

Inverse Kinematics Rack and Pinion Gear untuk Mekanisme Lifting Mobile Robot pada Kontes ABU Robocon 2023

1st Leo Tirto Purnomo

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

leotirto@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Arif Abdul Aziz

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

arifabdulaziz@telkomuniversity.ac.id

3rd Irham Mulkan Rodiana

Fakultas Teknik Elektro

Telkom University

Bandung, Indonesia

irhammulkan@telkomuniversity.ac.id

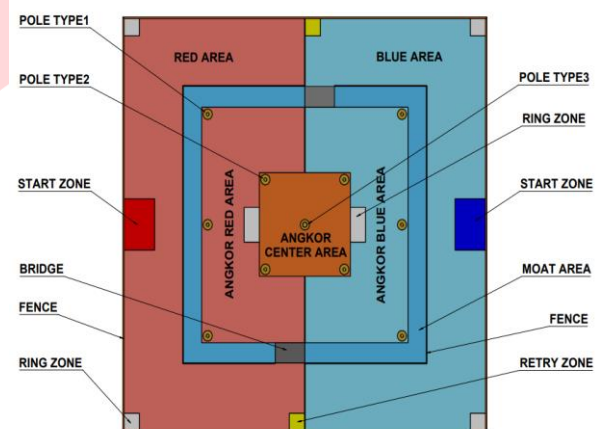
Abstrak — Kontes Robot ABU tahun 2023 bertemakan “Casting Flower Angkor Wat”. Dalam satu tim terdapat dua robot berbeda yaitu ER dan RR. Robot RR memiliki rintangan mobilitas tersendiri dibandingkan dengan ER. Salah satu rintangannya yaitu sebuah bidang anak tangga setinggi 200cm. Untuk dapat melewati rintangan tersebut diperlukan sistem pendaki anak tangga tersendiri. Sistem pendaki anak tangga yang telah ada terdiri dari dua mekanisme, yaitu lengan dan *lifting*. Pada jurnal ini dibahas mengenai kinematika untuk kendali pada mekanisme *lifting*. Diperoleh rumus *inverse kinematics* dari rumus kinematika *rack and pinion gear*. Kinematika yang telah didapat dilakukan pengujian dengan keadaan asli. Panjang penurunan dan posisi sudut yang diperoleh dibandingkan dengan hasil perhitungan kinematika. Desain sistem *lifting* menggunakan aktuator Motor DC PG45 200kgfcm sebagai penggeraknya, sensor *magnetic rotary encoder* 7ppr sebagai umpan balik, dan mikrokontroler STM32F407VGT6 sebagai pemroses pergerakan berdasarkan *setpoint* dan pembacaan sensor. Dilakukan pengujian sebanyak 10 kali. Hasil dari pengujian posisi sudut putaran terdapat perbedaan nilai. Persentase *error* pembacaan posisi sudut sensor *rotary encoder* terhadap *setpoint* dari *inverse kinematic* sebesar -0,18% dengan rata – rata *error* -1,295°.

Kata kunci— Mobile Robot, Rack and Pinion Gear, *Inverse Kinematics*.

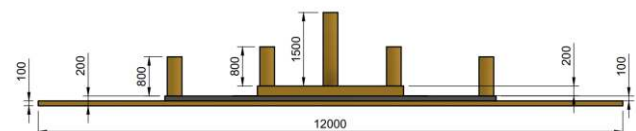
I. PENDAHULUAN

Kontes ABU (Asia Pacific Broadcasting Union) Robocon adalah kontes robot tahunan antar perguruan tinggi se-Asia Pasifik. Tema kontes robot tahun ini adalah “Casting Flower Over Angkor Wat”. Peserta ditugaskan melempar ring pada tiang – tiang yang tersedia di lapangan untuk memperoleh point. Pada saat kontes robot berlangsung, dalam satu pertandingan terbagi menjadi dua tim, *Blue Team* dan *Red Team*. Pertandingan berlangsung selama tiga menit dengan perebutan skor tertinggi untuk menjadi pemenang.

