

**APLIKASI MODEL MOBILE MANIPULATOR PADA ROBOT  
PENJINAK BOM**

***MODEL APLICATION ON MOBILE MANIPULATOR BOMB  
DISPOSAL ROBOT***

**RANDIS**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

**APLIKASI MODEL MOBILE MANIPULATOR PADA ROBOT  
PENJINAK BOM**

**Tesis**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister**

**Program Studi  
Teknik Mesin / Konstruksi Mesin**

**Disusun dan diajukan oleh**

**RANDIS  
P2202211403**

**Kepada**

**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2013**

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : RANDIS

Nomor Pokok : P2202211403

Program studi : Teknik Mesin / Konstruksi Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 1 Agustus 2013

Yang menyatakan,

**RANDIS**

## PRAKATA



*Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,*

Puji syukur atas segala nikmat yang begitu banyak yang Allah *subhanahu wa ta'ala* anugerahkan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Aplikasi Model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom** sesuai dengan waktu yang telah di tentukan.

*“ Jika kamu menghitung-hitung nikmat Allah, maka niscaya kamu tidak akan dapat menentukan jumlahnya”. [QS. An Nahl:18]*

*“ Dan apa saja nikmat yang ada pada kamu, maka dari Allahlah (datangngya)”. [QS. An Nahl:53]*

Tugas Akhir ini merupakan kewajiban dan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Master pada Jurusan Mesin Fakultas Teknik Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini melibatkan banyak pihak. Atas dukungan dan bantuannya kami mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. **Bapak Rafiuddin Syam, ST., M.Eng., PhD.**, selaku ketua Program Studi Pascasarjana Teknik Mesin sekaligus sebagai ketua komisi penasehat atas segala waktu dan bimbingannya selama penyusunan tesis ini.

2. **Prof. Dr. Ir. H.Hammada Abbas, MSME**, selaku anggota komisi penasehat atas segala waktu dan bimbingannya selama penyusunan tesis ini..
3. **Prof. Dr. Ir. Syukri Himran, MSME**, selaku Ketua Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
4. **Dr. Eng, Jalaluddin, ST, MT.** selaku Anggota Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
5. **Dr.Ir.Johannes Leonard, DEA**, selaku Anggota Tim Penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian tesis ini.
6. **Dosen dan Staff karyawan pada Program Pascasarjana Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin** yang telah memberikan pengetahuan serta membimbing penulis selama proses perkuliahan.
7. **Segenap Tekhnisi di Workhsop Fakultas Teknik Gowa**, yang telah membantu dalam penyelesain Tugas Akhir ini.
8. **Ibunda H. Haya dan Ayahanda H. Baharuddin** yang tak henti-hentinya mendoakan dan memberikan bantuan financial demi tercapainya penyelesaian Tugas Akhir ini.
9. **Istri tercinta, Nurul Hardiyanti** yang setia mendampingi dan memberi semangat.

10. **Sahabat terbaikku, Zulkifli, Saiful, Pak Edi, Hamka, Pak John dan Pak Iqbal** serta seluruh teman-teman yang telah memberikan semangat dan dorongannya. Terima kasih untuk semuanya.

Penulis menyadari dalam penyusunan Tugas Akhir kami masih jauh dari kesempurnaan. Akhir kata penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun karena penulis sangat menyadari sepenuhnya bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dan tidak lepas dari kekurangan karena sesungguhnya kesempurnaan itu hanyalah milik Allah *subhanahu wa ta'ala*.

Harapan terakhir penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan digunakan sebagaimana mestinya bagi semua pihak khususnya bagi mahasiswa di Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Makassar, 1 Agustus 2013

Randis

## ABSTRAK

**RANDIS.** Aplikasi Model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom (dibimbing oleh **Rafiuddin Syam** dan **Hammada Abbas**).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun robot penjinak bom serta menghitung kinematika manipulator dan mobile robot, kemudian mengujinya pada program matlab.

Penelitian dilakukan di workshop Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin Gowa. Data yang diambil adalah panjang setiap lengan dari manipulator robot, jari-jari roda, lebar robot, dan jarak antara titik tengah antara 2 roda. Perhitungan kinematika mobile manipulator selanjutnya di formulasikan dan di simulasikan pada program matlab, selanjutnya merancang robot penjinak bom sesuai dengan perhitungan dan simulasi yang telah di lakukan.

Hasil penelitian diperoleh inverse kinematik dari kinematika manipulator yaitu  $\theta_1 = 47,5003^\circ$ ,  $\theta_2 = 226,9114^\circ$ ,  $\theta_3 = 85,5884^\circ$ , perhitungan mobile robot untuk kecepatan diperoleh  $\dot{x} = 5,932\pi$ ,  $\dot{y} = 10,155\pi$   $\dot{\theta} = 13,33\pi$ . Sedangkan perhitungan mobile robot untuk percepatan diperoleh  $\ddot{x} = -15,07$ ,  $\ddot{y} = -5,59$ ,  $\ddot{\theta} = 10,66$ . Simulasi pada program Matlab dengan merubah variabel sudut lengan robot menggambarkan pergerakan lengan dari aktuator robot.

Kata kunci : robot penjinak bom, mobile manipulator, program Matlab.

## ABSTRACT

**RANDIS.** Model Application on Mobile Manipulator Bomb Disposal Robot (mentored by **Rafiuddin Syam** and **Hammada Abbas**).

This research aims to design a bomb disposal robot and calculating manipulator and mobile robot kinematics, and then test it on matlab program.

The research was conducted in the Department of Mechanical Engineering workshop Hasanuddin Universitas of Gowa. The data is taken from the long arm robotic manipulator, the radius of the wheel, the width of the robot, and the distance between the midpoints of the two wheels. Mobile manipulator kinematics calculations further formulated and simulated on matlab program, further designed a bomb disposal robot in accordance with the calculations and simulations that have been done.

The results obtained by the inverse kinematics of the manipulator kinematics  $^{\circ} \theta_1 = 47.5003$ ,  $\theta_2 = 226.9114$   $^{\circ}$ ,  $\theta_3 = 85.5884$   $^{\circ}$ , a mobile robot for velocity calculations obtained  $x = 5.932\pi$ ,  $y = 10.155\pi$ ,  $\theta = 13.33\pi$ . While the calculation for the acceleration of the mobile robot is obtained  $\ddot{x} = -15.07$ ,  $\ddot{y} = -5.59$ ,  $\ddot{\theta} = 10.66$ . Matlab simulation program by changing the angle variables describing the movement of the robot arm from the actuator arm robot.

Keywords: bomb disposal robots, mobile manipulator, Matlab program.



## DAFTAR ISI

<b>PRAKATA</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>

### **BAB I PENDAHULUAN**

A. Latar Belakang .....	1
B. Rumusan Masalah .....	3
C. Tujuan Penelitian .....	3
D. Manfaat Penelitian .....	4
E. Batasan Masalah .....	4

### **BAB II TEORI DASAR**

A. Jenis Robot Mobile Manipulator .....	5
1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 roda .....	6
2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 roda .....	7
3. Robot Mobile Manipulator Beroda Caterpillar .....	8
4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni .....	9
B. Komponen Dasar Robot .....	10
1. Manipulator .....	10
2. Sistem Kendali .....	11
3. Power Supply .....	12
4. Efector .....	13
C. Robot Manipulator.....	14
1. Konfigurasi Manipulator .....	14
a. Robot Cartesian .....	16
b. Robot Silindris .....	17

c. Robot Polar .....	18
d. Robot SCARA .....	19
e. Robot Articulated .....	19
2. Sistem Penggerak Robot .....	20
3. Sensor .....	20
D. Kinematika Robot .....	21
1. Denavit-Hartenberg Parameters .....	21
2. Penggunaan Denavit-Hartenberg Parameters .....	22
E. Mobile Robot .....	25
1. Konsep Dasar Mobile Robot .....	25
2. Kinematika Mobile Robot .....	27
F. Kesetimbangan .....	29
G. ATmega 8535 .....	31
H. Prinsip Kerja Sensor Garis .....	37
I. Error Tracking Lintasan .....	40
J. Prinsip Dasar Sistem Kendali .....	43
1. Jenis-jenis Pengontrolan .....	44
a. Sistem Kontrol Loop Terbuka .....	44
b. Sistem Kontrol Loop Tertutup .....	44

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

A. Waktu dan Tempat .....	46
B. Alat dan Bahan yang Digunakan .....	46
1. Alat .....	46
2. Bahan .....	49
C. Pelaksanaan Penelitian .....	53
1. Tahap Persiapan .....	53
2. Tahap Perancangan .....	53
3. Tahap Simulasi .....	53
D. Gambar Ilustrasi Perancangan .....	54
E. Diagram Alir Penelitian .....	56

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

A. Analisis Kinematika Robot penjinak Bom .....	57
Persamaan Kinematika Manipulator Robot .....	57
Analisis Kinematika Mobile Robot .....	78
B. Keseimbangan Robot .....	82
C. Perhitungan Error untuk tracking lintasan .....	86
D. Simulasi Matlab .....	89

**BAB V PENUTUP**

A. Kesimpulan .....	97
B. Saran .....	98

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>99</b>
-----------------------------	-----------

**LAMPIRAN**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Aksi terorisme yang terjadi belakangan ini semakin meningkat terutama di Indonesia. Jenis bom yang digunakan juga sudah bervariasi, mulai dari jenis bom dengan daya rendah sampai dengan penggunaan bom dengan daya ledak yang cukup besar seperti: bom Bali pada tahun 2002, bom di JW Marriot pada tahun 2003, bom di depan kedutaan besar Australia pada tahun 2004 dan bom Bali II pada tahun 2005, dan yang terakhir bom solo pada tahun 2012 (Hutama, 2013). Bahkan aksi terorisme berupa bom ini tidak hanya terjadi di kota-kota besar akan tetapi sudah merambah ke perkampungan dan pedesaan.

Salah satu langkah untuk mengurangi terjadinya ledakan bom adalah menjinakkan bom tersebut. Namun pekerjaan menjinakkan bom adalah salah satu pekerjaan yang memiliki resiko tinggi (Budianto, 2013). Sewaktu-waktu bom tersebut dapat meledak, sebagaimana peristiwa bom buku yang memakan korban seorang anggota polisi (Winarto, 2011). Oleh karena itu untuk mengurangi resiko jatuhnya korban jiwa diperlukan sebuah alat yang dapat menggantikan tugas manusia.

Salah satu hal yang dapat dibuat untuk menggantikan tugas manusia dalam pelaksanaan tugas tersebut adalah Robot. Robot yang sering digunakan untuk pelaksanaan penjinak bom adalah jenis dari

*security robot* . *Security robot* yang paling sering digunakan untuk menjinakkan bom adalah *mobile robot* yang dilengkapi lengan manipulator dengan gripper diujungnya yang berfungsi untuk memindahkan bom tersebut ke tempat yang aman untuk dijinakkan (Rahman, 2011). Pada prinsipnya robot penjinak bom ini sama dengan *security robot* yaitu gabungan antara *mobile robot* dan *manipulator robot*. *Mobile robot* merupakan base dari sistem ini. Sedangkan *manipulator robot* diletakkan dibagian atas dari base, yang berfungsi mirip lengan manusia.

Problem yang muncul saat ini adalah belum adanya robot penjinak bom dengan harga yang terjangkau dengan kemampuan yang menjanjikan. Robot penjinak bom yang sering digunakan untuk pertahanan keamanan di Indonesia adalah robot penjinak bom dari Amerika yang memiliki harga yang sangat tinggi (Igun, 2011). Sedangkan apabila dibandingkan dengan mendesain dan membuat robot penjinak bom sendiri kita dapat menggunakan biaya yang lebih murah tetapi fungsi yang sama, sehingga dapat menghemat pengeluaran negara dalam bidang pertahanan dan keamanan.

Pada penelitian sebelumnya, digunakan robot penjinak bom dengan menggunakan manipulator 4-Joint (DOF) yang didapat dengan metode DH Parameter dengan sistem kontrol berbasis wireless, dengan kontrol cukup baik untuk mengarahkan robot *path* (lintasan) yang telah ditentukan (Suwarno, 2008).

Berdasarkan hal tersebut diatas, penulis tertarik untuk mendesain suatu robot. Dalam hal ini adalah robot penjinak bom yang dapat membantu manusia dalam menjinakkan bom demi mengurangi jatuhnya korban jiwa. Selain itu diharapkan dengan diciptakannya robot ini dapat menghemat pengeluaran negara dalam pembelian robot penjinak bom yang sangat mahal itu. Oleh karena itu penulis mengangkat masalah ini sebagai bahan penulisan Tesis dengan judul : ***Aplikasi model Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom.***

### **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas maka dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mendesain dan membuat Robot penjinak bom..
2. Bagaimana merumuskan persamaan-persamaan kinematika mobile manipulator pada robot penjinak bom.
3. Bagaimana mensimulasikan pergerakan mobile dan manipulator robot dengan program berbasis MATLAB.

### **C. Tujuan Penelitian**

Secara umum tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian Analisis Kinematika Mobile Manipulator Robot Penjinak Bom ini adalah :

1. Rancang bangun robot penjinak bom.

2. Menganalisa pergerakan dan kinematika pada robot penjinak bom.
3. Mensimulasikan pergerakan mobile dan manipulator robot dengan program berbasis MATLAB.

#### **D. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat-manfaat yang dapat diperoleh dari Analisis Kinematika Mobile Manipulator Robot Penjinak Bom ini adalah :

1. Manfaat umum : dapat diaplikasikan pada bidang pertahanan dan keamanan yaitu membantu TNI dan Polri dalam menjinakkan bom.
2. Manfaat khusus : Untuk menambah referensi serta diharapkan berguna sebagai bahan perbandingan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini.

#### **E. Batasan Masalah**

Mengingat luasnya ruang lingkup masalah, maka penelitian ini dibatasi pada :

1. Analisis kinematika berkaitan dengan kajian gerakan robot tanpa meninjau penyebabnya.
2. Perhitungan kesetimbangan pada robot penjinak bom.

## **BAB II**

### **TEORI DASAR**

#### **A. Jenis Robot Mobile Manipulator**

Penggunaan robot mobile manipulator pada saat ini sudah sangat luas, dimana sistem robot ini dibangun dan mengacu pada lengan manipulator robot yang terpasang pada platform mobile robot. Sistem robot mobile manipulator menggabungkan keuntungan dari platform mobile dan lengan manipulator robot, serta mengurangi kelemahan keduanya. Misalnya, platform mobile memperluas ruang kerja lengan, sementara lengan menawarkan fungsi operasional yang lebih kompleks.

Sebuah sistem Mobile Manipulator menawarkan keuntungan ganda yaitu, mobilitas yang ditawarkan oleh platform mobile dan ketangkasan yang ditawarkan oleh manipulator. Platform mobile menawarkan ruang kerja tak terbatas untuk manipulator. Derajat kebebasan ekstra dari platform mobile juga menyediakan pengguna dengan lebih banyak pilihan. Namun pengoperasian sistem tersebut lebih sulit karena banyak derajat kebebasan dan masukan yang di butuhkan.

Robot dapat dibangun dengan menggunakan berbagai macam roda, misalnya beroda empat, beroda enam, dan beroda caterpillar (tank-treaded), atau beroda omni. Pemilihan jenis roda juga harus cermat dimana material roda yang lebih lembut memiliki koefisien traction yang besar, dan koefisien traction yang besar memberi friction yang besar pula,



sehingga dibutuhkan daya yang besar untuk menggerakkan motor. Berikut kelebihan dan kekurangan dari tiap jenis roda yang digunakan pada robot mobile manipulator :

### 1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 Roda



Gambar 1. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 4 Roda  
Sumber : <http://www.mobilerobots.com/researchrobots/SeekurJr.aspx>

Kelebihan :

- Berat roda terbagi rata antara keempat roda *driver* robot.
- Memiliki 4 motor. Bila 1 motor rusak, maka robot masih dapat berjalan lurus.

Kekurangan :

- Memerlukan daya baterai yang lebih besar untuk menggerakkan 4 motor.
- Saat berputar arah, daya yang diperlukan lebih besar lagi.

## 2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 Roda



Gambar 2. Robot Mobile Manipulator Menggunakan 6 Roda  
Sumber: <http://bomb.turbosquid.com/>

Kelebihan :

- Memiliki semua kelebihan yang dimiliki robot beroda 4.
- Memiliki 6 motor sehingga kekuatannya lebih besar dan lebih seimbang.

Kekurangan :

- Menggunakan baterai berdaya besar.
- Cepat menguras daya baterai.
- Saat berputar arah, daya yang diperlukan sangat besar.

### 3. Robot Mobile Manipulator Beroda Caterpillar (tank-tread)



Gambar 3. Robot Mobile Manipulator beroda caterpillar  
Sumber : <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article.html>

Kelebihan :

- Stabil pada segala kondisi tanah dan permukaan yang berkontur, berkat permukaan roda yang luas.
- Hanya memerlukan 1 motor setiap roda.

Kekurangan :

- Sulit untuk bergerak berbelok, karena tread lebih mudah lepas.
- Tread Harus ditahan sedemikian rupa agar tidak lepas dari motor.
- Saat berbelok, memakan daya yang besar dari baterai karena harus melepaskan diri dari frictional contact dari permukaan.
- Memerlukan motor kuat untuk melepaskan frictional contact.

#### 4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni



Gambar 4. Robot Mobile Manipulator Beroda Omni

Sumber: <http://www.armedrobots.com/kukas-youbot-expensive-but-beautiful>

Kelebihan :

- Mampu bergerak ke segala arah pada sudut manapun tanpa harus memutar terlebih dahulu.
- Mampu melakukan gerakan yang kompleks untuk mencapai posisi tertentu.
- Tidak membutuhkan torsi motor yang besar.

Kekurangan :

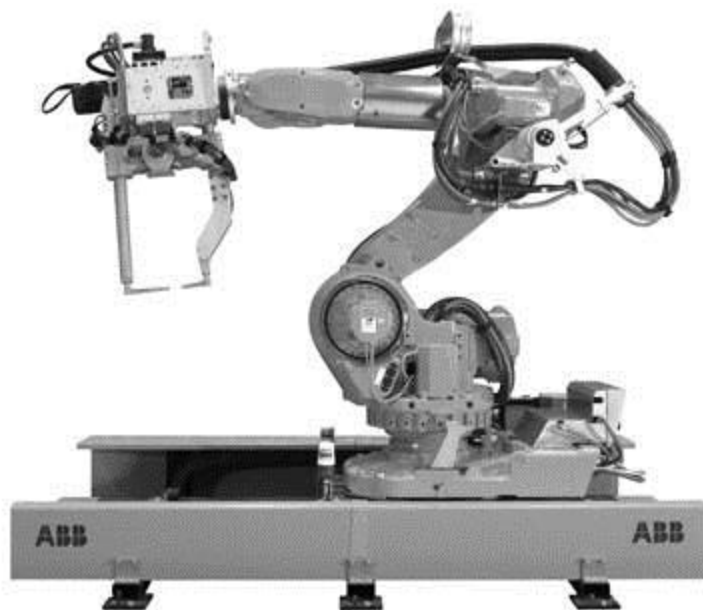
- Tidak memungkinkan bekerja pada contour permukaan yang kasar dan tidak rata.

## B. Komponen Dasar Robot

Sistem robot memiliki memiliki tiga komponen dasar, yaitu : Manipulator, kendali, dan Power (daya). *Efektor* sering ditemukan pada beberapa sistem robot, tetapi sifatnya tidak harus ada (Asriadi, 2006).

### 1. Manipulator

Manipulator memiliki dua bagian, yaitu bagian dasar dan bagian tambahan. Gambar 5 memberikan gambaran tentang bagian dasar dan bagian tambahan.



Gambar 5. Komponen dasar Manipulator robot

Sumber: <http://www.edn.com/design/industrial-control/4209595/Build-a-Robot-with-your-Kid-Part-I>

Bagian dasar manipulator bisa kaku terpasang pada lantai area kerja ataupun terpasang pada rel. Rel berfungsi sebagai path atau alur sehingga

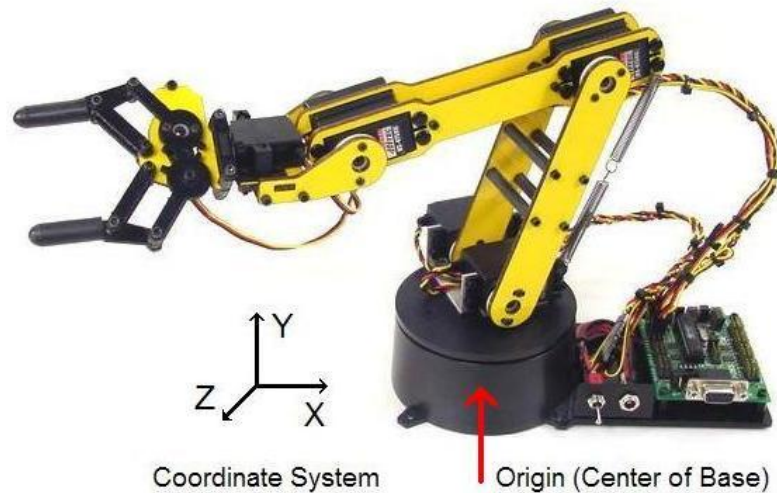
memungkinkan robot untuk bergerak dari satu lokasi ke lokasi lainnya dalam satu area kerja.

Bagian tambahan merupakan perluasan dari bagian dasar, bisa disebut juga lengan/arm. Bagian ujungnya terpasang efektor yang berfungsi untuk mengambil/mencekam material. Manipulator digerakkan oleh aktuator atau disebut sistem drive. Aktuator atau sistem drive menyebabkan gerakan yang bervariasi dari manipulator. Aktuator bisa menggunakan elektrik, hidrolis ataupun pneumatik.

