bubut otomatis dalam pembuatan motif meliputi:

1. Pergerakan sumbu X dan Z dikendalikan oleh motor stepper yang berperan sebagai aktuator.
2. Sebagai motor penggerak alat potong utama, digunakan motor RS 715-106 yang memiliki kecepatan tinggi dan torsi cukup.
3. Untuk menjepit dan memutar mata profil, digunakan drill chuck yang terpasang pada poros utama.
4. Mata router CNC round bottom cove bit shank dengan diameter 8mm digunakan sebagai mata profil yang memotong alur spiral kayu.
5. Sistem dilengkapi dengan rotary encoder pada motor spindel yang berfungsi untuk membaca putaran per menit (RPM).

3.2 Perancangan Elektrik

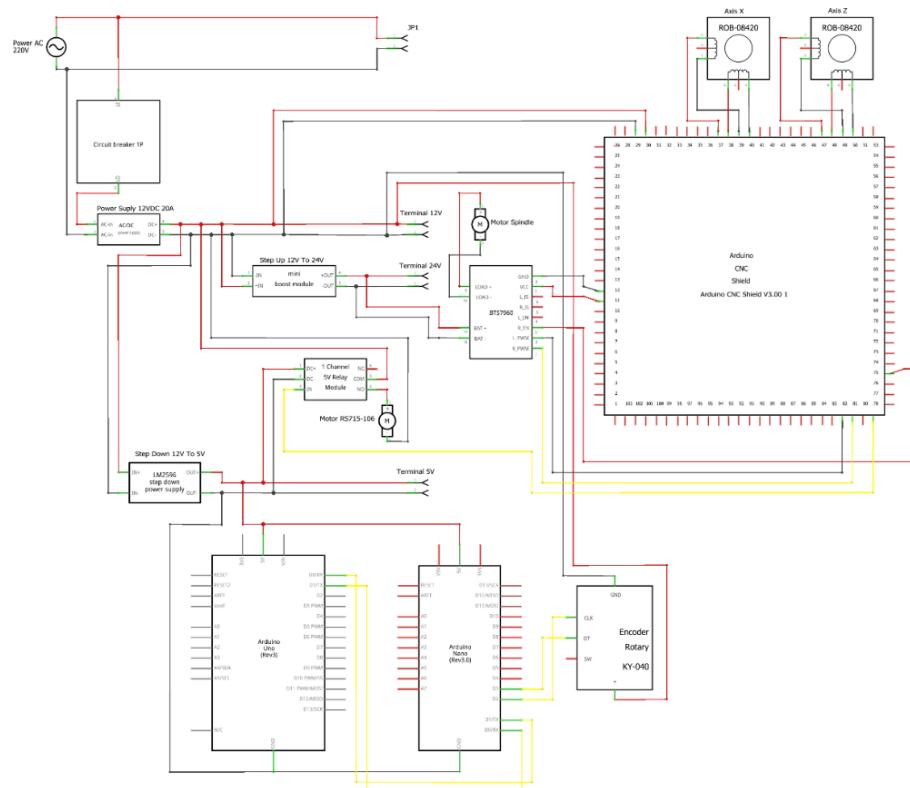
Sistem elektrik membutuhkan kontrol aliran daya, kontrol logika, dan koneksi antar komponen seperti pada gambar 4. Pada sistem ini menggunakan sumber listrik AC, MCB, dan power supply 12VDC. Selain itu, ada terminal blok dan relay yang digunakan untuk mengontrol perangkat dengan tegangan dan arus lebih tinggi serta mendistribusikan daya dari power supply ke berbagai komponen. Beberapa komponen terdiri dari sistem input eksternal adalah push button yang digunakan untuk mengontrol motor RS 715-106; emergency button yang digunakan untuk menghentikan sistem jika terjadi masalah.



