

PENGEMBANGAN PERANCANGAN ALAT TERAPI SENDI LUTUT *CONTINUOUS PASSIVE MOTION* UNTUK PASIEN PASCA OPERASI, PENYAKIT TULANG DAN FAKTOR USIA

Muhammad Yanuar Rifa¹, Munadi², Toni Prahasto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: muhammadyanuar142@gmail.com

Abstrak

Tubuh manusia terdiri dari berbagai macam organ termasuk kerangka tubuh, sistem kerangka tubuh terdapat berbagai jenis sendi yang menyebabkan tubuh manusia dapat bergerak bebas. Namun terdapat beberapa kondisi yang menyebabkan sendi mengalami kekakuan diantaranya disebabkan oleh kecelakaan, operasi, penyakit dan faktor usia. Sendi lutut merupakan sendi dianggap rawan mengalami kekakuan yang menyebabkan pengurangan *range of motion* (ROM), yang kemudian membutuhkan sebuah proses terapi untuk pemulihan fungsi. Pada penelitian ini dikembangkan perancangan alat terapi sendi lutut dengan *continuous passive motion*. Perancangan mesin *continuous passive motion* pada penelitian ini dikembangkan dengan tiga mode gerakan yaitu manual, otomatis dan progresif. Pada perancangan ini sensor sudut yang digunakan sensor *rotary encoder*. Pengujian sensor *rotary encoder* dilakukan menggunakan dua persamaan perhitungan, nilai error rata-rata yang dihasilkan pada mode manual 9,8%, mode otomatis 6,8 dan mode progresif 9,9% menggunakan persamaan orde 1, sedangkan hasil pengujian menggunakan persamaan orde 2 dihasilkan nilai *error* rata-rata mode manual 0,4%, mode otomatis 0,6% dan mode progresif 0,8%. Berdasarkan hasil pengujian tersebut disimpulkan penggunaan persamaan orde 2 mendapatkan hasil pengukuran yang lebih akurat dibandingkan menggunakan persamaan orde 1. Sehingga persamaan lebih akurat diaplikasikan pada sensor *rotary encoder* yang digunakan pada penelitian ini.

Kata kunci: *continuous passive motion*; *rotary encoder*; sendi lutut; terapi

Abstract

The human body consists of various organs including the body skeleton, the body skeleton system has various types of joints that cause the human body to move freely. However, there are several conditions that cause joints to experience stiffness, including those caused by accidents, surgery, disease and age. The knee joint is a joint considered prone to stiffness which causes a reduction in range of motion (ROM), which then requires a therapeutic process to restore function. In this study, the design of a knee joint therapy tool with *continuous passive motion* was developed. The design of the *continuous passive motion* machine in this study was developed with three modes of movement, namely manual, automatic and progressive. In this design, the angle sensor used is a *rotary encoder* sensor. Testing of *rotary encoder* sensors is done using two calculation equations, the average error value produced in manual mode is 9.8%, automatic mode is 6.8 and progressive mode is 9.9% using the first order equation, while the test results using the second order equation produced an average error value of 0.4% manual mode, 0.6% automatic mode and 0.8% progressive mode. Based on the test results, it is concluded that the use of the second-order equation gets more accurate measurement results than using the first-order equation. So that the equation is more accurately applied to the *rotary encoder* sensor used in this study.

Keywords: *continuous passive motion*; *knee joint*; *rotary encoder*; *therapy*

1. Pendahuluan

Tubuh manusia terdiri dari berbagai sistem organ termasuk kerangka tubuh, sistem otot, sistem pernapasan, sistem peredaran darah dan lain-lain. Sistem Kerangka adalah kumpulan tulang yang menyusun tubuh manusia dihubungkan oleh sendi [1]. Ada berbagai jenis sendi dalam tubuh manusia yang menyebabkan anggota tubuh manusia bergerak bebas. Namun, ada beberapa kondisi yang menyebabkan kekakuan sendi. Beberapa di antaranya adalah karena kecelakaan, operasi, penyakit dan usia tua [2].

Sendi lutut adalah salah satu sendi terbesar dalam tubuh, serta merupakan sendi yang kompleks [3]. Gerakan sendi lutut yaitu menekuk dan meluruskan serta membantu setiap pergerakan seperti berjalan, berlari dan berjongkok. Sendi lutut termasuk organ tubuh manusia yang rawan terjadi cedera atau mengalami kekakuan sehingga menyebabkan pengurangan *range of motion* (ROM) yang dapat mengganggu aktivitas sehari-hari [4]. Cedera pada sendi lutut dapat ditangani dengan proses rehabilitasi otot dan terapi yang dilakukan secara rutin, perlakuan tersebut diperlukan dikarenakan untuk mengembalikan fungsi sendi dan rentang gerak secara penuh. Terapi adalah proses pemulihan fungsi tubuh manusia yang terganggu akibat penyakit ataupun cedera [5]. Terdapat berbagai macam alat terapi, ada yang memancarkan sinar, memancarkan frekuensi tinggi dan membantu menggerakkan anggota tubuh manusia.