Sistem kendali merupakan jantung dari sistem robot sehingga keberadaannya sangat penting. Kontroler menyimpan informasi yang berkaitan dengan data-data robot, dalam hal ini data gerakan robot yang telah diprogram sebelumnya. Gambar 6 memberikan gambaran sebuah kontroler dan manipulator robot.

## **2. Sistem Kendali**

Sistem Kendali berfungsi untuk mengontrol pergerakan dari manipulator. Sistem Kendali sendiri diatur oleh sebuah informasi atau program yang diisikan dengan menggunakan bahasa pemrograman tertentu. Informasi tersebut kemudian disimpan didalam memori. Data dalam memori dapat di keluarkan atau di edit sesuai dengan yang dibutuhkan.



Gambar 6. Robot dan Kontroller

Sumber: <http://www.promrds.com/Chapter12/ArmMover.htm>

Dahulu sistem kendali dibuat dari drum mekanik yang bekerja langkah demi langkah secara sequential. dan sangat sederhana. Dimasa sekarang kontroler menggunakan PLC (programmable logic control) yang dapat bekerja dengan pergerakan yang sangat kompleks dari sistem robot.

### 3. Power Supply

Power supply adalah sebuah unit yang menyediakan tenaga pada kontroler dan manipulator sehingga dapat bekerja. Power supply dalam suatu sistem robot dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian untuk kontroler dan bagian untuk manipulator. Bagian kontroler menggunakan elektrik sedangkan bagian manipulator bisa menggunakan elektrik, pneumatik, hidrolis ataupun ketiganya.



Gambar 7. Sebuah Power Supply  
Sumber:<http://www.testequipmentdepot.com/elenco/power-supplies/>

#### 4. Efector

Efektor dapat ditemukan hampir semua aplikasi robot, walaupun keadaannya bukan merupakan komponen dasar dari sistem robot. Efektor berfungsi sebagai bagian terakhir yang menghubungkan antara manipulator dengan objek yang akan dijadikan kerja dari robot.



Gambar 8. Efector Sebuah Robot  
Sumber:<http://www.promrds.com/Chapter12/ArmMover.htm>



Sebagai contoh efektor dapat berupa peralatan las, penyemprot cat ataupun hanya berupa penjempit objek. Efektor jika disamakan dengan manusia seperti jari-jari tangan yang dapat digerakan untuk memindah atau mengangkat materilal ataupun peralatan yang dapat digunakan untuk mengelas, mengecat, menempa, mengisi botol, dan lain-lain sesuai dengan kebutuhan. Kerja efektor dapat berupa mekanik, elektrik, pneumataik (*gripper*), maupun hidrolis (Asriadi, 2006)

### **C. Robot Manipulator**

Robot manipulator adalah robot yang memiliki karakteristik lengan manusia. *Manipulator* robot adalah sistem mekanik yang menunjukkan pergerakan dari robot. Sistem mekanik terdiri dari susunan *link* (rangka) dan *joint* (engsel) yang mampu menghasilkan gerakan yang terkontrol. Rangka tersebut menggambarkan bahu, siku dan pergelangan tangan manusia. Selain itu, pada ujung dari lengan robot tersebut terdapat *end-effector* yang disebut *gripper*.

Robot manipulator dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kriteria yaitu :

#### **1. Konfigurasi Manipulator**

Ada beberapa jumlah dari konfigurasi robot yang umum dipakai. Biasanya dikontrol secara elektronik, hidrolis atau pneumatik. Tiap jenis konfigurasi memiliki area kerja yang berbeda. Oleh karenanya sangat penting untuk mengerti konfigurasi dan memilih tipe yang paling cocok di gunakan serta penerapan pada aplikasi yang dibutuhkan.

Konfigurasi adalah cara untuk mengklasifikasikan di dalam robot-robot industri. Konfigurasi merujuk pada bentuk geometri dari manipulator robot, yaitu bagaimana cara hubungan dari manipulator pada setiap joint. Robotic Industries Association (RIA) mendefenisikan robot sebagai manipulator yang didesain untuk memindahkan material, benda, alat atau peralatan tertentu lewat pergerakan yang terprogram untuk melakukan berbagai macam tugas (Adi, 2009)

Secara umum struktur robot dapat dibedakan menurut sumbu koordinat yang digunakan, untuk lebih jelasnya diuraikan dalam tabel 1.

No.	Jenis Robot	Sumbu 1	Sumbu 2	Sumbu 3	Total Rotasi
1	Cartesian	P	P	P	0
2	Cylindrical	R	P	P	1
3	Spherical	R	R	P	2
4	SCARA	R	R	P	2
5	Articulated	R	R	R	3

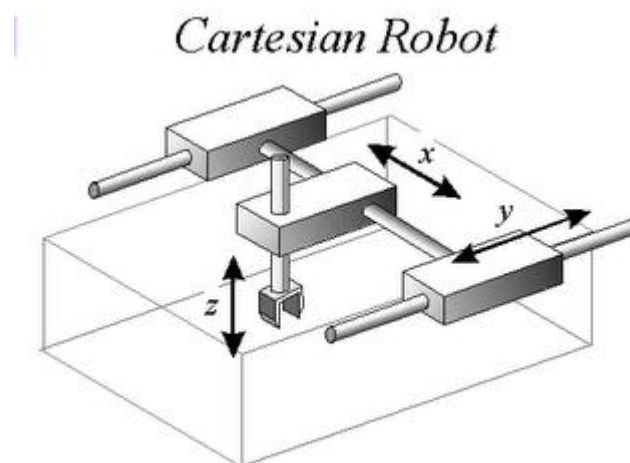
Tabel 1. Struktur Umum Robot.

*Catatan : P = Prismatic joint* yaitu pergeseran sepanjang sumbu tertentu

*R = Revolute joint* yaitu perputaran pada sumbu tertentu

### a. Robot cartesian

Cartesian Robot memiliki struktur yang paling kaku. Hal ini sangat menguntungkan untuk mengangkat beban yang berat dan pengulangan yang tinggi pada seluruh area pergerakan. Cartesian Robot memiliki pengulangan yang lebih baik pada area kerja yang luas dibandingkan dengan SCARA atau articulated arm. Pergerakan aksis X dan Y lebih lambat dibandingkan pergerakan rotasi dari konfigurasi yang lain dan membutuhkan area penempatan yang paling besar dibandingkan dengan konfigurasi lain untuk luas daerah kerja yang sama.



Gambar 9. Konfigurasi Cartesian  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

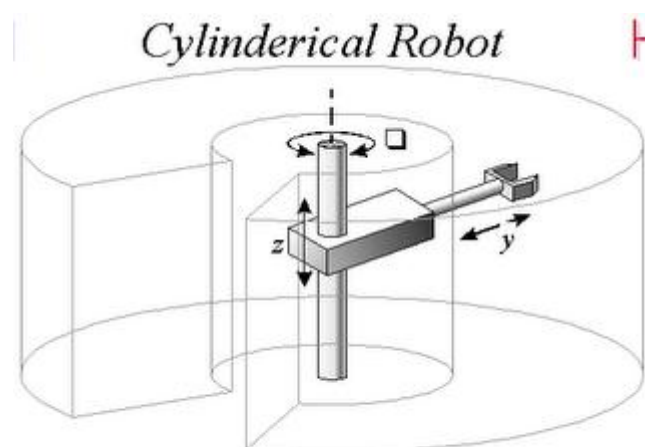
Pada Gambar 9 memperlihatkan manipulator berkonfigurasi cartesian dimana secara relatif adalah yang paling kokoh untuk tugas mengangkat beban yang berat. Struktur ini banyak dipakai secara permanen pada instalasi pabrik baik untuk mengangkat dan memindahkan

barang-barang produksi maupun untuk mengangkat peralatan-peralatan berat pabrik ketika melakukan kegiatan instalasi.

### **b. Robot Silindris**

Robot Cylindrical memiliki 2 pergerakan aksis ortogonal prismatic (horizontal dan vertikal) dan satu aksis putar, membentuk sistem koordinat silindris. Konfigurasi ini memiliki kemampuan yaitu kecepatan pergerakan yang lebih tinggi pada bidang horizontal dibandingkan dengan sistem cartesian.

Namun untuk pergerakan garis lurus pada konfigurasi ini membutuhkan perhitungan yang rumit dan lebih lambat. Resolusi penempatan dari end effector tidak konstan tapi tergantung pada derajat pergerakan. Beberapa contoh aplikasi robot cylindrical untuk pemindah barang ataupun perakitan, banyak diadopsi untuk sistem *gantry* atau *crane* karena strukturnya yang kokoh untuk tugas mengangkat beban.



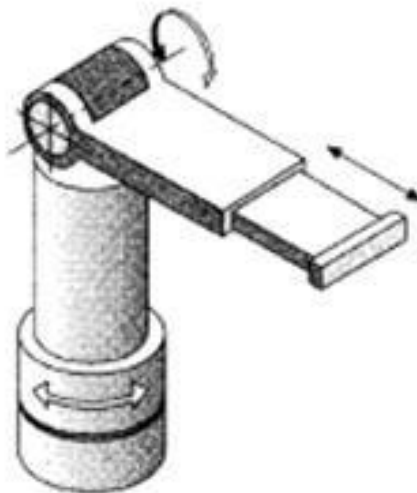
Gambar 10. Konfigurasi Cylindrical  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

Konfigurasi silinder mempunyai kemampuan jangkauan berbentuk ruang silinder yang lebih baik, meskipun sudut ujung lengan terhadap garis penyangga tetap.

### c. Robot Polar

Konfigurasi struktur robot ini mirip dengan sebuah tank dimana terdiri atas *Rotary Base*, *Elevated Pivot*, dan *Telescopic Arm*. Keuntungan dari robot jenis ini adalah fleksibilitas mekanik yang lebih baik.

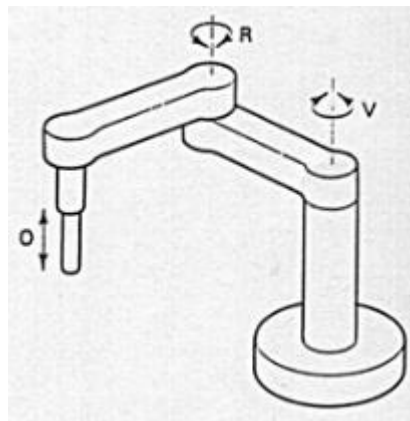
Pada Gambar 11 terlihat konfigurasi polar dimana badan dapat berputar ke kiri atau kanan. Sendi pada badan dapat mengangkat atau menurunkan pangkal lengan secara polar. Lengan ujung dapat digerakkan maju-mundur secara translasi.



Gambar 11. Konfigurasi Robot Polar  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

#### d. Robot SCARA

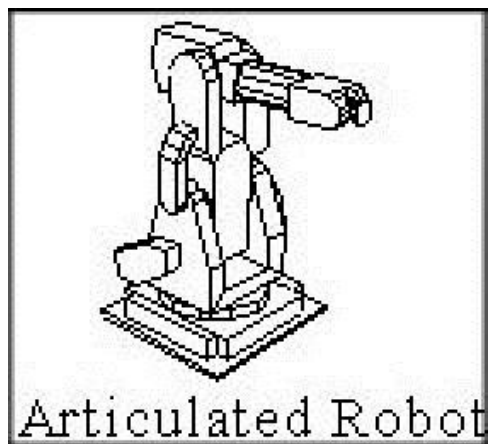
Robot *Assembly* bisa didesain menurut koordinat kartesian, silindris maupun spheris. Pada beberapa aplikasi hanya membutuhkan sumbu gerak vertikal, misalnya robot *assembly* yang memasang komponen pada PCB. Robot ini mempunyai lengan dengan dua artikulasi, sedangkan *wrist* mempunyai gerakan linier dan rolling. Struktur robot *assembly* dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Konfigurasi Robot SCARA  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

#### d. Robot Articulated

Robot ini terdiri dari tiga lengan yang dihubungkan dengan dua *Revolute Joint*. *Elbow Joint* menghubungkan *Force Arm* dengan *Upper Arm*. *Shoulder Joint* menghubungkan *Upper Arm* dengan *Base*. Struktur robot artikulasi ini dapat dilihat pada gambar 13 dibawah ini.



Gambar 13. Konfigurasi Robot Articulated  
Sumber: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>

Konfigurasi ini yang paling populer untuk melaksanakan fungsi layaknya pekerja pabrik seperti mengangkat barang, mengelas, memasang komponen mur dan baut, dan sebagainya. Struktur lengan-sendi cocok digunakan untuk menjangkau daerah kerja yang sempit dengan sudut jangkauan yang beragam.

## **2. Sistem penggerak Robot**

Penggerak diperlukan oleh robot agar robot mampu bergerak atau berpindah posisinya serta mampu mengangkat beban pada end effectornya. Macam-macam penggerak yang biasa digunakan adalah penggerak hidrolis (berbasis bahan cair seperti oli), penggerak pneumatik (perangkat kompresi berbasis udara atau gas nitrogen) dan penggerak elektrik (motor servo, motor DC dan motor stepper).

## **3. Sensor**

Adalah perangkat atau komponen yang bertugas mendeteksi (hasil) gerakan atau fenomena lingkungan yang diperlukan oleh sistem kontroler. Dapat dibuat dari sistem yang paling sederhana seperti sensor

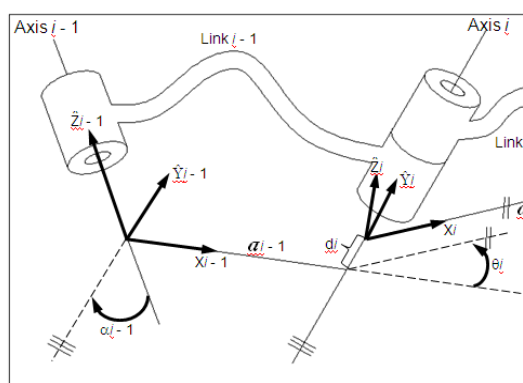
ON/OFF menggunakan limit switch, sistem analog, sistem bus parallel, sistem bus serial, hingga sistem mata kamera.

## D. Kinematika Manipulator

Analisis persamaan kinematik dapat diselesaikan dengan Metoda Denavit-Hartenberg Parameters (DH Parameter).

### 1. Denavit-Hartenberg Parameters

Analisis persamaan kinematik dapat diselesaikan dengan Metoda Denavit-Hartenberg Parameters (DH Parameter). Suatu cara khas representasi analisa hubungan gerak rotasi dan translasi antara lengan-lengan yang terhubung dalam suatu manipulator telah diperkenalkan oleh Denavit dan Hartenberg (1955). Meskipun telah lima dasawarsa yang lalu, metoda ini masih banyak digunakan utamanya untuk pemrograman robot-robot manipulator di industri. Mereka memperkenalkan suatu metoda yang berguna untuk menetapkan suatu sistem koordinat berorientasi *body* untuk setiap link/lengan yang terhubung dalam suatu struktur hubungan seperti rantai.



Gambar 14. Parameter Denavit-Hartenberg (Rosen 1989)



Dari gambar dapat dilihat bahwa :

- Panjang rangka ( $a_{i-1}$ ) adalah jarak antara sumbu  $i$  dengan sumbu  $i-1$
- Perputaran rangka ( $\alpha_{i-1}$ ) adalah sudut yang diukur dari sumbu  $i-1$  ke sumbu  $i$ .
- Link offset ( $d_i$ ) adalah jarak yang diukur sepanjang sumbu  $i$  dimana  $a_{i-1}$  berpotongan dengan sumbu  $i$ , dan dimana  $a_i$  berpotongan dengan sumbu  $i$ . Sebagai catatan, variabel  $d_i$  hanya berlaku jika sambungan/engsel  $i$  berupa *Prismatik joint* yaitu pergeseran sepanjang sumbu  $i$ .
- Sudut sambungan ( $\theta_i$ ) adalah sudut yang dibuat antara perluasan  $a_{i-1}$  dengan  $a_i$  yang diukur sekitar sumbu  $i$ .

Catatan : Sudut  $\theta_i$  hanya berlaku jika variable  $i$  berupa *Revolute joint* yaitu perputaran pada sumbu tertentu.

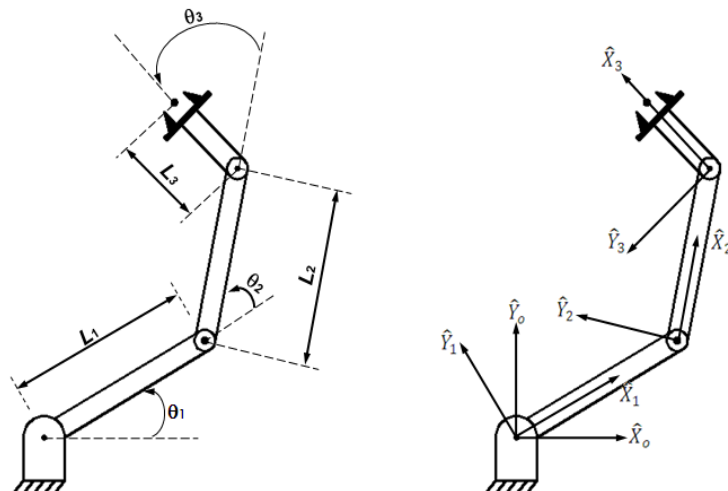
## 2. Penggunaan Denavit-Hartenberg Parameters

Prinsip dasar representasi D-H Parameter adalah melakukan transformasi koordinat antara dua link yang berdekatan. Hasilnya adalah suatu matrix (4 x 4) yang menyatakan system koordinat dari suatu link dengan link yang terhubung pada pangkalnya (link sebelumnya). Dalam konfigurasi serial, koordinat (ujung) link-1 dihitung berdasarkan sendi-0 atau sendi pada tubuh robot. Sistem koordinat link-2 dihitung berdasarkan posisi sendi-1 yang berada di ujung link-1 dengan mengasumsikan link-1 adalah basis gerakan link-2. demikian seterusnya, link-3 dihitung berdasarkan link-2, hingga link ke-( $n$ ) dihitung berdasarkan link ke-( $n-1$ ).

Dengan cara ini maka tiap langkah perhitungan atau transformasi hanya melibatkan sistem 1 DOF saja. Terakhir, posisi koordinat tangan atau posisi ujung robot (*end effector*) akan dapat diketahui. Representasi DH Parameter menggunakan 4 buah parameter, yaitu  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $d$  dan  $a$ . Untuk robot dengan  $n$ -DOF maka keempat parameter itu ditentukan hingga yang ke- $n$  (Craig, 1989). Batasan-batasan dari Parameters Denavit-Hartenberg adalah :

- $a_i$  - Jarak dari  $\hat{Z}_i$  ke  $\hat{Z}_{i+1}$  diukur sepanjang  $\hat{X}_i$
- $\alpha_i$  - Sudut antara  $\hat{Z}_i$  ke  $\hat{Z}_{i+1}$  diukur sekitar  $\hat{X}_i$
- $d_i$  - Jarak dari  $\hat{X}_{i-1}$  ke  $\hat{X}_i$  diukur sepanjang  $\hat{Z}_i$
- $\theta$  - Sudut antara  $\hat{X}_{i-1}$  ke  $\hat{X}_i$  diukur sekitar  $\hat{Z}_i$

Aplikasi perhitungan DH parameter dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada Manipulator Tiga Sendi.



Gambar 15. Konfigurasi Robot Tangan Tiga Sendi (Rosen, 1989)

Tabel : DH Parameter :

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$L_1$	0	$\theta_2$
3	0	$L_2$	0	$\theta_3$

Rumus umum adalah :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (01)$$

Berdasarkan Tabel DH Parameter didapat transformasi matriks sebagai berikut :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi :

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(02)$$

Dimana :

$$r_{11} = c_{123}$$

$$r_{21} = s_{123}$$

$$r_{12} = -s_{123}$$

$$r_{22} = c_{123}$$

$$P_x = L_2 c_{12} + L_1 c_1$$

$$P_y = L_2 s_{12} + L_1 s_1$$

$$r_{31} = r_{32} = r_{13} = r_{23} = P_z = 0 \text{ dan } r_{33} = 1$$

Jadi :

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(03)$$

## E. Mobile Robot

### 1. Konsep Dasar Mobile Robot

*Mobile robot* berarti robot yang dapat bergerak ke tempat lain, dengan jarak yang agak jauh. Mobile robot banyak digunakan pada aplikasi pertahanan dan keamanan, dan penjelajahan lingkungan yang ekstrim. *Rescue robot* dari *International Rescue System Institute (IRS)*

merupakan salah satu *mobile robot* yang dipergunakan untuk keperluan SAR (Search and Rescue), khususnya pada bangunan yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi dan ledakan. Robot ini dikendalikan oleh seorang operator.

*Mobile robot dengan operator oriented* adalah pengenalan gerakan dari robot yang membutuhkan seorang operator. Jadi seluruh gerakan robot untuk memindahkan tubuhnya tergantung dari instruksi yang diberikan oleh seorang operator. Sistem ini lebih banyak dipakai untuk aplikasi dilapangan, dibandingkan sistem full otomatis, disebabkan oleh keadaan lingkungan yang tidak dapat ditebak.

Contoh aplikasi yang lain dapat dijumpai dalam peralatan militer. Robot penjinak bom (*bomb disposal robot*) justru dianggap lebih aman jika dikendalikan oleh operator. Setidaknya hingga sekarang, masih belum dijumpai robot penjinak bom yang sepenuhnya dapat bergerak secara otomatis. Alasannya adalah bahwa penggunaan robot otomatis dapat lebih mencelakakan jika robot gagal berfungsi dan dapat bertindak liar.