Gambar 4. Perancangan Elektrik

Sensor rotary encoder berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran motor. Pada bagian prosesor, menggunakan komputer pribadi untuk menjalankan perangkat lunak UGS

Perangkat lunak ini dapat mengolah file G-Code dari desain CAD/CAM dan mengirimkan sinyal kontrol ke Arduino melalui CNC Shield. Arduino Uno R3, mikrokontroler utama sistem, menerima sinyal G-Code dari PC dan mengubahnya menjadi sinyal listrik untuk menggerakkan motor stepper. Sinyal yang dihasilkan oleh CNC Shield digunakan sebagai driver untuk mengontrol motor stepper berdasarkan sinyal spindel motor terletak di bagian output, yang berfungsi untuk menggerakkan benda kerja dan mengontrol kecepatan putar dan torsi yang dihasilkan. Motor RS 715-106 digunakan untuk motor pemotong. Driver A4988 mengatur aliran arus ke motor stepper, yang memungkinkannya bergerak dengan tepat sesuai sinyal yang diterima dari Arduino dan berfungsi menggerakkan sumbu X dan Z. Motor driver BTS7960 digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor spindel. Berikut rangkaian elektrik yang diilustrasikan pada gambar 5.



Gambar 5. Wiring Diagram Elektrik

Desain *wiring* sistem elektrik dijelaskan melalui ilustrasi pada Gambar 6 dan daftar koneksi pada tabel 2. Skema ini mencakup koneksi input-output antar komponen utama sistem. Dengan menjelaskan koneksi antar komponen yang digunakan pada sistem input dan output seperti tabel 2 dibawah ini. Untuk aliran sumber menggunakan beberapa besar, seperti 5VDC untuk komponen Arduino Uno dan Nano, sumber 12VDC digunakan untuk komponen CNC Shield, Driver A4988, LM2596 (*Step Down*), DC-DC Boost Converter *Step Up*, Encoder, sinyal relay, dan motor RS 715-106, sumber 24VDC digunakan untuk komponen motor driver BTS7960 dan motor spindel.

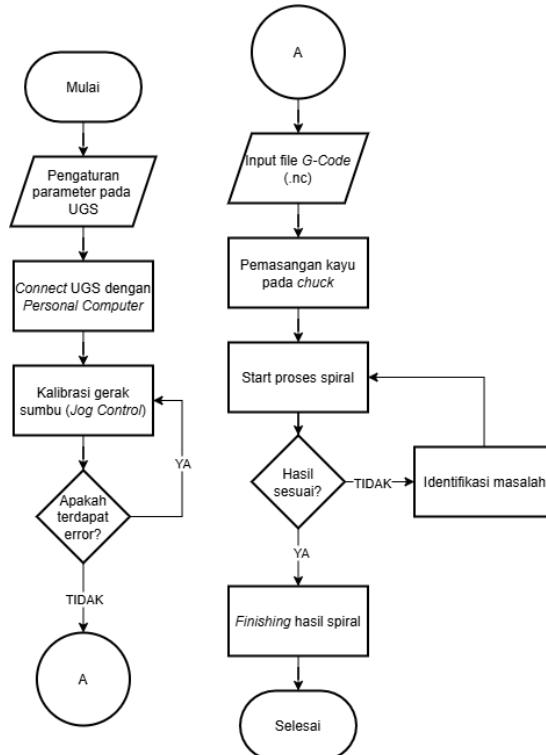
Tabel 2. Koneksi elektrik antar komponen

Device	Koneksi Pin	Koneksi Device
Arduino Uno R3	RX, TX	Arduino Nano dan CNC Shield
Arduino Nano	RX, TX, D2, D3, D4, D5	Arduino Uno, Rotary Encoder, Push Button
CNC Shield V3	D2, D4, D5, D7, D11	Driver A4988 dan Motor Driver BTS7960

Device	Koneksi Pin	Koneksi Device
Driver A4988	1A, 1B, 2A,2B	Motor NEMA 17
LM2596 (Step Down)	7VDC (Source), GND	Arduino Uno dan Nano
DC-DC Boost Converter Step Up	24VDC (Source), GND	Motor Driver BTS7960
Motor Driver BTS7960	IN+, IN-, OUT+, OUT-, CNC Shield pin 5v, GND, D11	Motor Spindel
Rotary Encoder	CLK, DATA	Arduino Nano
Push Button	NO	Motor RS 715-106

3.3 Perancangan Informatik

Perancangan sistem informatik dijelaskan dengan diagram alir rancangan sistem proses pada gambar 6.