Proses terapi melibatkan gerakan pasif sangat membantu mengurangi kekakuan pada otot sendi lutut dan membantu membangun kembali otot-otot disekitar lutut pasca operasi. Tujuan terapi fisik pasca operasi dan cedera yaitu untuk mengurangi kekakuan sendi dan mengembalikan gerak normal pada sendi lutut [6]. Gerakan pasif merupakan gerak yang dihasilkan oleh sumber luar dan tidak memerlukan aktivasi otot. Gerakan pasif berulang sebagai rehabilitasi dapat dilakukan dengan baik apabila di bantu oleh terapis yang berkompeten atau menggunakan mesin. Mesin terapi untuk terapi cedera sendi lutut yaitu mesin *continuous passive motion* (CPM).

Mesin *continuous passive motion* merupakan mesin yang mekanisme kerjanya sesuai dengan rehabilitasi teori gerak pasif terus menerus dan berulang. Gerakan ini memiliki tujuan dalam praktek kedokteran untuk memulihkan fungsi saraf motoric anggota tubuh yang cedera. Fungsi mesin CPM selaian untuk alat terapi yaitu untuk membantu mengurangi beban terapis dalam menangani kasus cedera lutut yang lumayan tinggi berdasarkan Badan Pusat Statistik (BPS) Jawa Tengah [7]. Mesin CPM diharapkan dapat diprogram untuk melakukan gerakan berulang dalam membantu melenturkan dan melatih gerakan otot pada pasien yang mengalami cedera.

Berdasarkan literatur tersebut pada penelitian sebelumnya telah dirancang mesin *continuous passive motion* berbasis IoT menggunakan kontrol PID dan kontrol fuzzy [8] [9]. Pada penelitian tersebut terdapat faktor kekurangan yang ada yaitu sistem mekanik yang dapat mengganggu kenyamanan pasien karena suara dari motor yang digunakan dan mekanik dari mesin CPM sebelumnya tidak dapat di sesuaikan (adjust) dengan panjang kaki pasien secara maksimal.

Berdasarkan hal tersebut, pada penelitian ini dilakukan pengembangan perancangan mesin *continuous passive motion* (CPM) yang bertujuan untuk membuat alat terapi cedera lutut serta membantu mengurangi kekakuan sendi yang disebabkan oleh pasca operasi, kecelakaan, penyakit dan faktor usia.

2. Material dan Metode Penelitian

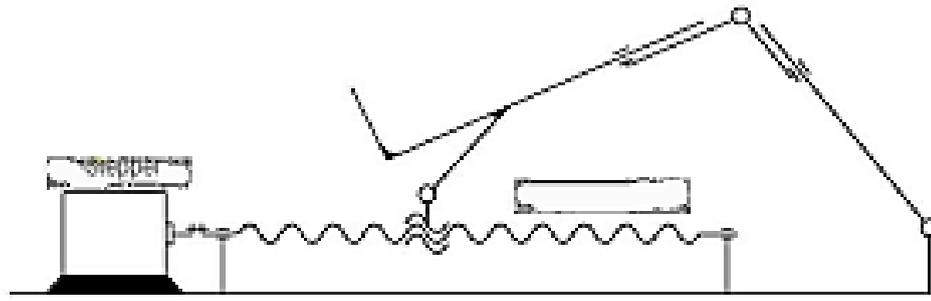
2.1 *Continuous Passive Motion*

Continuous passive motion yaitu alat terapi yang digunakan untuk membantu pengobatan pada pasien penderita cedera sendi lutut atau pasca operasi. Mesin CPM menghasilkan gerakan pasif dan terus menerus yang dapat membantu pasien dalam proses rehabilitasi pasca operasi atau cedera lutut untuk mengembalikan gerak sendi [10]. Pada proses pemulihan pasca operasi pasien memerlukan waktu yang lama untuk menggerakkan kembali sendi lututnya, proses tersebut dapat menyebabkan kekakuan pada sendi lutut, sehingga dengan dilakukan gerakan pasif dan berulang dapat membantu untuk mengurangi resiko kekakuan sendi dan keterbatasan gerak pada sendi, selama proses pemulihan dan rehabilitasi pasca operasi sendi. Mesin *continuous passive motion* digunakan untuk melatih gerakan pada sendi lutut, sesuai dengan prinsip kerjanya dengan memberi gerakan pasif dan terus menerus. Selain untuk melatih gerak pada sendi lutut, mesin *continuous passive motion* dapat membantu meningkatkan cairan *sinovial* serta untuk mengurangi pendarahan di sekitar sendi [11].