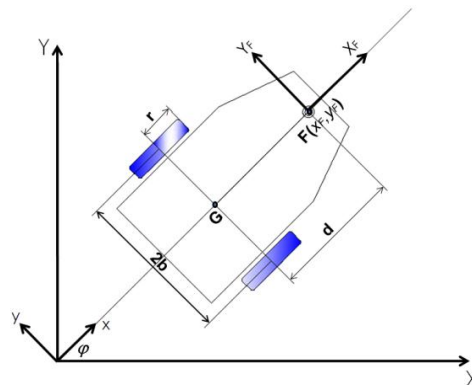
*Mobile Robot* adalah konstruksi robot yang ciri khasnya mempunyai aktuator berupa roda untuk menggerakkan keseluruhan badan robot tersebut, sehingga robot tersebut dapat melakukan perpindahan posisi dari satu titik ke titik yang lain.

Secara umum, *mobile robot* terdiri atas komponen mekanik dan komponen elektronik. Komponen mekanik terdiri atas motor penggerak yang dihubungkan ke poros roda (*Wheel robot*), Tracking Wheel (robot

yang menggunakan sabuk atau belt) dan mekanisme rangka. Sedangkan untuk komponen elektronik terdiri atas baterai, sensor dan kontroler. Baterai sebagai sumber tenaga, sensor yang bertugas mendeteksi (hasil) gerakan atau fenomena lingkungan yang diperlukan oleh sistem kontroler yaitu software yang berisi program kemudi.

## 2. Kinematika Mobile Robot

Mobile robot yang dimaksud disini ialah mobile robot berpengerak dua roda kiri-kanan yang dikendalikan terpisah (*Differentially Driven Mobile Robot, disingkat DDMR*), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 16 Berikut ini.



Gambar 16. DDMR Pada Medan 2D Cartesian (Endra, 2006)

Robot diasumsikan berada dalam kawasan 2D pada koordinat Cartesian XY. Parameter-parameter dalam gambar adalah :

- $\varphi$  = sudut arah hadap robot
- $2b$  = lebar robot yang diukur dari garis tengah roda ke roda
- $r$  = jari-jari roda (roda kiri dan kanan adalah sama dan sebangun)
- $d$  = jarak antara titik tengah antara 2 roda, G dengan titik acuan  $F$

$(x,y)$  = koordinat acuan di tubuh robot terhadap sumbu  $XY$

Dalam kajian kinematik ini robot diasumsikan bergerak relatif pelan dan roda tidak slip terhadap permukaan jalan. Maka komponen  $x$  dan  $y$  dapat diekspresikan dalam suatu persamaan nonholonomic sebagai berikut,

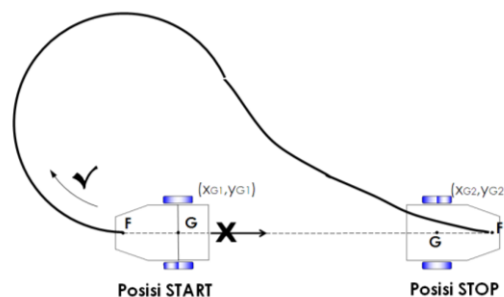
$$\dot{x}_G \sin \varphi - \dot{y}_G \cos \varphi = 0 \dots\dots\dots (04)$$

Untuk titik  $F$  sebagai acuan analisa, persamaan di atas dapat ditulis,

$$\dot{x}_G \sin \varphi - \dot{y}_G \cos \varphi + \dot{\varphi} d = 0 \dots\dots\dots (05)$$

Masalah klasik dalam kontrol kinematik DDMR ini adalah bahwa ia memiliki dua aktuator, namun parameter kontrolnya lebih dari dua, yaitu  $x$  untuk gerakan ke arah  $X$  (1 DOF) dan  $y$  untuk arah  $Y$  (1 DOF) yang diukur relatif terhadap perpindahan titik  $G$ , dan gerakan sudut hadap  $\varphi$  yang diukur dari garis hubung titik  $G$  dan  $F$  terhadap sumbu  $x$  (1DOF). Inilah ciri khas dari sistem nonholonomic.

Dari persamaan (5) nampak bahwa derajat kebebasan dalam kontrol kinematiknya berjumlah tiga, yaitu  $(x,y,\varphi)$  karena ketiga parameter ini perlu dikontrol secara simultan untuk mendapatkan gerakan nonholonomic. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 17. Contoh Manuver DDMR (Endra, 2006)

Perpindahan kedudukan robot dari START ke STOP bila dipandang pada titik G adalah perpindahan dari koordinat  $(x_{G1}, y_{G1})$  ke  $(x_{G2}, y_{G2})$  secara translasi. Namun hal ini tidak dapat dilakukan sebab robot harus dikontrol agar bergerak maju, sehingga ia harus membuat manuver belok membentuk lingkaran terlebih hingga pada posisi yang memungkinkan untuk mengarahkannya ke koordinat  $(x_{G2}, y_{G2})$ . Oleh karena itu diperlukan titik acuan F yang berada di luar garis yang menghubungkan kedua roda agar sudut hadap dapat dihitung.

Bentuk umum persamaan kinematik untuk DDMR ini dapat dinyatakan dalam persamaan kecepatan sebagai berikut:

$$\dot{q}(t) = T_{NH}(q)\dot{\theta}(t) \dots\dots\dots (06)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \text{sistem koordinat umum robot} \\ \dot{q} &= [x_F, y_F, \varphi]^T \text{ atau } \dot{q} = \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ \varphi \end{bmatrix} \\ \dot{\theta} &= \text{Kecepatan radial} \\ \dot{\theta} &= [v, \omega]^T \text{ atau } \dot{\theta} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \\ T_{NH} &= \text{Matriks transformasi nonholonomic} \end{aligned}$$

## F. Kestimbangan

Sebuah benda dikatakan dalam kondisi keseimbangan jika gaya luar beraksi padanya membentuk gaya equivalen dengan nol. Ini berarti sistem tidak mempunyai resultan kopel. Syarat perlu dan cukup untuk keseimbangan sebuah benda tegar yang berada dalam kondisi statik



tertentu dapat dinyatakan secara analitis dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Sigma F_H = 0$$

$$\Sigma F_V = 0 \dots\dots\dots (07)$$

$$\Sigma M = 0$$

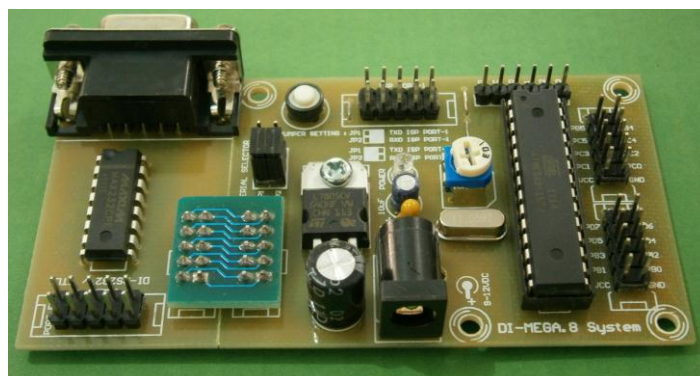
Persamaan diatas menunjukkan gaya luar yang beraksi pada benda tegar tidak menimbulkan gerak translasi pada benda itu dan menyebabkan rotasi pada titik manapun. Aksi tiap gaya luar diiadakan oleh gaya reaksi dari sistem itu. Sebelum menetapkan persamaan diatas, perlu ditunjukkan dengan tepat sebuah gaya yang bekerja pada benda itu baik gaya reaksi yang bekerja pada benda juga gaya reaksi yang timbul pada tumpuan. Penggambaran semua gaya yang bekerja pada benda disebut digram benda bebas.

Persamaan kesetimbangan diatas telah cukup untuk menyelesaikan benda pada kondisi tertentu. Penambahan persamaan lainnya tidak mengandung informasi baru, hanya berguna untuk memeriksa pemecahan yang diperoleh dari ketiga persamaan semula.

Setiap persamaan keseimbangan diatas hanya berlaku untuk menyelesaikan tiga besaran yang tidak diketahui yang dikatakan bersifat statik tak tentu, hal ini diperlukan persamaan-persamaan yang lain dengan memperhatikan kondisi yang mempertimbangkan geometri dari deformasi yang terjadi seperti pada jepitan yang mempunyai slop sama dengan nol.

## G. ATmega 8535

Mikrokontroler AVR ATmega 8535 memiliki fitur yang cukup lengkap. Mikrokontroler AVR ATmega 8535 telah dilengkapi dengan ADC *internal*, *EEPROM internal*, *Timer/Counter*, *PWM*, *analog comparator*, dll (M.Ary Heryanto, 2008). Sehingga dengan fasilitas yang lengkap ini memungkinkan kita belajar mikrokontroler keluarga AVR dengan lebih mudah dan efisien, serta dapat mengembangkan kreativitas penggunaan mikrokontroler ATmega 8535. PWM (*Pulse Width Modulation*) dapat digunakan untuk mengatur kecepatan motor, yaitu dengan cara mengatur lebar pulsa (waktu ON) dari tegangan sumbernya (tegangan DC). Perbandingan antara waktu ON dan waktu OFF disebut *duty cycle* (siklus kerja). Semakin besar siklus kerjanya, akan semakin besar pula keluaran yang dihasilkan, sehingga kecepatan motor akan semakin besar. Pembangkitan sinyal PWM dengan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan, seperti teknik pemrograman yang sederhana, dan rangkaian listrik menjadi sederhana.



Gambar 18 ATmega 8535  
Sumber: Foto, Scan (2013)

Fitur-fitur yang dimiliki oleh mikrokontroler ATmega 8535 adalah sebagai berikut:

1. Saluran I/O sebanyak 32 buah, yaitu port A, port B, port C, dan port D.
2. ADC internal sebanyak 8 saluran.
3. Tiga buah Timer/Counter dengan kemampuan perbandingan.
4. CPU yang terdiri atas 32 buah register.
5. SRAM sebesar 512 byte.
6. Memori Flash sebesar 8 kb dengan kemampuan Read While Write.
7. Port antarmuka SPI
8. EEPROM sebesar 512 byte yang dapat diprogram saat operasi.
9. Antarmuka komparator analog.
10. Port USART untuk komunikasi serial.
11. Sistem mikroprosesor 8 bit berbasis RISC dengan kecepatan maksimal 16 MHz.
12. Dan lain-lainnya.

Mikrokontroler ATmega 8535 memiliki 3 jenis memori, yaitu memori program, memori data dan memori EEPROM. Ketiganya memiliki ruang sendiri dan terpisah.

a. Memori program

ATmega 8535 memiliki kapasitas memori program sebesar 8 Kbyte yang terpetakan dari alamat 0000h – 0FFFh dimana masing-masing alamat memiliki lebar data 16 bit. Memori program ini

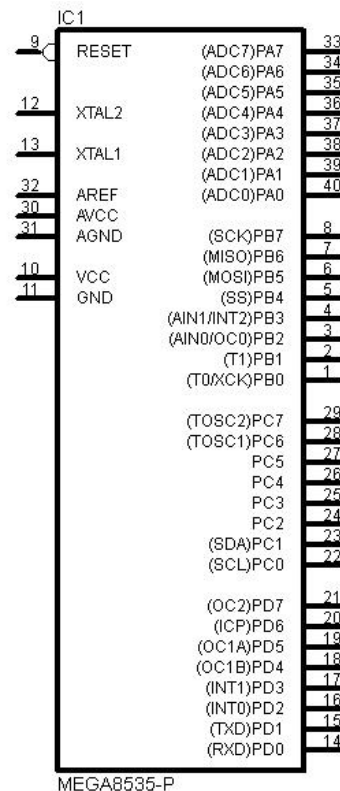
terbagi menjadi 2 bagian yaitu bagian program *boot* dan bagian program aplikasi.

b. Memori data

ATmega 8535 memiliki kapasitas memori data sebesar 608 byte yang terbagi menjadi 3 bagian yaitu register serba guna, register I/O dan SRAM. Atmega 8535 memiliki 32 byte register serba guna, 64 byte register I/O yang dapat diakses sebagai bagian dari memori RAM (menggunakan instruksi LD atau ST) atau dapat juga diakses sebagai I/O (menggunakan instruksi IN atau OUT), dan 512 byte digunakan untuk memori data SRAM.

c. Memori EEPROM

ATmega 8535 memiliki memori EEPROM sebesar 512 byte yang terpisah dari memori program maupun memori data. Memori EEPROM ini hanya dapat diakses dengan menggunakan register-register I/O yaitu register EEPROM *Address*, register EEPROM *Data*, dan register EEPROM *Control*. Untuk mengakses memori EEPROM ini diperlakukan seperti mengakses data eksternal, sehingga waktu eksekusinya relatif lebih lama bila dibandingkan dengan mengakses data dari SRAM.



Gambar 19. Konfigurasi pin ATmega 8535 (Data Sheet AVR)

Konfigurasi *pin* ATmega 8535 dengan kemasan 40 pin DIP (*Dual Inline Package*) dapat dilihat pada gambar 19. Dari gambar di atas dapat dijelaskan fungsi dari masing-masing *pin* ATmega 8535 sebagai berikut:

1. VCC merupakan *pin* yang berfungsi sebagai masukan catu daya.
2. GND merukan *pin Ground*.
3. *Port A* (PortA0...PortA7) merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* masukan ADC.
4. *Port B* (PortB0...PortB7) merupakan *pin input/output* dua arah dan dan *pin* fungsi khusus, seperti dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Pin	Fungsi Khusus
PB7	SCK ( <i>SPI Bus Serial Clock</i> )
PB6	MISO ( <i>SPI Bus Master Input/ Slave Output</i> )
PB5	MOSI ( <i>SPI Bus Master Output/ Slave Input</i> )
PB4	SS ( <i>SPI Slave Select Input</i> )
PB3	AIN1 ( <i>Analog Comparator Negative Input</i> ) OC0 ( <i>Timer/Counter0 Output Compare Match Output</i> )
PB2	AIN0 ( <i>Analog Comparator Positive Input</i> ) INT2 ( <i>External Interrupt 2 Input</i> )
PB1	T1 ( <i>Timer/ Counter1 External Counter Input</i> )
PB0	T0 T1 ( <i>Timer/Counter External Counter Input</i> ) XCK ( <i>USART External Clock Input/Output</i> )

Tabel 2. Fungsi Khusus Port B

4. Port C (PortC0...PortC7) merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* fungsi khusus, seperti dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Pin	Fungsi khusus
PC7	TOSC2 ( <i>Timer Oscillator Pin2</i> )
PC6	TOSC1 ( <i>Timer Oscillator Pin1</i> )
PC5	<i>Input/Output</i>
PC4	<i>Input/Output</i>
PC3	<i>Input/Output</i>

PC2	<i>Input/Output</i>
PC1	<i>SDA ( Two-wire Serial Bus Data Input/Output Line)</i>
PC0	<i>SCL ( Two-wire Serial Bus Clock Line)</i>

Tabel 3. Fungsi Khusus Port C

5. *Port D (PortD0...PortD7)* merupakan *pin input/output* dua arah dan *pin* fungsi khusus, seperti yang terlihat pada tabel dibawah ini.

Pin	Fungsi khusus
PD7	OC2 ( <i>Timer/Counter Output Compare Match Output</i> )
PD6	ICP ( <i>Timer/Counter1 Input Capture Pin</i> )
PD5	OC1A ( <i>Timer/Counter1 Output Compare A Match Output</i> )
PD4	OC1B ( <i>Timer/Counter1 Output Compare B Match Output</i> )
PD3	INT1 ( <i>External Interrupt 1 Input</i> )
PD2	INT0 ( <i>External Interrupt 0 Input</i> )
PD1	TXD ( <i>USART Output Pin</i> )
PD0	RXD ( <i>USART Input Pin</i> )

Tabel 4. Fungsi Khusus Port D

6. RESET merupakan *pin* yang digunakan untuk me-*reset* mikrokontroler.

7. XTAL1 dan XTAL2 merupakan *pin* masukan *clock* eksternal.

## H. Prinsip Kerja Sensor Garis

Sensor garis adalah jenis sensor yang berfungsi mendeteksi warna garis hitam atau putih. Sensor ini penting karena sensor menentukan arah dan gerakan robot. Sensor pendeteksi garis yang digunakan dalam robot adalah berdasarkan pada prinsip pemantulan cahaya dari *LED* dan *photodiode* sebagai penerima cahaya.

Sensor garis berfungsi untuk mendeteksi warna dari permukaan yang berada di bawah robot penjejak garis dengan maksud agar sensor garis ini dapat menghasilkan logika posisi dari robot penjejak garis terhadap garis tepat berada di bawah robot. Logika posisi yang dihasilkan oleh sensor garis ini kemudian akan dijadikan *input* ke mikrokontroler pada robot. (<http://repository.gunadarma.ac.id/bitstream/123456789/1327/1/21107264.pdf>)

### 1. Cara Kerja Sensor Garis

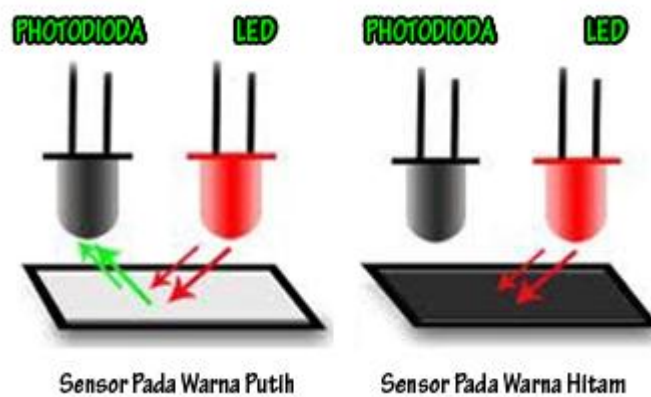
Pada sensor garis, komponen yang digunakan yaitu *photodiode* sebagai pendeteksi garis hitam dengan dasar putih yang menjadi jalur robot dan LED (*Light Emitting Diode*) sebagai pemancar cahaya ke lantai yang kemudian dipantulkan dan diterima oleh *photodiode*.

LED Pada sensor garis berfungsi sebagai pengirim cahaya ke garis untuk dipantulkan lalu dibaca sensor (*photodiode* ataupun LDR). Sifat pemantulan cahaya yang berbeda dari berbagai macam warna digunakan dalam hal ini. Ketika LED memancarkan cahaya ke bidang berwarna putih, cahaya akan dipantulkan hampir semuanya oleh bidang berwarna



putih tersebut. Sebaliknya, ketika LED memancarkan cahaya ke bidang berwarna gelap atau hitam, maka cahaya akan banyak diserap oleh bidang gelap tersebut, sehingga cahaya yang sampai ke sensor (photodiode atau LDR) sedikit.

Karena perbedaan cahaya yang diterima oleh sensor akan menyebabkan hambatan yang berbeda pula di dalam sensor maka prinsip ini yang digunakan untuk membedakan pembacaan garis. Gambar dibawah ini adalah ilustrasi mekanisme pemantulan cahaya sensor garis.



Gambar 20. Mekanisme Pemantulan Cahaya Sensor Garis

Sumber : <http://a2pd.blog.student.eepis-its.edu/>

Saat sensor pada garis putih, maka sensor akan terkena banyak cahaya sehingga nilai resistansinya akan sangat kecil atau dapat diabaikan. Karena  $R_{sens}$  sangat kecil maka  $V_{out}=0$ .

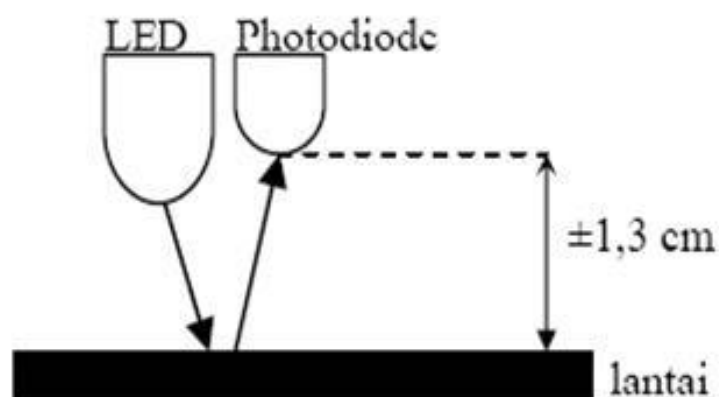
Saat sensor pada garis hitam, maka sensor akan tidak terkena cahaya sehingga nilai resistansinya akan besar atau dapat diasumsikan tak hingga. Karena  $R_{sens}$  sangat besar maka  $V_{out}=V_{in}$

Dengan arti kata dengan rangkaian diatas perubahan  $V_{out}$  berbanding lurus dengan cahaya. Untuk membuat rangkaian dengan  $V_{out}$  berbanding terbalik dengan perubahan cahaya hanya dengan mengganti letak sensor berada dekat dengan  $V_{in}$ .

Seperti dibahas diatas Saat Sensor mendeteksi warna berbeda maka  $V_{out}$  pun akan ikut berubah. Perubahan  $V_{out}$  inilah yang akan digunakan sebagai pembeda warna hitam dan putih baik dengan menggunakan komparator ataupun dengan menggunakan ADC internal mikrokontroler.

## 2. Mekanisme Perancangan Sensor Garis

LED *superbright* berfungsi sebagai pengirim cahaya ke garis untuk dipantulkan lalu dibaca oleh sensor *photodiode*. Sifat dari warna putih (permukaan terang) yang memantulkan cahaya dan warna hitam (permukaan gelap) yang tidak memantulkan cahaya digunakan dalam aplikasi ini. Gambar dibawah ini adalah ilustrasi mekanisme sensor garis.