Gambar 6. Rancangan Sistem Proses

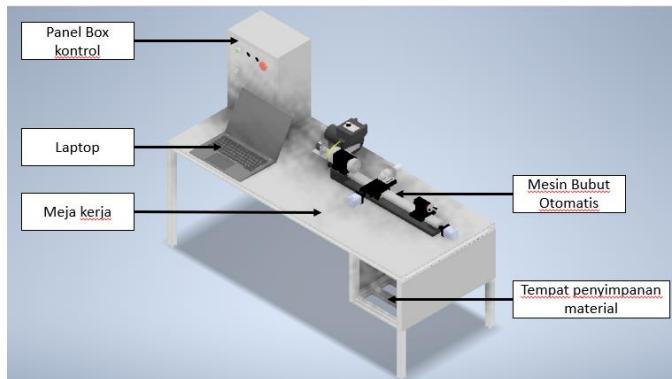
Proses sistem dimulai dengan pengaturan awal melalui perangkat lunak Universal G-Code Sender (UGS). Tahapan ini meliputi pemilihan firmware GRBL, penyesuaian port komunikasi dengan port Arduino, serta pengaturan baudrate sebesar 115200. Setelah parameter dikonfigurasi, perangkat lunak dihubungkan dengan sistem melalui koneksi serial USB, memungkinkan UGS untuk mengirimkan instruksi secara langsung ke CNC Shield dan Arduino Uno R3. Fitur Jog Control digunakan untuk kalibrasi awal, seperti pengaturan titik nol (home), verifikasi fungsi endstop, serta pengujian respon motor stepper. Apabila terjadi kesalahan, sistem akan menghentikan proses untuk dilakukan pengecekan terhadap koneksi kabel, fungsi limit switch, atau kegagalan gerak sumbu.

Setelah sistem terkalibrasi dan tidak ditemukan kesalahan, file G-Code (.nc) yang telah dibuat sebelumnya pada perangkat lunak Fusion 360 diunggah ke UGS. Selanjutnya, benda kerja berupa kayu dipasang pada chuck spindel secara sentris dan kokoh untuk memastikan kestabilan saat pemotongan. Mesin kemudian mulai bekerja secara otomatis mengikuti jalur toolpath spiral sesuai desain yang telah ditentukan. Proses pemotongan dipantau untuk

memastikan kesesuaian hasil dengan desain. Jika terjadi deviasi, proses dihentikan untuk evaluasi ulang. Jika hasil sesuai, tahapan dilanjutkan ke proses finishing berupa pembersihan sisa serbuk dan penghalusan permukaan agar kualitas visual motif spiral tetap optimal.

4. System Integration

Integrasi sistem dilakukan dengan menggabungkan seluruh domain, yaitu mengintegrasikan domain mekanik, domain elektrik, domain informatik, dan domain sistem kendali. Sistem yang telah diintegrasikan akan diuji dari sistem keseluruhan. Berikut merupakan rancangan integrasi sistem.



Gambar 7. Integrasi Sistem

Setelah desain tiap domain selesai, pada gambar 7, dilakukan perakitan seluruh komponen mekanik sesuai dengan gambar desain. Sistem kelistrikan dirangkai dan dihubungkan di dalam panel box kontrol sesuai dengan wiring diagram yang telah dirancang. Mikrokontroler Arduino Uno di-flash dengan firmware GRBL. Seluruh parameter sistem seperti steps/mm, kecepatan maksimum, dan akselerasi dikonfigurasi melalui antarmuka UGS untuk memastikan kesesuaian antara perintah digital dan respons fisik mesin. Disusun sebuah buku panduan penggunaan alat yang akan digunakan pada tahap implementasi.

5. Verification /Validation

Alat yang telah diintegrasikan, kemudian diverifikasi dan divalidasi secara fungsi alatnya, hal ini bertujuan untuk memastikan alat telah mencapai tujuan yang telah direncanakan. Berikut ini merupakan tabel verification/validation.