Gerakan mesin CPM dirancang untuk bergerak dengan sudut dan kecepatan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan pasien, seperti yang ditentukan oleh dokter atau terapis fisik. Variasi sudut diperlukan dalam melakukan proses terapi. Hal ini dikarenakan besarnya sudut fleksi yang dapat dibentuk dipengaruhi oleh kekuatan sendi yang mengalami kekakuan dimana sendi memiliki kekuatan atau tenaga yang lebih besar pada besaran sudut tertentu, sehingga perlu dirancang sistem kontrol yang dapat mengendalikan besar sudut fleksi sesuai dengan kemampuan pasien [12].

2.2 Mekanisme Gerakan *Continuous Passive Motion*

Mesin CPM termasuk alat yang menggunakan mekanisme gerakan *Four bar linkage* (tautan 4 batang). *Four bar linkage* merupakan hubungan rantai tertutup yang paling sederhana. *Four bar linkage* terdiri dari empat badan, disebut *bar* atau *link*, dihubungkan dalam satu lingkaran oleh empat sendi. Pada penerapannya, sambungan diatur pada batang link sehingga bergerak pada bidang sejajar dan *assembly*-nya disebut mekanisme 4 batang planar. Mekanisme ini terdiri dari empat batang penghubung dimana batang penghubung 1 (O₂O₄) merupakan kerangka yang diam, batang penghubung 2 dan 4 adalah engkol (*crank/rocker*) dan batang penghubung 3 adalah perangkainya (*coupler*) [13].



Gambar 1 Mekanisme jalaran genjang berbasis *slider*.

Berdasarkan literatur tersebut pada penelitian ini mekanisme four bar linkage yang digunakan pada mesin CPM yang dirancang yaitu mekanisme jalaran genjang berbasis *slider* dengan *linkage* yang dapat disesuaikan panjangnya mengikuti Panjang kaki pasien, mekanisme jalaran genjang berbasis *slider* ditunjukkan pada Gambar 1.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2 Alat dan bahan penelitian.

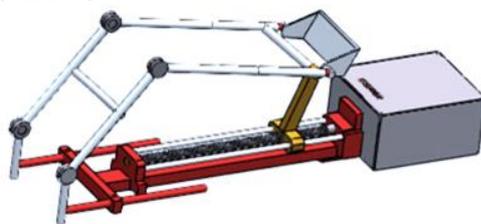
Mekanik CPM	Sistem Master CPM	Sistem <i>Slave</i> CPM
<ul style="list-style-type: none"> Pipa stainless steel 0,6 dan 0,7 inch (Rangka CPM) Plat stainless steel 2 mm (<i>box</i> komponen) Aluminium (<i>base</i> utama CPM) 	<ul style="list-style-type: none"> Motor <i>stepper</i> Nema23 <i>Rotary encoder</i> E40H6 Arduino Mega 2560 Pro mini Driver motor TB6600 DC Dc Converter LM2596HVS Modul Bluetooth HC05 <i>Power supply</i> 24V <i>Limit switch</i> 	<ul style="list-style-type: none"> LCD Touchscreen Nection 7 Inch Arduino Nano Modul Bluetooth HC05 Baterai Push Button

2.4 Perancangan Mekanik Mesin CPM

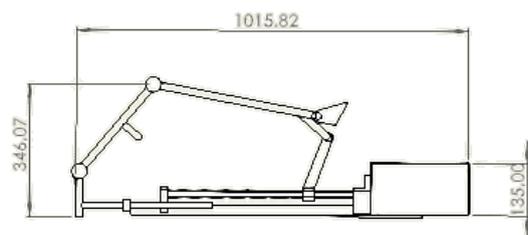
Pada proses perancangan mekanik mesin terapi sendi lutut dilakukan 2 proses tahapan, berikut merupakan proses perancangan mekanik mesin CPM,

2.4.1 Desain Mesin CPM

Proses desain mekanik mesin CPM pada penelitian ini menggunakan software *Solidworks 2022*, pembuatan desain mekanik mesin CPM dibagi berpart- part kemudian di *assembly*. Hasil desain mekanik mesin CPM ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2 Hasil desain mesin CPM.



Gambar 3 Gambar isometri desain CPM

2.4.2 Perancangan Mekanik Mesin CPM.

Berdasarkan hasil desain yang telah dibuat maka proses selanjutnya dilakukan proses permesinan untuk membuat sistem mekanis mesin CPM. Berikut merupakan proses permesinan yang dilakukan dalam proses perancangan mesin CPM pada penelitian ini.