Dalam satu tim terdapat dua buah robot, *Elephant Robot* (ER) dan *Rabbit Robot* (RR). Kedua robot memiliki tugas melempar ring ke tiang dengan lapangan permainan yang terdiri dari rintangan bidang datar, bidang miring, dan bidang berbentuk anak tangga. Bentuk lapangan pertandingan dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



GAMBAR 1.
Desain Lapangan Pertandingan (Tampak Atas)



GAMBAR 2.
Dimensi Lapangan Pertandingan (Tampak Samping)

Berdasarkan aturan pertandingan, RR dapat bergerak pada *Blue/Red Area*, dan *Angkor Center Area*, sedangkan ER hanya *Blue/Red Area*. Pergerakan RR lebih luas dan dinamis dari ER. Berdasarkan pada GAMBAR 2, agar dapat memasuki *Angkor Center Area* RR harus melewati rintangan berupa bidang berbentuk anak tangga dengan tinggi 200mm. Untuk melewati rintangan tersebut, diperlukan sistem pendaki anak tangga yang terintegrasi pada RR.

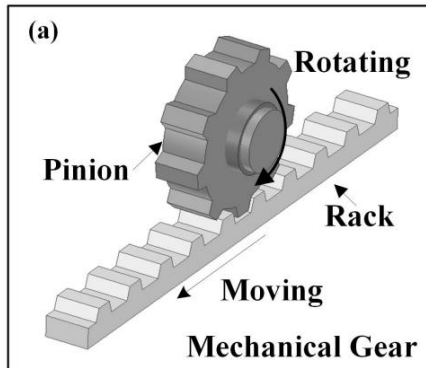
Dalam *Rule Book ABU Robocon 2023*, terdapat beberapa aturan yang perlu diperhatikan dalam membangun RR. RR memiliki dimensi maksimum 50cm x 50cm x 50cm saat pertandingan dimulai dan dapat memperpanjang dimensinya hingga 70cm x 70cm x 80cm saat pertandingan berlangsung.

Sistem pendaki anak tangga yang digunakan terdapat dua mekanisme yang saling berhubungan, yaitu mekanisme *lifting* dan lengan 1-DOF. Mekanisme *lifting* menerapkan sistem gerak *rack and pinion gear* untuk mengangkat beban belakang robot dan lengan 1-DOF untuk beban depan. Pada

paper ini akan dibahas kinematika pergerakan mekanisme *lifting* atau lebih tepatnya *rack and pinion gear*. Aktuator penggerak mekanisme *lifting* menggunakan Motor DC *gearbox*.

II. KAJIAN TEORI

A. Rack and Pinion Gear



GAMBAR 3.
Struktur Rack and Pinion Gear

Rack and pinion gear memiliki gigi linear dan roda gigi serta umumnya digunakan untuk mengonversi gerakan rotasi menjadi linear [1]. Berdasarkan konversi gerakan tersebut, *rack and pinion gear* sering digunakan untuk sistem *steering*, perangkat pengangkut, dan *elevator*. Untuk mengetahui panjang penurunan *rack* j dapat diperoleh dengan persamaan (1) [1].

$$j = \left(\frac{\theta}{\beta}\right) \cdot L \quad (1)$$

Dengan keterangan parameter:

θ =Putaran sudut roda gigi pinion

β =Besarnya sudut antar gigi dari ujung gigi

L =Keliling lingkaran per jarak satu gigi

B. Roda Gigi Kerucut

Dua buah roda gigi yang terhubung secara berpotongan dengan tujuan mentransmisikan daya pada arah putaran yang berbeda. Roda gigi yang digunakan untuk tujuan ini adalah roda gigi kerucut. Bentuk roda gigi kerucut dan aplikasinya dapat dilihat pada Gambar 4.

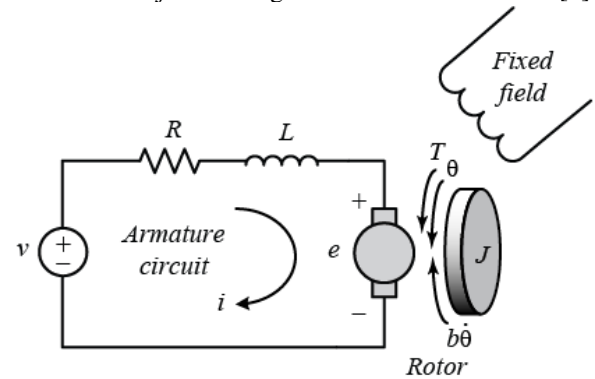


GAMBAR 4.
Roda Gigi Kerucut

C. Motor DC

Motor DC merupakan perangkat yang dapat mengkonversi tenaga listrik menjadi tenaga mekanik dan

jenis motor yang menggunakan sumber tegangan searah [2]. Gambar 5. menunjukkan rangkaian ekivalen motor DC [2].