Tabel 3. Verification/Validation alat

Perangkat	Tuntutan	Ketercapaian
Arduino Uno R3 (Mikrokontroler)	Mampu mengontrol pergerakan motor stepper untuk rotasi benda kerja dan translasi pahat secara otomatis menggunakan G-Code/GRBL.	Tercapai
CNC Shield V3	Mampu menjadi penghubung antara Arduino dan driver motor stepper, serta menyederhanakan wiring kontrol motor.	Tercapai
Driver A4988	Mampu mengatur kecepatan dan arah motor stepper secara presisi untuk menghasilkan motif spiral.	Tercapai
Motor Stepper NEMA 17	Mampu menghasilkan gerak rotasi dan translasi secara akurat sesuai perintah kontrol.	Tercapai
Universal G-Code Sender	Mampu mengirimkan perintah G-Code ke sistem untuk menjalankan operasi pemotongan otomatis.	Tercapai

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengujian Akurasi Gerak Motor dan Sumbu Kerja

Pengujian dilakukan dengan menginstruksikan pergerakan sejumlah jarak tertentu di mana perintah G-code seperti G01 X10, G01 X15, hingga G01 X55 digunakan untuk menggerakkan motor stepper sejauh nilai tertentu dalam satuan milimeter. Kolom “Gerak Teoritis” merepresentasikan jarak yang seharusnya ditempuh sesuai perintah, sedangkan “Gerak Aktual” adalah hasil pengukuran langsung perpindahan menggunakan alat ukur laser distance meter, kemudian mengukur deviasi aktualnya. Akurasi gerak motor yang diuji yaitu pada sumbu kerja X dan Z seperti yang dituliskan dalam tabel 4 dan tabel 5 dibawah.

Tabel 4. Akurasi Gerak Sumbu X

G-Code	Gerak Teoritis (mm)	Gerak Aktual (mm)					Rata - Rata (mm)	Selisih (mm)	Error (%)	Akurasi (%)
		1	2	3	4	5				
G01 X20	20	21	19	22	20	21	20,50	0,500	2,500	97,5
G01 X40	40	42	41	42	40	42	41,17	1,167	2,917	97,083
G01 X60	60	63	60	61	60	62	61,00	1,000	1,667	98,333
G01 X80	80	80	83	82	80	84	81,50	1,500	1,875	98,125
G01 X100	100	100	99	99	99	101	99,67	0,333	0,333	99,667
G01 X120	120	121	121	119	119	120	120,17	0,167	0,139	99,861
G01 X140	140	139	141	139	139	141	139,83	0,167	0,119	99,881
G01 X160	160	160	159	161	161	160	160,17	0,167	0,104	99,896
G01 X180	180	181	180	179	180	181	180,17	0,167	0,093	99,907
G01 X200	200	199	200	200	201	201	200,17	0,167	0,083	99,917
G01 X220	220	219	219	220	221	220	219,83	0,167	0,076	99,924
G01 X240	240	240	241	240	241	240	240,33	0,333	0,139	99,861
G01 X260	260	260	261	260	259	259	259,83	0,167	0,064	99,936
G01 X280	280	280	280	281	280	279	280,00	0,000	0,000	100
G01 X300	300	301	299	300	301	300	300,17	0,167	0,056	99,944
G01 X320	320	321	321	320	320	321	320,50	0,500	0,156	99,844
G01 X340	340	341	341	340	340	341	340,50	0,500	0,147	99,853
G01 X360	360	360	361	360	361	361	360,50	0,500	0,139	99,861
G01 X380	380	379	379	381	380	381	380,00	0,000	0,000	100
G01 X400	400	400	400	400	400	401	400,17	0,167	0,042	99,9583
Rata - Rata							0,392	0,532	0,468	99,468

Tabel 5. Akurasi Gerak Sumbu Z

G-Code	Gerak Teoritis (mm)	Gerak Aktual (mm)					Rata - Rata (mm)	Selisih (mm)	Error (%)	Akurasi (%)
		1	2	3	4	5				
G01 Z5	5	4	4	6	6	4	4,83	0,167	3,333	96,667
G01 Z12	12	11	12	12	12	13	12,00	0,000	0,000	100
G01 Z19	19	20	19	20	19	20	19,50	0,500	2,632	97,368
G01 Z26	26	27	25	25	25	27	25,83	0,167	0,641	99,359
G01 Z33	33	33	34	34	32	33	33,17	0,167	0,505	99,495
G01 Z40	40	39	41	39	39	41	39,83	0,167	0,417	99,583
G01 Z47	47	46	46	48	48	48	47,17	0,167	0,355	99,645
G01 Z54	54	54	55	55	54	53	54,17	0,167	0,309	99,691
G01 Z61	61	62	60	60	60	60	60,50	0,500	0,820	99,180