- Proses Pemotongan: bertujuan untuk memotong bahan yang digunakan dalam pembuatan alat terapi sendi lutut, agar sesuai dengan ukuran part yang sesuai dengan desain alat.
- Proses pembubutan: pada pembuatan alat terapi sendi lutut salah satu part yang dilakukan proses pembubutan yaitu ulir pada rangka alat CPM.
- Proses Bending: pada pembuatan alat CPM ini proses bending dilakukan untuk membuat *box* kontroler dan beberapa part rangka alat.
- Proses *Drilling*: *drilling* dilakukan untuk membuat lubang untuk dudukan as ulir dan lubang untuk baut pada mesin CPM
- Proses Pengelasan: pengelasan dilakukan untuk menghubungkan part- part mekanik mesin CPM.
- Proses *Assembly*.

2.4.3 Perancangan Mekatronika Mesin CPM.

Komponen elektronika yang digunakan dalam perancangan mesin terapi sendi lutut kaki dengan *continuous passive motion* ini memerlukan spesifikasi yang memenuhi kebutuhan sistem sebagai berikut :

1. Mampu bergerak pada rentang sudut antara 0-120°.
2. Untuk akurasi pembacaan nilai sudut memerlukan *rotary encoder* dengan resolusi yang tinggi.
3. Motor DC mampu menggerakkan rangka mekanik ditambah dengan beban berupa kaki pasien.
4. Sistem komunikasi antara sistem master dan *slave* secara wireless agar tidak ada kabel yang mengganggu selama mesin bekerja.
5. Sistem dapat bekerja secara otomatis berdasarkan *setpoint* yang telah diberikan.
6. Sistem remote kontrol yang berbasis touchscreen agar memudahkan pengguna dalam pengoperasian mesin terapi.
7. Modul converter tegangan untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan masing-masing komponen.

Adapun komponen yang digunakan yaitu arduino mega 2560 pro mini sebagai pengolah data dan pengendali pada sistem master, Arduino Mega 2560 Pro Mini merupakan salah satu jenis arduino yang menggunakan chip ATmega 2560. Terdapat 54 pin untuk input/output digital dimana 15 pin diantaranya dapat berfungsi sebagai output PWM. Selain itu terdapat 16 buah pin untuk input analog, 4 buah port serial hardware UART, port USB, ICSP header dan tombol reset [14]. Kemudian arduino uno digunakan sebagai pengolah data pada sistem *slave*, Arduino uno merupakan salah satu tipe arduino yang menggunakan chip Atmega328 [15]. Komunikasi antara sistem master dan *slave* menggunakan modul HC05, HC05 merupakan sebuah modul komunikasi wireless yang beroperasi pada gelombang RF 2,4 GHz. HC05 bekerja pada tegangan 3,3 volt DC dan konsumsi arus yaitu sekitar 50 mA pada saat bekerja [16]. LCD nextion digunakan sebagai tampilan sistem remote control atau *slave*, LCD nextion merupakan sebuah LCD yang memiliki prosesor onboard dan tampilan layar sentuh serta didukung dengan software nextion editor [17]. Kemudian *rotary encoder* yang digunakan memiliki resolusi 600 PPR yang sudah cukup baik untuk membaca nilai sudut fleksi. Motor *stepper* DC digunakan sebagai aktuator pada sistem ini yang gerakannya dikendalikan oleh sebuah driver motor DC TB6600, Driver adalah rangkaian yang tersusun dari transistor yang digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* DC [18].

3. Hasil dan Pembahasan

2.1 Pengujian Sensor *Rotary encoder*

Pengujian *rotary encoder* pada penelitian ini menggunakan dua perhitungan regresi, yaitu regresi linear (orde 1) dan regresi polynomial (orde 2). Penggunaan dua perhitungan bertujuan untuk mengetahui nilai hasil pembacaan *rotary encoder* dengan alat ukur sudut goniometer selisihnya tidak banyak. Untuk mengetahui nilai *error* yang sedikit dengan cara membandingkan hasil pembacaan dari *rotary encoder* dan alat ukur sudut goniometer, dari pengujian *rotary encoder* yang menggunakan persamaan orde 1 dan persamaan orde 2.

2.1.1 Pengujian Sensor *Rotary encoder* pada Mode Manual Menggunakan Persamaan Orde 1 dan Orde 2.

Pada pengujian pertama yang dilakukan yaitu menggunakan mode manual, pengujian dilakukan dengan 10 kali pengambilan data. Berdasarkan pengujian ini didapatkan nilai *error* rata-rata 9,8%, pada Table 3 ditunjukkan hasil pengujian *rotary encoder* pada mode manual menggunakan persamaan orde 1.