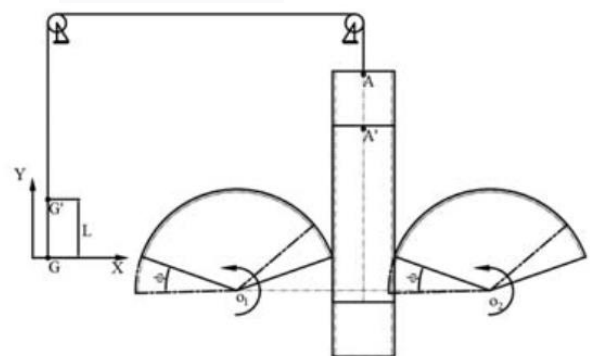
GAMBAR 5.
Rangkaian Ekvivalen Motor DC

Pada Gambar 5. masukan sistem motor DC adalah tegangan (V) yang diberikan ke *armature* motor dan keluaran yang dihasilkan adalah kecepatan rotasi *shaft* motor ($\dot{\theta}$). Disini *rotor* dan *shaft* diasumsikan *rigid*.

Pada umumnya, besar nilai torsi yang dihasilkan oleh motor DC sebanding dengan besar arus listrik yang mengalir ke *armature* dan kuat medan magnet. Tetapi dikarenakan besar kuat medan magnet diasumsikan konstan, maka besar nilai torsi yang dihasilkan hanya sebanding dengan besar arus listrik [2] [3].

III. METODE

A. Kinematika Rack and Pinion Gear



GAMBAR 6.
Diagram Pergerakan Rack and Pinion Gear Berlawanan Arah Jarum Jam

Pada Gambar 6., roda gigi kiri menggerakkan rack kiri dan begitu pula roda gigi kanan. Simbol ϕ merupakan sudut rotasi roda gigi, dengan G sebagai titik permulaan, gerakan naik dan turun dibagi menjadi tiga area; area sambungan gigi pertama, area sambungan normal, dan area sambungan gigi akhir [4].

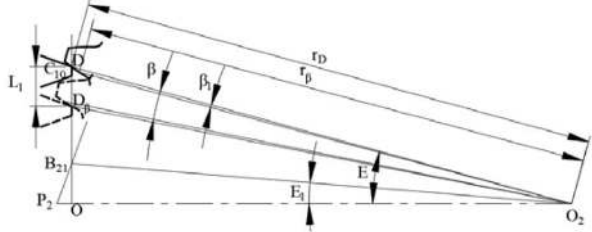
Pada gerakan naik, roda gigi kanan bersentuhan dengan rack kanan. Analisis relasi kinematika area sambungan gigi pertama, area sambungan normal, dan area sambungan gigi akhir adalah sebagai berikut.

Untuk area sambungan gigi pertama diorientasikan pada Gambar 7., setelah roda gigi kanan bergerak ke jalur rack, titik gigi pertama (D) roda gigi kanan bersentuhan dengan titik gigi rack C10 dan memasuki area sambungan gigi pertama, serta garis aksi DB21. Ketika gigi pertama dari roda gigi kanan bergerak sejauh 1 gigi terlewat β (rad), rack bergerak turun $DD\beta$, yaitu $L1$ (mm). Hubungan antara $L1$ dan β dapat diperoleh dari Teorema Sinus [4]:

$$L_1(\beta) = \frac{r_D \sin(\beta + \beta_1)}{\sin(\frac{\pi}{2} + E - \beta - \beta_1)} \quad (2)$$

$$\beta_{max} = E - E_1 - \beta - \beta_{1max} \quad (3)$$

Dimana E , E_1 , β_{1max} , β_1 , dapat diperoleh dari Persamaan (5), (6), (7), dan (8). r_D merupakan jarak antara titik sambungan awal D pada roda gigi kanan dan titik tengah lingkaran O_2 ; β_1 merupakan gerakan sudut dari titik sambungan ketika gigi pertama roda gigi kanan bergerak β ; β_{max} adalah sudut maksimal dari area sambungan gigi pertama [4].