G-Code	Gerak Teoritis (mm)	Gerak Aktual (mm)					Rata - Rata (mm)	Selisih (mm)	Error (%)	Akurasi (%)
		1	2	3	4	5				
G01 Z68	68	67	67	67	67	67	67,17	0,833	1,225	98,775
G01 Z75	75	75	74	76	76	75	75,17	0,167	0,222	99,778
G01 Z82	82	82	82	83	81	83	82,17	0,167	0,203	99,797
G01 Z89	89	89	90	90	89	89	89,33	0,333	0,375	99,625
G01 Z96	96	95	97	95	96	96	95,83	0,167	0,174	99,826
G01 Z103	103	104	103	102	104	102	103,00	0,000	0,000	100
G01 Z110	110	109	110	109	110	111	109,83	0,167	0,152	99,848
G01 Z117	117	116	116	116	117	116	116,33	0,667	0,570	99,430
G01 Z124	124	125	125	123	123	124	124,00	0,000	0,000	100
G01 Z131	131	131	131	131	130	131	130,83	0,167	0,127	99,873
G01 Z138	138	139	137	137	139	139	138,17	0,167	0,121	99,879
Rata - Rata							0,242	0,609	99,391	

Pengujian akurasi gerak dilakukan dengan memerintahkan sistem untuk bergerak ke posisi tertentu menggunakan G-Code, lalu mengukur posisi aktual menggunakan alat ukur digital. Pada sumbu X, selisih rata-rata $\pm 0,392$ mm dan error 0,523% menunjukkan bahwa gerakan sumbu berada dalam toleransi sistem dan cukup stabil. Sumbu Z juga menunjukkan hasil yang baik, dengan rata-rata selisih $\pm 0,242$ mm dan error 0,609%. Hal ini menandakan bahwa sistem mekanik, stepper motor, dan konfigurasi GRBL mampu bekerja dengan presisi yang layak untuk pembuatan motif spiral presisi pada kayu.

2. Pengujian *Repeatability* Gerak

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur tingkat konsistensi posisi sumbu kerja (X atau Z) dalam mencapai titik yang sama berulang kali, misalnya kembali ke posisi awal setelah digerakkan ke posisi lain. Pengujian ini dilakukan untuk menguji kemampuan sistem dalam mengulangi posisi yang sama secara konsisten. Pengujian dilakukan dengan menggerakkan sumbu ke titik awal dan kembali ke posisi nol sebanyak 10 kali, lalu mengukur deviasi posisi setiap pengulangan. Dari pengujian tersebut didapatkan data pada tabel 6 berikut.

Tabel 6. Pengujian Repeatability Gerak

Pergerakan	Sumbu X		Sumbu Z	
	Posisi Ideal (mm)	Posisi Aktual (mm)	Posisi Ideal (mm)	Posisi Aktual (mm)
1	70	69	40	40
2	70	70	40	40
3	70	70	40	39
4	70	70	40	39
5	70	69	40	40
6	70	70	40	41
7	70	70	40	40
8	70	71	40	40
9	70	71	40	40
10	70	70	40	40

Dari hasil yang tercantum pada tabel 6, dapat diamati bahwa posisi aktual yang dicapai pada setiap pengulangan sangat mendekati nilai ideal pada sumbu 70 mm dan nilai ideal pada sumbu 40 mm. Sebagian besar selisih terjadi pada percobaan, antara 0 mm hingga 1 mm. Dari data tersebut kemudian dilakukan analisa statistik dengan metode analisa statistik deskriptif dan menghasilkan data dengan perhitungan sebagai berikut.

Tabel 7. Analisa Statistik Repeatability Gerak

Sumbu Kerja	Mean	Standart Deviation	Coefficient Of Variation (%)
Sumbu X	70	0.6667	0,0095
Sumbu Z	39,9	0.5677	0,0142

Koefisien variasi (Coefficient of Variation/CV) merupakan indikator statistik yang digunakan untuk melihat sejauh mana data tersebar atau bervariasi terhadap nilai rata-ratanya. Dalam konteks ini, CV memberikan gambaran seberapa stabil atau konsisten kinerja sistem berdasarkan hasil pengulangan pengukuran. Semakin kecil nilai CV, artinya variasi antar data semakin rendah, sehingga menunjukkan bahwa sistem bekerja secara stabil dan presisi. Sebaliknya, jika nilai CV tinggi, maka data yang dihasilkan menunjukkan fluktuasi besar dan sistem dianggap kurang stabil.