Gambar 21. Ilustrasi mekanisme sensor garis  
Sumber : <http://fahmizaleeits.wordpress.com/2010/09/02/robot-line-follower-dengan-multiplekser-adc/>

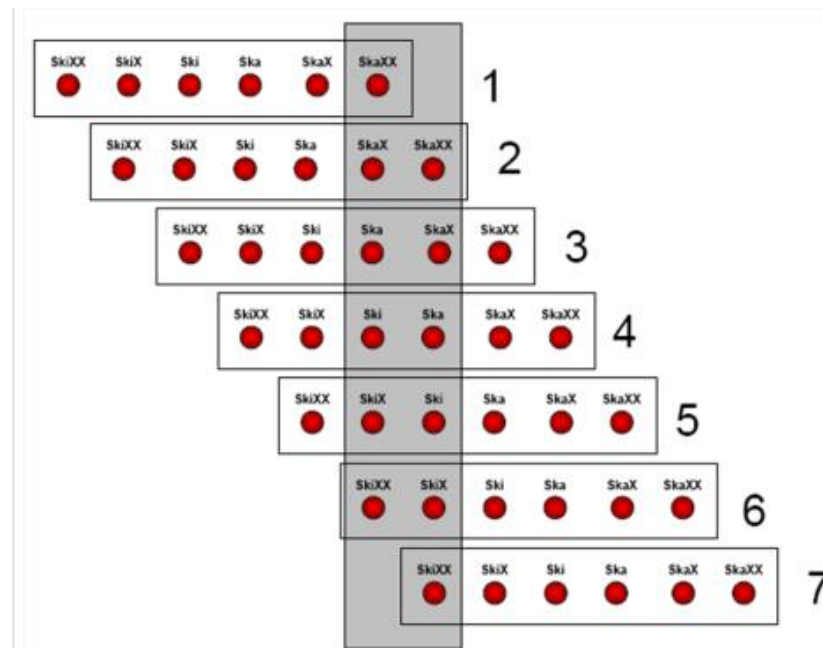
Sensor garis sering digunakan pada robot line follower (robot pengikut garis), digunakan juga sebagai pendeteksi objek dengan permukaan bidang pantul yang kontras. Selain menggunakan *photodiode* dapat juga dirancang dengan menggunakan *phototransistor*, dan *infra red*.

### **I. Error Tracking Lintasan**

Dalam pergerakan omni wheel ini semua komponen-komponen mempunyai peranan tersendiri. Atmega 8535 berperan dalam sistem pengendalian motor/roda yang menerima input dari sensor garis, saat Sensor mendeteksi warna berbeda maka Vout pun akan ikut berubah.

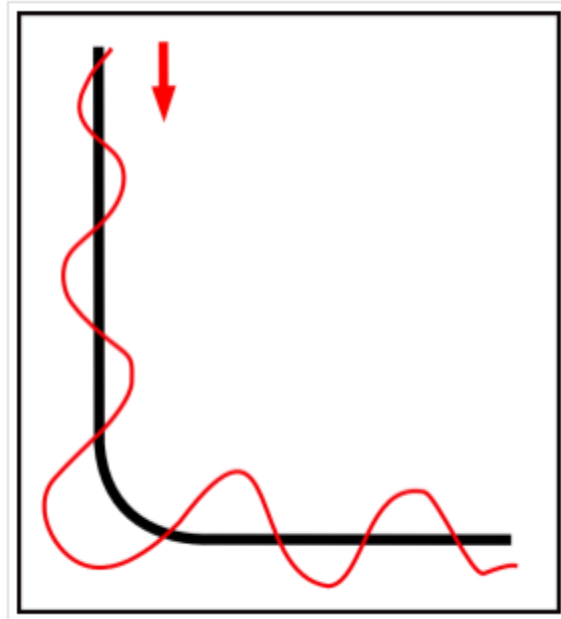
Skema posisi 8 buah sensor robot terhadap garis lintasan di tunjukkan pada gambar 19, idealnya robot selalu berada di tengah-tengah terhadap garis atau pada kondisi ke-4. ketika robot semakin menyimpang ke kiri dari garis maka dikatakan eror robot semakin besar untuk sisi kiri begitu pula untuk sisi kanan garis. dengan demikian eror terbesar adalah kondisi ke-7 dan ke-1 sedangkan eror terkecil adalah kondisi ke-4.

Karena prinsip line tracer ini menggunakan *differential wheel* atau dua roda dengan masing masing kendali, maka agar robot berada di tengah lintasan adalah dengan mengatur kecepatan masing masing motor penggerakannya. (<http://kurangsangu.wordpress.com/2011/05/13/line-tracer-dengan-kontrol-pid/>)



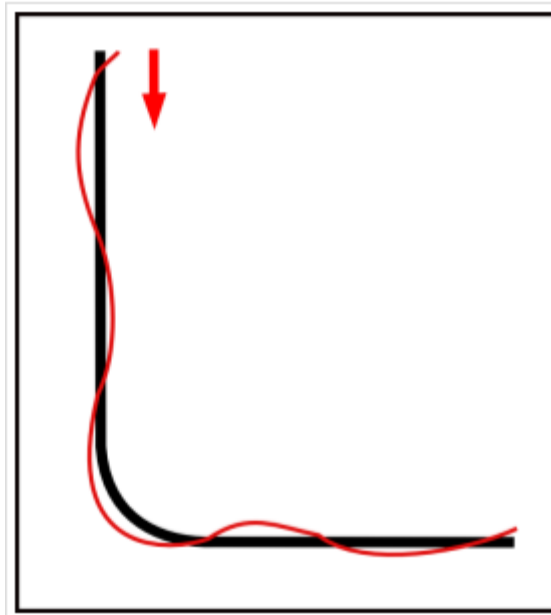
Gambar 22. Skema posisi sensor robot terhadap garis lintasan  
 Sumber : <http://kurangsangu.wordpress.com/2011/05/13/line-tracer-dengan-kontrol-pid/>

Fungsi *proportional control* pada robot line tracer ini adalah hanya menentukan aksi kecepatan motor kanan dan kiri setiap keadaan eror robot (menyimpang dari garis). ketika robot menyimpang ke kanan dari garis dengan kondisi ke-5 maka motor kanan harus lebih cepat dari motor kiri agar robot kembali ke kiri (manut garis). ketika kondisi eror ke-7 maka motor kanan harus tambah semakin cepat lagi dari motor kiri agar robot kembali ke lintasan,, dst.. kelemahan dari kontrol ini adalah masih adanya overshoot eror terhadap set point (nilai yg diinginkan) karena hanya merespon nilai eror. akibatnya robot masih terlihat bergelombang saat jalan. seperti yang ditunjukkan pada gambar 23



Gambar 23. Tracking lintasan yang bergelombang  
Sumber :[http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/355](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/355)

Kontrol diferensial berfungsi untuk merespon perubahan error setiap saatnya,, sehingga ketika robot semakin cepat berubah erornya, misal dari kondisi  $eror=0$  tiba tiba eror menjadi 6 maka motor kanan robot sebelah kanan akan semakin cepat dibandingkan ketika perubahan eror dari 0 ke  $eror=4$ . ini berguna untuk tikungan tikungan tajam di lintasan. Sedangkan kontrol integral berfungsi merespon jumlah total error yg telah terakumulasi. semakin lama robot menemukan set point semakin besar akumulasi erornya sehingga semakin besar respon integralnya. Agar robot bisa lebih alus (smooth) lagi jalannya, perlu ditambahkan kontrol integral dan diferensial ("I" dan "D").



Gambar 24. Tracking lintasan yang lebih smoot  
Sumber :[http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/355](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/355)

## I. Prinsip Dasar Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan sebuah sistem yang terdiri atas satu atau beberapa peralatan yang berfungsi untuk mengendalikan sistem lain yang berhubungan dengan sebuah proses. Keberadaan sistem kendali dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Pada prinsipnya hal itu disebabkan tidak dapat di ubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik plant harus diterima sebagaimana adanya, sehingga perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan suatu sub sistem, yaitu sistem kendali.

## 1. Jenis-Jenis Pengontrolan

### a. Sistem kontrol lup terbuka (open- loop control system)

Sistem kontrol terbuka adalah sistem kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol lup terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpam-balikkan untuk dibandingkan dengan masukan.

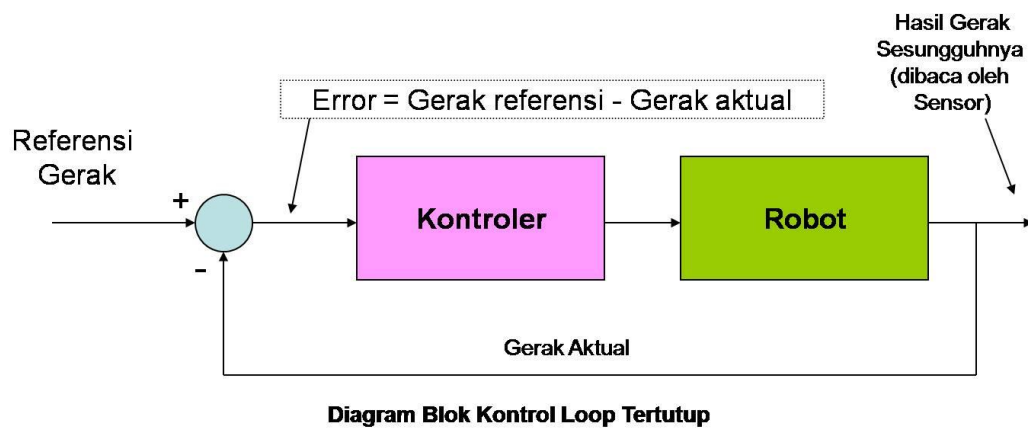


**Diagram Blok Kontrol Loop Terbuka**

Gambar 25. Sistem kontrol lup terbuka (Ogata, 1993)

### b. Sistem kontrol lup tertutup (closed-loop control system)

Sistem kontrol lup tertutup adalah sistem kontrol yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengontrolan. Jadi sistem kontrol lup tertutup adalah sistem kontrol berumpan balik (yang dapat berupa sinyal keluaran atau suatu fungsi sinyal keluaran dan turunannya), diumpamakan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan dan membuat agar keluaran sistem mendekati harga yang diinginkan.



Gambar 26. Sistem Kontrol lup tertutup (Ogata, 1993)



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada Januari – Juni 2013 di Workshop Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Gowa.

### B. Alat dan Bahan yang digunakan

#### 1. Alat

Adapun alat-alat yang digunakan untuk merancang Robot penjinak bom adalah :

##### a. Mesin bubut



Merek : Harison  
Tipe : Alpha 460

##### b. Las listrik



Merek : LAKONI  
Tipe : Falcon 160e

c. Bor duduk listrik untuk membuat lubang pada material



Merek : Muller  
Tipe : ZJQ4116B

d. Cutting Wheel digunakan untuk memotong material



Merek : Maktec  
Tipe : -

e. Gerinda tangan digunakan untuk menghaluskan permukaan material



Merek : Maktec  
Tipe : MT954

f. Kunci inggris untuk mengencangkan baut dan mur



Merek : Krisbow

Tipe : -

g. Gunting plat untuk memotong plat



h. Satu set computer dan printer.



Merek : Lg dan Canon

Tipe : -

## 2. Bahan

Sedangkan Bahan-bahan yang digunakan untuk merancang Robot penjinak bom adalah :

- a. Timing Gear sebagai roda robot



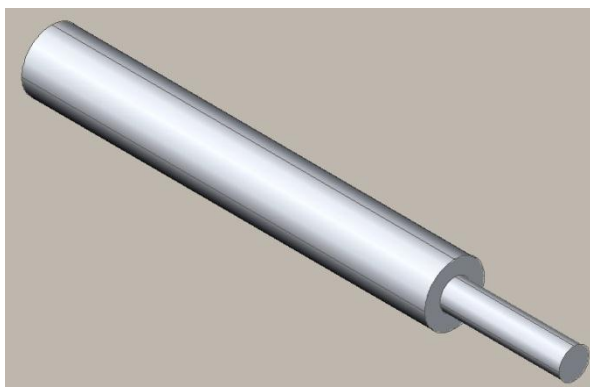
Merek : Mitsubitshi

Bahan : Campuran Al dan Fe

- b. Timing belt sebagai belt penghubung antara kedua roda



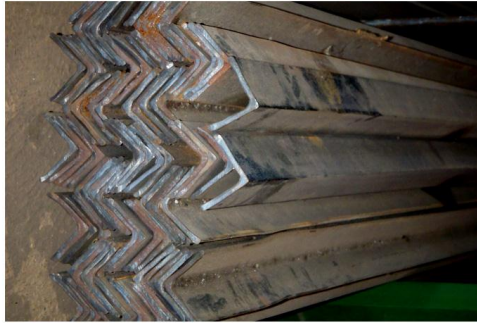
- b. Baja ST 37 dan ST 42 untuk tromol dan poros dari robot



Merek : -

Bahan : Baja ST 37

c. Besi siku sebagai rangka dari robot



Ukuran : 3 x 3 x 0.2 cm

Merek : -

d. Besi plat sebagaiudukan motor dan actuator



Merek : -

Ukuran : 2 cm

f. Bearing, roda gigi, dan rantai sebagai transmisi



- g. Mur dan baut untuk menyatukan rangka dan bagian-bagian dari robot penjinak bom

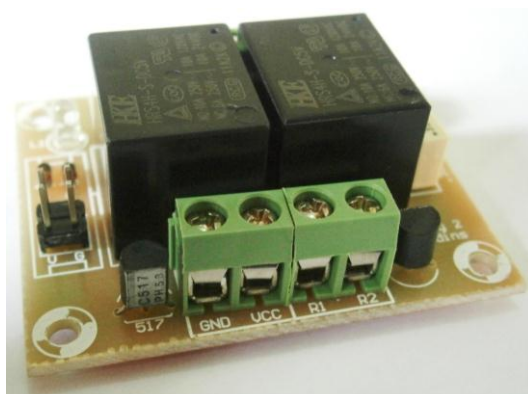


- h. Motor penggerak



Spesifikasi :  
 Built-in gearbox  
 Vsuplai : 12~24 vdc  
 Arus : 3-10 Amp  
 Speed : 195-400rpm  
 Torsi : 70 Kg.cm

- i. Driver motor sebagai komponen elektronika untuk mengontrol putaran motor



Spesifikasi :  
 Driver Motor, 10A, 12 V  
 Regenerative Motor Controller  
 Depok Instrumen

j. Motor Servo untuk motor penggerak lengan robot

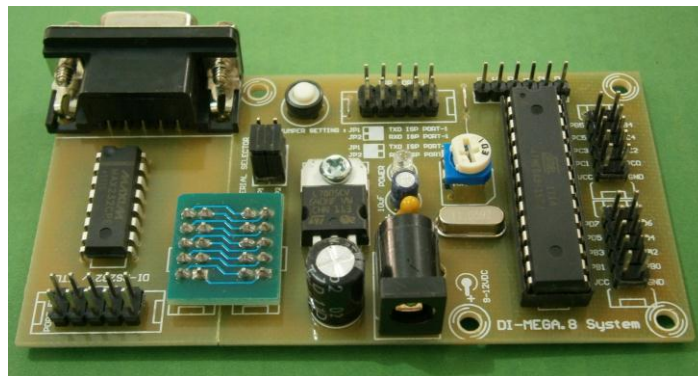


Spesifikasi :

Input Voltage : 4.8-6 Volt Dc

Hitec HS-485HB Metal Gear Servo

k. Microcontroller untuk menjalankan program



Spesifikasi :

Mikrokontroler

DI-Smart Mega 8

ATMEGA 8535

l. Akumulator sebagai sumber tenaga penggerak



Merek : Panasinic

Model : UP-RW1245P1

## **C. Pelaksanaan Penelitian**

### **1. Tahap Persiapan**

- Menggambar desain Robot penjinak bom dengan menggunakan program AutoCad.
- Menyiapkan alat dan bahan yang akan dipakai untuk melakukan simulasi.
- Membuat diagram blok dari sistem secara keseluruhan.
- Membuat persamaan Kinematik dan Dinamika dari Robot penjinak bom.

### **2. Tahap Perancangan Sistem Elektrik dan Mekanik.**

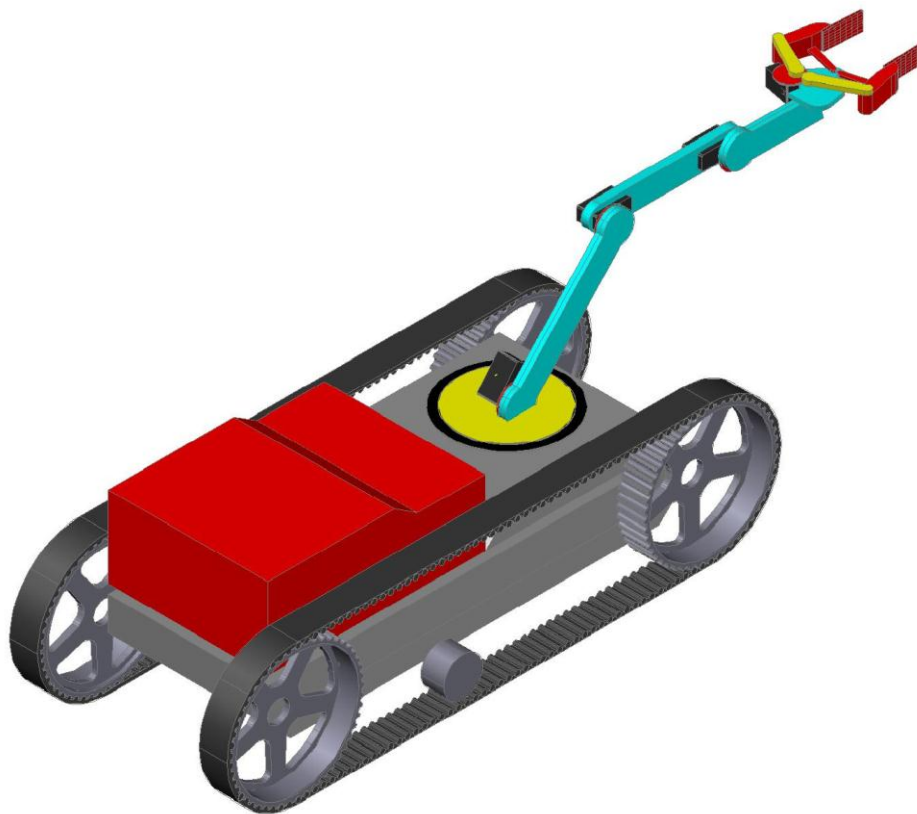
Merakit system mekanik dari Robot penjinak bom sesuai dengan gambar dan rancangan yang telah di buat. Selanjutnya untuk system elektrik, membuat program penggerak motor berdasarkan nilai-nilai yang telah diperoleh sebelumnya dari pengujian dikomputer, selanjutnya di download ke mikrokontroler.

### **3. Tahap Simulasi.**

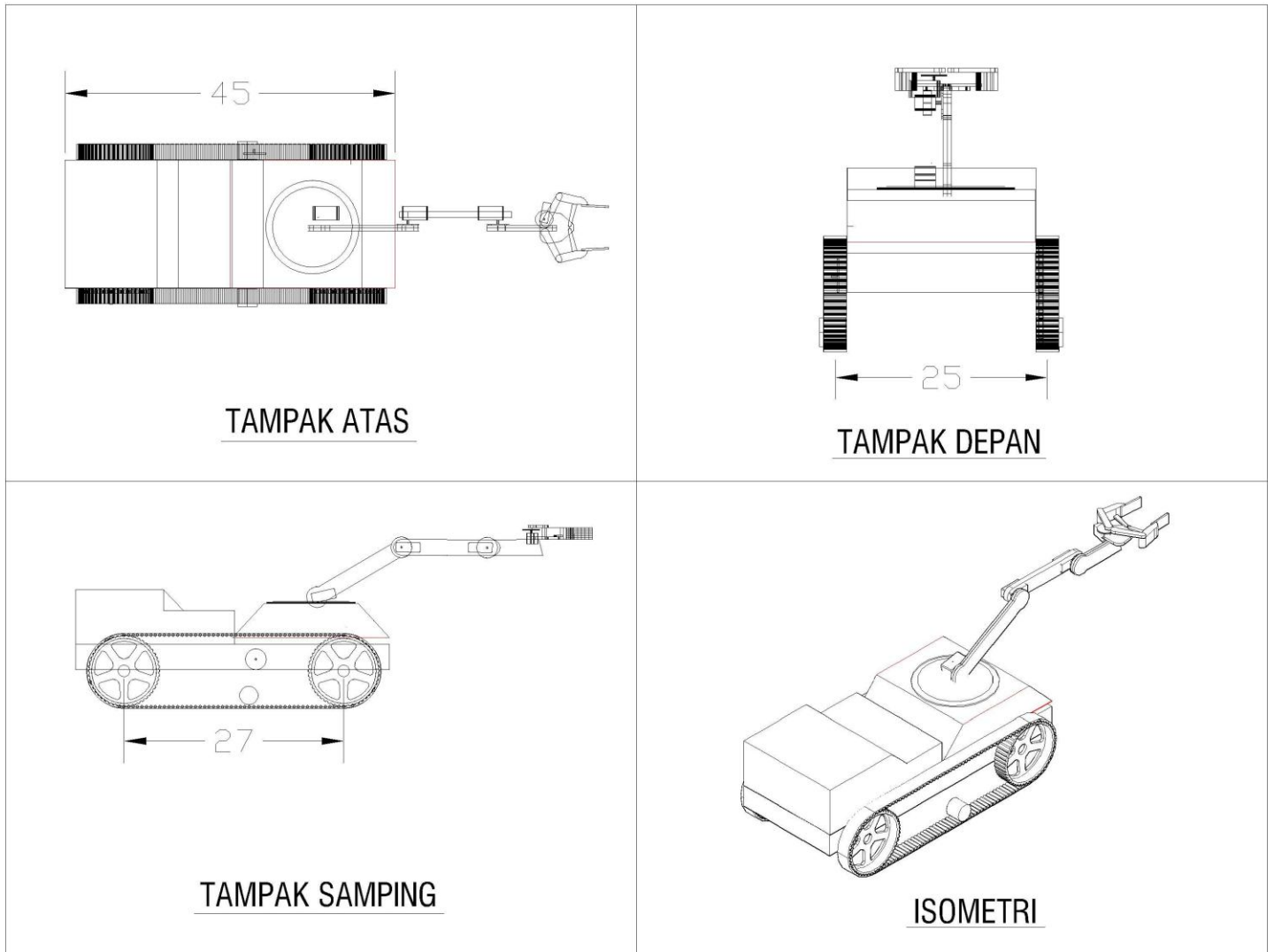
Keluaran yang diharapkan dari simulasi yaitu Robot penjinak bom dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan program yang telah di input kedalam mikrokontroler.