GAMBAR 7.

Diagram gerak area sambungan gigi pertama

$$E = \arctan\left(\frac{y_D}{r_1 - h_{am}}\right) \quad (4)$$

$$E_1 = \arctan\left(\frac{\frac{h_{am}}{\tan \alpha}}{r_1 - h_{am}}\right) \quad (5)$$

$$\beta_{1max} = \tan \alpha_D - \alpha_D - \tan \alpha_{\beta max} + \alpha_{\beta max} \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{\theta_{\beta} - \theta_D}{2} = \tan \alpha_D - \alpha_D - \tan \alpha_{\beta} + \alpha_{\beta} \quad (7)$$

$$r_D = \frac{r_1 - h_{am}}{\cos E} \quad (8)$$

$$r_{\beta} = [(y_D - L_1)^2 + (r_1 - h_{am})^2]^{1/2} \quad (9)$$

$$r_{\beta min} = \frac{r_1 - h_{am}}{\cos E_1} \quad (10)$$

$$\alpha_{\beta max} = \arccos\left(\frac{r_1 \cos \alpha}{r_{\beta min}}\right) \quad (11)$$

$$y_D = r_{a1} \sin(\varphi_{max} + K) - s_e \quad (12)$$

$$K = \alpha_{a1} - \alpha \quad (13)$$

r_1 merupakan referensi radius, r_{a1} ujung radius, α sudut tekanan roda gigi, α_{a1} ujung sudut tekanan roda gigi, s_e lebar ruang; y_D jarak dari titik sambungan awal D ke titik O, yaitu, DO di Gambar 7.; r_{β} jarak antara titik sambungan D_{β} pada roda gigi kanan dan titik tengah lingkaran O_2 ; θ_D radian yang berhubungan dengan ketebalan gigi dititik sambungan awal D pada roda gigi kanan; θ_{β} radian yang berhubungan dengan ketebalan gigi dititik sambungan D_{β} setelah roda gigi kanan bergerak β ; α_D sudut tekanan dititik D roda gigi involute. α_{β} sudut tekanan dititik D_{β} roda gigi involute; φ_{max} dapat diperoleh dari persamaan (18).

Untuk area sambungan normal. Pada saat roda gigi kanan dan gerakan rack ke area sambungan normal, hubungan antara gerakan radian roda gigi kanan γ (rad) dan jarak penurunan rack L_2 (mm) dinyatakan pada persamaan.

$$L_2(\gamma) = r_1 \gamma \quad (14)$$

$$\gamma_{max} = \pi - \varphi_{max} - \beta_{max} \quad (15)$$

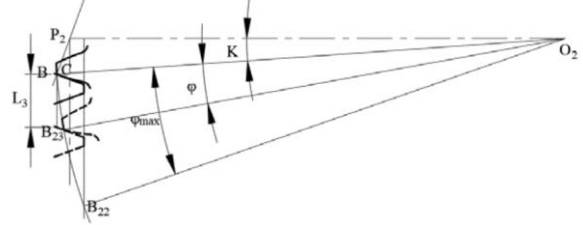
γ_{max} merupakan nilai maksimum radian pada area sambungan normal. Untuk area sambungan akhir. Seperti pada Gambar 8., pada saat titik C roda gigi kanan bergerak menuju titik B, addendum gigi akhir dari roda gigi kanan mulai menyatu dengan rack dan memasuki area gigi akhir. BB22 adalah garis aksi. Φ (rad) rotasi gigi terakhir dari roda

gigi kanan, jarak penurunan rack BB23 yaitu L_3 (mm). Hubungan antara L_3 dan φ dapat diperoleh dari Teorema Sinus [4]:

$$L_3(\varphi) = \frac{2r_{a1} \sin(\frac{\varphi}{2}) \cos(\frac{\varphi}{2} + \alpha_{a1})}{\cos \alpha} \quad (16)$$

$$\varphi_{max} = \arccos\left(\frac{r_1 - h_{am}}{r_{a1}}\right) - K \quad (17)$$

φ_{max} merupakan nilai maksimum radian pada area sambungan gigi akhir.



GAMBAR 8.

Diagram gerak area sambungan gigi akhir

Penerapan kinematika pada mekanisme *lifting* terdapat transmisi roda gigi kerucut sebelum ke pinion. Sehingga hubungan roda gigi pinion tidak terhubung langsung dengan shaft Motor DC. Tetapi karena roda gigi kerucut yang digunakan memiliki rasio 1:1 dan dipasang pada shaft yang sama dengan roda gigi pinion, maka sudut rotasi yang dihasilkan pada masing – masing roda gigi akan selalu sama [5]. Oleh karena itu, dari persamaan $L_1(\beta)$ (17), diperoleh jarak penurunan setiap satu gigi yang terlewati. Untuk kinematika mundur dalam mengetahui sudut putar yang dihasilkan oleh roda gigi pinion θ (derajat) dengan jarak penurunan rack yang ditentukan j (mm) dan sudut aktual 1 gigi βa (derajat), dapat digunakan persamaan *rack and pinion gear* (1) menjadi persamaan (19).

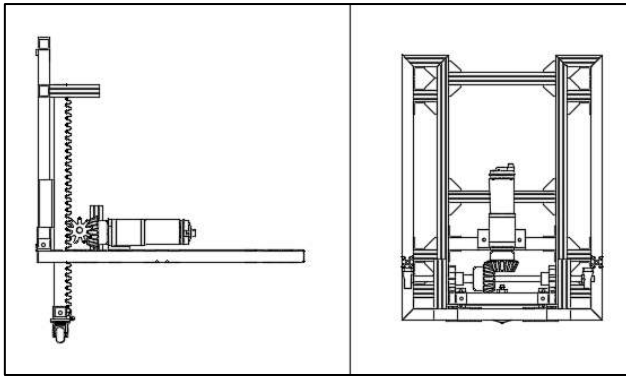
$$\theta = \left(\frac{j}{L_1}\right) \cdot \beta a \quad (18)$$

Rumus untuk mengetahui banyak gigi yang perlu dilewati p (gigi) dalam mencapai jarak penurunan yang telah ditentukan j dinyatakan pada persamaan (20).

$$p = \frac{j}{L_1} \quad (19)$$

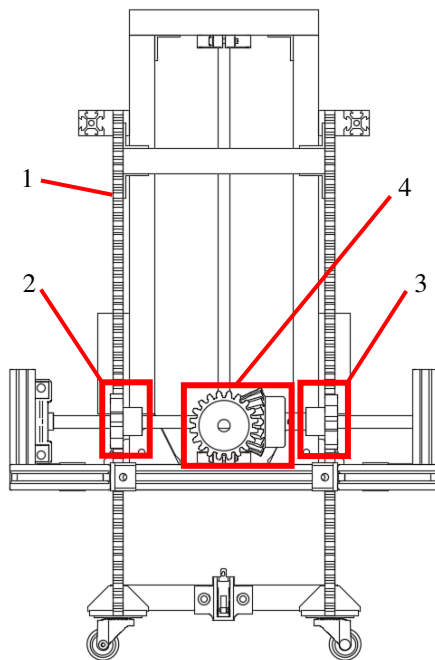
B. Desain Sistem

Sistem *rack and pinion gear* pada dasarnya mengonversi gerakan rotasi putaran Motor DC menjadi gerakan linear untuk mengangkat bagian belakang robot. Penggunaan *rack and pinion gear* untuk *lifting* tidak dihubungkan secara langsung dari roda gigi pinion ke shaft Motor DC, tetapi terdapat transmisi roda gigi kerucut.



GAMBAR 9.

Mekanika Sistem Lifting Tampak Samping dan Atas



1.Rack 2.Roda gigi pinion kiri 3.Roda gigi pinion kanan
4.Roda gigi kerucut

GAMBAR 10.