Pada pengujian yang dilakukan dan ditampilkan dalam tabel 7, diperoleh nilai CV untuk masing-masing sumbu berada di bawah angka 1%. Nilai ini mengindikasikan bahwa data hasil pengukuran dari beberapa kali pengulangan berada pada tingkat konsistensi yang tinggi. Dengan kata lain, sistem mampu mengulangi gerakan sesuai perintah secara presisi dan minim deviasi.

3. Pengujian Linearitas Output PWM

Pengujian ini bertujuan untuk mengamati hubungan antara sinyal PWM yang dihasilkan oleh sistem kontrol melalui perintah G-code, terhadap kecepatan putar motor spindel DC yang diukur menggunakan alat ukur tachometer. Dalam sistem ini, nilai S pada perintah G-code (misalnya S500, S1000) dikonversi oleh firmware GRBL menjadi sinyal PWM dengan rentang nilai dari 0 hingga 255. Nilai PWM ini kemudian dikirim ke driver, yang mengatur tegangan rata-rata ke motor, sehingga memengaruhi kecepatannya. Berdasarkan prinsip dasar motor DC dengan karakteristik linier, besar kecilnya tegangan input seharusnya berbanding lurus dengan kecepatan putar (RPM) motor. Tabel 8 hasil pengujian yang dilakukan dengan 11 data sinyal yang diuji.

Tabel 8. Pengujian Pembacaan Sinyal PWM pada Sumber 24VDC

Dari hasil pengujian yang dilakukan sebanyak 5 kali, terlihat bahwa setiap kenaikan nilai G-code menghasilkan peningkatan nilai PWM, duty cycle, tegangan, dan RPM aktual motor. Hal ini

membuktikan bahwa sistem bekerja secara konsisten dalam mengubah perintah digital menjadi perubahan kecepatan motor. Misalnya, saat diberikan perintah S500, sistem menghasilkan duty cycle sebesar 50% dengan tegangan rata-rata sekitar 12,12 V dan kecepatan motor mencapai 349,9 RPM. Sementara itu, pada perintah maksimum S1000, sinyal PWM mencapai duty cycle penuh (100%) dan tegangan 23,9 V, menghasilkan kecepatan motor sebesar 745,4 RPM. Nilai-nilai ini mendekati nilai teoritis yang dihitung berdasarkan karakteristik linier motor, di mana 24 V seharusnya menghasilkan sekitar 700 RPM.

Meskipun demikian, terdapat selisih antara nilai aktual dan teoritis, yang dapat dihitung dalam bentuk error absolut maupun error relatif (persentase). Dari pengujian, error terbesar terjadi pada perintah S100, yaitu 1,32%, sementara error terkecil tercatat pada perintah S500, yaitu hanya 0,0002%. Error yang terjadi pada duty cycle rendah seperti S100 kemungkinan besar disebabkan oleh karakteristik motor yang belum stabil pada tegangan rendah, serta adanya inersia awal yang membuat motor belum mampu mencapai putaran ideal dalam waktu pengambilan data yang terbatas. Sebaliknya, pada duty cycle menengah seperti 50–75%, sistem menunjukkan performa paling stabil dan presisi, yang dibuktikan dengan nilai RPM aktual yang sangat mendekati nilai teoritis.

4. Pengujian Pembuatan Motif Spiral

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa mesin bubut otomatis yang telah dirancang mampu menghasilkan motif spiral pada benda kerja kayu secara tepat sesuai desain yang telah dibuat sebelumnya. Pengujian dilakukan pada jenis kayu pinus, diameter benda kerja 30mm, panjang benda kerja 300mm, dan diameter mata pahat 8mm.

Untuk mengetahui kemampuan mesin untuk memotong kayu, maka dicari tahu besarnya gaya potong pada mesin (F_{mesin}) serta keteguhan geser kayu berdasarkan kelas kuat kayu.