Tabel 3 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode manual menggunakan persamaan orde 1.

No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Error</i> (%)
1	171	166,5	2,6
2	160	155,4	2,9
3	150	143	4,7
4	141	132	6,4
5	130	120,5	7,3
6	119	109,5	8
7	111	97,7	12
8	100	84	16
9	96	76,4	20,4
10	79	65,3	17,3
Rata-rata			9,8

Tabel 4 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode manual menggunakan persamaan orde 2.

No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Error</i> (%)
1	173	173,9	0,5
2	158	156,8	0,8
3	144	144	0,1
4	133	134,1	0,8
5	124	124,4	0,3
6	111	110,9	0,1
7	103	103,2	0,2
8	93	93,3	0,3
9	74	73,7	0,4
10	69	69,5	0,7
Rata-rata			0,4

Pada pengujian pertama menggunakan persamaan orde 2 pada mode manual didapatkan hasil pengukuran dengan nilai *error* 9,9 % dari sepuluh pengukuran sudut. Data hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.

2.1.2 Pengujian Sensor *Rotary encoder* pada Mode Otomatis Menggunakan Persamaan Orde 1 dan Orde 2.

Pada pengujian kedua pengambilan data dilakukan menggunakan mode otomatis dengan menggunakan *set point* sudut 120°. Dari hasil pembacaan sensor *rotary encoder* pada pengujian mode otomatis yang pertama didapat nilai rata-rata *error* 6,8 %. Data hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode otomatis menggunakan persamaan orde 1

No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Errorr</i> (%)
1	120	110	8,3
2	120	109,2	9
3	120	112	6,7
4	120	109,3	8,9
5	120	112,2	6,5
6	120	112,2	6,5
7	120	113,4	5,5
8	120	113,8	5,2
9	120	112,1	6,6
10	120	114	5
Rata- rata			6,8

Tabel 6 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode otomatis menggunakan persamaan orde 2.

No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Errorr</i> (%)
1	120	120,3	0,2
2	120	119,3	0,6
3	120	119,6	0,3
4	120	119,3	0,6
5	120	119,2	0,7
6	120	120	0
7	120	119,5	0,4
8	120	118,2	1,5
9	120	118,9	0,9
10	120	118,6	1,2
Rata- rata			0,6

Pada pengujian ke dua menggunakan persamaan orde 2 pada mode otomatis dengan *set point* sudut mesin CPM diatur sebesar 120° didapatkan nilai *errorr* rata- rata 0,6%. Hasil pengujian kedua ini ditunjukkan pada Tabel 6.

2.1.3 Pengujian Sensor *Rotary encoder* pada Mode Progresif Menggunakan Persamaan Orde 1 dan Orde 2.

Pada pengujian ketiga pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *set point* sudut minimal 110° dan sudut maksimal 130°, untuk *set point* kelipatan sudut menggunakan 2°. Dari pengujian ini nilai *errorr* yang didapatkan yaitu 16,6° dari sepuluh kali pengambilan data sudut yang dihasilkan mesin CPM. Pada Tabel 5 ditunjukkan data hasil pengujian ketiga.

Tabel 7 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode progresif menggunakan persamaan orde 1.

No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Errorr</i> (%)
1	120	102,2	14,8
2	124	106,1	14,4
3	128	114,3	10,7
4	132	118,2	10,5
5	136	121,3	10,8
6	140	127,1	9,2
7	144	133,2	7,5
8	148	138,4	6,5
9	152	140,6	7,5
10	158	147,1	6,9
Rata- rata			9,9

Tabel 8 Hasil pengujian *rotary encoder* pada mode progresif menggunakan persamaan orde 2.

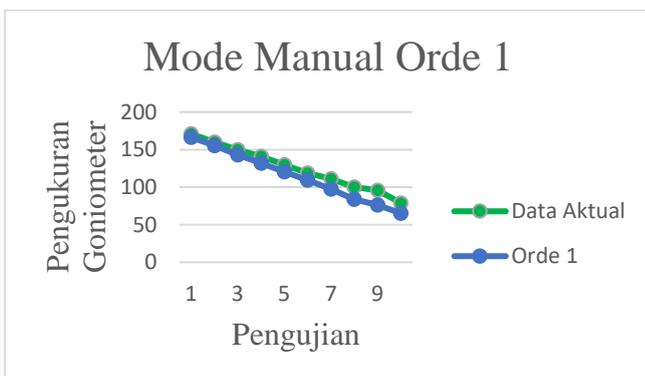
No	Pembacaan <i>Rotary encoder</i> (°)	Pengukuran Goniometer (°)	<i>Errorr</i> (%)
1	120	118,6	1,2
2	124	123,4	0,5
3	128	129,2	0,9
4	132	130,9	0,8
5	136	136,2	0,1
6	140	140,4	0,3
7	144	146,3	1,6
8	148	150,2	1,5
9	152	152,7	0,5
10	156	156,3	0,2
Rata- rata			0,8