Struktur Diagram Mekanisme Lifting

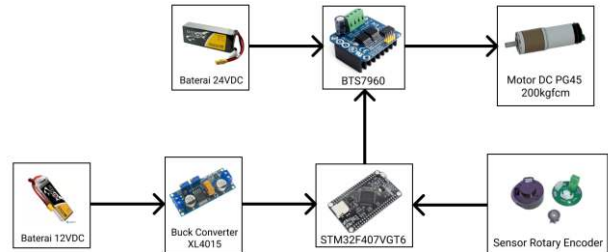
Struktur mekanisme *lifting* pada Gambar 10. memiliki pergerakan akhir naik dan turun. *Rack* bergerak turun ketika roda gigi kerucut 4 berotasi ke kanan, begitu pula sebaliknya. Roda gigi pinion 2 dan 3 bersentuhan secara langsung dengan *rack* 1, sedangkan roda gigi kerucut terhubung secara langsung dengan *shaft* penggerak roda gigi pinion dan Motor DC. Spesifikasi komponen yang digunakan dalam sistem *lifting* ini dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL 1.

Spesifikasi komponen yang digunakan pada mekanisme lifting

Komponen	Spesifikasi
Motor DC	Motor DC PG45 200kgf.cm <i>built-in rotary encoder</i> 7ppr - Tegangan kerja 24VDC - Daya 60W - Torsi efisien 197kgf.cm
Roda gigi kerucut	19 <i>tooth</i> - Diameter luar 55mm

	- Diameter <i>shaft</i> 10mm - Material <i>hard nylon</i>
<i>Rack</i>	- Modul gigi 3 - Panjang 36cm
Roda gigi pinon 2 dan 3	9 <i>tooth</i> - Diameter luar 45mm - Diameter <i>shaft</i> 10mm - Material aluminium



GAMBAR 11.

Skema Elektronika Sistem Lifting

Pada Gambar 11. merupakan skema elektronika pada sistem *lifting rack and pinion gear* yang digunakan untuk pengujian kinematika. Terdapat dua buah input yang berbeda yaitu sumber tegangan 24VDC untuk Motor DC PG45 dan 12VDC untuk mikrokontroler STM32F407VGT6. Tegangan kerja dari STM32F407VGT6 berada pada 3,3VDC sehingga digunakan XL4015 sebagai penurun tegangan DC. Mikrokontroler STM32F407VGT6 dihubungkan dengan *motor driver* BTS7960 untuk membatasi kecepatan perputaran Motor DC PG45 dan sensor *rotary encoder* sebagai umpan balik, pembatas perputaran, serta *monitoring* posisi sudut roda gigi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Posisi Sudut antar Roda Gigi dan Sensor Rotary Encoder

Sensor *rotary encoder* yang digunakan memiliki spesifikasi pembacaan 7ppr (*pulse per rotation*). Dari spesifikasi tersebut diperlukan konversi satuan ppr menjadi besaran sudut θ s(derajat). Digunakan persamaan berikut.

$$\theta_s = \frac{N_{pulse}}{Pulse\ per\ Revolution} \times 360$$

N_{pulse} merupakan nilai pulsa pembacaan sensor *rotary encoder*.

TABEL 2.

Pengujian posisi sudut roda gigi dan encoder

Data ke-	Pengukuran Posisi Sudut(°)			Posisi Sudut Pinion Gear terhadap Bevel Gear(°)			Posisi Sudut Rotary Encoder terhadap Bevel Gear(°)		
	Roda gigi kerucut	Roda gigi pinion	Rotary encoder	Error	Persentase Error	Akurasi	Error	Persentase Error	Akurasi
1	367	367	364,5	0	0,000%	100%	2,5	0,681%	99%
2	365	364,5	365,5	0,5	-0,137%	100%	-0,5	-0,137%	100%
3	365,5	364,5	365,8	1	-0,273%	100%	-0,3	-0,082%	100%
4	366	365	365,9	1	-0,273%	100%	0,1	0,027%	100%
5	367,5	367	366,12	0,5	-0,136%	100%	1,38	0,376%	100%
6	365	364	365,5	1	-0,274%	100%	-0,5	-0,137%	100%
7	366,5	366	365,9	0,5	-0,136%	100%	0,6	0,164%	100%
8	367	366	366,5	1	-0,272%	100%	0,5	0,136%	100%
9	365,5	365	366,8	0,5	-0,137%	100%	-1,3	-0,356%	100%
10	366,5	365,5	366,12	1	-0,273%	100%	0,38	0,104%	100%
Rata - rata	366,15	365,45	365,864	0,7	-0,191%	100%	0,286	0,078%	99,9%