- a. Momen puntir motor RS 715-106 menggunakan perhitungan dibawah:

Maka, dengan daya motor 240 W dan kecepatan maksimal 6500 RPM dihasilkan:

$$Mp = 9550 \times \frac{P}{n}$$

$$= 9550 \times \frac{240}{6500}$$

$$= 352,62 \text{ Nmm}$$

- b. Gaya Mesin (F_{mesin}) menggunakan perhitungan dibawah:

Dengan diameter mata pahat $d=8$ mm dihasilkan:

$$F_{mesin} = \frac{1}{2} \times \frac{Mp}{d}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{352,62}{8}$$

= 22,04 N

- c. Kemampuan potong mesin menggunakan perhitungan dibawah:

Diketahui jenis kayu yang dipakai pada proses permesinan yaitu kayu pinus yang berada pada kayu kelas kuat III -IV dengan nilai kuat $20,912 \text{ N/mm}^2$ dihasilkan:

$$c = \frac{F_{mesin}}{A}$$

$$20,912 \text{ N/mm}^2 = \frac{22,04}{x}$$

$$x = \frac{22,04}{20,912}$$

$$x = 1,054 \text{ } mm^2$$

Lebar mata potong (l) = 8 mm, sehingga kedalaman pemotongan yang mampu dipotong mesin untuk kelas kayu ini adalah sebagai berikut.

$$\frac{x}{l} = \frac{1,054 \text{ } mm^2}{8 \text{ } mm}$$

$$= 0,132 \text{ mm}$$

Untuk mengetahui parameter RPM dan *feed rate* yang digunakan dalam proses permesinan yang akan dibuat, dengan $pitch = 30\text{mm}$, Panjang kayu = 300mm , maka dicari menggunakan:

$$pitch = \frac{feed\ rate\ sumbu\ X}{RPM\ spindel} \quad \dots \quad (7)$$

a. RPM minimal dari motor spindel = 70 RPM

$$\begin{aligned} \text{feed rate} &= \text{pitch} \times \text{RPM} \\ &= 30 \times 70 \\ &= 2100 \text{ mm/min} \end{aligned}$$

b. Feed rate maksimal dari motor stepper = 300 mm/min maka

$$\begin{aligned}
 RPM &= \frac{\text{feed rate}}{\text{pitch}} \\
 &= \frac{300}{30} \\
 &= 10 \text{ RPM}
 \end{aligned}$$

Tabel 9 merupakan hasil pemotongan yang telah dilakukan sesuai parameter diatas.

Tabel 9. Hasil Pemotongan Motif Spiral

Hasil	Gambar
<p><i>Pitch</i> benda kerja yang terukur adalah 30 mm, tetapi dalam pemrosesannya masih ada error dalam pemotongan yang dikarenakan perbedaan permukaan dari kayu silinder</p>	

Hasil	Gambar
<p><i>Pitch</i> benda kerja yang terukur adalah 30,6 mm, tetapi dalam pemrosesannya masih ada error dalam pemotongan yang dikarenakan adanya alur pemotongan yang berhenti, lalu proses pemotongan diulangi dan juga kayu terlalu lembab menjadikan adanya sisa pemotongan pada kayu</p>	
<p><i>Pitch</i> benda kerja yang terukur adalah 30 mm kedalaman potong yang dilakukan yaitu 0,5mm.</p>	