Pada pengujian mesin CPM mode progresif menggunakan persamaan orde 2 didapatkan nilai *errorr* rata- rata 0,8%. Pada pengujian ini nilai *set point* yang digunakan yaitu 120° untuk sudut minimal dan 160° untuk sudut maksimalnya, sedangkan *set point* untuk kelipatan sudut yang digunakan yaitu 4°. Pada Tabel 8 ditunjukkan hasil pengujian *rotary encoder* pada mode progresif menggunakan persamaan orde 2.

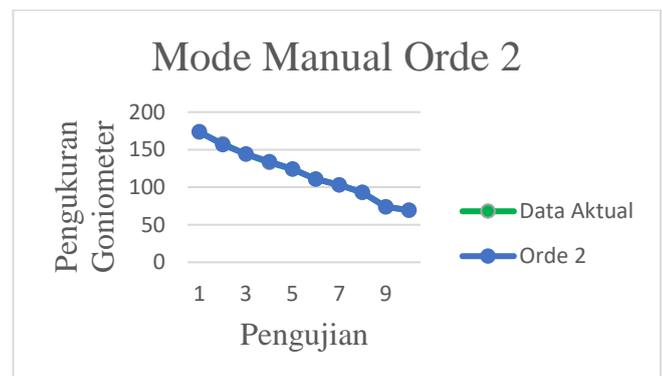
2.2 Perbandingan Hasil Pengujian Orde 1 dan Orde 2

2.2.1 Perbandingan Hasil Pengujian Orde 1 dan Orde 2 pada Mode Manual.

Berdasarkan hasil pengujian *rotary encoder* mode manual menggunakan persamaan orde 1 yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 6, maka didapatkan hasil perbandingan data dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5 Grafik hasil pengujian *rotary encoder* pertama pada mode normal menggunakan persamaan orde 1.

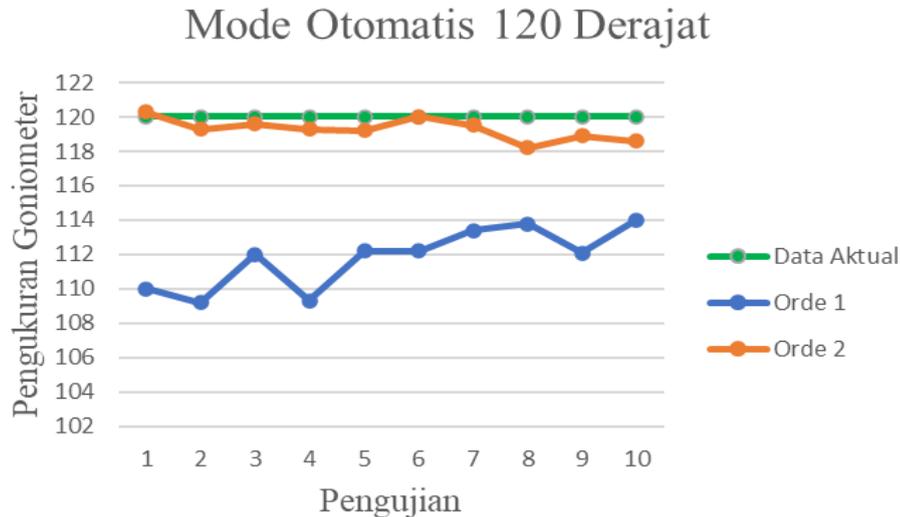


Gambar 6 Grafik hasil pengujian *rotary encoder* pertama pada mode normal menggunakan persamaan orde 2.

Berdasarkan pada Gambar 10 dan 11 grafik hasil pengujian pertama sensor *rotary encoder* menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2 dapat dibandingkan bahwa penggunaan rumus persamaan orde 2 pada *rotary encoder* mendapatkan nilai *error* yang kecil, hal tersebut dibuktikan dari Gambar 11 garis hasil pengujian orde 2 sejajar dengan nilai aktual pada grafik. Nilai *error* rata-rata yang didapatkan dari pengujian pertama *rotary encoder* pada mode normal yaitu 9,8% dengan menggunakan persamaan orde 1 dan 0,4% dengan menggunakan persamaan orde 2. Nilai tersebut ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 6.

