

# ANALISIS INDUSTRIAL ROBOT *AUTOMOTIVE* *BODY PAINTING* DENGAN KENDALI KINEMATIK

Syarifuddin<sup>1</sup>, Anthonius L.S Haans<sup>2</sup>

**Abstract:** *The study aims to design and create a painting robot . kinematic equation of the 3 DOF .Cartesian robot was determined by using the equation method of DH parameter.Painting robot can replace human as the painting operator and can reduce the occurrence of respiratory distress due to inhalation whose physical form and movement mechanism resemble those of Cartesian one. The study concludes from the experiment with 3 DOF(three degrees of freedom) that Cartesian robot can do the painting on flat or corved plates for various field, on a surface of vehicle body. The prototype robot arm 3 DOF for automotive industry is an example outcome of the study.*

**Keywords:** *Painting robotic , 3DOF, kinematic DH parameter.*

## I. PENDAHULUAN

Penggunaan robot di industri semakin meningkat dari waktu ke waktu untuk menangani berbagai tugas, baik tugas yang tidak bisa ditangani manusia seperti di bidang nuklir, kimia, perjalanan ke luar angkasa dan tugas-tugas lain yang di lakukan di lingkungan yang berbahaya, maupun tugas-tugas yang dapat dilakukan manusia seperti pengecatan dan pengelasan, dan tugas-tugas lainnya. Dimana proses pengerjaan beresiko dalam dunia industri saat ini dapat dilakukan oleh robot khusus menggantikan manusia. Salah satu contoh robot industri yang banyak digunakan adalah *painting robot*. Painting robot ini dapat menggantikan manusia sebagai operator pengecatan. Hal ini untuk mengurangi resiko terjadinya gangguan pernapasan operator, akibat terhirupnya partikel dan uap cat. Korban jiwa juga dapat dicegah apabila terjadi kebakaran di area pengecatan, karena uap pelarut yang mudah terbakar. [1] Sekitar 23 % painting robot digunakan dalam dunia industri pembuatan mobil. Hal ini dapat dilihat dalam diagram penggunaan robot pembuatan mobil. [2]

Pada perencanaan robot *painting class* yang diusulkan, sistem adalah dibagi menjadi dua komponen utama yakni perangkat keras dan perangkat lunak. Di dalam perangkat keras terdiri dari bagian disain, mekanik, manipulator, dan sistem elektronika adalah yang diuraikan. Dan di dalam perangkat lunak, memisahkan dan mengendalikan algoritma diterangkan. Pengujian hasil menunjukkan bahwa hasil

---

<sup>1</sup> Staf Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

<sup>2</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

robot *painting* atau pengecatan lebih baik dan lebih efektif dibandingkan pengecatan manual.

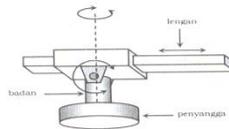
Dalam pengecatan manual mempunyai banyak kelemahan antara lain jarak spoid tidak dapat konstan pada jarak yang sebenarnya, jangkauan pengecatan sangat terbatas oleh panjang jangkauan lengan manusia, kecepatan pergerakan ayunan spoid juga tidak konstan sehingga ketebalan permukaan hasil pengecatan berbeda beda dengan demikian kualitas dan hasil pengecatan kurang bagus. Didalam pengerjaan pengecatan manual, mixing atau pencampuran cat dilakukan secara bertahap, sehingga kekentalan cat juga berbeda beda, sehingga hasilnya juga kurang bagus.

*Painting* robot yang direncanakan adalah *painting* robot dengan 3 (three) Degree of freedom (DOF). Didesain dengan pergerakan mekanis dengan tingkat kepekaan tinggi dan kecerdasan buatan yang baik, untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas yang tetap persatuan waktu dari produk pengecatan. Sensor jarak digunakan agar jarak antara robot dan objek tetap. Disamping itu, robot ini mampu beradaptasi jika objek tidak rata atau bergelombang. Dari penelitian yang akan dilaksanakan, penulis mengharapkan suatu prototype yang dapat bekerja sesuai dengan perancangan. Baik dari segi bentuk, kinerja serta fungsinya. Sistem kontrol tersebut diharapkan dapat mereduksi kesalahan-kesalahan yang mungkin muncul pada saat operasi.

#### A. Robot Manipulator

Robot manipulator yaitu robot dengan bagian mekanik yang dapat difungsikan untuk memindah, mengangkat dan memanipulasi benda kerja. Robot ini memiliki pergerakan yang ditentukan dari konfigurasi mekanisme robot yang dapat dikategorikan menjadi empat kelompok. Konfigurasi manipulator dapat dibagi dalam 4 kelompok yaitu:

##### a. Konfigurasi polar

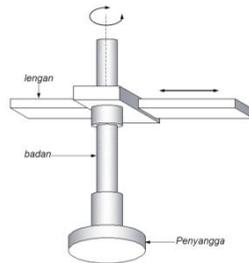


Gambar 1. Konfigurasi polar

Pada Gambar 1 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.