Pitch spiral yang dihasilkan memiliki deviasi kecil, berkisar $\pm 0,6$ mm dari nilai target. Waktu pemrosesan rata – rata berada pada waktu 2 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan untuk pembuatan motif spiral pada kayu silinder, dengan akurasi yang layak untuk produk estetis maupun fungsional.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan dalam pengembangan miniatur mesin bubut otomatis berbasis CNC untuk pembuatan motif spiral pada kayu. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan integrasi domain mekanik, elektrik, dan informatika dengan pendekatan metodologi VDI 2206. Hasil pengujian menunjukkan bahwa telah berhasil dilakukan retrofitting mesin bubut konvensional menjadi mesin otomatis berbasis CNC untuk pembuatan motif spiral pada kayu berbentuk silinder. Sinkronisasi dua sumbu kerja dilakukan dengan mengatur kecepatan motor stepper menggunakan sistem GRBL yang dikontrol melalui G-code. Nilai kecepatan gerak sumbu X dan Z diatur agar menghasilkan pitch spiral, dengan memanfaatkan perhitungan kemampuan potong mesin, parameter RPM dan feed rate. Pengujian dilakukan pada benda kerja sepanjang 300 mm dengan mata profil berdiameter 8 mm dalam tiga pengujian. Pada pengujian pertama, pitch spiral terukur sebesar 30 mm, namun hasil pemotongan mengalami ketidakteraturan akibat ketidaksamaan permukaan kayu. Pengujian kedua menghasilkan pitch sebesar 30,6 mm, tetapi terdapat kesalahan pemotongan akibat proses yang terhenti dan diulang, serta kondisi kayu yang terlalu lembab memengaruhi kualitas hasil. Pada pengujian ketiga, pitch terukur 30 mm dengan kedalaman potong 0,5 mm menghasilkan bentuk spiral. Hasil ini menunjukkan bahwa keberhasilan proses pemotongan sangat dipengaruhi oleh kualitas permukaan dan kondisi material benda kerja, serta konsistensi jalannya proses pemotongan.

Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih merupakan bagian tidak wajib disertakan dalam artikel. Bagian ini dapat disertakan dalam artikel jika hendak mengucapkan terima kasih yang ditujukan kepada institusi resmi atau perorangan sebagai pemberi hibah dana atau telah memberi kontribusi lain dalam penelitian.

REFERENSI

- [1] D. J. Mutaqin, F. Oktia, and N. Hygiawati, "Performa Industri Hutan Kayu dan Strategi," *J. Bappenas*, vol. 5, no. 1, pp. 48–62, 2022.
- [2] E. S. Putra and I. N. Slamet, "Strategi Dan Inovasi Pengembangan Industri Kreatif Kerajinan Kayu Hitam Kota Palu Di Era Industri 4.0," *J. Pariwisata PaRAMA Panorama, Recreat. Accomodation, Merch. Accessibility*, vol. 3, no. 2, pp. 66–75, 2022, doi: 10.36417/jpp.v3i2.534.
- [3] P. Marcon *et al.*, "Communication technology for industry 4.0," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 1694–1697, 2017, doi: 10.1109/PIERS.2017.8262021.
- [4] W. Widiyanto and A. Prasojo, "JURNAL INDUSTRI FURNITUR & PENGOLAHAN KAYU Vol 2 No 1 Juni 2024 IMPLEMENTASI TEKNOLOGI CNC BUBUT DALAM PRODUKSI KURSI KLASIK," vol. 2, no. 1, 2024.
- [5] A. Salam, M. Iswar, M. Rifaldi, S. Malik, and K. Putra, "Rancang Bangun Mesin CNC Router Mini Untuk Pembelajaran Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 17, no. 2, pp. 150–155, 2020, doi: 10.31963/sinergi.v17i2.2077.
- [6] E. Kurniawan, Syaifurrahman, and B. Jekky, "Rancang Bangun Mesin CNC Lathe Mini 2 Axis," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–90, 2020, [Online]. Available: https://ejournal.up45.ac.id/index.php/Jurnal_ENGINE/article/view/769
- [7] T. T. Tung, N. X. Quynh, and T. V. Minh, "Development and Implementation of a Mini CNC Milling Machine," *Acta Marisiensis. Ser. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 24–28, 2021, doi: 10.2478/amset-2021-0014.
- [8] S. Aminah, A. S. Sunarya, and N. Hadiatiningsih, "Perancangan Sistem Peminjaman Alat Praktikum Pada Laboratorium dengan Metode VDI 2206," *Semin. Nas. Inform. dan Apl.*, no. September, p. 2019, 2019.
- [9] J. Gausemeier and S. Moehringer, "New Guideline VDI 2206 – A Flexible Procedure Model for Specific Requirements to the Design of Mechatronic Systems," *Int. Conf. Eng. Des. Iced 03 Stock.*, p. 10, 2003.
- [10] D. H. Wigenaputra, A. Ramdan, and F. Akbar, "Meningkatkan Kapasitas Produksi Susu Kemasan Kaleng Melalui Perancangan Mesin Palletizing," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 31–37, 2023, doi: 10.33019/jm.v9i2.4615.