

## IMPLEMENTASI SISTEM GERAK *HOLONOMIC* PADA ROBOT KRSBI BERODA 2017

### IMPLEMENTATION OF *HOLONOMIC MOTION* IN *INDONESIAN SOCCER WHEELED ROBOT CONTEST 2017*

Muliady<sup>1</sup>, Gerry Arisandy<sup>2</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Maranatha  
Jalan Surya Sumantri no 65, Bandung

<sup>1</sup>mld\_ang@yahoo.com <sup>2</sup>gerryarisandy@gmail.com

#### Abstrak

Pada Kontes Robot Indonesia 2017 divisi Kontes Robot Sepak Bola Indonesia (KRSBI) Beroda, robot harus dapat bermain bola di lapangan dan sebanyak mungkin memasukkan bola ke dalam gawang. Permasalahan manuver pada robot beroda adalah *tuning* dan pengontrolan pergerakan robot yang tidak efisien jika menggunakan konfigurasi roda konvensional, yaitu terdapat beberapa keterbatasan pergerakan. Pada penelitian ini diimplementasikan sistem gerak *holonomic* pada robot KRSBI Beroda untuk mengatasi permasalahan tersebut. *Mecanum drive* merupakan sistem gerak berbasis *holonomic* yang digunakan. Gerakan *mecanum drive*, yaitu gerak ke kiri, kanan, maju, mundur, dan diagonal tanpa mengubah orientasi robot dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan *inverse kinematic* robot *mecanum* beroda empat. Komponen yang digunakan adalah sensor Vex *Integrated Encoder*, aktuator Vex *2-Wire Motor*, dan kontroler Arduino Mega 2560. Sistem gerak *holonomic* menggunakan *mecanum drive* berhasil diimplementasikan. Persamaan *inverse kinematic* dapat digunakan untuk menghitung kecepatan sudut putaran masing-masing motor. Keberhasilan mendekati bola selain pada posisi bola di belakang robot, yaitu sebesar 40-100%. Waktu tempuh robot yang menggunakan roda *mecanum* lebih kecil dibandingkan dengan roda konvensional.

**Kata kunci:** *holonomic, mecanum drive, inverse kinematic, sensor vex integrated encoder*

#### Abstract

*In order to participate in Indonesian Soccer Robot Contest 2017 (KRSBI), Wheeled Robot Field, a robot needs to be able to play soccer and score a goal. In mobile robot field, the arising problems are tuning and motion controlling, especially the less good motion. Problems encountered when using conventional wheel configuration are limitations of movement. In this research, holonomic motion system was implemented to overcome those limitations. Mecanum drive is a motion system based on holonomic motion. Mecanum drive motion includes movements to the left, right, front, back, and diagonals without changing its orientation. The mecanum drive motion could be obtained by using inverse kinematics formulae for four wheeled mecanum robot. Devices used including Vex Integrated Encoder sensor, 2-Wire Motor actuator, and Arduino Mega 2560 controller. Holonomic motion systems using mecanum drive was successfully implemented. Inverse kinematics formulae could be used to calculate the speed of each motor. Robots using mecanum wheel had less travel time compared to robots using conventional wheel.*

**Keywords:** *holonomic, mecanum drive, inverse kinematic*

Tanggal Terima Naskah : 02 November 2017  
Tanggal Persetujuan Naskah : 30 November 2017

## 1. PENDAHULUAN

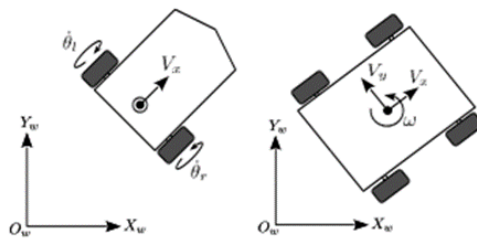
Pada Kontes Robot Indonesia 2017 divisi Kontes Robot Sepak Bola Indonesia (KRSBI) Beroda, robot yang dibuat harus dapat menyelesaikan misi yang telah ditentukan. Misi dari divisi KRSBI Beroda, yaitu robot harus dapat bermain bola di lapangan seperti pemain sepak bola pada umumnya. Keterbatasan yang dimiliki robot, yaitu pada bagian pergerakannya. Robot tidak dapat berpindah ke tempat yang diinginkan secara akurat. Permasalahan pergerakan yang juga dihadapi robot adalah *tuning* dan pengontrolan pergerakan robot yang sulit dilakukan. Keterbatasan untuk dapat bergerak ke arah kiri, kanan, dan diagonal tanpa mengubah orientasinya juga menjadi masalah. Hal ini menyebabkan robot tidak dapat bermain bola dengan baik sehingga misi yang diberikan tidak dapat diselesaikan dengan baik.

Pada penelitian ini dirancang sebuah sistem pergerakan robot, yaitu sistem gerak *holonomic* menggunakan *mecanum drive*. Dengan menggunakan rumus *inverse kinematic* untuk robot yang menggunakan empat buah *mecanum wheels*, diharapkan robot dapat memiliki sebuah sistem gerak yang baik, efisien, dan tepat untuk permainan sepak bola.

## 2. KONSEP DASAR

### 2.1 Sistem Gerak *Omnidirectional*

*Omnidirectional* secara sederhana didefinisikan sebagai kemampuan untuk bergerak ke segala arah. Pada *mobile robot*, ruang yang ditempati robot hanya terdiri atas tiga dimensi, yaitu  $x, y$  (posisi titik pada robot), dan  $\Theta$  (orientasi robot) [1]. Pada sistem gerak diferensial seperti pada Gambar 1 (Kiri), robot dapat bergerak karena adanya perbedaan kecepatan angular roda dan hanya dapat bergerak maju dengan mempengaruhi nilai  $V_x$  dan tidak ada kecepatan *lateral* ke arah samping roda yang dihasilkan. Robot harus berputar terhadap titik tengahnya terlebih dahulu jika ingin mencapai suatu titik atau arah yang diinginkan. Pada robot yang menggunakan sistem gerak *omnidirectional* seperti Gambar 1 (Kanan), robot dapat bergerak ke segala arah tanpa memperhatikan posisi dan orientasinya sehingga kecepatan *linear*  $V_x$  dan  $V_y$ , kecepatan *angular* dapat dihasilkan secara bersamaan. Dengan menggunakan sistem gerak *omnidirectional*, pengontrolan terhadap ketiga nilai tersebut dapat dilakukan sehingga robot memiliki tiga derajat kebebasan (DOF). Sistem gerak *omnidirectional* dapat diklasifikasikan menjadi sistem gerak *holonomic* dan *non-holonomic* [2].