Pengujian posisi sudut dilakukan sebanyak 10 kali dengan menggunakan sumber tegangan 24VDC untuk penggerak Motor DC, dan busur derajat 180° untuk pengukuran posisi sudut roda gigi pinion. Dilakukan perbandingan posisi sudut yang dihasilkan pada masing – masing jenis roda gigi dan pembacaan sensor rotary encoder.

Prosedur pengujian posisi sudut, motor DC yang terhubung dengan roda gigi kerucut dan pinion digerakan menggunakan mikrokontroler STM32F407VGT6 dengan sumber tegangan dari baterai 24VDC. Rotary encoder Motor DC dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407VGT6 sebagai umpan balik posisi sudut. Dari pergerakan Motor DC PG45 dihasilkan nilai posisi sudut pembacaan sensor rotary encoder, roda gigi kerucut, dan pinion. Posisi sudut roda gigi pinion diperoleh melalui pengukuran menggunakan busur derajat. Hasil pengujian kinerja sensor *rotary encoder* pada mekanisme *lifting* diperoleh rata – rata persentase *error* pembacaan posisi sudut 0,078% dengan rata – rata *error* 0,286° dan dapat dilihat pada Tabel 2.

B. Kinematika Rack and Pinion Gear

Berdasarkan tujuan utama pada paper ini yaitu memperoleh kinematika mundur *lifting rack and pinion gear*, dilakukan pengujian untuk memperoleh besar *error* kinematika yang akan digunakan. Kinematika mundur yang telah diperoleh pada persamaan (19) dilakukan pengujian dengan spesifikasi roda gigi pinion pada Tabel 3.

TABEL 3. Parameter dan spesifikasi roda gigi pinion yang digunakan

Parameter	Besaran yang digunakan	Besaran lain
h_a	4 mm	0,4 cm
m	3	-
s_e	6,5 mm	0,65 cm
r_{al}	21,5 mm	2,15 cm
r_l	17,75 mm	1,775 cm
β_1	0,141429 rad	10 °
β	0,583175 rad	33,4 °
β_a	40 °	0,698132 rad

p	212 mm	21,2 cm
-----	--------	---------

Pengujian kinematika mundur *rack and pinion gear* dilakukan sebanyak 10 kali dengan penurunan menentukan nilai *setpoint* panjang penurunan *rack* 21,2cm. Mekanisme *lifting* dijalankan menggunakan mikrokontroler STM32F407VGT6 dengan sumber tegangan dari baterai 24VDC menuju ke *motor driver* BTS7960 yang terhubung Motor DC PG45 sebagai penggerak roda gigi kerucut. Sensor *rotary encoder* Motor DC PG45 dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407VGT6.

TABEL 4.

Pengujian Kinematika Rack and Pinion Gear

Data ke-	Setpoint posisi sudut Motor DC Lifting (degree)	Pengukuran Posisi Rack (cm)		Pengukuran Posisi sudut (degree)		Rotary Encoder terhadap setpoint		Rotary Encoder terhadap sudut aktual	
		Kinematika	Aktual	Rotary Encoder Motor DC PG45 (degree)	Busur Derajat (degree)	Nilai Error	Persentase Error	Nilai Error	Persentase Error
1	732	21,2	21,2	732,09	733	0,09	0,01%	-0,91	-0,12%
2	732	21,2	21,2	731,2	733	-0,8	-0,11%	-1,8	-0,25%
3	732	21,2	21,2	731,04	733	-0,96	-0,13%	-1,96	-0,27%
4	732	21,2	21,3	728,15	730	-3,85	-0,53%	-1,85	-0,25%
5	732	21,2	21,3	729,83	730	-2,17	-0,30%	-0,17	-0,02%
6	732	21,2	21,2	728,27	730	-3,73	-0,51%	-1,73	-0,24%
7	732	21,2	21	732,16	733	0,16	0,02%	-0,84	-0,11%
8	732	21,2	21	732,02	733	0,02	0,00%	-0,98	-0,13%
9	732	21,2	21	731,18	732	-0,82	-0,11%	-0,82	-0,11%
10	732	21,2	21,2	731,11	732	-0,89	-0,12%	-0,89	-0,12%
Rata - rata	732	21,2	21,16	730,705	731,9	-1,295	-0,18%	-1,195	-0,16%

Pembacaan posisi sudut sensor *rotary encoder* akan dibandingkan dengan pengukuran busur derajat 360° dan *setpoint* berdasarkan kinematika mundur pada persamaan (19). Dari Tabel 4., hasil pengujian kinematika *rack and pinion gear* diperoleh persentase *error* pembacaan posisi sudut sensor *rotary encoder* terhadap *setpoint* -0,18% dengan rata – rata *error* -1,295°. Pembacaan posisi sudut sensor *rotary encoder* terhadap pengukuran aktual/ busur derajat diperoleh persentase *error* -0,16% dengan rata – rata *error* -1,195°. Rata – rata jarak aktual penurunan *rack* 21,16cm dengan *setpoint* 21,2cm. Persentase *error* pembacaan sensor *rotary encoder* terhadap *setpoint* kinematika berada dibawah 1%.

V. KESIMPULAN

Dari sistem *lifting* yang telah dibangun untuk mekanisme pendaki anak tangga pada *Rabbit Robot* dan kinematika mundur yang diperoleh pada persamaan (19). Dilakukan pengujian kinematika mundur dan kinerja pembacaan sensor *rotary encoder*. Dari pengujian kinerja pembacaan sensor *rotary encoder* Motor DC PG45 yang digunakan pada sistem *lifting* diperoleh rata – rata persentase *error* 0,078% dengan *error* 0,286°. Sedangkan pengujian kinematika, dari 10 kali pengujian diperoleh rata – rata persentase *error* pembacaan posisi sudut sensor *rotary encoder* terhadap pengukuran aktual -0,16% dengan *error* -1,195°. Untuk perbandingan pembacaan posisi sudut *rotary encoder* terhadap *setpoint* kinematika mundur diperoleh persentase *error* -0,18% dengan rata – rata *error* -1,295°. Dapat disimpulkan persentase *error* kinematika mundur *rack and pinion gear* terhadap sensor *rotary encoder* cukup kecil yaitu berada dibawah 1%.

REFERENSI

- [1] Ima, I. Darmawan, A. Rusdinar and F. Y. Suratman, "Penyemai Benih Otomatis Untuk Rover Pertanian Pintar," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 2178-2179, 2022.
- [2] S. V., D. Z. and D. D., "Design and Analysis of DC Motor Using Softver Tool MATLAB Simulink," in *International Conference on Applied Internet and Information Tecnologies*, Zrenjanin, 2019.
- [3] P. Sutiyasadi, "An Improved DC Motor Position Control Using Differential Evolution Based Structure Specified H_{∞} Robust Controller," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, vol. 7, no. 2, p. 348, 2021.
- [4] J. Shao, K. Ding and D. Wang, "Kinematics Analysis of Incomplete Gear and Rack Pumping Unit," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2095, no. 1, pp. 2-5, 2021.
- [5] D. Guo, H. Li, Y. Wang, S. Ge and X. Bai, "A decoupling method for multi-stage gear transmission error," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 8, p. 3, 2023.
- [6] G.-H. Jang, C.-W. Kim, S.-W. Seo, K.-H. Shin, I.-J. Yoon and J.-Y. Choi, "Torque Characteristic Analysis and Measurement of Magnetic Rack–Pinion Gear Based on Analytical Method," *IEEE Transactions On Magnetics*, vol. 55, no. 7, p. 1, 2019.
- [7] O. KROL, V. SOKOLOV and A. GOLUBENKO, "Modification of Rack-And-Pinion Transmission Design With Increased Resource," *DIAGNOSTYKA*, vol. 23, no. 1, pp. 1-7, 2022.
- [8] L. Steinle, A. Lechler, M. Neubauer and A. Verl, "Experimental investigation into the implications of transmission errors for rack-and-pinion drives," *Production Engineering*, vol. 16, pp. 453-463, 2022.