##### b. Konfigurasi Silinder

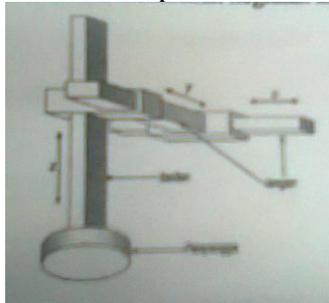
Konfigurasi silinder mempunyai kemampuan jangkauan berbentuk ruang silinder yang lebih baik, meskipun sudut ujung lengan terhadap garis penyangga tetap. Konfigurasi ini banyak diadopsi untuk sistem *gantry* atau *crane* karena strukturnya 2 di bawah.



Gambar 2. konfigurasi selinder

c. Konfigurasi Cartesien

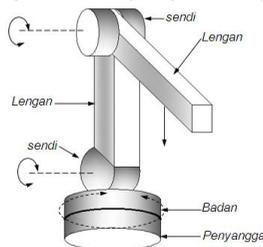
Pada Gambar 3 memperlihatkan manipulator berkonfigurasi cartesien dimana secara relatif adalah yang paling kokoh untuk tugas mengangkat beban yang berat. Struktur ini banyak dipakai secara permanen pada instalasi pabrik baik untuk mengangkat dan memindah barang-barang produksi maupun untuk mengangkat peralatan-peralatan berat pabrik ketika melakukan kegiatan instalasi.



Gambar 3.konfigurasi cartesien

d. Konfigurasi sendi / Lengan

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.



Gambar 4. Konfigurasi sendi

## B. Mekanik Robot

Struktur robot sebagian besar dibangun berdasarkan konstruksi mekanik. Robot yang memiliki kemampuan navigasi dan manipulasi secara relatif memiliki konstruksi mekanik yang lebih rumit dibanding dengan navigasi saja. Hal yang mendasar perlu diperhatikan dalam desain mekanik robot adalah perhitungan kebutuhan torsi untuk menggerakkan sendi atau roda. Motor sebagai penggerak utama (prime-mover) yang paling sering dipakai umumnya akan bekerja optimal (torsi dan kecepatan putar paling ideal) pada putaran yang relatif tinggi yang hal ini tidak sesuai bila porosnya dihubungkan langsung dengan sendi gerak atau roda.

Rasio transmisi perbandingan dapat di peroleh :

$$i = \frac{z_2}{z_1} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana :

Z1 = jumlah gigi gir A

Z2 = jumlah ulir gir B

Dari rasio perbandingan maka dapat diperoleh nilai putaran output :

$$n_2 = n_1 \cdot i$$

dimana :

n1 = putran input

n2 = putaran output

Mencari torsi output :

$$\tau_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \tau_1 \cdot \eta$$

Dimana :  $\tau_1$  = torsi input (torsi pada poros motor)

$\tau_2$  = torsi output

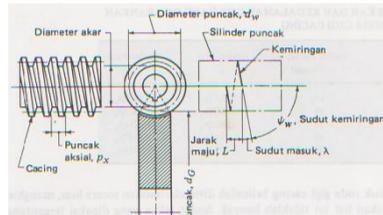
Suatu ciri utama dalam bangunan mesin sekarang ini, yang sangat luas digunakan, dimana gerakan mekanis bersama-sama dengan transmisi elektrik, hidrolik dan pneumatik (vacuum) digunakan dalam menjalankan tugas yang sama. Seringkali terjadi gerakan mekanis dan transmisi ini secara simultan digunakan untuk menjalankan beberapa mekanisme.

Dengan model gerak transmisi dari penggerak mula, suatu hubungan fleksibel (gerakan-gerakan mekanis) dapat dibagi dalam tipe-tipe berikut :

1. Transmisi dengan friksi: dengan berkontak langsung, atau dengan sabuk).
2. Transmisi dengan perkaitan: dengan berkontak langsung (roda gigi dan roda gigi ulir) atau dengan suatu hubungan fleksibel (gerakan rantai).

Pada pembuatan robot cartesian ini digunakan sistem penggerak transmisi motor. Dimana pada motor penggerak ini menggunakan sistem transmisi roda gigi cacing. Roda gigi adalah roda daya penerus, atau roda yang mentransmisikan gerak atau putaran dari penggerak ke yang digerakkan. Pemakaian roda gigi sebagai alat transmisi banyak dijumpai; misalnya pada alat pengukur yang kecil dan teliti (jam tangan), roda gigi reduksi pada turbin yang besar yang berdaya puluhan Mega-watt,

pada mesin perkakas, kendaraan bermotor, mesin pengangkat, mesin transportasi dan sebagainya.



Gambar 5. struktur roda gigi penggerak

Kecepatan pada garis puncak roda gigi A dapat diperoleh

$$v_1 = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{60000} \text{ (m/s)} \quad (2)$$

Sedangkan kecepatan pada garis puncak roda gigi B dapat diperoleh:

$$v_2 = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n_2}{60000} \text{ (m/s)} \quad (3)$$

Daya input dari dari motor tersebut

$$P_1 = \frac{\tau_1 \cdot n_1 \cdot 2\pi}{60} \quad (4)$$

Daya Output

$$P_2 = P_1 \cdot \eta$$

Momen Input

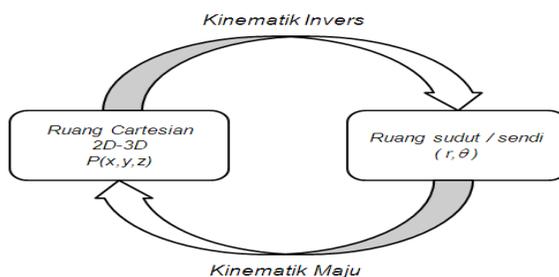
$$M_{k1} = \frac{p \cdot 60}{\pi \cdot n_1}$$

$$M_{k2} = M_{k1} \cdot i \cdot \eta$$

Momen Output

### C. Kinematika

Kinematika dalam robotika adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematika geometri dari suatu struktur robot. Dari persamaan kinematika dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep kordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu obyek. Dengan model kinematika, dapat ditentukan konfigurasi refrensi input yang harus diumpamakan setiap atuator agar robot dapat melakukan gerakan simulutan (seluruh sendi) untuk mencapai posisi yang dikehendaki. Sebaliknya, informasi kedudukan (sudut) yang dinyatakan oleh setiap sendi ketika robot sedang melakukan suatu gerakan, dengan analisa kinematika, dapat ditentukan dimana posisi ujung lengan atau bagian robot yang bergerak itu dalam kordinat ruang.



Gambar 6. Transformasi Kinematika maju dan invers kinematika

Secara umum persamaan kinematika maju setiap sendi 1DOF secara persial dapat dinyatakan sebagai:

$$P(x,y) = f(r, \emptyset) \quad (5)$$

Dimana :

$P$  = kordinat  $(x,y)$  yang relatif terhasdap kordinat tetap/acuan  $(0,0)$  pada titik sendi.

$R$  = jari-jari lengan (link)

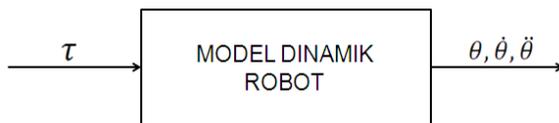
$\emptyset$  = sudut sendi

Jika  $r$  adalah tetap dengan asumsi lengan bergerak secara rotasi maka  $r$  dianggap konstan. Dengan demikian perubahan  $P$  hanya dipengaruhi oleh perubahan  $\emptyset$ . Persamaan invers kinematikanya dapat dinyatakan sebagai,

$$(r, \emptyset) = f(P) \quad (6)$$

Konsep Dinamika

Robot adalah secara fisik suatu benda yang memiliki struktur tertentu dengan massa tertentu yang dalam pergerakannya tunduk kepada hukum-hukum alam yang berkaitan dengan gravitasi dan atau massa/kelembaman. Jika robot berada dipermukaan bumi maka kedua efek gravitasi dan massa ini, akan mempengaruhi kualitas gerakan. Sedangkan bila robot berada diluar angkasa yang bebas gravitasi maka massa saja yang dapat menimbulkan efek inersia/kelembaman. Dalam kontes inilah dikatakan bahwa model dinamika dari suatu robot berhubungan dengan struktur dan massa. Setiap struktur dan massa yang berbeda akan memberikan efek inersia yang berbeda pula sehingga penanganan dalam pemberian torsi pada tiap sendi (dengan kata lain :sinyal pengemudian actuator/motor tiap sendi) seharusnya berbeda pula.



Gambar 2. Diagram Model Dinamika Robot [ ]

Model dinamika robot dapat dinyatakan sebagai torsi  $\tau$  ,  

$$\tau = I \cdot Ktn \tag{7}$$

Dimana :

$I$  = sinyal analog ( arus motor ) yang dikeluarkan oleh kontroler.

$Ktn$  = konstanta motor

$\tau$  = torsi pada sendi yang menghasilkan gerakan

$\theta$  = sudut

$\dot{\theta}$  = kecepatan sudut

$\ddot{\theta}$  = percepatan sudut

Jika output system  $(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  dinyatakan sebagai q maka torsi yang diberikan kepada sendi-sendi robot adalah :

$$\tau = f(q) \tag{8}$$

persamaan ini dikenal sebagai dinamika maju / langsung (forward / directdynamics), sebaliknya jika torsi diketahui (sebagai input) q dikenal sebagai dinamika invers (inverse dynamics). Model dinamikanya adalah :

$$q = f^{-1}(\tau) \tag{9}$$

Hubungan model matematika dinamika invers dan dinamika maju dapat dilustrasikan pada gambar berikut :



Gambar 8. Transformasi dinamika invers dan dinamika maju

### 1. Derajat Kebebasan ( Degree Of Freedom )

Merupakan bilangan yang menyatakan jumlah masukan (penggerak) yang diperlukan oleh suatu mesin atau mekanisme dalam melakukan gerakan dengan satu derajat kebebasan berarti hanya perlu menggerakkan satu batang dimana batang lain akan ikut bergerak ke posisi tertentu, ini identik dengan rantai kinematis terbatas.

Dari uraian sebelumnya diperoleh persamaan derajat kebebasan sebagai berikut :

$$df = 3(n-1) - 2l - h \tag{10}$$

Dimana :

$df$  = Jumlah derajat kebebasan

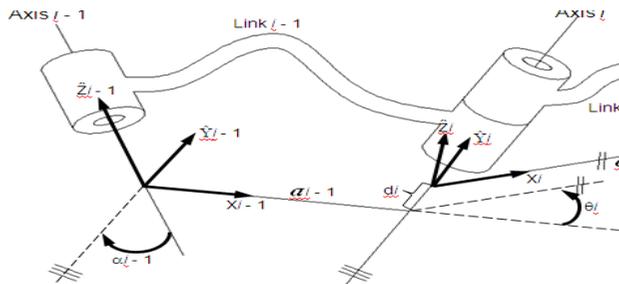
$n$  = Jumlah batang

$l$  = Jumlah pasangan rendah

$h$  = Jumlah pasangan tinggi

### 2. Penggunaan Denavit-Hartenberg ( Dh ) 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) dalam suatu struktur hubungan seperti rantai.



Gambar 4. Parameter Denavit-Hartenberg. [6]

Prinsip dasar representasi D-H 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). 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- $n$ .

Rumus umum DH Parameter adalah :

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

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	$\theta_3$

Menurut Rosen J.,(1989) rumus umum DH Parameter adalah:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

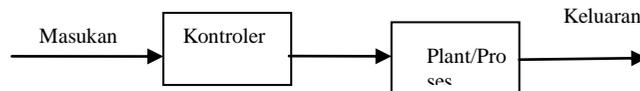
Berdasarkan Tabel DH Parameter didapat transformasi matriks sebagai berikut :

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

### 3. Prinsip Dasar Sistem Kontrol.

#### a. Sistem kontrol lup terbuka

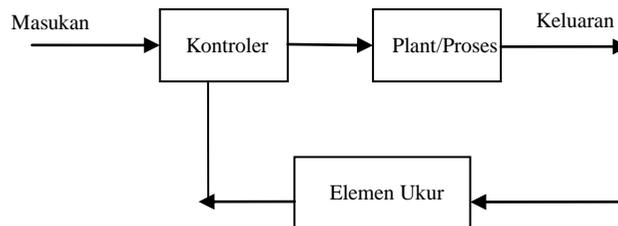
Sistem kontrol lup terbuka adalah system kontrol yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengontrolan. Jadi pada sistem kontrol lup terbuka, keluaran tidak diukur atau diumpkan-balikkan untuk dibandingkan dengan masukan



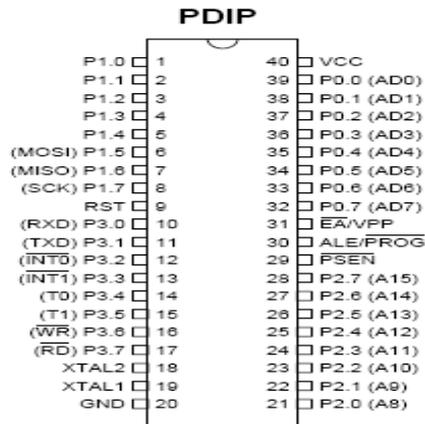
Gambar 10. Sistem kontrol lup terbuka. ─

#### b. Sistem kontrol lup tertutup

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), diumpkan ke kontroler untuk memperkecil kesalahan .



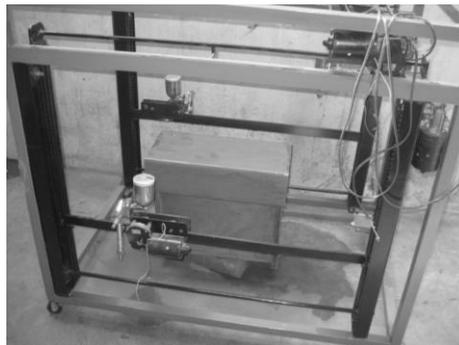
Gambar 11. Sistem kontrol lup tertutup ─



Gambar 12. Mikrokontroler AT89S51

## II. METODE PENELITIAN

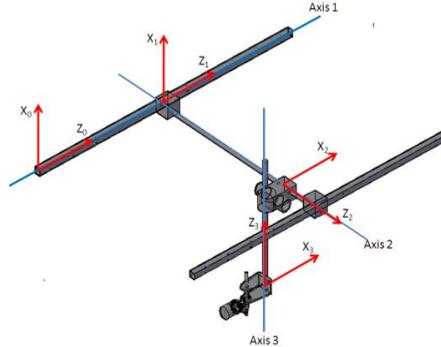
Sebelum melakukan simulasi terlebih dahulu menyiapkan alat dan bahan yang akan di pakai untuk melakukan simulasi seperti menggambar desain *painting robot* yang akan disimulasikan dengan menggunakan program AutoCad 2008<sup>®</sup>, membuat diagram blok dari sistem secara keseluruhan, membuat persamaan kinematik dari *painting robot* kemudian diterjemahkan ke dalam program simulasi komputer dalam hal ini menggunakan Programmer Notepad dan C/C++. Selanjutnya merakit penggerak motor berdasarkan nilai-nilai yang telah diperoleh sebelumnya dari pengujian di komputer yang selanjutnya program tersebut akan di-*download* ke mikrokontroler AT 89S51, selanjutnya rakit semua komponen-komponen, baik itu komponen elektrik maupun mekanik dengan mengikuti bentuk yang telah dipersiapkan pada gambar. Keluaran yang diharapkan dari simulasi yaitu *greenhouse* dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan program yang telah diinput kedalam mikrokontroler AT 89S51



Gambar 13. Painting robot yang telah dibuat

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Aplikasi perhitungan DH parameter dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada Manipulator Cartesien 3-DOF dibawah ini.



Gambar 14. Konfigurasi Manipulator Cartesien Robot 3-Joint ( DOF)  
 Sumber : Dokumen Pribadi (2008).

DH Parameter :

i-1	i	$a_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
0	1	0	0	$d_1$	0
1	2	-90	0	$d_2$	0
2	3	90	0	$d_3$	0

Rumus umum adalah :

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

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

- Transformasi matriks untuk Axis 1 ( ${}^0T_1$ ) adalah :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos 0 & \cos 0 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot d_1 \\ \sin 0 \sin 0 & \cos 0 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk Axis 2 ( ${}^1_2T$ ) adalah :

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos -90 & \cos 0 \cos -90 & -\sin -90 & -\sin 0 \cdot d_2 \\ \sin 0 \sin -90 & \cos 0 \sin -90 & \cos -90 & \cos 0 \cdot d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk Axis 3 ( ${}^2_3T$ ) adalah :

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos 90 & \cos 0 \cos 90 & -\sin 90 & -\sin 0 \cdot d_3 \\ \sin 0 \sin 90 & \cos 0 \sin 90 & \cos 90 & \cos 0 \cdot d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sasaran untuk posisi (x,y) didalam Transformasi Matriks Homogeneous didefinisikan sebagai berikut [8]:

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

Berdasarkan defenisi diatas ada tiga parameter yang berpengaruh menentukan posisi (x,y,z) dari setiap proses rotasi dan translasi dari setiap Axis, yaitu :

- Untuk penentuan posisi (x,y) :

$$x = P_x$$

$$y = P_y$$

$$z = P_z$$

Dari gambar konfigurasi manipulator 3-Joint (DOF) posisi dari setiap pergerakan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan dari DH Parameter :

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

Persamaan DH Parameternya :

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

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B_T Goal = {}^0_2T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi sumbu i = 2 berada pada titik :

$$\begin{aligned}x &= 0 \\y &= 0 \\z &= d_1 + d_2\end{aligned}$$

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

Persamaan DH Parameternya:

$$\begin{aligned}{}^0_3T &= {}^0_3T \cdot {}^2_3T \\{}^0_3T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\end{aligned}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B_W T_{Goal} = {}^0_3T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{aligned}x &= 0 \\y &= d_3 \\z &= d_1 + d_2\end{aligned}$$

3). Pergerakan dari dasar (base) menuju end effector :

Kinematika 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 :

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

Atau :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B_W T \cdot \begin{bmatrix} P_{xyz'} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dimana :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B_W T = {}^0_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{xyz'} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan konfigurasi manipulator 3 DOF (lihat gambar 3.4.), maka didapat persamaan kinematika maju sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_3 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Jadi :

$$x_T = L_3$$

$$y_T = d_3$$

$$z_T = d_1 + d_2$$

### Contoh Perhitungan

Aplikasi perhitungan DH parameter untuk kinematika maju dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada manipulator 3 DOF.

Diketahui:

$$\begin{aligned} d1 &= \text{Pergerakan manipulator robot berdasarkan axis 1} \\ &= 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d2 &= \text{Pergerakan manipulator robot berdasarkan axis 2} \\ &= 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d3 &= \text{Pergerakan manipulator robot berdasarkan axis 3} \\ &= 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L3 &= \text{Lengan robot untuk pemegang spoid (End Effector)} \\ &= 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m} \end{aligned}$$

Permasalahan :

Bagaimana posisi dari end effector dari konfigurasi manipulator robot 3 DOF !

DH Parameter :

i-1	i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
0	1	0	0	0,5	0
1	2	-90	0	0,3	0
2	3	90	0	0,2	0

Rumus umum adalah :

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

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

- Transformasi matriks untuk Axis 1 ( ${}^0T_1$ ) adalah :

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos 0 & \cos 0 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0.5 \\ \sin 0 \sin 0 & \cos 0 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot d_1 \cdot 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk Axis 2 ( ${}^1_2T$ ) adalah :

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos -90 & \cos 0 \cos -90 & -\sin -90 & -\sin 0 \cdot 0.3 \\ \sin 0 \sin -90 & \cos 0 \sin -90 & \cos -90 & \cos 0 \cdot 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Transformasi matriks untuk Axis 3 ( ${}^2_3T$ ) adalah :

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos 0 & -\sin 0 & 0 & 0 \\ \sin 0 \cos 90 & \cos 0 \cos 90 & -\sin 90 & -\sin 0 \cdot 0.2 \\ \sin 0 \sin 90 & \cos 0 \sin 90 & \cos 90 & \cos 0 \cdot 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

Persamaan DH Parameternya :

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

$${}^0_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^E_WT_{Goal} = {}^0_2T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Jadi posisi sumbu  $i = 2$  berada pada titik :

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= 0 \\ z &= 0.8 \end{aligned}$$

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

Persamaan DH Parameternya:

$${}^0_3T = {}^0_2T \cdot {}^2_3T$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan Transformasi Matriks Homogeneous, maka :

$${}^B_3T_{Goal} = {}^0_3T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{aligned} x &= 0 \\ y &= 0,2 \\ z &= 0,8 \end{aligned}$$

3). Pergerakan dari dasar (base) menuju end effector :

Kinematika 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 :

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

Atau :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B_3T \cdot \begin{bmatrix} P_{x'y'z'} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Dimana :

$$\begin{bmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B_3T = {}^0_4T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{x'y'z'} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,12 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan konfigurasi manipulator 3 DOF (lihat gambar), maka didapat persamaan kinematika maju sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0,8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,12 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

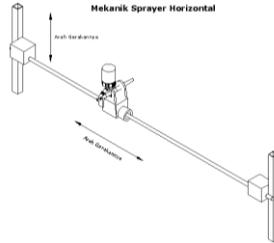
Jadi :

$$x_T = 0,12 \text{ m}$$

$$y_T = 0,2 \text{ m}$$

$$z_T = 0,8 \text{ m}$$

B. Kinematika Manipulator pergerakan painting 2robot



Gambar 14. Konfigurasi Robot Manipulator 2 Sendi (DOF)

1. Kinematika maju

Tabel 1. DH Parameter

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	-90	$L_1$	0	$\theta_2$

Rumus umum adalah :

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dari tabel 1 kita dapat menghitung *homogeneous transform* matriks untuk setiap sumbu.

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

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

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

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

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin\theta_2 \cos-60 & \cos\theta_2 \cos-60 & -\sin-60 & -\sin 0.0 \\ \sin\theta_2 \sin-60 & \cos\theta_2 \sin-60 & \cos-60 & \cos 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Sasaran untuk posisi (x,y) dan arah ( $\theta_1, \theta_2$ ) di dalam transformasi matriks homogenous didefinisikan sebagai berikut :

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

$${}^0_2 T = {}^0_1 T \cdot {}^1_2 T = \begin{pmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Berdasarkan definisi di atas ada dua parameter yang berpengaruh menentukan posisi (x,y) dan arah ( $\theta_1, \theta_2$ ) 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 ( $\theta_1, \theta_2$ ) yang terbentuk adalah :

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

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

Dari gambar konfigurasi manipulator 2 DOF posisi dan arah sudut dari setiap manipulator 2 DOF posisi dan arah sudut dari setiap pergerakan lengan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan – persamaan DH Parameter

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

Persamaan DH Parameternya :

$${}^0_2 T = {}^0_1 T \cdot {}^1_2 T$$

$${}^0_2 T = \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & c_1 L_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & s_1 L_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dari penyelesaian matriks di atas, maka diperoleh bentuk persamaan umum dari robot

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= c_1 c_2 \\
 r_{12} &= -c_1 s_2 \\
 r_{13} &= -s_1 \\
 r_{21} &= s_1 c_2 \\
 r_{22} &= -s_1 s_2 \\
 r_{23} &= -c_1 \\
 r_{31} &= -s_2 \\
 r_{32} &= -c_2 \\
 P_x &= c_1 L_1 \\
 P_y &= s_1 L_1
 \end{aligned}$$

- Pergerakan lengan dari dasar menuju *end effektor*:

Kinematika maju robot dapat dijabarkan dengan mengacu posisi end effektor merupakan hasil dari gerakan rotasi dan translasi sepanjang  $P_x$ ,  $P_y$  dan  $P_z$ . Persamaan tersebut dapat ditulis:

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

Atau :

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

Dimana :

$$\begin{pmatrix} P_{xyz} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{pmatrix}$$

$${}^B_W T = {}^0_2 T = \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & c_1 L_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & s_1 L_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P_{x' y' z'} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Berdasarkan konfigurasi manipulator 2 DOF, maka didapat persamaan kinematik maju sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & c_1 L_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & s_1 L_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Jadi :

$$x_T = c_1 L_1 + L_2 c_1 c_2$$

$$y_T = s_1 L_1 + L_2 s_1 c_2$$

## 2. Kinematika Invers

Pada pembahasan ini, kita akan mencari besarnya nilai dari  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  yang dapat kita cari dengan menggunakan cara sebagai berikut:

### a. Menentukan persamaan $\theta_2$

Apabila kita mengkuadratkan  $x$  dan  $y$  dan menambakkannya dengan menggunakan  $c_{12} = c_1 c_2 - s_1 s_2$ ;  $s_{12} = c_1 s_2 + s_1 c_2$  sehingga kita akan mendapatkan:

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2$$

Dimana  $c_2$  kita dapatkan dari

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}$$

### b. Apabila persamaan di atas disederhanakan, kita akan memperoleh $\theta_2$

$$\theta_2 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}\right)$$

Menentukan persamaan  $\theta_1$

$$\tan \alpha = \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_2 \cos \theta_2 + l_1}$$

$$\tan \beta = \frac{y_T}{x_T}$$

Sehingga  $\theta_1 = \beta + \alpha$

## C. Pembahasan Kinematika Manipulator *Smart Greenhouse*

### 1. Kinematika Maju (*Forward Kinematic*)

Aplikasi perhitungan DH parameter untuk kinematika maju dapat kita lihat pada perhitungan-perhitungan parameter pada manipulator 2 DOF.

Diketahui:

$$L1 = 50 \text{ cm} = 0,50\text{m} \quad \theta_1 = 90^\circ$$

$$L2 = 10 \text{ cm} = 0,55 \text{ m} \quad \theta_2 = 90^\circ$$

Permasalahan :

Tentukan posisi dari end effector dari konfigurasi manipulator robot 2 DOF !

DH Parameter

$i-$	$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
0	1	0	0	0	$\theta_1=90$
1	2	-90	0,050	0	$\theta_2$

Rumus umum adalah :

$${}_{i-1}T_i = \begin{pmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Berdasarkan Tabel DH Parameter di atas maka transformasi matriks setiap sumbu adalah sebagai berikut:

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

$${}^0_1T = \begin{pmatrix} \cos 90 & -\sin 90 & 0 & 0 \\ \sin 90 \cos 0 & \cos 90 \cos 0 & -\sin 0 & -\sin 0 \cdot 0 \\ \sin 90 \sin 0 & \cos 90 \sin 0 & \cos 0 & \cos 0 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

b. Transformasi matriks untuk sumbu 2 ( ${}^1_2T$ )

$${}^1_2T = \begin{pmatrix} \cos 30 & -\sin 30 & 0 & L_1 \\ \sin 30 \cos -90 & \cos 30 \cos -90 & -\sin -90 & -\sin -90 \cdot 0 \\ \sin 30 \sin -90 & \cos 30 \sin -90 & \cos -90 & \cos -90 \cdot 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

• Pergerakan Lengan dari base menuju sumbu 2 yaitu :

$$\begin{aligned} {}^0_2T &= {}^0_1T \cdot {}^1_2T \\ &= \begin{pmatrix} 0,8660 & 0,5 & -0,8660 & 0 \\ 0,8660 & -0,8660 & 0 & 0,5 \\ -0,8660 & -0,8660 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Jadi posisi x dan y dalam sumbu 2 adalah

$$x_2 = 0 \text{ (m)}$$

$$y_2 = 0,5 \text{ (m)}$$

• Pergerakan lengan dari dasar menuju *end effektor*:

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & -s_1 & c_1 L_1 \\ s_1 c_2 & -s_1 s_2 & c_1 & s_1 L_1 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} L_2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$x_T = c_1 L_1 + L_2 c_1 c_2$$

$$\begin{aligned}
 &= \cos 90 \cdot 0,035 + 0,1 \cos (90+30) \\
 &= 0,05 \text{ m} \\
 y_T &= s_1 L_1 + L_2 s_1 c_2 \\
 &= 0,035 \cdot \sin 90 + 0,1 \cdot \sin 90 \cos 30 \\
 &= 0,035 + 0,0866 \\
 &= 0,1216 \text{ m}
 \end{aligned}$$

## 2. Kinematika Invers

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 50 \text{ cm} && = 0,50 \text{ m} \\
 L_2 &= 55 \text{ cm} && = 0,55 \text{ m} \\
 x_T &= 0,05 \text{ m} \\
 y_T &= 0,1216 \text{ m} \\
 x &= 0 \text{ m} \\
 y &= 0,035 \text{ m}
 \end{aligned}$$

### a. Menentukan nilai $\theta_2$

$$\begin{aligned}
 \theta_2 &= \arccos \left( \frac{x_T^2 + y_T^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1 L_2} \right) \\
 &= \arccos \left( \frac{(0,05)^2 + (0,1216)^2 - (0,55)^2 - (0,1)^2}{2(0,035)(0,1)} \right) \\
 &= \arccos \frac{0,006}{0,07} \\
 &= \arccos 0,85714 \\
 &= 30,003^\circ
 \end{aligned}$$

### b. Menentukan nilai $\theta_1$

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= \beta + \alpha \\
 \tan \alpha &= \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_2 \cos \theta_2 + l_1} = \frac{0,1 \sin 30}{0,1 \cos 30 + 0,035} = 0,4111 \\
 \alpha &= \arctan 0,4111 = 22,35^\circ \\
 \tan \beta &= \frac{y}{x} \\
 \beta &= \arctan 2,432 = 67,64^\circ \\
 \text{Sehingga :} \\
 \theta_1 &= 22,35^\circ + 67,64^\circ = 90^\circ
 \end{aligned}$$

## 3. Kecepatan Sudut

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= \cos 90 \cdot \cos 30 - \sin 90 \cdot \sin 30 \\
 &= 0,866 - 0,5 \\
 &= 0,366
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r_{12} &= -\cos 90 \cdot \sin 90 \\
 &= -0,5 \\
 r_{21} &= \sin 90 \cdot \cos 90 \\
 &= 0,8660 \\
 r_{22} &= -\cos 90 \cdot \sin 90 + \sin 90 \cos 90 \\
 &= -0
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan transformasi Jacobian maka persamaan kinematiknya dapat ditulis:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,366 & -0,5 \\ 0,8660 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,05 \\ 0,1216 \end{bmatrix} \\
 \omega_1 &= 0,09 \text{ rad/s} \\
 \omega_2 &= -0,09 + 0,00608 \\
 &= 0,09608 \text{ rad/s}
 \end{aligned}$$

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

##### A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian diperoleh beberapa kesimpulan antara lain:

1. Sistem painter robot telah mencapai manfaat yang optimal berkaitan dengan kehandalan, kualitas keamanan, dan kemudahan penggunaan, dibandingkan dengan pengecatan manual. Semua tujuan yang ditetapkan untuk painter robot yang diusulkan telah dicapai.
2. Dari segi desain mekanik, x-sumbu modul, modul y-sumbu, sumbu z-modul dan modul akhir effector dirancang dan dibuat dengan benar. Semua mounting motor dan kopling yang benar disesuaikan. Semua sendi prismatic dikembangkan berhasil.
3. Dalam hal sistem listrik dan elektronik, modul distribusi daya, modul sensor, sistem elektronik, induksi DC motor penggerak sistem dan panel kontrol dikembangkan berhasil.
4. Dalam hal pengembangan perangkat lunak, penulis telah berhasil mensimulasikan sebuah program kontrol untuk painter robot. Setiap gerakan berhasil dikontrol oleh program tersebut. Hal ini dapat diprogram dengan mudah untuk menghadapi setiap perubahan dalam proses.

5. Dari perhitungan kinematika robot menggunakan metode DH parameter dan matriks Jacobian Diperoleh persamaan kinematik sebagai berikut :

$$\begin{pmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1c_2 & -c_1s_2 & -s_1 & -s_1d_2 \\ s_1c_2 & -s_1s_2 & c_1 & c_1d_2 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$x_T = c_1c_2 \cdot d_1 - c_1s_2 \cdot d_2 - s_1d_2 \quad y_T = s_1c_2 \cdot d_1 - s_1s_2 \cdot d_2 - c_1d_2$$

### B. Saran

1. Painting robot Cartesian yang dihasilkan tidak hanya memiliki manipulator 3 planar (3 DOF) saja, tetapi dapat di kombinasikan dengan sendi pada End effector agar dapat menjangkau dimensi yang lebih sulit.
2. Dalam mendesain alat, baik sistem mekanik maupun sistem kontrol, sebaiknya mempertimbangkan material yang tersedia di pasaran. Seringkali ditemui kesulitan dalam menerapkan desain dengan material yang tidak tersedia di pasaran

### V. DAFTAR PUSTAKA

<http://www.robots.com>

Miyazaki (1996), "Total Cost Concept in Mechanization and Automation", Proceeding of IIW Shipbuilding Seminar '96 in Denmark

Pitowarno, Endra, 2006. *Robotika : Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*. Penerbit ANDI, Yogyakarta.

Honda Respect Motor (2004)

Tai-ran Hsu (san jose state University),1992. *Computer-Aided*. Penerbit: West Publishing Company

Craig, Jhon J. 2003. *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. 3<sup>rd</sup> Edition.

Mappaita, Abdullah. 2003. *Modul kuliah Kinematika & Dinamika I*. Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Rosen, Jacob. 2001. *Model of Robot Manipulation*. Department of Electrical Engineering University of Washington.

209 Syarifuddin, Anthonius L.S Haans, *Analisis Industrial Robot Automotive Body Painting dengan Kendali Kinematik*

Ogata, Katsuhiko, Leksono, Edi. 1985. *Teknik Kontrol Automatik (terjemahan). Jilid 1*, Erlangga, Jakarta.

*Power Window Specification. China Leader Industry Co., Ltd.*  
<http://powerwindow.chinese-suppliers.com>

Darle W.dudley (ed.)1962. *Perencanaan Teknik Mesin*