Gambar 1. Sistem Gerak Diferensial (Kiri) dan *Omnidirectional* (Kanan)

## 2.2 Sistem Gerak *Holonomic* dan *Non-Holonomic*

Sistem gerak *holonomic* merupakan sebuah sistem yang jumlah derajat kebebasannya sama dengan jumlah koordinat yang dibutuhkan untuk menyatakan konfigurasi dari sistem tersebut [3]. Di dalam bidang *mobile robot*, istilah *holonomic* diterapkan terhadap sebuah robot tanpa memperhatikan kesatuan bentuk fisik yang membentuk mekanisme yang sebenarnya. *Mobile robot* dengan sistem gerak yang memiliki tiga derajat kebebasan pada suatu bidang dapat dikatakan *holonomic mobile robot*. Sistem gerak *holonomic* dapat membantu dalam merancang gerakan robot karena tidak ada keterbatasan arah robot dapat bergerak. Berdasarkan sifat dasarnya, robot *non-holonomic* memiliki derajat kebebasan lebih sedikit dibandingkan dengan robot *holonomic*. Ciri-ciri robot *holonomic* adalah sebagai berikut:

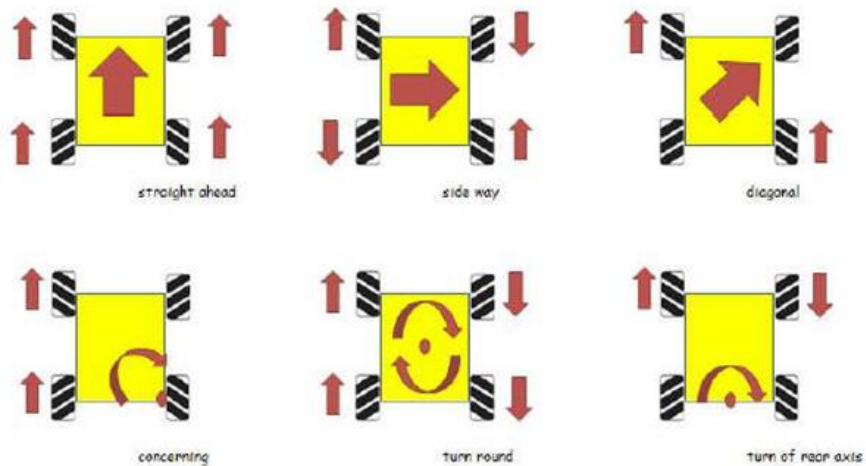
1. Konfigurasi robot dideskripsikan oleh tiga dimensi.
2. Robot memiliki tiga DOF tanpa *singularities*. *Singularities* adalah titik pada bidang yang tidak terjangkau [4].
3. Robot dapat bergerak memutar secara bebas pada absis  $x$ , ordinat  $y$ , dan orientasi  $\Theta$ .
4. Robot dapat berakselerasi pada absis  $x$ , ordinat  $y$ , dan orientasi  $\Theta$ .

Ciri-ciri robot *non-holonomic* adalah sebagai berikut:

1. Konfigurasi robot dideskripsikan oleh lebih dari tiga dimensi.
2. Robot memiliki dua DOF atau tiga DOF dengan *singularities* [1].

## 2.3 Mecanum Drive

*Mecanum Drive* merupakan salah satu jenis gerakan berbasis *holonomic*. Dengan menggunakan *mecanum drive*, robot dapat bergerak ke segala arah sambil mempertahankan orientasi robot ke arah tertentu. *Mecanum drive* menggunakan roda khusus, yaitu *mecanum wheels* (Gambar 3), roda yang terdiri dari satu pusat roda yang dikelilingi sejumlah *roller* yang bergerak secara bebas membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap keliling roda [5]. Dengan bergantung pada masing-masing arah dan kecepatan roda, kombinasi semua gaya yang bekerja menghasilkan gaya total ke arah yang diinginkan sehingga memungkinkan robot untuk bergerak secara bebas. Gambar 2 merupakan gerakan yang dapat dihasilkan oleh *mecanum drive* [6].



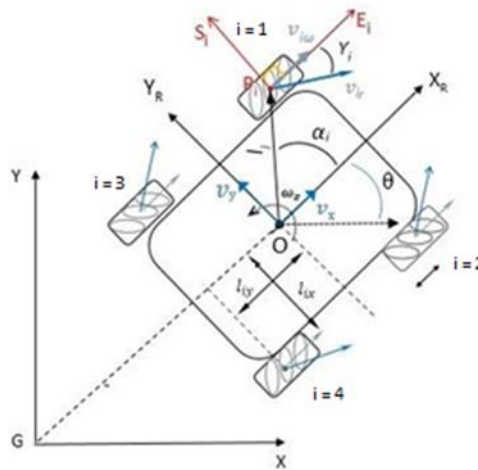
Gambar 2. *Mecanum Drive*



Gambar 3. Mecanum Wheels

## 2.4 Kinematik Robot

Gambar 4 merupakan kinematik robot *mecanum* beroda empat [7].



Gambar 4. Konfigurasi Roda dan Definisi Parameter

$x, y, \theta$ , merupakan posisi robot ( $x, y$ ) dan sudut orientasinya ( $\theta$ ).