2.2.2 Perbandingan Hasil Pengujian Orde 1 dan Orde 2 pada Mode Otomatis.

Berdasarkan hasil pengujian *rotary encoder* mode otomatis menggunakan persamaan orde 1 yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 7, maka didapatkan hasil perbandingan data dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 7.

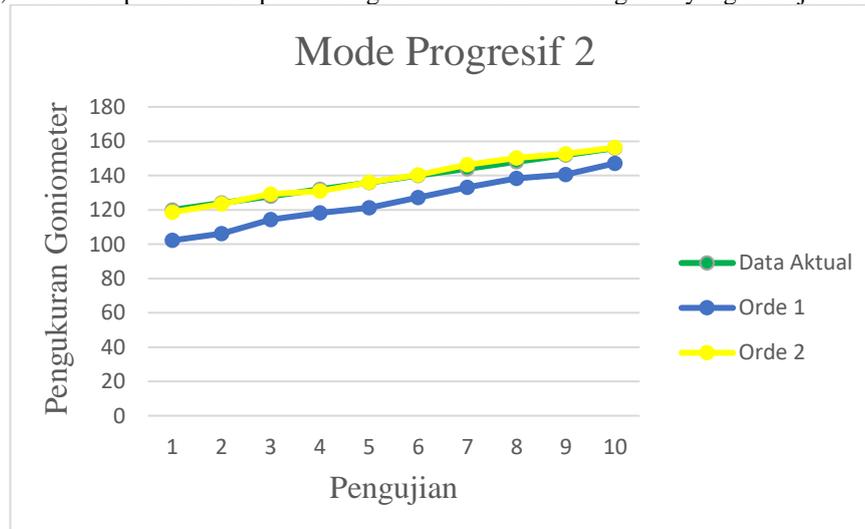


Gambar 7 Grafik hasil pengujian *rotary encoder* pertama pada mode otomatis menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2.

Berdasarkan Gambar 7 ditunjukkan hasil perbandingan data pengujian mesin CPM mode otomatis menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2. Dari grafik Gambar 12 dapat dilihat hasil pengujian mesin CPM yang menggunakan persamaan orde 2 lebih mendekati nilai aktual yang ditentukan. Pada pengujian pertama mesin CPM mode otomatis nilai *set poin* sudut yang ditentukan yaitu 120°, dari pengujian ini didapatkan nilai *error* rata-rata 6,8% yang menggunakan persamaan orde 1, sedangkan hasil yang menggunakan persamaan orde 2 yaitu 0,6%. Nilai hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 7.

2.2.3 Perbandingan Hasil Pengujian Orde 1 dan Orde 2 pada Mode Progresif.

Berdasarkan hasil pengujian *rotary encoder* mode progresif menggunakan persamaan orde 1 yang ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 8, maka didapatkan hasil perbandingan data dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik hasil pengujian *rotary encoder* kedua pada mode progresif menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2.