#### D. Gambar Ilustrasi Perancangan

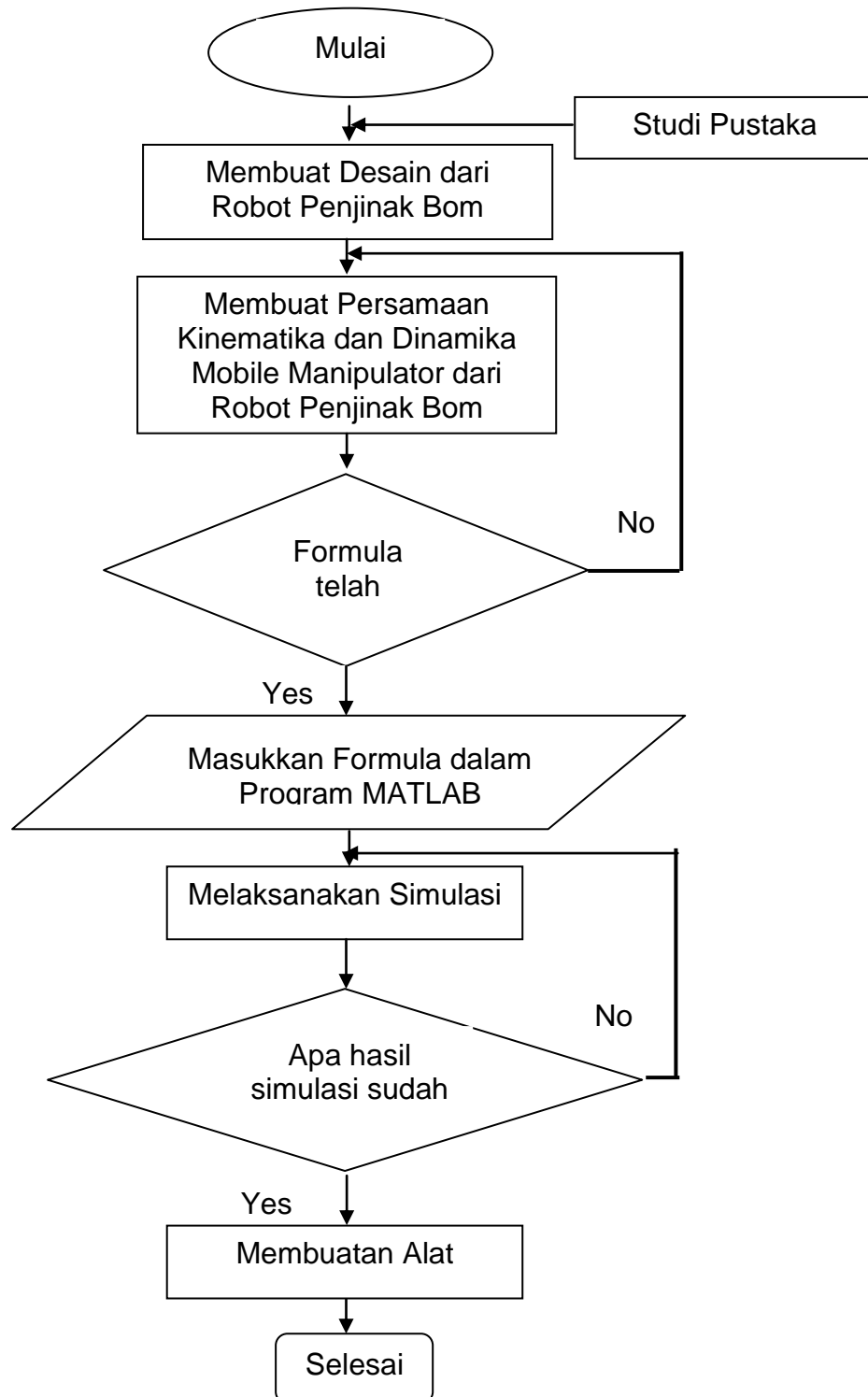


Gambar 27. Ilustrasi Perancangan



Gambar 28. Gambar Tampak dan Isomertri

### E. Diagram Alir Penelitian / Flow Chart



Gambar 29. Diagram alir penelitian (Flow Chart)

## BAB IV

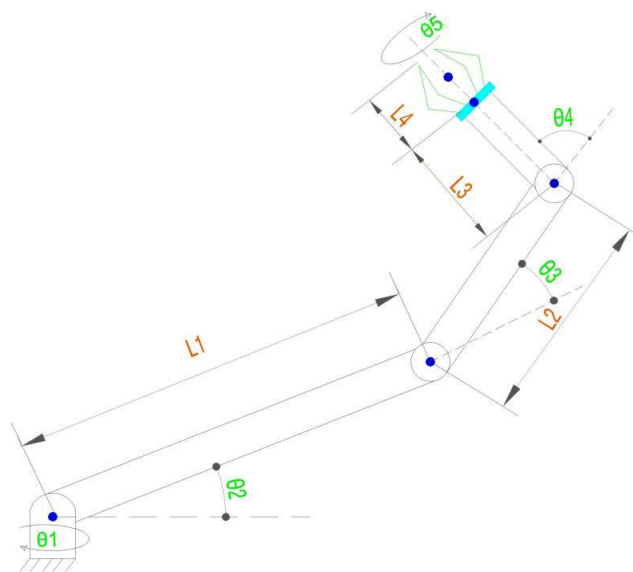
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Analisis Kinematika Robot Penjinak Bom

##### 1. Persamaan Kinematika Manipulator Robot

Persamaan Kinematika yang digunakan untuk mengetahui informasi kedudukan (sudut) yang dinyatakan oleh setiap sendi ketika robot sedang melakukan gerakan adalah Metoda Denavit-Hartenberg yang dikenal dengan DH Parameter. Prinsip dasar representasi DH Parameter adalah melakukan transformasi koordinat antar dua link yang berdekatan. Hasilnya adalah suatu matrix (4 x 4) yang menyatakan system koordinat dari suatu link dengan link yang terhubung pada pangkalnya (link sebelumnya).

Aplikasi perhitungan DH parameter dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada Manipulator 4 DOF dibawah ini.



Gambar 27. Konfigurasi Manipulator Robot 5-Joint ( DOF)

DH Parameter :

$i-1$	$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
0	1	0	0	0	$\theta_1$
1	2	0	$L_1$	0	$\theta_2$
2	3	0	$L_2$	0	$\theta_3$
3	4	0	$L_3$	0	$\theta_4$
4	5	90	$L_4$	0	$\theta_5$

Rumus umum adalah :

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (08)$$

Berdasarkan Tabel DH Parameter maka Transformasi Matriks setiap sumbu dapat dijabarkan sebagai berikut :

a. Transformasi matriks untuk Sumbu 1 ( ${}^0T_1$ ) adalah :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 \cos 0 & \cos \theta_1 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0 \\ \sin \theta_1 \sin 0 & \cos \theta_1 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (09)$$

b. Transformasi matriks untuk Sumbu 2 ( ${}^1T_2$ ) adalah :

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin \theta_2 \cos 0 & \cos \theta_2 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0 \\ \sin \theta_2 \sin 0 & \cos \theta_2 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

∴

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(10)$$

c. Transformasi matriks untuk Sumbu 3 ( ${}^2_3T$ ) adalah :

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 \cos 0 & \cos \theta_3 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0 \\ \sin \theta_3 \sin 0 & \cos \theta_3 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(11)$$

d. Transformasi matriks untuk Sumbu 4 ( ${}^3_4T$ ) adalah :

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & L_3 \\ \sin \theta_4 \cos 0 & \cos \theta_4 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0 \\ \sin \theta_4 \sin 0 & \cos \theta_4 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & L_3 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & L_3 \\ s_4 & c_4 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

e. Transformasi matriks untuk Sumbu 5 ( ${}^4_5T$ ) adalah :

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & L_4 \\ \sin \theta_5 \cos 90 & \cos \theta_5 \cos 90 & -\sin 90 & -\sin 90 \cdot 0 \\ \sin \theta_5 \sin 90 & \cos \theta_5 \sin 90 & \cos 90 & \cos 90 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (13)$$

Sasaran untuk posisi  $(x,y)$  dan arah  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$  didalam

Transformasi Matriks Homogeneous didefinisikan sebagai berikut :

$${}^B T_{Goal} = {}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan defenisi diatas ada empat parameter yang berpengaruh menentukan posisi  $(x,y)$  dan arah  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$  dari setiap proses rotasi dan translasi dari setiap sumbu, yaitu :

Untuk penentuan posisi  $(x,y)$  :

$$x = P_x$$

$$y = P_y$$

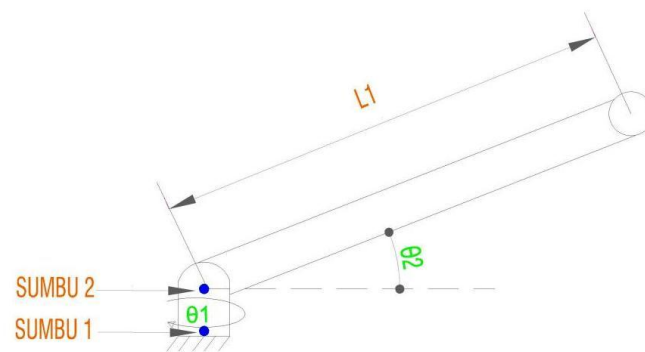
Untuk penentuan arah sudut  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$  yang terbentuk adalah :

$$c_\phi = r_{11}$$

$$s_\phi = r_{21}$$

Dari gambar konfigurasi manipulator 5-Joint (DOF) posisi dan arah sudut dari setiap pergerakan lengan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan dari DH Parameter :

1). Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 2 yaitu :



Gambar 28. Konfigurasi Manipulator Robot 1-Joint ( DOF) (Endra, 2006)

Persamaan DH Parameternya :

$${}^0_2T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T$$



$$\begin{aligned}
{}^0_2T &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0_2T &= \begin{bmatrix} c_1c_2 - s_1s_2 & -c_1s_2 - s_1c_2 & 0 & c_1L_1 \\ s_1c_2 + c_1s_2 & -s_1s_2 + c_1c_2 & 0 & s_1L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^0_2T &= \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & L_1c_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & L_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(14)
\end{aligned}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B_W T_{Goal} = {}^0_2T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & L_1c_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & L_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi sumbu i=2 berada pada titik:

$$\begin{aligned}
x &= L_1c_1 \\
&= L_1 \cos \theta_1 \dots\dots\dots(15)
\end{aligned}$$

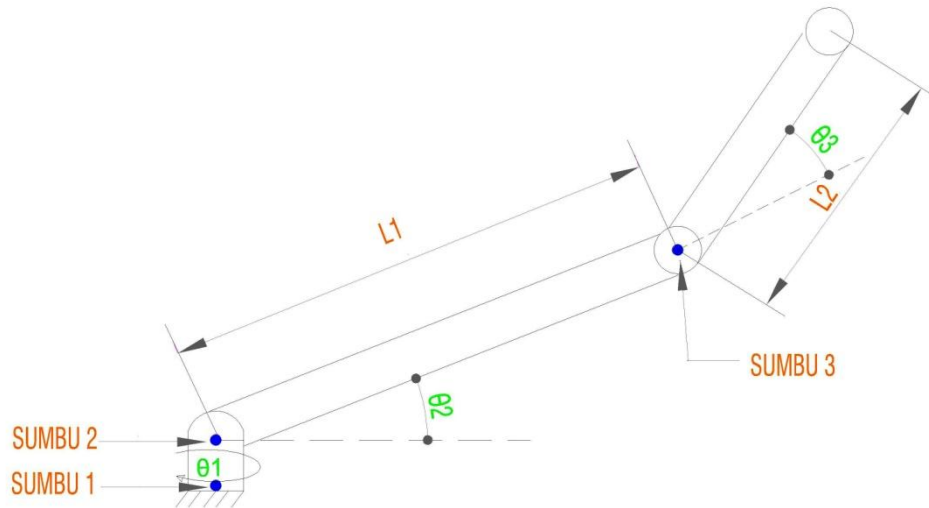
$$\begin{aligned}
y &= s_1L_1 \\
&= L_1 \sin \theta_1 \dots\dots\dots(16)
\end{aligned}$$

Dan arah sudut yang terbentuk adalah :

$$\begin{aligned}
c_\phi &= c_{12} \\
&= \cos (\theta_1 + \theta_2) \dots\dots\dots(17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
s_\phi &= s_{12} \\
&= \sin (\theta_1 + \theta_2) \dots\dots\dots(18)
\end{aligned}$$

2) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 3 yaitu :



Gambar 29. Konfigurasi Manipulator Robot 2-Joint (DOF) (Endra, 2006)

Persamaan DH Parameternya:

$$\begin{aligned}
 {}^0_3T &= {}^0_2T \cdot {}^2_3T \\
 {}^0_3T &= \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & L_1 c_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & L_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0_3T &= \begin{bmatrix} c_{12}c_3 - s_{12}s_3 & -c_{12}s_3 - s_{12}c_3 & 0 & L_2c_{12} + L_1c_1 \\ s_{12}c_3 + c_{12}s_3 & -s_{12}s_3 + c_{12}c_3 & 0 & L_2s_{12} + L_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^0_3T &= \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2c_{12} + L_1c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2s_{12} + L_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B_W T_{Goal} = {}^0_3T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2c_{12} + L_1c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2s_{12} + L_1s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi sumbu  $i=3$  berada pada titik  $(x,y)$  :

$$\begin{aligned} x &= L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ &= L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_1 \dots\dots\dots(19) \end{aligned}$$

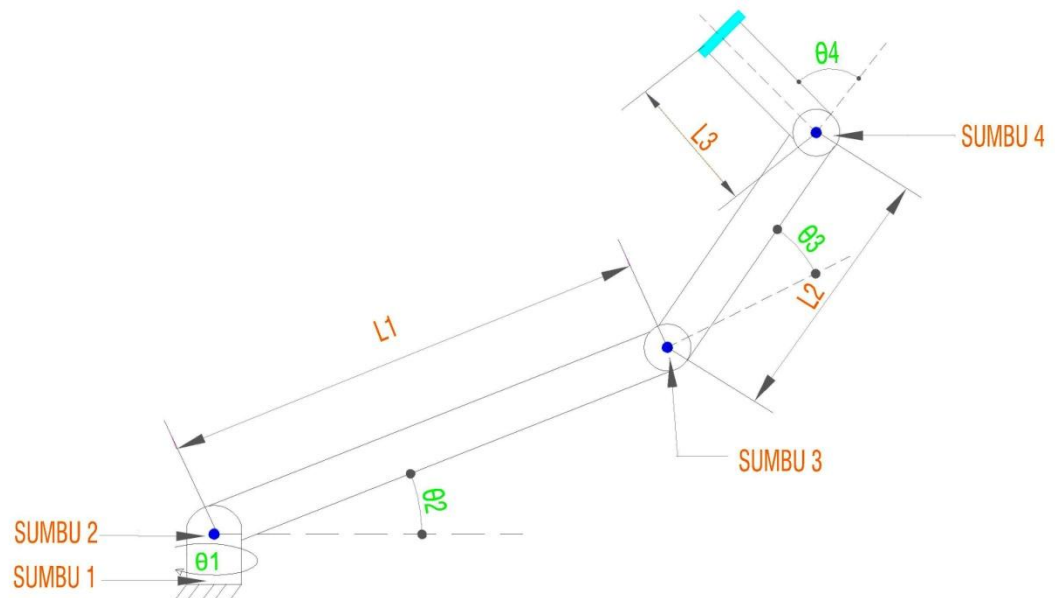
$$\begin{aligned} y &= L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ &= L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin \theta_1 \dots\dots\dots(20) \end{aligned}$$

Dan arah sudut yang terbentuk adalah :

$$\begin{aligned} c_{\phi} &= c_{123} \\ &= \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{\phi} &= s_{123} \\ &= \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \dots\dots\dots(22) \end{aligned}$$

3) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 4 yaitu :



Gambar 30. Konfigurasi Manipulator Robot 3-Joint (DOF) (Endra, 2006)

Persamaan DH Parameternya :

$${}^0T_4 = {}^0T_3 \cdot {}^3T_4$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & L_3 \\ s_4 & c_4 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_4 =$$

$$\begin{bmatrix} c_{123} c_4 - s_{123} \cdot s_4 & -c_{123} \cdot s_4 - s_{123} \cdot s_4 & s_{123} & L_3 c_{123} + L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} c_4 + c_{123} \cdot s_4 & -s_{123} \cdot s_4 + c_{123} \cdot c_4 & -c_{123} & L_3 s_{123} + L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B T_{Goal} = {}^0 T_4 = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c_{123} c_4 - s_{123} \cdot s_4 & -c_{123} \cdot s_4 - s_{123} \cdot s_4 & s_{123} & L_3 c_{123} + L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} c_4 + c_{123} \cdot s_4 & -s_{123} \cdot s_4 + c_{123} \cdot c_4 & -c_{123} & L_3 s_{123} + L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(23)

Jadi posisi sumbu i=4 berada pada titik :

$$x = L_3 c_{123} + L_2 c_{12} + L_1 c_1 \dots \dots \dots (24)$$

$$= L_3 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) + L_1 \cos \theta_1$$

$$y = L_3 s_{123} + L_2 s_{12} + L_1 s_1 \dots \dots \dots (25)$$

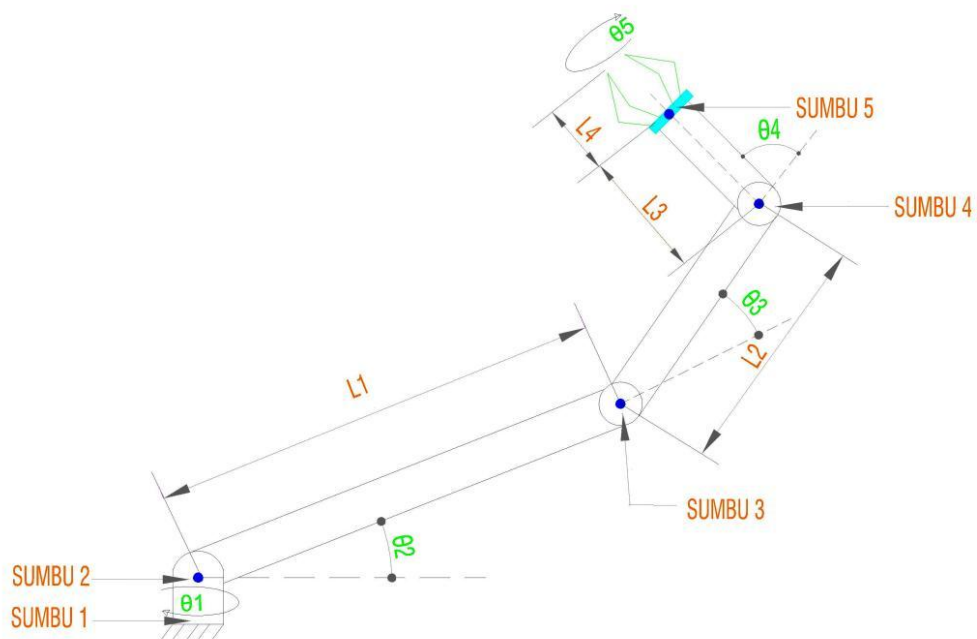
$$= L_3 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) + L_1 \sin \theta_1$$

Dan arah sudut yang terbentuk adalah :

$$\begin{aligned}
 C_{\phi} &= C_{123} C_4 - S_{123} \cdot S_4 \\
 &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot \cos \theta_4 - \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot \sin \theta_4 \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\phi} &= S_{123} C_4 + C_{123} \cdot S_4 \\
 &= \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot \cos \theta_4 + \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \cdot \sin \theta_4 \quad (27)
 \end{aligned}$$

4) Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 5 yaitu :



Gambar 31. Konfigurasi Manipulator Robot 4-Joint (DOF) (Endra, 2006)

Persamaan DH Parameternya :

$${}^0_5T = {}^0_4T \cdot {}^4_5T$$

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} C_{123} C_4 - S_{123} \cdot S_4 & -C_{123} \cdot S_4 - S_{123} \cdot S_4 & S_{123} & L_3 C_{123} + L_2 C_{12} + L_1 C_1 \\ S_{123} C_4 + C_{123} \cdot S_4 & -S_{123} \cdot S_4 + C_{123} \cdot C_4 & -C_{123} & L_3 S_{123} + L_2 S_{12} + L_1 S_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_{123} C_4 C_5 - S_{123} S_4 C_5 + S_{123} S_5 & -C_{123} C_4 S_5 + S_{123} S_4 S_5 + S_{123} C_5 & C_{123} S_4 + S_{123} S_4 & C_{123} C_4 L_4 - S_{123} S_4 L_4 + C_{123} L_3 + C_{12} L_2 + C_1 L_1 \\ S_{123} C_4 C_5 + C_{123} S_4 C_5 - C_{123} S_5 & -S_{123} C_4 S_5 - C_{123} S_4 S_5 - C_{123} C_5 & S_{123} S_4 - C_{123} C_4 & S_{123} C_4 L_4 + C_{123} S_4 L_4 + S_{123} L_3 + S_{12} L_2 + S_1 L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B T_{Goal} = {}^0 T_4 = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} c_{123}c_4c_5 - s_{123}s_4c_5 + s_{123}s_5 & -c_{123}c_4s_5 + s_{123}s_4s_5 + s_{123}c_5 & c_{123}s_4 + s_{123}s_4 & c_{123}c_4l_4 - s_{123}s_4l_4 + c_{123}l_3 + c_{12}l_2 + c_1l_1 \\ s_{123}c_4c_5 + c_{123}s_4c_5 - c_{123}s_5 & -s_{123}c_4s_5 - c_{123}s_4s_5 - c_{123}c_5 & s_{123}s_4 - c_{123}c_4 & s_{123}c_4l_4 + c_{123}s_4l_4 + s_{123}l_3 + s_{12}l_2 + s_1l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi sumbu i=5 berada pada titik :

$$x = c_{123}c_4l_4 - s_{123}s_4l_4 + c_{123}l_3 + c_{12}l_2 + c_1l_1 \dots \dots \dots (28)$$

$$y = s_{123}c_4l_4 + c_{123}s_4l_4 + s_{123}l_3 + s_{12}l_2 + s_1l_1 \dots \dots \dots (29)$$

Dan arah sudut yang terbentuk adalah :

$$c_\phi = c_{123}c_4c_5 - s_{123}s_4c_5 + s_{123}s_5 \dots \dots \dots (30)$$

$$s_\phi = s_{123}c_4c_5 + c_{123}s_4c_5 - c_{123}s_5 \dots \dots \dots (31)$$

4). Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju end effector :

Kinematik Maju (Forward Kinematic) robot dapat dijabarkan dengan mengacu posisi end effector merupakan hasil dari gerakan rotasi dan translasi sepanjang  $P_x$ ,  $P_y$  dan  $P_z$  (vektor posisi dalam matriks transformasi). Persamaan tersebut dapat ditulis :

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x' \\ P_y' \\ P_z' \\ 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (32)$$

Atau :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B T \cdot \begin{bmatrix} P_{x'y'z'} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dimana :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B W^T = {}^0 T =$$

$$\begin{bmatrix} c_{123}c_4c_5 - s_{123}s_4c_5 + s_{123}s_5 & -c_{123}c_4s_5 + s_{123}s_4s_5 + s_{123}c_5 & c_{123}s_4 + s_{123}s_5 & c_{123}c_4l_4 - s_{123}s_4l_4 + c_{123}l_3 + c_{12}l_2 + c_1l_1 \\ s_{123}c_4s_5 + c_{123}s_4c_5 - c_{123}s_5 & -s_{123}c_4s_5 - c_{123}s_4s_5 - c_{123}c_5 & s_{123}s_4 - c_{123}c_5 & s_{123}c_4l_4 + c_{123}s_4l_4 + s_{123}l_3 + s_{12}l_2 + s_1l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{x'y'z'} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_5 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan konfigurasi manipulator 5 DOF, maka didapat persamaan kinematik maju sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{123}c_4c_5 - s_{123}s_4c_5 + s_{123}s_5 & -c_{123}c_4s_5 + s_{123}s_4s_5 + s_{123}c_5 & c_{123}s_4 + s_{123}s_5 & c_{123}c_4l_4 - s_{123}s_4l_4 + c_{123}l_3 + c_{12}l_2 + c_1l_1 \\ s_{123}c_4s_5 + c_{123}s_4c_5 - c_{123}s_5 & -s_{123}c_4s_5 - c_{123}s_4s_5 - c_{123}c_5 & s_{123}s_4 - c_{123}c_5 & s_{123}c_4l_4 + c_{123}s_4l_4 + s_{123}l_3 + s_{12}l_2 + s_1l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_5 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Jadi :

$$x_T = c_{123}c_4c_5l_5 - s_{123}s_4c_5l_5 + s_{123}s_5l_5 + c_{123}c_4l_4 - s_{123}s_4l_4 + c_{123}l_3 + c_{12}l_2 + c_1l_1$$

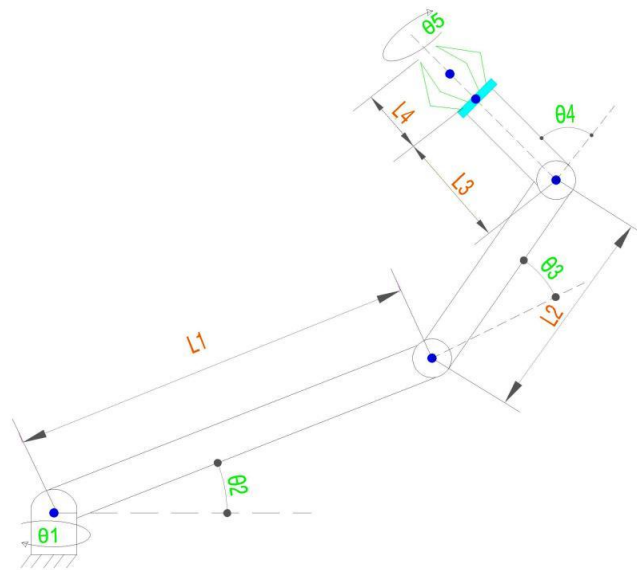
$$y_T = s_{123}c_4s_5l_5 + c_{123}s_4c_5l_5 - c_{123}s_5l_5 + s_{123}c_4l_4 + c_{123}s_4l_4 + s_{123}l_3 + s_{12}l_2 + s_1l_1 \quad (34)$$

$$z_T = 0 \quad \dots\dots\dots \backslash \dots\dots\dots (35)$$

### a. Kinematika Invers (Inverse Kinematic)

Kinematika Invers dapat dijabarkan, Jika  $(x_T, y_T)$  dan  $(x, y)$  diketahui maka  $\theta_2$  dan  $\theta_1$  dapat dicari :

1) Menentukan Persamaan  $\theta_2$  :



Gambar 32. Konfigurasi Manipulator Robot 5-Joint (DOF) (Endra, 2006)

Dengan memperhatikan persamaan DH Parameter dari konfigurasi manipulator 2 DOF dan mengikuti definisi Transformasi Homogeneous maka didapat :

$${}^B T_{Goal} = {}^{i-1} T_i = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dimana :

$${}^{i-1} T_i = {}^0 T_3 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (36)$$

Jadi :

$${}^B T_{Goal} = {}^0 T_3 = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & L_2 c_{12} + L_1 c_1 \\ s_{123} & c_{123} & 0 & L_2 s_{12} + L_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ada 4 (empat) persamaan non linier untuk memecahkan persamaan  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  yaitu :



$$\begin{aligned}
c_\phi &= c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
s_\phi &= s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\
x &= L_1 c_1 + L_2 c_{12} = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\
y &= L_1 s_1 + L_2 s_{12} = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)
\end{aligned}$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
c_{12} &= \cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\
s_{12} &= \sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2
\end{aligned}$$

Persamaan x dan y dapat ditulis:

$$\begin{aligned}
x &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\
y &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + L_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2
\end{aligned}$$

Dari dua persamaan terakhir ini kita dapat mencari  $\theta_2$  terlebih dahulu dengan mengeluarkan  $\cos \theta_2$  dari kedua persamaan. Dengan operasi pangkat dua pada keduanya, dan dikombinasikan didapat :

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2}$$

Sehingga :

$$\theta_2 = \arccos \left( \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right) \dots \dots \dots (37)$$

2). Menentukan Persamaan  $\theta_1$  :

Untuk memecahkan nilai  $\theta_1$  kita menggunakan persamaan non linier yaitu mengikuti nilai variabel x dan y :

$$\begin{aligned}
x &= L_1 c_1 + L_2 c_{12} \\
y &= L_1 s_1 + L_2 s_{12}
\end{aligned}$$

Dengan memperhatikan gambar :

$$x = k_1 c_1 + k_2 s_1$$

$$y = k_1 s_1 + k_2 c_1$$

Dimana :

$$k_1 = L_1 + L_2 c_2 \dots\dots\dots(38)$$

$$k_2 = L_2 s_2 \dots\dots\dots(39)$$

Menentukan nilai r :

$$r^2 = k_1^2 + k_2^2 \dots\dots\dots(40)$$

$$r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \dots\dots\dots(41)$$

Maka :

$$k_1 = r \cos \gamma \rightarrow \cos \gamma = \frac{k_1}{r}$$

$$\gamma = \arccos \frac{k_1}{r} \dots\dots\dots(42)$$

Atau:

$$k_2 = r \sin \gamma \rightarrow \sin \gamma = \frac{k_2}{r}$$

$$\gamma = \arcsin \frac{k_2}{r} \dots\dots\dots(43)$$

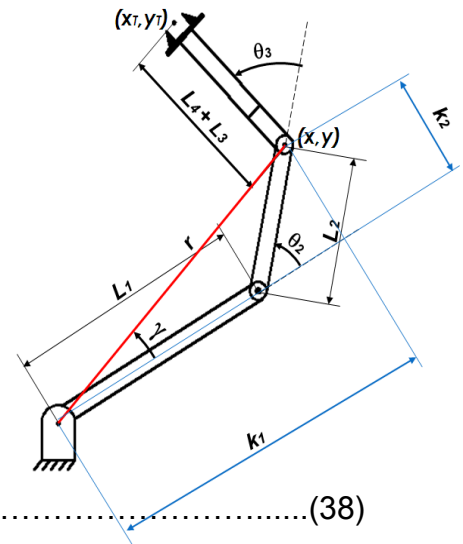
Kembali kepada dua persamaan Transformasi Matriks :

$$x = k_1 c_1 - k_2 s_1$$

$$= r \cos \gamma \cos \theta_1 - r \sin \gamma \sin \theta_1 \dots\dots\dots(44)$$

$$y = k_1 s_1 + k_2 c_1$$

$$= r \cos \gamma \sin \theta_1 + r \sin \gamma \cos \theta_1 \dots\dots\dots(45)$$



Atau :

$$\frac{x}{r} = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 \dots\dots\dots(46)$$

$$\frac{y}{r} = \cos \gamma \sin \theta_1 + \sin \gamma \cos \theta_1 \dots\dots\dots(47)$$

Atau:

$$\frac{x}{r} = \cos(\gamma + \theta_1) \dots\dots\dots(48)$$

$$\frac{y}{r} = \sin(\gamma + \theta_1) \dots\dots\dots(49)$$

Jadi :

$$\cos(\gamma + \theta_1) = \frac{x}{r}$$

$$(\gamma + \theta_1) = \arccos \frac{x}{r}$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{x}{r} - \gamma$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{x}{r} - \arccos \frac{k_1}{r}$$

$$\theta_1 = \arccos \frac{x}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} - \arccos \frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}$$

.....(50)

$$\theta_1 = \arccos \frac{x}{\sqrt{(L_1 + L_2 c_2)^2 + (L_2 s_2)^2}} - \arccos \frac{L_1 + L_2 c_2}{\sqrt{(L_1 + L_2 c_2)^2 + (L_2 s_2)^2}}$$

Atau :

$$\sin(\gamma + \theta_1) = \frac{y}{r}$$

$$(\gamma + \theta_1) = \arcsin \frac{y}{r}$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{y}{r} - \gamma$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{y}{r} - \arcsin \frac{k_1}{r}$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{x}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} - \arcsin \frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \dots\dots\dots(51)$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{y}{\sqrt{(L_1 + L_2 c_2)^2 + (L_2 s_2)^2}} - \arcsin \frac{L_1 + L_2 c_2}{\sqrt{(L_1 + L_2 c_2)^2 + (L_2 s_2)^2}}$$

3). Menentukan Persamaan  $\theta_3$  :

Untuk memecahkan nilai  $\theta_3$ , kembali pada parameter-parameter yang terdapat pada persamaan DH Parameter untuk 2 DOF yaitu :

$$c_\phi = c_{123}$$

$$c_\phi = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

Dimana :

$$x_T = L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} + L_4 c_{123} \cdot c_4$$

$$x_T = L_1 c_1 + L_2 c_{12} + L_3 c_{123} + L_4 c_{123} + L_4 c_4$$

$$x_T = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_4 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + L_4 \cos \theta_4$$

$$x_T = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos \phi + L_4 \cos \phi + L_4 \cos \theta_4$$

$$x_T = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + (L_3 + L_4) \cos \phi + L_4 \cos \theta_4$$

$$\cos \phi = \frac{x_T - L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_4 \cos \theta_4}{L_3 + L_4}$$

$$\phi = \arccos \frac{x_T - L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_4 \cos \theta_4}{L_3 + L_4} \dots\dots\dots(52)$$

Jadi :

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

$$\theta_3 = \left( \arccos \frac{x_T - L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{L_3 + L_4} \right) - \theta_1 - \theta_2 \dots (53)$$

## b. Contoh Perhitungan lengan Manipulator 5 Derajat Kebebasan

DH Parameter :

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	47,5003
2	0	0,185	0	226,9114
3	0	0,18	0	85,5884
4	0	0,097	0	90
5	90	0,05	0	0

a. Transformasi matriks untuk Sumbu 1 ( ${}^0_1T$ ) adalah :

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_1 \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 0,676 & -0,737 & 0 & 0 \\ 0,737 & 0,676 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

b. Transformasi matriks untuk Sumbu 2 ( ${}^1_2T$ ) adalah :

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_1 \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} -0,683 & 0,73 & 0 & 0,185 \\ -0,73 & -0,683 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

c. Transformasi matriks untuk Sumbu 3 ( ${}^2_3T$ ) adalah :

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_1 \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 0,077 & -0,997 & 0 & 0,18 \\ 0,997 & 0,077 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

d. Transformasi matriks untuk Sumbu 4 ( ${}^3_4T$ ) adalah :

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_1 \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0,097 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

e. Transformasi matriks untuk Sumbu 5 ( ${}^4_5T$ ) adalah :

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c \theta_i & -s \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s \theta_i c \alpha_{i-1} & c \theta_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} d_1 \\ s \theta_i s \alpha_{i-1} & c \theta_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,05 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pergerakan lengan-lengan manipulator dari dasar (base) sampai sumbu 4 dapat kita lihat pada persamaan dibawah ini:

$${}^0_5T = {}^0_1T \cdot {}^1_2T \cdot {}^2_3T \cdot {}^3_4T \cdot {}^4_5T.$$

- Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 2 yaitu :

a. Perkalian Matriks  ${}^0_1T \cdot {}^1_2T$  adalah :

$${}^0_1T \cdot {}^1_2T = \begin{bmatrix} 0,676 & -0,737 & 0 & 0 \\ 0,737 & 0,676 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0,683 & 0,73 & 0 & 0,185 \\ -0,73 & -0,683 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} 0,076 & 0,997 & 0 & 0,125 \\ -0,997 & 0,076 & 0 & 0,136 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x dan y dalam sumbu 2 adalah :

$$x_2 = 0,125 \quad (m)$$

$$y_2 = 0,136 \quad (m)$$

- Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 3 yaitu :

b. Perkalian matriks  ${}^0_2T \cdot {}^2_3T$  adalah :

$${}^0_2T \cdot {}^2_3T = \begin{bmatrix} 0,076 & 0,997 & 0 & 0,125 \\ -0,997 & 0,076 & 0 & 0,136 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,077 & -0,997 & 0 & 0,18 \\ 0,997 & 0,077 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 0,999 & 0,00099 & 0 & 0,137 \\ -0,001 & 0,999 & 0 & -0,043 \\ 0 & 0 & 1 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x dan y dalam sumbu 3 adalah :

$$X_3 = 0,137 \quad (m)$$

$$Y_3 = -0,043 \quad (m)$$

- Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 4 yaitu :

c. Perkalian matriks  ${}^0_3T \cdot {}^3_4T$  adalah :

$${}^0_3T \cdot {}^3_4T = \begin{bmatrix} 0,999 & 0,00099 & 0 & 0,137 \\ -0,001 & 0,999 & 0 & -0,043 \\ 0 & 0 & 1 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0,097 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} -0,707 & -0,707 & 0 & 3,374 \\ 0,707 & -0,707 & 0 & 2,21 \\ 0 & 0 & 1 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x dan y dalam sumbu 4 adalah :

$$X_4 = 3.374 \text{ (m)}$$

$$Y_4 = 2.21 \text{ (m)}$$

- Pergerakan lengan dari dasar (base) menuju sumbu 5 yaitu :

c. Perkalian matriks  ${}^0_4T \cdot {}^4_5T$  adalah :

$${}^0_4T \cdot {}^4_5T = \begin{bmatrix} -0,707 & -0,707 & 0 & 3,374 \\ 0,707 & -0,707 & 0 & 2,21 \\ 0 & 0 & 1 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} -0,707 & 0 & 0,707 & 3,021 \\ 0,707 & 0 & 0,707 & 2,564 \\ 0 & 1 & 0 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi x dan y dalam sumbu 4 adalah :

$$X_5 = 3.021 \text{ (m)}$$

$$Y_5 = 3.564 \text{ (m)}$$

### c. Contoh Perhitungan Inverse Kinematic :

Diketahui :

$$L1 = 0,185 \text{ m}$$

$$x_T = 2,8577 \text{ m}$$

$$L2 = 0,18 \text{ m}$$

$$y_T = -0,9306 \text{ m}$$



$$L3 = 0,097 \text{ m} \qquad x = 0,125 \text{ m}$$

$$L4 = 0,05 \text{ m} \qquad y = 0,136 \text{ m}$$

Permasalahan :

Tentukan  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  dan  $\theta_3$ ?

a. Menentukan Persamaan  $\theta_2$

Dimana :

$$x = 0,125 \text{ m}$$

$$y = 0,136 \text{ m}$$

$$L1 = 0,185 \text{ m}$$

$$L2 = 0,18 \text{ m}$$

Rumus :

$$\theta_2 = \arccos \left( \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right)$$

$$\theta_2 = \arccos \left( \frac{0,125^2 + 0,136^2 - 0,185^2 - 0,18^2}{2 \cdot 0,185 \cdot 0,18} \right)$$

$$\theta_2 = 226,3451^\circ$$

Menentukan Persamaan  $\theta_1$

$$\theta_1 = \left( \frac{\arccos X}{r} \right) - \left( \frac{\arccos k1}{r} \right)$$

Dimana :

$$k_1 = L1 + L2 \cdot C2$$

$$= 0,185 + 0,18 \cdot \cos 226,3451$$

$$k_2 = L2 \cdot S2$$

$$= 0,18 \cdot \sin 226,3451$$

$$r =$$

$$\sqrt{(0,185 + 0,18 \cdot \cos 226,3451)^2 + (0,18 \cdot \sin 226,3451)^2}$$

$$= 0,1437$$

$$\theta_1 = \left( \frac{\arccos 0,125}{0,1437} \right) - \left( \frac{\arccos 0,0607}{0,1437} \right)$$

$$\theta_1 = 47,4988^\circ$$

c. Menentukan Persamaan  $\theta_3$ :

Rumus :

$$\theta_3 = \phi - \theta_1 - \theta_2$$

Dimana :

$$\theta_1 = 47,4988^\circ$$

$$\theta_2 = 226,3451^\circ$$

$$\theta_3 = \left( \arccos \frac{x_T - L_1 \cos \theta_1 - L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{L_3 + L_4} \right) - \theta_1 - \theta_2$$

$$\begin{aligned} \theta_3 &= \left( \arccos \frac{2,8577 - 0,185 \cdot \cos 47,4988 - 0,18 \cos(47,4988 + 226,3451)}{0,097 + 0,05} \right) - 47,4988 - 60,002 \\ &= 85,6421^\circ \end{aligned}$$

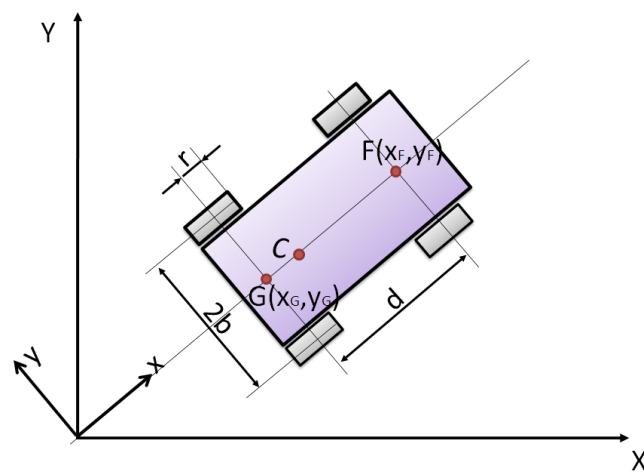
## 2. Analisis Kinematika Mobile Robot

Sistem gerak Non-Holonomic merupakan sistem gerak yang mempunyai keterbatasan dalam arah gerakan. Fungsi geometri tertentu yang berhubungan dengan “arah hadap” harus dipenuhi untuk mendapatkan gerak yang sesuai.

Mobile robot merupakan salah satu contoh aplikasi yang memiliki struktur kinemati Non-Holonomic. Mobile Robot didefinifkan bergerak

dalam kawasan 2D. Kontur medan yang tidak rata seperti jalan naik turun lazimnya tidak dimasukkan sebagai unsur sumbu Z karena navigasi (gerak robot) tetap bisa diasumsikan bergerak dalam kawasan sumbu XY saja.

Kinematika dari mobile robot non-holonomic seperti terlihat pada diagram bebas berikut :



Gambar 33. DDMR pada medan 2D Cartesian

Robot diasumsikan berada dalam kawasan 2D pada koordinat Cartesian XY. Parameter-parameter dalam gambar adalah :

$\theta$  = sudut arah hadap robot

$2b$  = lebar robot yang diukur dari garis tengah roda ke roda

$r$  = jari-jari roda (roda kiri dan kanan adalah sama dan sebangun)

$d$  = jarak antara titik tengah antara 2 roda, G dengan titik acuan F

$(x,y)$  = koordinat acuan di tubuh robot terhadap sumbu XY

Dalam kajian kinematik ini robot diasumsikan bergerak relatif pelan dan roda tidak slip terhadap permukaan jalan. Maka komponen x

dan  $y$  dapat diekspresikan dalam suatu persamaan nonholonomic sebagai berikut,

$$\dot{x}_G \sin \theta - \dot{y}_G \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(54)$$

Untuk titik  $F$  sebagai acuan analisa, persamaan di atas dapat ditulis,

$$\dot{x}_F \sin \theta - \dot{y}_F \cos \theta + \dot{\theta}d = 0 \quad \dots\dots\dots(55)$$

Bentuk umum persamaan kinematik untuk DDMR ini dapat dinyatakan dalam persamaan kecepatan sebagai berikut:

$$\dot{q}(t) = T_{NH}(q)\dot{\theta}(t) \quad \dots\dots\dots(56)$$

Dimana :

$\dot{q}$  = sistem koordinat umum robot

$$\dot{q} = [x_F, y_F, \theta]^T \quad \text{atau} \quad \dot{q} = \begin{bmatrix} x_F \\ y_F \\ \theta \end{bmatrix}$$

$\dot{\theta}$  = Kecepatan radial

$$\dot{\theta} = [\dot{\theta}_L, \dot{\theta}_R]^T \quad \text{atau} \quad \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix}$$

$T_{NH}$  = Matriks transformasi nonholonomic

$$T_{NH} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_F \\ \dot{y}_F \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(57)$$

Setelah diperkalikan hasilnya:

$$\dot{X}_c = \dot{\theta}_L \cos \theta - \dot{\theta}_R d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(58)$$

$$\dot{Y}_c = \dot{\theta}_L \sin \theta + \dot{\theta}_R d \cos \theta \quad \dots\dots\dots(59)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_R \dots\dots\dots(60)$$

Untuk mengetahui kinematik inversnya (Kecepatan sudut) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\dot{\theta}(t) = T_{NH}^{-1}(q) \dot{q}(t) \dots\dots\dots(61)$$

Untuk percepatan linear didapat dengan mendifferensialkan persamaan kecepatan linear yaitu :

$$\ddot{q}(t) = T_{NH}''(q) \dot{\theta}(t) - T_{NH}(q) \ddot{\theta}(t) \dots\dots\dots(62)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_F \\ \ddot{y}_F \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \cdot \dot{\theta} & -d \cos \theta \dot{\theta} \\ \cos \theta \dot{\theta} & -d \sin \theta \cdot \dot{\theta} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_L \\ \ddot{\theta}_R \end{bmatrix} \dots\dots(63)$$

Setelah diperkalikan hasilnya :

$$\ddot{x}_F = -\sin \theta \cdot \ddot{\theta}_L - d \cos \theta \cdot \ddot{\theta}_R - \cos \theta \cdot \dot{\theta}_L + d \sin \theta \cdot \dot{\theta}_R \dots\dots\dots(64)$$

$$\ddot{y}_F = \cos \theta \cdot \ddot{\theta}_L - d \sin \theta \cdot \ddot{\theta}_R - \sin \theta \cdot \dot{\theta}_L - d \cos \theta \cdot \dot{\theta}_R \dots\dots\dots(65)$$

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_R \dots\dots\dots(66)$$

Dalam bentuk matriks didapat :

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_F \\ \ddot{y}_F \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta - \cos \theta & -d \cos \theta + d \sin \theta \\ \cos \theta - \sin \theta & -d \sin \theta - d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_L \\ \ddot{\theta}_R \end{bmatrix} \dots\dots\dots(67)$$

Atau

$$\ddot{q}(t) = T_{NH}(\dot{q}) \ddot{\theta}(t) \dots\dots\dots(68)$$

Dengan kinematik invers maka percepatan sudut ( $\ddot{\theta}(t)$ ) dapat diketahui sebagai berikut :

$$\ddot{\theta}(t) = T_{NH}^{-1}(\dot{q}) \ddot{q}(t) \dots\dots\dots(70)$$

**Contoh Perhitungan Kinematika Untuk Kecepatan :**

Diketahui :

$$2b = 29 \text{ cm} = 0,29 \text{ m}$$

$$r = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$$

$$d = 37 \text{ cm} = 0,37 \text{ m}$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\dot{\theta}_L = \dot{\theta}_R = 400 \text{ rpm} = 13,33 \pi \text{ rad/s}$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\theta}^2 \cdot r = 13,33^2 \cdot 0,06 = 10,66 \pi^2 \text{ rad/s}^2$$

Bentuk umum persamaan kinematika wheeltrack robot seperti terlihat pada persamaan :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & -0,37 \sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & 0,37 \cos 45^\circ \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 13,33\pi \\ 13,33\pi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0,707 & -0,262 \\ 0,707 & 0,262 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 13,33\pi \\ 13,33\pi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 5,932 \pi \\ 10,155\pi \\ 13,33\pi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

**Contoh Perhitungan Kinematika Untuk Percepatan :**

Diketahui :

$$2b = 29 \text{ cm} = 0,29 \text{ m}$$

$$r = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$$

$$d = 37 \text{ cm} = 0,37 \text{ m}$$

$$\theta = 45^\circ$$

$$\dot{\theta}_L = \dot{\theta}_R = 400 \text{ rpm} = 13,33 \pi \text{ rad/s}$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\theta}^2 \cdot r = 13,33^2 \cdot 0,06 = 10,66 \pi^2 \text{ rad/s}^2$$

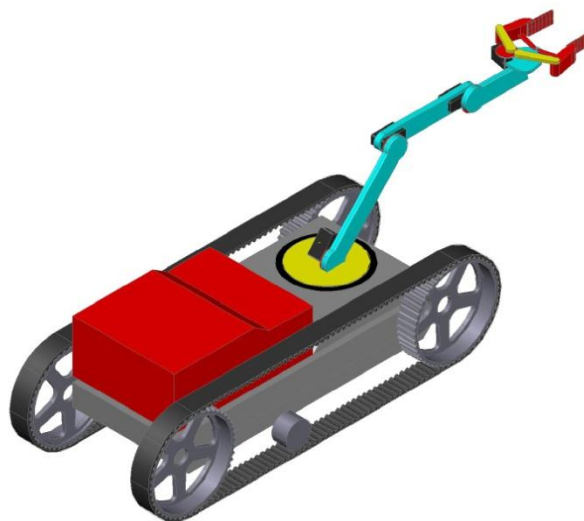
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x}_F \\ \ddot{y}_F \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\sin 45^\circ - \cos 45^\circ & -0,37 \cos 45^\circ + 0,37 \sin 45^\circ \\ \cos 45^\circ - \sin 45^\circ & -0,37 \sin 45^\circ - 0,37 \cos 45^\circ \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_L \\ \ddot{\theta}_R \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -0,707 - 0,707 & -0,37 \cdot 0,707 + 0,37 \cdot 0,707 \\ 0,707 - 0,707 & -0,37 \cdot 0,707 - 0,37 \cdot 0,707 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 10,66 \\ 10,66 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} -1,414 & 0 \\ 0 & -0,524 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 10,66 \\ 10,66 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -15,07 \\ -5,59 \\ 10,66 \end{bmatrix}$$

### 3. Kestimbangan Robot

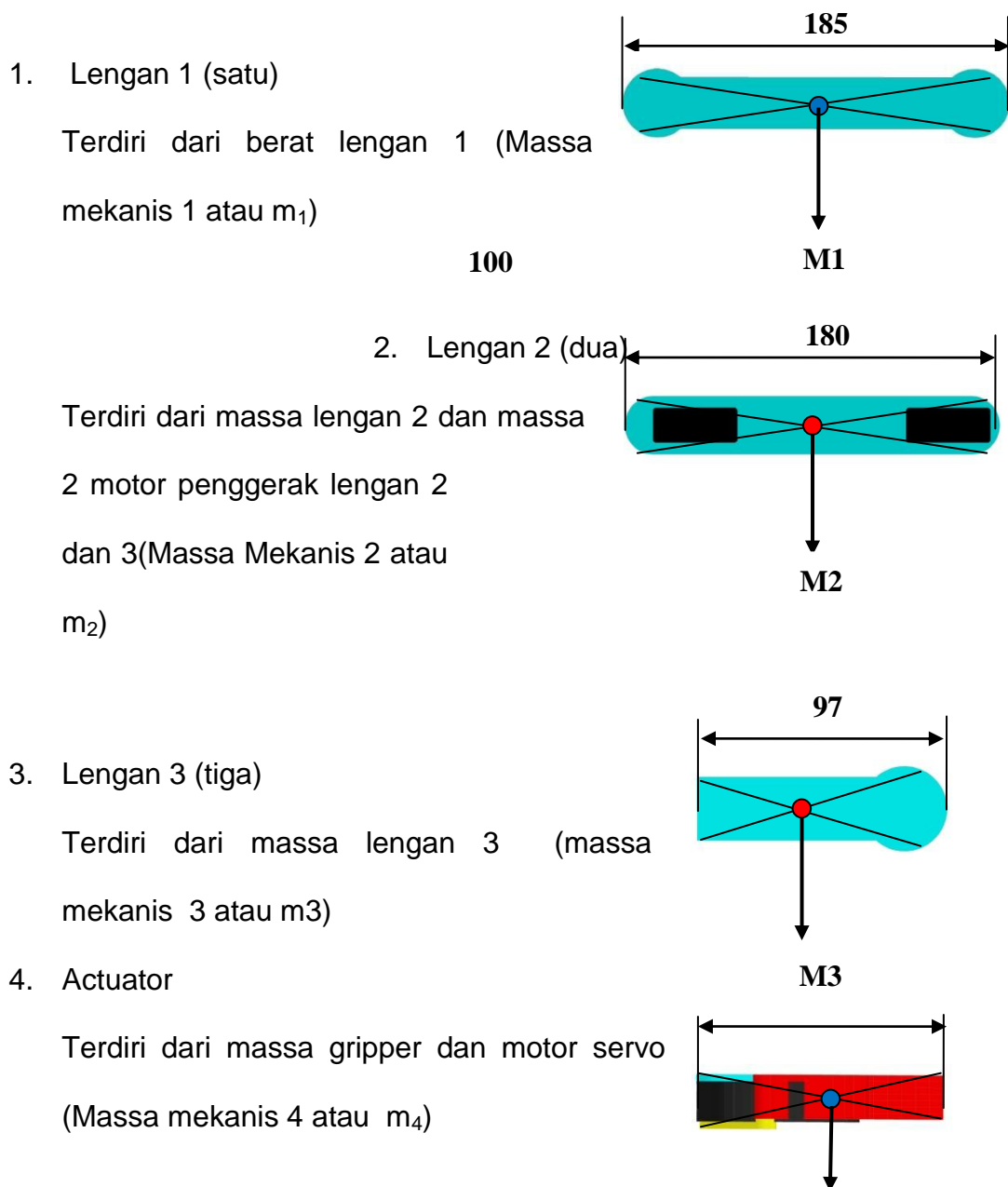
Kestimbangan robot sangatlah penting dalam merancang suatu mobile robot dimana pada rancangan Robot Penjinak Bom ini, setelah mendapatkan keseimbangan pada robot maka kita mampu mengukur beban maksimum robot pada saat mengambil benda dengan mengabaikan kemampuan cengkraman maksimum griper.



Gambar 34. Sistem Mekanis dari Mobile Manipulator Robot Penjinak Bom

Sebelum menerapkan persamaan untuk menentukan kestimbangan dari pada sistem mekanis dari pada robot penjinak bom, terlebih dahulu kita harus mendefinisikan dengan jelas sistem mekanis yang akan dianalisis dan menggambarkan dengan jelas dan

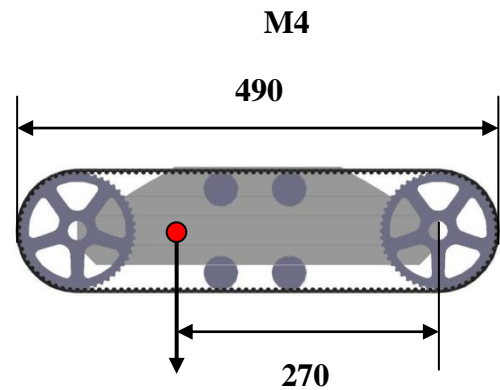
lengkap gaya yang bekerja pada benda tersebut. Sistem mekanis didefinisikan sebagai suatu benda atau sekumpulan benda yang dapat dipisahkan dari pengaruh benda-benda lain. Dibawah ini diperlihatkan pemisahan mekanis dari sistem mekanis robot penjinak bom dan penentuan titik beratnya.



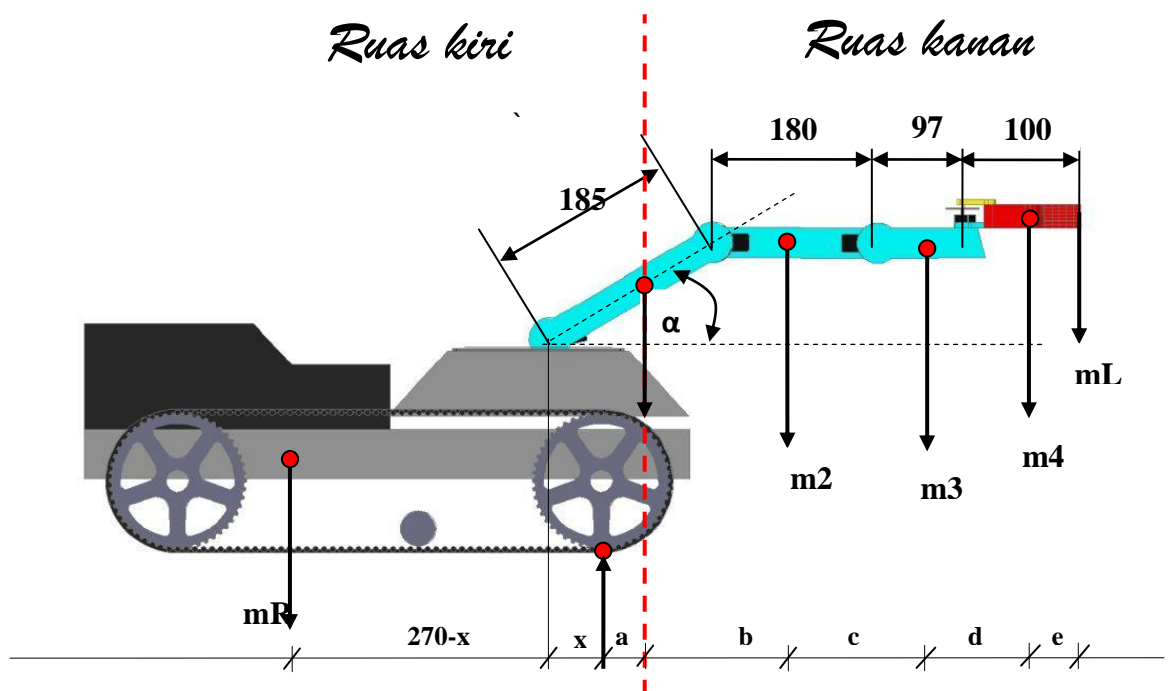


### 5. Momen Rangka

Terdiri dari massa rangka ( $M_R$ ) atau massa mobile robot secara keseluruhan (sistem mekanika dan sistem elektrikal).



Dengan penempatan titik berat pada sistem mekanis Robot Penjinak Bom maka, berikut ini diperlihatkan perhitungan kesetimbangan robot dengan menganggap titik tumpu adalah pada kedua roda depan robot.



\*) Satuan dalam mm.

Data-data yang diketahui adalah :

$$x = 70 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$\begin{aligned} a &= (92,5 \cdot \cos \alpha) - x \\ &= (92,5 \cdot \cos 30) - 60 \\ &= (92,5 \cdot 0,866) - 60 \\ &= 20,105 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b = 182,5 \text{ mm}$$

$$c = 138,5 \text{ mm}$$

$$d = 98,5 \text{ mm}$$

$$e = 50 \text{ mm}$$

$$M1 = 0,78 \text{ kg}$$

$$M2 = 1,5 \text{ kg}$$

$$M3 = 0,65 \text{ kg}$$

$$M4 = 0,95 \text{ kg}$$

$$m_L = \dots? \text{ Kg.}$$

$$\begin{aligned} 10 (270) &= 0,78(20,105) + 1,5(202,605) + 0,65(341) + \\ &\quad 0,95(439,605) + m_L(489,605) \\ &= 15,6819 + 303,9075 + 217,183 + 417,6248 + \\ &\quad m_L(489,605) \\ 2700 &= 958,9324 + m_L(489,605) \\ m_L(489,605) &= 2700 - 958,9324 \end{aligned}$$

$$m_L(489,605) = 1741,068$$

$$m_L = 1741,068 / 489,605$$

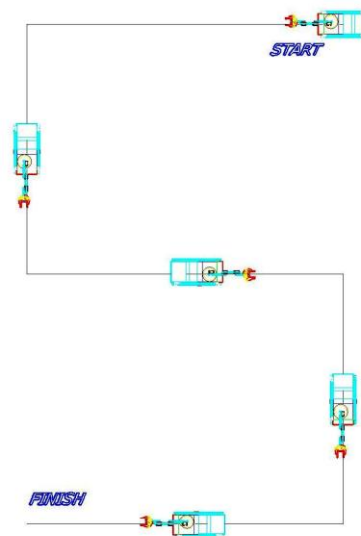
$$m_L = 3,55 \text{ Kg}$$

Jadi beban maksimal yang dapat diangkat oleh manipulator untuk jangkauan lengan terjauh adalah 3,55 Kg.

#### 4. Perhitungan Error untuk *tracking* lintasan

Pada lintasan pertama, dilakukan percobaan error dengan dua operator yang berbeda. Adapun bentuk lintasannya sebagai berikut :  
Data dalam bentuk tabel untuk lintasan 1 dapat dilihat pada lampiran

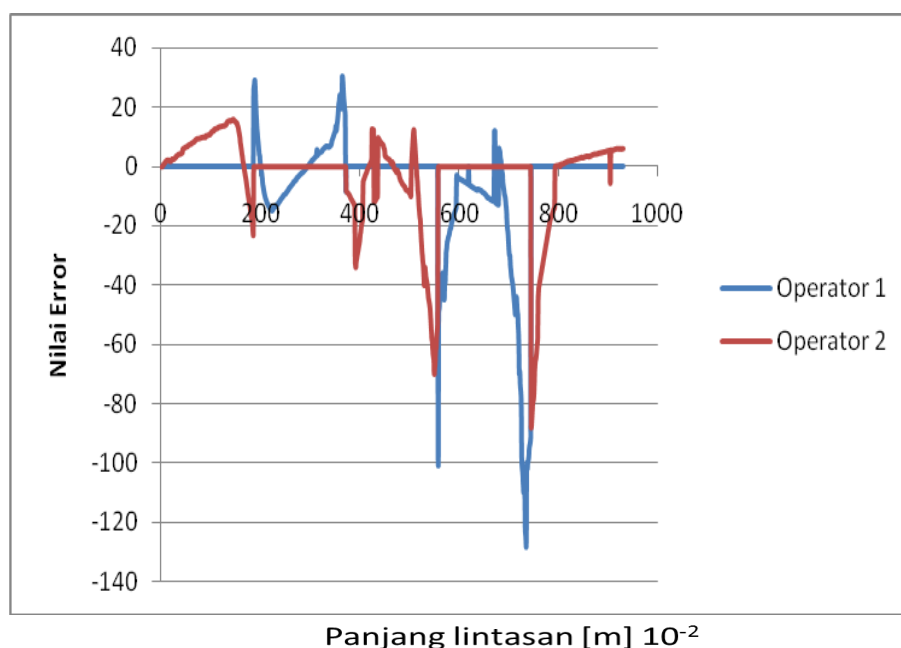
##### a. *Lintasan 1*



Gambar 35. Track Lintasan 1

Pada lintasan Pertama, mobile manipulator robot memulai pada lintasan start. Mobile robot bergerak mendatar sejauh 374 cm kemudian berbelok ke arah kiri sebesar 90 derajat lalu bergerak mendatar sejauh 374 cm kemudian berbelok lagi ke arah kiri sebesar 90 derajat lalu

bergerak pada lintasan yang mendatar sejauh 374 cm kemudian berbelok ke arah kanan sebesar 90 derajat lalu bergerak mendatar sejauh 374 cm, dan yang terakhir berbelok ke arah kanan sebesar 90 derajat lalu bergerak mendatar sejauh 374 cm sampai mencapai garis finish.



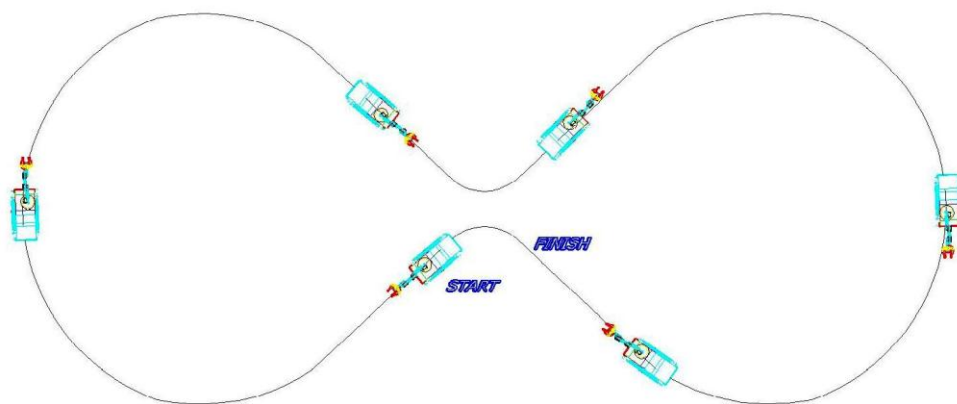
Grafik 1. Error pada Lintasan 1

Pada grafik diatas terlihat bahwa error terbesar pada Operator pertama dan kedua terjadi pada belokan kanan yang terakhir dengan sudut  $90^{\circ}$ . Hal tersebut disebabkan karena pada saat robot berbelok, robot melakukan transformasi ( perubahan posisi) dari vertical ke horizontal membuat sudut  $90$  yang menjauh dari garis lintasan sehingga mengakibatkan nilai error yang besar.

Pada grafik diatas terlihat pula lintasan error untuk lintasan pertama. diimana error terbesar untuk operator pertama yaitu pada nilai -130 cm

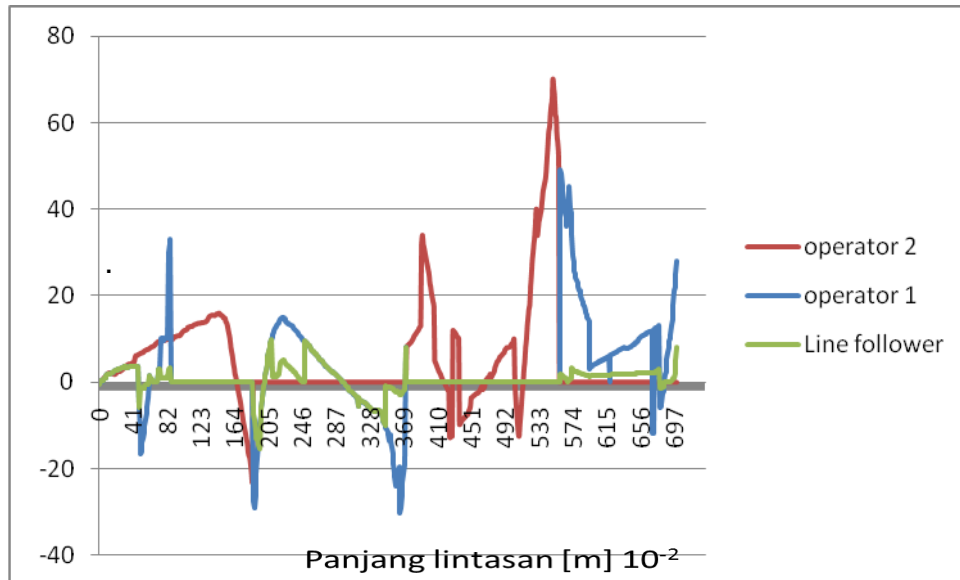
dan error terbesar untuk operator ke-dua ada pada nilai -92 cm. Nilai error yang besar untuk kedua operator masing- masing terjadi pada belokan kanan yang terakhir sedangkan untuk nilai error yang terkecil terjadi pada saat robot melewati track yang lurus pada lintasan.

*b. Lintasan 2*



Gambar 36. Track Lintasan 2

Pada lintasan kedua, robot mobile manipulator memulai pada lintasan start. Mobile robot bergerak memutar melingkar sepanjang 14 meter sampai mencapai garis finish. Pada track lintasan yang kedua ini, terdapat 2 variasi belokan dengan radius yang berbeda sehingga membutuhkan operator yang handal untuk mendapatkan nilai error yang kecil.



Grafik 2. Error pada Lintasan 2

Pada grafik diatas terlihat bahwa nilai error terbesar baik untuk operator 1 maupun operator 2, yaitu pada saat melewati tikungan dengan radius besar menuju ke tikungan dengan radius kecil. Hal tersebut disebabkan karena robot sangat sulit berbelok dengan radius belokan yang kecil sehingga robot keluar dari garis yang telah di buat, dengan demikian nilai error yang terjadi juga akan bernilai besar pula. Sedangkan untuk line follower, terlihat bahwa nilai error terbesar terjadi pada saat tikungan dengan radius kecil.

Pada grafik diatas terlihat pula lintasan error untuk lintasan pertama. diimana error terbesar untuk operator pertama yaitu pada nilai 70 cm dan error terbesar untuk operator ke-dua ada pada nilai 49 cm, sedangkan untuk line follower nilai error terbesar bernilai 9,8 cm. Nilai error yang besar untuk kedua operator masing- masing terjadi pada belokan kanan yang terakhir sedangkan untuk nilai error yang terkecil terjadi pada

saat robot melewati track yang lurus pada lintasan, sedangkan untuk line follower, terjadi pada saat melewati tikungan dengan radius kecil.

## 5. Simulasi Matlab

MATLAB adalah salah satu bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dapat melakukan komputasi, diantaranya adalah memiliki kemampuan untuk melakukan perhitungan, visualisasi dan pemrograman dalam suatu lingkungan yang permasalahan dan pemecahannya dinyatakan dalam notasi matematika biasa sehingga mudah untuk digunakan. MATLAB secara umum banyak digunakan untuk melakukan :

- Matematika dan komputasi,
- Pengembangan dan Algoritma,
- Pemodelan, Simulasi, dan pembuatan prototype,
- Analisis data, eksplorasi dan visualisasi,
- Pembuatan aplikasi, termasuk pembuatan antarmuka grafis

*(Graphical User Interface).*

MATLAB merupakan suatu sistem interaktif dengan elemen dasar basis data array yang tidak perlu menyatakan dimensinya secara khusus. Dengan alasan ini, perhitungan yang menggunakan matriks dan vektor banyak digunakan dibandingkan dengan program yang menggunakan bahasa C atau FORTRAN.

Keseluruhan bagian input, proses, dan output dari program berada dalam satu lingkungan M ATLAB. Program simulasi yang dibuat dalam

skripsi ini menggunakan semua kelebihan yang dimiliki MATLAB dan dieksekusi melalui command window MATLAB.

Dalam membentuk kerangka perancangan software simulasi ini, modul dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu modul input, modul proses, modul output. Dalam setiap bagian utama tersebut bisa terdiri dari input, proses, dan output.

### 1. PROGRAM UTAMA :

```
% Program      : SimulasiLengan Robot
% Programmer   :
% Tanggal      : Juni 2013

clc% clear command window
closeall% menutup all figure
clear

global Form grs_solid i z

global L_0 L_1 L_2 L_3 L_4 Alpa_0 Alpa_1 Alpa_2 Alpa_3 Alpa_4
global d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 Teta_1 Teta_2 Teta_3 Teta_4 Teta_5

Form = '%8.5f';

% a_i1 = translasi dlm arah x (panjang lengan)
% Alpa_i1 = rotasi thdsb x (sblengan)
% d_i = translasi dlm arah z
% Teta_i = sudut sambungan, dlm bid xy (thdsb z)

L_0 = 0;           % base ygbergerak (link 1)
L_1 = 185/100;    % panj link 1 cm --> m
L_2 = 180/100;
L_3 = 97/100;
L_4 = 50/100;    % grip

Alpa_0 = 20;      % base ygbergerak (link 1)
Alpa_1 = 0;
Alpa_2 = 0;
Alpa_3 = 0;
Alpa_4 = 0;      % grip

d_1 = 0;          % base ygbergerak (link 1)
d_2 = 0;
d_3 = 0;
d_4 = 0;
```



```

    d_5 = 10/100;           % grip, jaraksearahsumbu z

    Teta_1 = 0;            % krn base bergerakmakadianggap link 1
    Teta_2 = 60;
    Teta_3 = -30;
    Teta_4 = 10;
    Teta_5 = 0;           % grip

    disp ('Manipulator dg 5 derajatkebebasan ')
    disp (' ')

    z = 10;

    for i=1:z;

    fForward; hold on;

        Teta_2 = Teta_2 - 2;
        Teta_3 = Teta_3 - 5;
        Teta_4 = Teta_4 + 5;

        Alpa_0 = Alpa_0 - 5;    % rotasi base
        d_5 = d_5 - 1/100;     % grip menutup

    pause (0.1)
    end

    xlabel('sumbu z'), ylabel('sumbu x'), zlabel('sumbu y');

```

## 2. SUB PROGRAM :

```

function fForward
global i

global L_0 L_1 L_2 L_3 L_4 Alpa_0 Alpa_1 Alpa_2 Alpa_3 Alpa_4

global d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 Teta_1 Teta_2 Teta_3 Teta_4 Teta_5

% Koordinat base
T00 = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];           % statistanpgerakan

% a_i1 = translasi dlm arah x (panjang)
% Alpa_i1 = rotasi thdsb x (sblangan)
% d_i = translasi dlm arah z
% Teta_i = sudut sambungan, dlm bid xy (thdsb z)

% Transformasi relatif dlm sumbu engane sebelumnya
% fTransform(a_i1, Alpa_i1, d_i, Teta_i)
% krn base bergerak makadianggap link 1

```

```

T01 = fTransform(L_0, Alpa_0, d_1, Teta_1);

T12 = fTransform(L_1, Alpa_1, d_2, Teta_2);
T23 = fTransform(L_2, Alpa_2, d_3, Teta_3);
T34 = fTransform(L_3, Alpa_3, d_4, Teta_4);
T45 = fTransform(L_4, Alpa_4, d_5, Teta_5);

T45_2 = fTransform(L_4, Alpa_4, -d_5, -Teta_5);

Form = '% 12.3f';

if i == 1
disp ('          L_i-1    Alpa_i-1          d_iTeta_i');

disp (sprintf(Form, [L_0    Alpa_0    d_1    Teta_1]));
disp (sprintf(Form, [L_1    Alpa_1    d_2    Teta_2]));
disp (sprintf(Form, [L_2    Alpa_2    d_3    Teta_3]));
disp (sprintf(Form, [L_3    Alpa_3    d_4    Teta_4]));
disp (sprintf(Form, [L_4    Alpa_4    d_5    Teta_5]));
disp (' ');
end;

% Transformasirelatifhd base (sumbukartesiandasar)
T02 = T01 * T12;
T03 = T02 * T23;
T04 = T03 * T34;
T05 = T04 * T45;

T05_2 = T04 * T45_2;

% Data Koord
[x1 y1 z1] = fKoord(T01,1);
[x2 y2 z2] = fKoord(T02,2);
[x3 y3 z3] = fKoord(T03,3);
[x4 y4 z4] = fKoord(T04,4);
[x5 y5 z5] = fKoord(T05,5);
disp (' ')

% Plot Lengan
fPlotLengan (T00, T01, 'r-', 0);
fPlotLengan (T01, T02, 'c-', 0);
fPlotLengan (T02, T03, 'g-', 0);
fPlotLengan (T03, T04, 'b-', 0);

fPlotLengan (T04, T05, 'r-', 1);
fPlotLengan (T04, T05_2, 'r-', 1);
end

function [Ti] = fTrans (a_i1, Al_i1, d_i, Teta_i)

cTet = cosd(Teta_i);  sTet = sind(Teta_i);

cAlp = cosd(Al_i1);  sAlp = sind(Al_i1);

```

```

    Ti = [cTet      -sTet      0      a_i1;
sTet*cAlpcTet*cAlp  -sAlp  -sAlp*d_i;
sTet*sAlpcTet*sAlpcAlpcAlp*d_i;
          0          0          0      1];
end

function [x y z] = fKoord(T, n)
global Form

    x = T(1,4);
    y = T(2,4);
    z = T(3,4);

ss = strcat(num2str(n), ' = ');

sx = strcat('x',ss); sy = strcat(' y',ss); sz = strcat('
z',ss);

vx = sprintf(Form,x);
vy = sprintf(Form,y);
vz = sprintf(Form,z);

disp ([sx, vx, sy, vy, sz, vz]);
end

```

### **3. HASIL RUNNING PROGRAM :**

Manipulator dg 5 derajatkebebasan

$L_{i-1}$	$\text{Alpa}_{i-1}$	$d_i$	$\text{Teta}_i$
0.000	20.000	0.000	0.000
1.850	0.000	0.000	60.000
1.800	0.000	0.000	-30.000
0.970	0.000	0.000	10.000
0.500	0.000	0.100	0.000

x1 = 0.00000	y1 = 0.00000	z1 = 0.00000
x2 = 0.92500	y2 = 1.50553	z2 = 0.54797
x3 = 2.48385	y3 = 2.35125	z3 = 0.85578
x4 = 3.22691	y4 = 2.93715	z4 = 1.06904
x5 = 3.60993	y5 = 3.20496	z5 = 1.27293

x1 = 0.00000	y1 = 0.00000	z1 = 0.00000
x2 = 0.98035	y2 = 1.51543	z2 = 0.40606
x3 = 2.63726	y3 = 2.19478	z3 = 0.58809
x4 = 3.40163	y4 = 2.77162	z4 = 0.74265
x5 = 3.79564	y5 = 3.04567	z5 = 0.90926

x1 = 0.00000	y1 = 0.00000	z1 = 0.00000
x2 = 1.03451	y2 = 1.51042	z2 = 0.26633
x3 = 2.76478	y3 = 1.99903	z3 = 0.35248

x4 = 3.54952    y4 = 2.56052    z4 = 0.45149  
x5 = 3.95403    y5 = 2.83605    z5 = 0.58131

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.08740    y2 = 1.49099    z2 = 0.13044  
x3 = 2.86524    y3 = 1.77150    z3 = 0.15499  
x4 = 3.66941    y4 = 2.31185    z4 = 0.20226  
x5 = 4.08393    y5 = 2.58428    z5 = 0.29636

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.13897    y2 = 1.45782    z2 = 0.00000  
x3 = 2.93788    y3 = 1.52064    z3 = 0.00000  
x4 = 3.76048    y4 = 2.03466    z4 = 0.00000  
x5 = 4.18451    y5 = 2.29962    z5 = 0.06000

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.18916    y2 = 1.41179    z2 = -0.12352  
x3 = 2.98231    y3 = 1.25551    z3 = -0.10984  
x4 = 3.82235    y4 = 1.73866    z4 = -0.15211  
x5 = 4.25536    y5 = 1.99207    z5 = -0.12409

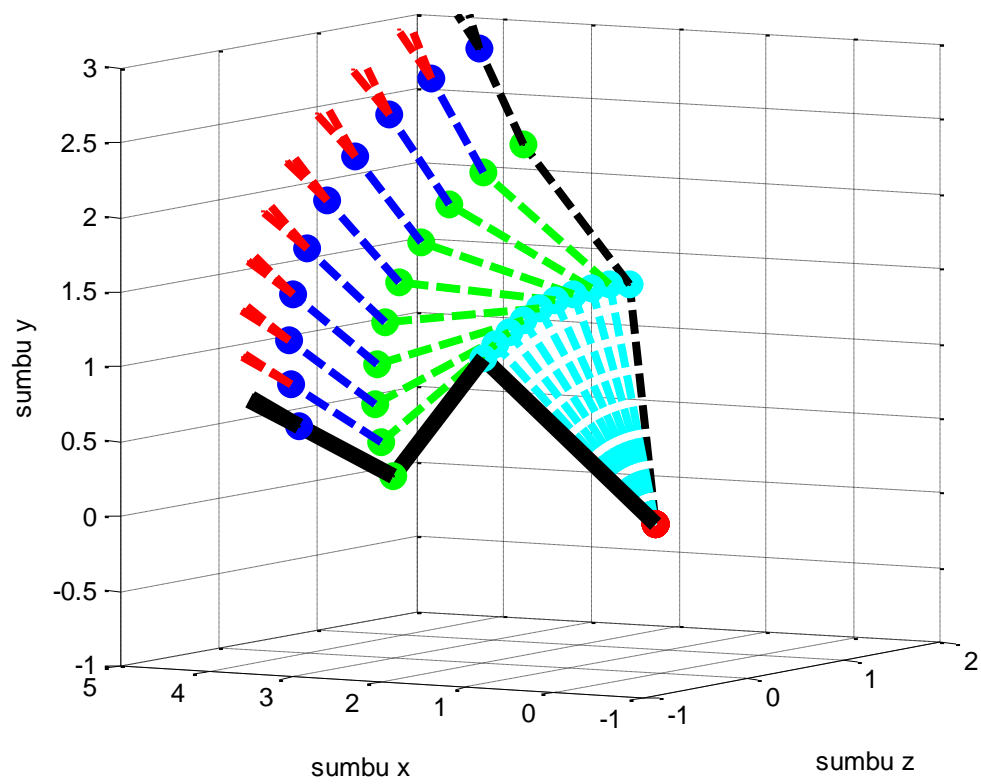
x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.23789    y2 = 1.35393    z2 = -0.23873  
x3 = 2.99856    y3 = 0.98538    z3 = -0.17375  
x4 = 3.85502    y4 = 1.43384    z4 = -0.25283  
x5 = 4.29649    y5 = 1.67196    z5 = -0.25419

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.28512    y2 = 1.28543    z2 = -0.34443  
x3 = 2.98705    y3 = 0.71938    z3 = -0.19276  
x4 = 3.85888    y4 = 1.13011    z4 = -0.30281  
x5 = 4.30828    y5 = 1.34959    z5 = -0.33056

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.33078    y2 = 1.20762    z2 = -0.43954  
x3 = 2.94861    y3 = 0.46613    z3 = -0.16966  
x4 = 3.83475    y4 = 0.83688    z4 = -0.30460  
x5 = 4.29152    y5 = 1.03482    z5 = -0.35536

x1 = 0.00000    y1 = 0.00000    z1 = 0.00000  
x2 = 1.37482    y2 = 1.12191    z2 = -0.52316  
x3 = 2.88442    y3 = 0.23341    z3 = -0.10884  
x4 = 3.78379    y4 = 0.56274    z4 = -0.26241  
x5 = 4.24739    y5 = 0.73672    z5 = -0.33250

>>



### 3. HASIL RUNNING PROGRAM :

Teta\_2 =  
2.3228

Teta\_2 =  
133.0886

Teta\_2 =  
226.9114

Teta\_1 =  
47.5003

cos\_phi =

```
1  
  
phi =  
360  
  
Teta_3 =  
85.5884  
  
>>
```

## BAB V

### PENUTUP

#### A. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa :

1. Proses pembuatan robot penjinak bom ini diawali dengan menggambar desain pada program auto cad, selanjutnya simulasi pada program matlab. Selanjutnya robot dibuat sesuai dengan desain yang dibuat.
2. Persamaan Kinematika Manipulator Robot di peroleh

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} -0,707 & 0 & 0,707 & 3,021 \\ 0,707 & 0 & 0,707 & 2,564 \\ 0 & 1 & 0 & 3,65 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan Kinematika Mobile Robot untuk kecepatan diperoleh

$$= \begin{bmatrix} 5,932\pi \\ 10,155\pi \\ 13,33\pi \end{bmatrix}$$

Persamaan Kinematika Mobile Robot untuk kecepatan diperoleh

$$= \begin{bmatrix} -15,07 \\ -5,59 \\ 10,66 \end{bmatrix}$$

3. Simulasi pada program matlab berjalan dengan baik sesuai dengan hasil formula perhitungan kinematika manipulator dan mobile manipulator yang telah di hitung sebelumnya.

**B. Saran**

Dari kesimpulan di atas dan seiring perkembangan teknologi robot yang begitu pesat saat ini maka di sarankan agar :

1. Kiranya robot dapat dilengkapi dengan sensor jarak (sensor ping), sehingga robot dapat mengambil benda secara otomatis.
2. Penelitian selanjutnya diharapkan memprioritaskan kehandalan dari robot yang direncanakan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Endra, P. 2006. *Disain, control, dan Kecerdasan Buatan*, Andi Yogyakarta.
- Estiko, M. 2009. Wikipedia Indonesia, 2009 : *Definisi Robot*, (Online), ([http://id.wikipedia.org/wiki/Robotika\\_Indonesia](http://id.wikipedia.org/wiki/Robotika_Indonesia), diakses 10 November 2012).
- Adi, R. 2009.: *konfigurasi robot*, (Online), (<http://adielits.blogspot.com/2009/05/konfigurasi-robot.html>, diakses 12 November 2012).
- Asriadi. 2006.: *komponen dasar robot*, (Online), (<http://suaraterbaru.com/komponen-dasar-robot.html>, diakses 15 November 2012).
- Pambudi, N. A. 2012.: *komponen dasar robot*, (Online), (<http://dosen.narotama.ac.id/the-science-of-robot.doc>, diakses 15 November 2012).
- Eric, S 2002.: *Kuka's YouBOT*, (Online), (<http://www.armedrobots.com/kukas-youbot-expensive-but-beautiful>, diakses 10 Desember 2012)
- Suwarno, *Analisis Kinematika Mobile Manipulator Pada Robot Penjinak Bom* [tesis]. Makassar: Universitas Hasanuddin; 2008.
- A2pd, 2011.: *Line follower dengan IC LM339*, (Online), (<http://a2pd.blog.student.eepis-its.edu/>, diakses 10 Desember 2012)
- Muchlish, M 2008.: *pembuatan robot ziobot untuk penjejak garis dan pengangkat barang dengan sensor jarak berbasis mikrokontroler* (Online), (<http://repository.gunadarma.ac.id/bitstream/123456789/1327/1/21107264.pdf>, diakses 12 Desember 2012)
- Fahmizal, 2010.: *Robot line follower*, (Online), (<http://fahmizaleeits.wordpress.com/2010/09/02/robot-line-follower-dengan-multiplekser-adc/>, diakses 10 Desember 2012)
- Pratheek, 2010.: *Advanced Line Following Robot*, (Online), ([http://www.societyofrobots.com/member\\_tutorials/node/355](http://www.societyofrobots.com/member_tutorials/node/355), diakses 27 Januari 2013)
- Sangu, G 2011.: *Line follower dengan control PID*, (Online), (<http://kurangsangu.wordpress.com/2011/05/13/line-tracer-dengan-kontrol-pid>, diakses 13 Mei 2013)

- Rosen, J. 1989. *Model of Robot Manipulation : Introduction & Basic Ideas – Speed Description & Transformation*. Department of Electrical Engineering - University of Washinton.
- Ogata, K. dan Lesono, E. 1993. *Teknik control Automatik (terjemahan)*. Jilid 1, Erlangga, Jakarta.
- Steve, A. 2002.: Mobile manipulator, (*Online*), ([http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/SeekurJr\\_with\\_Outdoor\\_Manipulator.aspx](http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/SeekurJr_with_Outdoor_Manipulator.aspx), diakses 8 Desember 2013).