$l_{ix}, l_{iy}$ , merupakan setengah dari jarak antara kedua roda depan ( $l_{ix}$ ) dan setengah dari jarak antara roda depan dan roda belakang ( $l_{iy}$ ).

$r_i$ , merupakan jari-jari roda.

$\omega_i$  [rad/s], merupakan kecepatan *angular* roda.

$v_x, v_y$  [m/s], merupakan kecepatan *linear* robot.

$\omega_z$  [rad/s], merupakan kecepatan angular robot.

Rumus *inverse kinematic* untuk robot *mecanum* beroda empat sebagai berikut [7]:

$$\omega_1 = \frac{1}{r} (v_x - v_y - (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{r} (v_x + v_y + (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (2)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{r} (v_x + v_y - (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (3)$$

$$\omega_4 = \frac{1}{r} (v_x - v_y + (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (4)$$

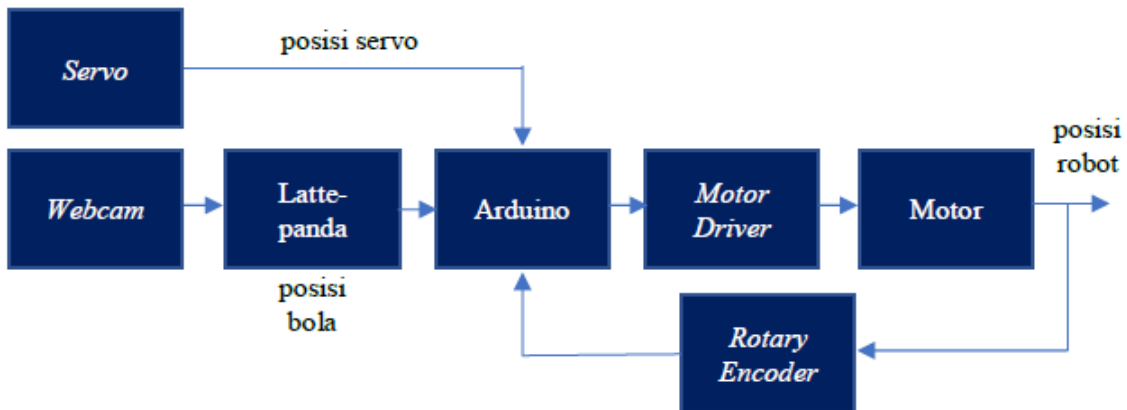
Kecepatan resultan ( $v_R$ ) dan arahnya ( $\rho$ ) pada koordinat sumbu ( $x,y,z$ ) dapat diperoleh melalui persamaan [7]:

$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{v_x}{v_y}\right) \dots \dots \dots (5)$$

$$v_R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \dots \dots \dots (6)$$

### 3. PERANCANGAN DAN REALISASI

Dalam permainan sepak bola, robot memerlukan mobilitas yang tinggi dan efektif. Untuk itu, dipilihlah sistem gerak *holonomic* menggunakan *mecanum drive* sebagai sistem gerak robot. Diagram blok sistem pergerakan robot ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Sistem Pergerakan Robot

Dalam penelitian ini, pembahasan sistem gerak robot berfokus pada arah gerakan robot, sudut yang dihasilkan melalui pergerakan robot dan pengaturan kecepatan robot termasuk kecepatan masing-masing roda. Untuk menghasilkan gerakan ke kiri, kanan, maju, mundur, diagonal 45° (kiri depan), 135° (kiri belakang), -45° (kanan depan), dan 135° (kanan belakang) kecepatan motor yang diberikan harus sama besar. Dengan memberikan kecepatan yang sama pada setiap motor pada saat yang bersamaan, kedelapan gerakan tersebut dapat diperoleh tanpa mengubah orientasi robot. Tabel 1 merupakan tabel kecepatan motor yang digunakan saat keadaan *free speed* dan tegangan kerja 7,6 V.

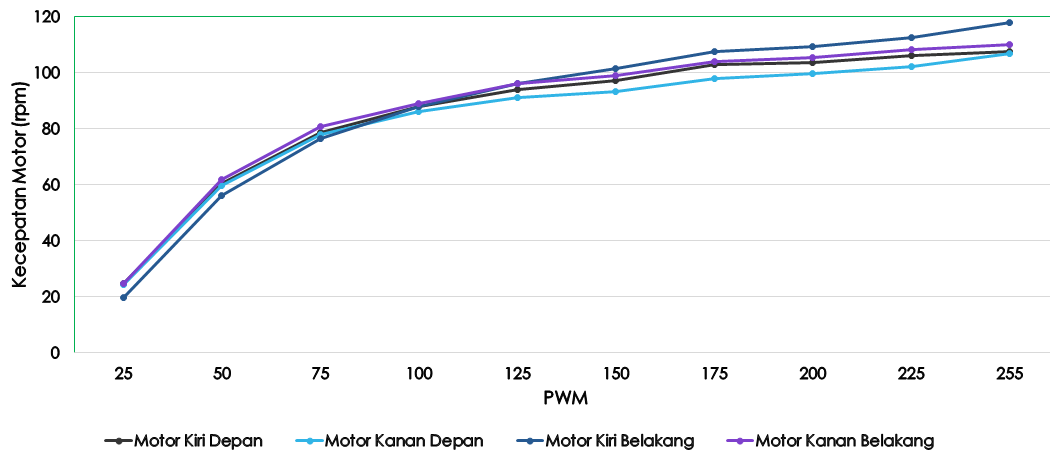
Tabel 1. Kecepatan Motor yang digunakan

Motor Kiri Depan				Motor Kanan Depan			
PWM	Kecepatan (rpm)		Rata-rata (rpm)	PWM	Kecepatan (rpm)		Rata-rata (rpm)
	Min	Max			Min	Max	
255	104.89	109.71	107.3	255	105.82	107.73	106.775
225	103.09	108.71	105.9	225	101.34	103.09	102.215
200	100.49	106.77	103.63	200	98.83	100.49	99.66
175	101.34	103.98	102.66	175	96.43	98.83	97.63
150	95.66	98.83	97.24	150	91.98	94.16	93.07
125	92.7	94.9	93.8	125	89.24	92.7	90.97
100	86.65	88.58	87.62	100	84.81	87.28	86.045
75	77.65	79.72	78.69	75	76.65	78.67	77.66
50	59.79	61.01	60.4	50	58.91	60.09	59.5
25	24.21	25.28	24.75	25	23.77	24.5	24.135

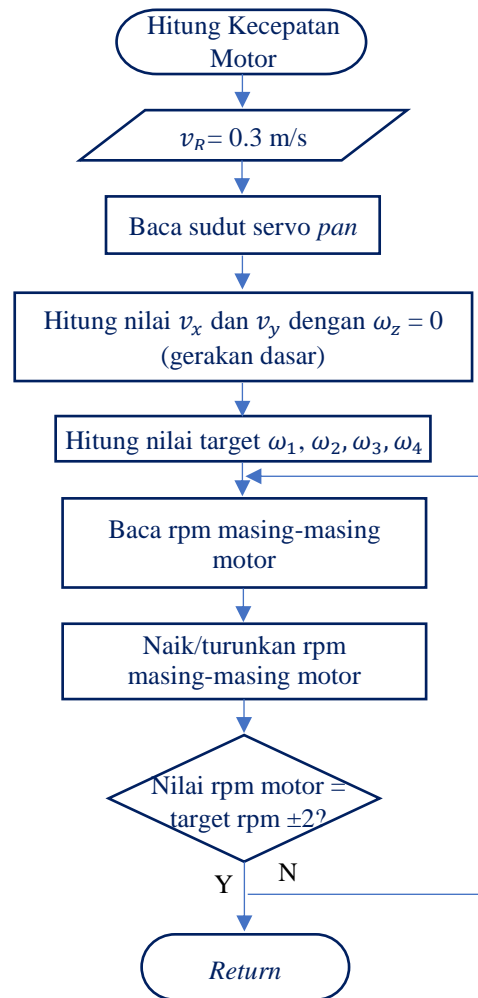
  

Motor Kiri Belakang				Motor Kanan Belakang			
PWM	Kecepatan (rpm)		Rata-rata (rpm)	PWM	Kecepatan (rpm)		Rata-rata (rpm)
	Min	Max			Min	Max	
255	116.1	119.58	117.84	255	107.73	111.76	109.745
225	110.72	113.89	112.305	225	105.82	110.72	108.27
200	107.73	110.72	109.225	200	103.09	107.73	105.41
175	104.89	109.71	107.3	175	102.2	105.82	104.01
150	100.49	102.2	101.345	150	96.43	101.34	98.885
125	94.9	97.22	96.06	125	94.16	98.02	96.09
100	86.65	89.24	87.945	100	86.65	91.28	88.965
75	75.21	77.65	76.43	75	78.67	82.47	80.57
50	55.11	56.94	56.025	50	59.2	63.91	61.555
25	19.38	20.03	19.705	25	21.24	28.27	24.755

Berdasarkan tabel 1 dapat dibentuk sebuah grafik (Gambar 6) hubungan antara nilai PWM dan kecepatan (rpm) motor yang dihasilkan. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa karakteristik keempat motor berbeda-beda. Perbedaan karakteristik motor ini menyebabkan perlunya *rotary encoder*, sehingga tidak perlu melihat nilai PWM lagi, yang penting adalah menjaga kecepatan (rpm) masing-masing motor tetap sama maka robot dapat lurus ke arah yang diinginkan (maju, mundur, kiri, kanan, dan diagonal).



Gambar 6. Grafik Hubungan Nilai PWM Terhadap Kecepatan Motor



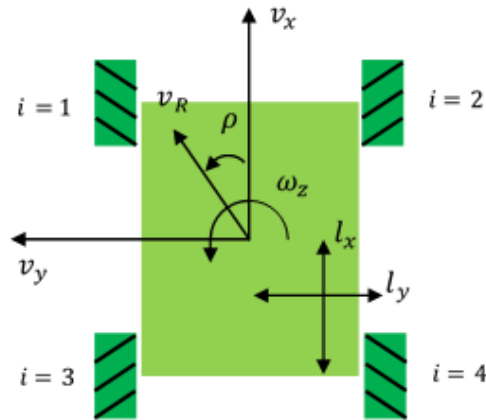
Gambar 7. Diagram alir perhitungan kecepatan motor

Gambar 7 menunjukkan diagram alir proses perhitungan kecepatan motor. Untuk menghitung kecepatan motor, pertama-tama baca sudut servo *pan* (sudut bola terhadap robot) dan memberikan nilai kecepatan resultan robot  $v_R = 0,3$  m/s . Jika sudut dan kecepatan resultannya diketahui maka dapat dihitung nilai  $v_x$  dan  $v_y$ . Dengan memberikan nilai  $\omega_z = 0$ , dapat dihitung nilai target  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  yang harus dicapai untuk menghasilkan sudut tersebut.

Selanjutnya baca kecepatan masing-masing motor menggunakan *rotary encoder* kemudian naikkan atau turunkan rpmnya hingga mencapai target yang diinginkan. Apabila belum mencapai target maka motor akan menaikkan atau menurunkan kecepatannya sampai kurang lebih sama dengan target.

Untuk menghitung kecepatan yang harus diberikan kepada motor agar dapat membentuk suatu gerakan ke arah tertentu digunakan rumus *inverse kinematic*. Gambar 8 menjelaskan definisi dari parameter yang digunakan.  $l_x$  merupakan setengah dari jarak antara roda depan dan  $l_y$  merupakan setengah dari jarak antara roda depan dan roda belakang.  $v_x, v_y$  merupakan kecepatan *linear* robot,  $\omega_z$  merupakan kecepatan *angular* robot dan  $r$  merupakan jari-jari roda.

Pada penelitian ini, nilai  $l_x = 0.14$  m, nilai  $l_y = 0.185$  m, nilai  $\omega_z = 0$  atau tidak ada kecepatan *angular* robot dan nilai  $r = 0.0508$  m.



Gambar 8. Definisi parameter yang digunakan

Pertama, tentukan terlebih dahulu target kecepatan resultan ( $v_R$ ) robot yang diinginkan. Pemilihan nilai kecepatan resultan disesuaikan dengan kemampuan robot. Pada penelitian ini, nilai kecepatan resultan yang dapat diberikan kepada robot adalah 0,12-0,44 m/s. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan eksperimen gerak maju, yaitu nilai rpm maksimal yang dapat diberikan masing-masing motor dan nilai rpm minimum robot agar dapat bergerak. Untuk dapat melakukan semua jenis gerakan, maka diambil nilai  $v_R$  sebesar 0,3 m/s atau kurang lebih setengah dari rentang kecepatan yang memungkinkan.

Pengambilan nilai tengah tersebut dikarenakan pada gerakan diagonal yang hanya menggunakan dua buah motor mengharuskan motor berputar lebih cepat untuk mencapai target  $v_R$ . Nilai  $v_R = 0,3$  m/s masih mungkin didapatkan oleh robot dengan menggunakan dua buah motor. Selanjutnya perhitungan nilai  $v_x$  dan  $v_y$  menggunakan rumus jika diketahui kecepatan resultan ( $v_R$ ) dan sudutnya ( $\rho$ ).

$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{v_x}{v_y}\right) \dots\dots\dots (7)$$

$$v_R = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \dots\dots\dots (8)$$

Contohnya, jika diinginkan robot bergerak maju dengan kecepatan 0,3 m/s, maka nilai  $v_R = 0,3$  m/s dan  $\rho = 0^\circ$ . Dengan menggunakan persamaan 7 dan 8, dapat diperoleh nilai  $v_x = 0,3$  m/s dan  $v_y = 0$ . Contoh lain jika diinginkan robot serong ke arah kiri depan sebesar  $45^\circ$  dengan kecepatan 0,3 m/s, maka nilai  $v_R = 0,3$  m/s dan  $\rho = 45^\circ$  sehingga dapat dihitung nilai  $v_x = 0,212$  m/s dan  $v_y = 0,212$  m/s. Jika diketahui  $v_x$  dan  $v_y$ , maka target kecepatan masing-masing motor untuk delapan gerakan dasar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\omega_1 = \frac{1}{r}(v_x - v_y - (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (9)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{r}(v_x + v_y + (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (10)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{r}(v_x + v_y - (l_x + l_y)\omega_z) \dots\dots\dots (11)$$



$$\omega_4 = \frac{1}{r}(v_x - v_y + (l_x + l_y)\omega_2) \dots \dots \dots (12)$$

Untuk gerak maju dengan  $v_R = 0,3$  m/s diperoleh nilai  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ ,  $\omega_4$  masing-masing 5,9 rad/s. Untuk gerak menyerong ke kiri depan dengan sudut  $45^\circ$  diperoleh nilai  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  masing-masing 8,27 rad/s. Nilai positif atau negatif  $v_x$ ,  $v_y$ , dan  $\omega_i$  hanya menunjukkan arah saja sehingga yang diperhitungkan hanya magnitudanya. Jika diperoleh nilai  $\omega_i$  negatif, diambil nilai magnitudanya saja dan arah putar motor akan diatur oleh *motor driver* untuk membentuk gerakan. Sebagai contoh, pada gerak serong kiri belakang, nilai target  $\omega_i$ ,  $\omega_4$  yang dihitung bernilai negatif sehingga diambil magnitudanya saja dan arah putarnya diatur menggunakan *pin motor direction* pada *motor driver* (*Counter Clockwise* atau *Clockwise*).

Masing-masing motor harus dibuat berputar dengan kecepatan yang sama dengan target kecepatan yang telah dihitung. Nilai target  $\omega_i$  yang diperoleh dari perhitungan memiliki satuan rad/s, sedangkan nilai bacaan sensor *rotary encoder* memiliki satuan rpm sehingga perlu dilakukan konversi [8].

## 4. DATA PENGAMATAN DAN ANALISIS DATA

### 4.1 Pengujian Sensor *Rotary Encoder*

Pengujian sensor *rotary encoder* bertujuan untuk mengetahui ketepatan pembacaan kecepatan dan jumlah putaran motor. Berikut ini merupakan tabel pembacaan sensor *rotary encoder*.

Tabel 2. Kecepatan Motor Tinggi

Kecepatan (rpm)	Jumlah putaran	Sudut ( $^\circ$ )	Rata-rata sudut yang dihasilkan ( $^\circ$ )	% Error
100,49 – 103,09	5	1.800	1831,2	1,73
	10	3.600	3630,4	0,84
	15	5.400	5430,6	0,56
	20	7.200	7233,2	0,46
	25	9.000	9033,4	0,37

Tabel 3. Kecepatan Motor Menengah

Kecepatan (rpm)	Jumlah putaran	Sudut ( $^\circ$ )	Rata-rata sudut yang dihasilkan ( $^\circ$ )	% Error
89,9 – 92,7	5	1.800	1828,4	1,58
	10	3.600	3630,8	0,86
	15	5.400	5432,4	0,6
	20	7.200	7227,8	0,39
	25	9.000	9030,8	0,34

Tabel 4. Kecepatan Motor Rendah

Kecepatan (rpm)	Jumlah putaran	Sudut ( $^\circ$ )	Rata-rata sudut yang dihasilkan ( $^\circ$ )	% Error
58,33 – 59,49	5	1.800	1.815,8	0,88
	10	3.600	3.619	0,53
	15	5.400	5.419,4	0,36
	20	7.200	7.217,4	0,24
	25	9.000	9.015,4	0,17

Pada pengujian sensor *rotary encoder*, motor harus berputar sebanyak jumlah putaran yang telah ditentukan. Selanjutnya dilihat kesesuaian jumlah sudut yang dihasilkan dengan sudut yang ditentukan. Pengambilan data dilakukan untuk tiga kecepatan yang berbeda pada saat kecepatan motor *free speed*. Pada saat kecepatan motor tinggi (Tabel 2) sudut yang dihasilkan memiliki *offset* sekitar  $30,4^{\circ}$ - $33,4^{\circ}$  atau memiliki *error* sebesar 0,37 – 1,73 %. Pada saat kecepatan motor menengah (Tabel 3) sudut yang dihasilkan memiliki *offset* sekitar  $27,28^{\circ}$ - $32,4^{\circ}$  atau memiliki *error* 0,34 – 1,58 %. Pada saat kecepatan motor rendah (Tabel 4) sudut yang dihasilkan *offset* sekitar  $15,4^{\circ}$  –  $19,4^{\circ}$  atau memiliki *error* 0,17 – 0,88 %. Dapat disimpulkan bahwa *offset* semakin besar apabila kecepatan motor semakin tinggi. *Offset* ini terjadi karena pada saat motor diperintahkan untuk berhenti, motor tersebut tidak langsung berhenti atau adanya momentum sudut.

#### 4.2 Pengujian Jarak Perpindahan Robot

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketepatan jumlah putaran yang dibaca *rotary encoder* pada saat diimplementasikan pada robot. Tabel 5 merupakan tabel pengujian jarak perpindahan robot.

Tabel 5. Pengujian Jarak Pindah

Jarak-X (mm)	Jarak-Y (mm)	Jarak rotasi-Z ( $^{\circ}$ )
1990	1920	1780
1990	1940	1785
1987	1970	1800
1990	1920	1800
2000	1940	1810

Pada pengujian jarak perpindahan robot, diberikan target jarak X atau jarak ke arah depan robot yang harus ditempuh sejauh 2.000 mm, jarak Y atau arah samping robot sejauh 2.000 mm dan rotasi sebanyak lima putaran atau  $1.800^{\circ}$ . Dengan membagi jarak X tersebut dengan keliling roda maka dapat diperoleh jumlah putaran yang harus diberikan oleh motor. Dari hasil pengamatan dapat dilihat bahwa pembacaan sudut *rotary encoder* cukup akurat karena jarak tempuh robot yang dihasilkan antara 1.987-2.000 mm atau hampir sama dengan target jarak yang diinginkan. Untuk perpindahan ke arah Y atau ke arah samping robot, tidak dapat ditentukan jumlah putaran motor yang dibutuhkan untuk mencapai target jarak sejauh 2.000 mm. Untuk itu, dilakukan eksperimen jarak yang dihasilkan terhadap jumlah putaran motor. Jarak yang diperoleh dari jumlah putaran motor sebanyak 10 kali ke arah samping, yaitu 2.480 mm sehingga untuk target sejauh 2.000 mm mengharuskan motor berputar delapan kali. Perpindahan ke arah Y yang dihasilkan sebesar 1.920 – 1.970 mm, tidak terlalu akurat dengan target jarak yang diinginkan. Untuk rotasi robot terhadap sumbu Z (ke atas robot) juga tidak dapat dipastikan jumlah putaran motor yang dibutuhkan untuk mencapai perputaran robot sebesar  $1.800^{\circ}$ . Berdasarkan eksperimen, untuk menghasilkan rotasi robot sebesar  $360^{\circ}$  (1 putaran) diberikan jumlah putaran masing-masing motor 7,5 kali. Ketika motor berputar 37,5 kali, hasil rotasi robot terhadap sumbu-Z menghasilkan jumlah sudut sebesar  $1.780^{\circ}$  -  $1.810^{\circ}$  (cukup akurat).

### 4.3 Pengujian Kecepatan Gerak Robot

Pengujian kecepatan gerak robot bertujuan untuk mengukur kecepatan minimal dan maksimal yang dapat diberikan oleh robot. Selain itu, dapat dilihat kesesuaian antara target kecepatan yang diinginkan dan kecepatan yang dihasilkan. Tabel 6 merupakan tabel pengujian kecepatan gerak robot.

Tabel 6. Kecepatan Gerak Robot

$v_R$ target (m/s)	Jarak (m)	Waktu rata-rata (s)	$v_R$ sebenarnya (m/s)
0.12	2	17.4	0.115
0.2	2	10.48	0.19
0.3	2	7.4	0.27
0.44	2	5.85	0.34

Pengujian yang dilakukan, yaitu dengan memberikan nilai kecepatan resultan yang diinginkan kepada robot, kemudian dihitung kecepatan masing-masing motornya. Setelah itu, diberikan jarak sejauh 2 m dan dihitung waktu tempuh robot menggunakan *stopwatch*. Untuk nilai kecepatan resultan 0,12 m/s diperoleh kecepatan sebenarnya, yaitu 0,115 m/s, untuk kecepatan 0,2 m/s diperoleh 0,19 m/s dan untuk 0,23 m/s diperoleh nilai kecepatan 0,27 m/s. Nilai kecepatan sebenarnya yang dihasilkan mendekati nilai kecepatan yang diinginkan. Untuk target kecepatan resultan 0,44 m/s didapat hasil yang berbeda cukup jauh, yaitu 0,34 m/s. Hal ini dikarenakan pada saat robot menaikkan kecepatannya menuju target kecepatan yang diinginkan dibutuhkan waktu untuk mencapai target tersebut.

### 4.4 Pengujian Rumus yang Digunakan

Tabel 7 merupakan tabel data hasil pengukuran kecepatan yang dihasilkan oleh masing-masing motor dengan menggunakan rumus *inverse kinematic*.

Tabel 7. Pengujian Rumus yang Digunakan

Arah	$v_R$ (m/s)	$v_x$ (m/s)	$v_y$ (m/s)	$\omega_z$ (rad/s)	Wheel 1 (rpm)	Wheel 2 (rpm)	Wheel 3 (rpm)	Wheel 4 (rpm)
Maju	0.3	0.3	0	0	59.49	57.21	56.67	61.64
Mundur	0.3	-0.3	0	0	-52.91	-58.33	-55.88	-54.35
Kiri	0.3	0	0.3	0	-58.05	56.94	55.36	-53.62
Kanan	0.3	0	-0.3	0	56.39	-60.09	-57.49	56.39
Kiri Depan	0.3	0.21	0.21	0	0	79.72	78.16	0
Kanan Depan	0.3	0.21	-0.21	0	80.8	0	0	79.19
Kiri belakang	0.3	-0.21	0.21	0	-83.04	0	0	-84.21
Kanan Belakang	0.3	-0.21	-0.21	0	0	-79.19	-77.15	0

Pada pengujian ini ditentukan kecepatan resultan sebesar 0,3 m/s untuk semua jenis gerakan. Untuk gerak maju, mundur, kiri, dan kanan target kecepatan yang diperoleh dari perhitungan, yaitu sebesar 56,34 rpm. Pada Tabel 7 dapat dilihat kecepatan motor 1-4 yang dihasilkan mendekati nilai yang diinginkan. Nilai positif atau negatif hanya menunjukkan arah putaran motornya. Untuk gerak serong kiri depan, serong kanan depan, serong kiri belakang, dan serong kanan belakang target kecepatan yang diperoleh dari perhitungan adalah 79,55 rpm untuk masing-masing motor. Pada Tabel 7 dapat dilihat kecepatan motor 2 dan 3 yang dihasilkan juga mendekati nilai yang diinginkan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa rumus *inverse kinematic* dapat digunakan untuk mengatur kecepatan masing-masing motor.

#### 4.5 Pengujian Keberhasilan Robot Mendekati Bola

Pengujian ini bertujuan untuk melihat ketepatan dan keberhasilan robot dalam mendekati bola. Pengujian keberhasilan mendekati bola dibagi menjadi dua jarak bola yang berbeda, yaitu 1,5 m dan 3 m dengan posisi sudut bola 0° (bola di depan robot), 90° (kiri), -90° (kanan), 180° (belakang), 45° (kiri depan), -45° (kanan depan), 135° (kiri belakang), dan -135° (kanan belakang). Berikut merupakan tabel data hasil pengujian robot mendekati bola.

Tabel 8. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 0° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
0	1,26	Berhasil
0	1,23	Berhasil
0	1,27	Berhasil
0	1,22	Berhasil
0	1,23	Berhasil

Tabel 9. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 90° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
90	3,56	Berhasil
90	3,69	Berhasil
90	3,87	Berhasil
90	3,44	Berhasil
90	0	Tidak Berhasil

Tabel 10. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut -90° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-90	3,54	Berhasil
-90	3,49	Berhasil
-90	0	Tidak Berhasil
-90	3,71	Berhasil
-90	0	Tidak Berhasil

Tabel 11. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 180° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil

Tabel 12. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 180° Jarak 1,5 m (Lanjutan)

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil
180	5,94	Berhasil

Tabel 12. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 45° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
45	1,94	Berhasil
45	0	Tidak Berhasil
45	1,71	Berhasil
45	1,74	Berhasil
45	1,90	Berhasil

Tabel 13. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut -45° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-45	1,84	Berhasil
-45	1,74	Berhasil
-45	0	Tidak Berhasil
-45	1,93	Berhasil
-45	0	Tidak Berhasil

Tabel 14. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 135° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
135	4,72	Berhasil
135	4,94	Berhasil
135	0	Tidak Berhasil
135	4,88	Berhasil
135	0	Tidak Berhasil

Tabel 15. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut -135° Jarak 1,5 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-135	4,81	Berhasil
-135	0	Tidak Berhasil
-135	0	Tidak Berhasil
-135	4,64	Berhasil
-135	0	Tidak Berhasil

Keberhasilan robot mendekati bola pada jarak 1,5 m untuk sudut  $0^\circ$  sebesar 100%, sudut  $90^\circ$  sebesar 80%, sudut  $-90^\circ$  sebesar 60%, sudut  $180^\circ$  sebesar 20%, sudut  $45^\circ$  sebesar 80%, sudut  $-45$  sebesar 60%, sudut  $135^\circ$  sebesar 60%, sudut  $-135^\circ$  sebesar 40%. Algoritma yang dibuat, yaitu robot akan mundur apabila bola tidak terdeteksi, kemudian mendekati bola pada saat bola sudah terdeteksi. Untuk posisi bola  $180^\circ$  keberhasilannya hanya 20% karena posisi bola di belakang robot sehingga robot akan menabrak bola. Nilai 20% ini terjadi ketika bola tertabrak dan bergerak ke arah samping sehingga robot dapat mendeteksinya.

Tabel 16. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut  $0^\circ$  Jarak 3 m

Sudut bola ( $^\circ$ )	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
0	2,71	Berhasil
0	2,74	Berhasil
0	2,74	Berhasil
0	2,74	Berhasil
0	2,72	Berhasil

Tabel 17. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut  $90^\circ$  Jarak 3 m

Sudut bola ( $^\circ$ )	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
90	5,31	Berhasil
90	0	Tidak Berhasil
90	0	Tidak Berhasil
90	5,22	Berhasil
90	0	Tidak Berhasil

Tabel 18. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut  $-90^\circ$  Jarak 3 m

Sudut bola ( $^\circ$ )	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-90	0	Tidak Berhasil
-90	0	Tidak Berhasil
-90	4,98	Berhasil
-90	5,14	Berhasil
-90	0	Tidak Berhasil

Tabel 19. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut  $180^\circ$  Jarak 3 m

Sudut bola ( $^\circ$ )	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil
180	0	Tidak Berhasil

Tabel 20. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 45° Jarak 3 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
45	3,86	Berhasil
45	3,63	Berhasil
45	3,77	Berhasil
45	0	Tidak Berhasil
45	3,79	Berhasil

Tabel 21. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut -45° Jarak 3 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-45	3,87	Berhasil
-45	3,66	Berhasil
-45	0	Tidak Berhasil
-45	3,61	Berhasil
-45	0	Tidak Berhasil

Tabel 22. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut 135° Jarak 3 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
135	7,95	Berhasil
135	0	Tidak Berhasil
135	0	Tidak Berhasil
135	8,07	Berhasil
135	0	Tidak Berhasil

Tabel 23. Keberhasilan Mendekati Bola Sudut -135° Jarak 3 m

Sudut bola (°)	Jarak Tempuh (m)	Keterangan
-135	0	Tidak Berhasil
-135	8,13	Berhasil
-135	0	Tidak Berhasil
-135	7,84	Berhasil
-135	0	Tidak Berhasil

Persentase keberhasilan mendekati bola pada jarak 3 m saat bola berada di sudut 0°, yaitu 100%, sudut 90° sebesar 40%, sudut -90° sebesar 40%, sudut 180° sebesar 0%, sudut 45° yaitu 80%, sudut -45° sebesar 60%, sudut 135° sebesar 40%, dan sudut -135° sebesar 40%. Dari data yang dihasilkan dapat disimpulkan bahwa jarak bola terhadap robot mempengaruhi keberhasilan mendekati bola. Pada jarak bola 1,5 m untuk keseluruhan sudut mayoritasnya memiliki tingkat keberhasilan mendekati bola lebih besar dibandingkan dengan jarak 3 m. Hal ini terjadi karena pada saat menyerong gerakannya kurang sempurna. Sebagai contoh, pada saat bola berada di samping robot, robot akan mundur terlebih dahulu sampai bola sudah terdeteksi namun gerakan serong robot tidak bisa mencapai bola karena arah kemiringan gerakannya lebih mendekati sudut 0° dibandingkan dengan 90° atau -90°.

#### 4.6 Perbandingan *Mecanum Wheels* dengan Roda Konvensional

Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan penggunaan roda *mecanum wheels* dan roda konvensional pada robot KRSBI Beroda. Tabel 24 menunjukkan data waktu tempuh robot untuk mencapai suatu titik.

Tabel 24. Waktu Tempuh *Mecanum Wheels* dan Roda Konvensional

Gerakan	Jarak (m)	Sudut (°)	Waktu Tempuh (s)	
			Mecanum Wheels	Roda Konvensional
Maju	1,5	0	5,1	5,1
Kiri		90	5,9	6,5
Diagonal Kiri Depan		45	5,6	5,9

Pengujian dilakukan dengan mengarahkan robot untuk bergerak ke suatu titik pada lapangan. Posisi titik target berjarak 1,5 m dengan sudut 0° terhadap robot (di depan robot), 45° (diagonal kiri depan robot), dan 90° (tepat di kiri robot). Kecepatan robot yang digunakan, yaitu 0,3 m/s untuk roda konvensional dan *mecanum wheels*. Roda konvensional yang digunakan, yaitu kombinasi roda *omniwheel* untuk kedua roda depan dan *traction wheels* untuk kedua roda belakang. Jenis gerakan yang digunakan, yaitu *differential drive*. Tabel 24 menunjukkan waktu tempuh robot yang menggunakan *mecanum wheels* untuk target posisi 45° dan 90° lebih kecil dibandingkan dengan roda konvensional. Hal ini terjadi karena roda konvensional memerlukan perubahan arah robot terlebih dahulu untuk mencapai titik target, sedangkan *mecanum wheels* dapat langsung bergerak ke titik target.

#### 5. KESIMPULAN

Dengan memperhatikan data pengamatan dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Perancangan dan realisasi sistem gerak *holonomic* menggunakan *mecanum drive* untuk robot KRSBI Beroda berhasil dilakukan.
2. Perputaran motor yang diuji memiliki *offset* pada pembacaan jumlah putarannya karena pada saat motor diperintahkan untuk berhenti masih terdapat momentum sudut.
3. Dari hasil percobaan, rumus *inverse kinematic* untuk robot yang menggunakan empat *mecanum wheels* dapat digunakan untuk menentukan kecepatan masing-masing motor.
4. Keberhasilan mendekati bola pada saat posisi bola di belakang robot, yaitu sebesar 0-20% karena robot menabrak bola tersebut pada saat mundur sehingga tidak berhasil mendapatkan bola. Keberhasilan mendekati bola selain pada posisi bola di belakang robot, yaitu sebesar 40-100%.
5. Waktu tempuh robot yang menggunakan *mecanum wheels* untuk target posisi 45° dan 90° lebih kecil dibandingkan dengan roda konvensional.

#### REFERENSI

- [1] Goris, K. 2004. *Autonomous Mobile Robot: Mechanical Design*. Belgium: Doctoral Thesis, Vrije University of Brussel.
- [2] Safar, M.J.A. 2015. *Holonomic and Omnidirectional Locomotion Systems for Wheeled Mobile Robots. A Review*. Jurnal Teknologi, Vol 77 No 28 : 91-97.



- [3] Khatib, O., R. Holmberg. 2000. *Development and Control of a Holonomic Mobile Robot for Mobile Manipulation Tasks*. International Journal of Robotics Research, Vol 19 No 11 : 1066-1074.
- [4] Spong, M.W., S.Hutchinson, M. Vidyasagar. 2004. *Robot Dynamics and Control. Second Edition*.
- [5] McInerney, Ian. *Simplistic Control of Mecanum Drive*. FCR Team 2022.
- [6] Zufri, M.A.R. 2014. *Omni Directional Control Algorithm for Mecanum Wheel*. Melaka: Tugas Akhir, Universiti Teknikal Malaysia.
- [7] Qiao, B., H. Taheri and N. Ghaeminezhad. 2015. *Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot*. International Journal of Computer Applications, Vol 113 No 3 : 6-9.
- [8] Arisandy, Gerry. 2017. *Perancangan dan Realisasi Robot KRSBI Beroda 2017 Menggunakan Sistem Gerak Holonomic*. Bandung: Tugas Akhir, Universitas Kristen Maranatha.