Pada Gambar 13 ditunjukkan hasil perbandingan nilai yang didapat dari pengujian mesin mode progresif menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2. Berdasarkan grafik pada Gambar 8 hasil pengujian mesin CPM mode progresif dengan persamaan orde 2 mendapatkan nilai pembacaan yang lebih baik dan lebih mendekati nilai aktual yang ditentukan dari hasil pengujian yang menggunakan persamaan orde 1. Pada pengujian pertama mesin CPM mode progresif nilai *set point* yang digunakan yaitu untuk nilai sudut minimal 120° dan untuk nilai sudut maksimal 160° , sedangkan untuk *set point* nilai sudut kelipatannya yaitu 4° . Dari nilai *set point* yang ditentukan mendapatkan nilai *error* rata-rata 9,9% untuk hasil yang menggunakan persamaan orde 1, sedangkan untuk hasil yang menggunakan persamaan orde 2 yaitu 0,8%. Nilai hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 8.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian sensor *rotary encoder* menggunakan persamaan orde 1 didapatkan nilai *error* rata-rata pada mode normal 9,8%, mode otomatis 6,8% dan mode progresif 9,9 %, sedangkan nilai *error* yang dihasilkan pada pengujian menggunakan persamaan orde 2 pada mode manual 0,4%, mode otomatis 0,6% dan mode progresif 0,8%, sedangkan untuk perbandingan hasil pengujian mesin CPM menggunakan persamaan orde 1 dan orde 2. Berdasarkan dari pengujian sensor *rotary encoder* yang dilakukan menggunakan dua variasi persamaan perhitungan yaitu persamaan orde 1 dan orde 2. Dari data yang didapat hasil pengujian *rotary encoder* menggunakan persamaan orde 2 lebih akurat pembacaan sudutnya dibandingkan dengan menggunakan persamaan orde 1, hal tersebut ditunjukkan dari nilai rata-rata hasil pengujian menggunakan persamaan orde 2 lebih kecil dibandingkan dengan nilai rata-rata yang dihasilkan menggunakan persamaan orde 1. Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa rumus persamaan orde 2 lebih akurat untuk diaplikasikan pada sensor *rotary encoder* yang digunakan untuk pengembangan perancangan mesin *continuous passive motion* pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Sofyan, Harlinda. 2018. Sistem Rangka dan Panca Indra. Universitas Esa Unggul.
- [2] Hartono, J., Kesoema, T., & Novriansyah, R. (2021). Perbandingan Sensitivitas dan Spesifitas Pemeriksaan Lachman dan Stable Lachman Terhadap MRI (Doctoral dissertation, Universitas Diponegoro).
- [3] F. Lumongga, "Sendi Lutut," Laporan Tugas Akhir, Fakultas Kedokteran, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2004.
- [4] Umchid, S., Taraphongphan, P. (2016). Design and development of a smart continuous passive motion device for knee rehabilitation. 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 1–5.
- [5] Graha, A. S. (2012). Manfaat Terapi Masase Frirage Dan Stretching Dalam Penanganan Cedera Pada Atlet Olahraga Beladiri. Medikora, VIII (2). <https://doi.org/10.21831/medikora.v0i2.4650>
- [6] Handoyo, Rudy. Terapi Latihan Pasca Operasi Penggantian Sendi Lutut (*Knee Replacement Surgery*), <https://www.rskariadi.co.id/news/635/Terapi-Latihan-Pasca-Operasi-Penggantian-Sendi-Lutut-Artikel>, [Diakses 31 juli 2023]
- [7] B. P. S. J. Tengah, "Badan Pusat Statistik Jawa Tengah," 2021. [Online]. Available: <https://jateng.bps.go.id/dynamic/table/2019/10/22/569/jumlahkorban-kecelakaan-lalu-lintas-di-wilayah-polda-jawa-tengah-tahun-2013-2018.html>. [Accessed 31 Juli 2023].
- [8] Naufal, Dhafin., Tri, Wiyatno., & Munadi. (2021). Desain Kontrol Fuzzy untuk Pengendalian Besar Sudut Fleksi pada Mesin Terapi Sendi Lutut Kaki dengan Continuous Passive Motion. *Skripsi*. Univesitas Diponegoro.
- [9] Imam, Fajar., Tri, Wiyatno., & Munadi. (2021). Desain Kontrol PID untuk Pengendalian Besar Sudut Fleksi pada Mesin Terapi Sendi Lutut Kaki dengan Continuous Passive Motion. *Skripsi*. Univesitas Diponegoro.
- [10] Noviyanto, A. H., Septilianingtyas, L. D., & Rahmawati, D. (2021). Design of a *continuous passive motion* (CPM) machine for wrist joint therapy. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(4), 311-315.
- [11] Saputra, M. K., & Iskandar, A. A. (2011, November). Development of automatic *Continuous passive motion* therapeutic system. In 2011 2nd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (pp. 376-379). IEEE.
- [12] M. P. McHugh dan D. E. Hogan, "Effect of Knee Flexion on Active Joint Stiffness," *Acta Physiologica Scandinavica*, vol. 180, pp. 249-254, 2004.

-
- [13] Le, N. B., Nguyen, H. N., Nguyen, D. A., & Vo, H. D. (2013). Study on Mechanical Adaptive Design, Construction and Control of Knee *Continuous passive motion* Machine. *Journal of Automation and Control Engineering* Vol, 1(3).
- [14] "Arduino Mega 2560 Datasheet," [Online]. Available: www.robotshop.com. [Diakses 20 Juli 2023].
- [15] A. S. Wiryawan dan T. Ghozali, "NRF24L01 sebagai Pemancar/Penerima untuk Wireless Sensor Network," *TEKNO*, vol. 17, no. 1, pp. 26-34, 2020.
- [16] Muhammad, B. K., & Oktaviana Putri, T. W. (2021). Rancang Bangun Alat Pemberi Pakan Ayam Otomatis dengan Motor DC menggunakan Mikrokontroler ATMEGA328 Berbasis Bluetooth HC-05 (Doctoral dissertation, Institut Teknologi PLN).
- [17] "NX8048T050," Nextion, [Online]. Available: <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t050/>. [Diakses 30 Juli 2023].
- [18] Purbaya, R. (2017). Aplikasi Motor *Stepper* Pada Alat Pencetak Bangun Ruang Tiga Dimensi Untuk Peleburan Filament Pada Motor Extruder (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya).