

# ANALISIS WORKING SPACE SERIAL MANIPULATOR TIPE 6R

Rino Yusra Hamdani<sup>[1]</sup>, Syafri<sup>[2]</sup>

Laboratorium Hidrolik dan Pneumatik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

<sup>[1]</sup>rinoyusra11@gmail.com, <sup>[2]</sup>Prie\_00m022@gmail.com

## Abstract

*In designing a manipulator, several things need to be considered, which is like the singular condition of the manipulator. This is so that the manipulators can operate in a safe work area. This research will begin with modeling 3D serial manipulator 6R using Inventor software. This 3D model is needed to get joint parameter values, namely  $a$ ,  $d$ ,  $\theta$  and  $\alpha$ . After obtaining the joint parameters, a Forward Kinematic calculation is performed to get the end effector position when given a certain input angle using Matlab software. Then variations are made on the input angle  $\theta_2$  ( $30^\circ$  to  $180^\circ$ ) and  $\theta_3$  ( $-90^\circ$  to  $60^\circ$ ) and a graph that shows working space is obtained. To ensure that the calculations performed are correct, validation using inventor is done by providing an angle value for the second and third joints. Then the Jacobian matrix was built to obtain the singularity value of each configuration by determining the Jacobian matrix. The configuration is stated to be in a singular position if the  $\det(J)$  is approaches 0. With the variation in input angle obtained, the manipulator range is  $-471$  mm to  $2967$  mm on the Z axis and  $-1936$  mm to  $2699$  mm on the X axis. The singular manipulator is occur when  $\theta_3 = -78.15^\circ$ . From these results it can be stated that the manipulator cannot be in the configuration of  $\theta_3 = -78.15^\circ$ . This is in line with the manufacturer's recommendations which only allow  $\theta_3$  minimum =  $-75^\circ$ .*

**keywords:** manipulator, serial manipulator, DH parameter, forward kinematics, arm robot, singularity.

## 1. Pendahuluan

Saat ini dunia sedang memasuki era revolusi industri yang ke-4 atau biasa disebut revolusi industri 4.0 dimana industri-industri akan secara besar-besaran mengaplikasikan teknologi canggih salah satunya adalah sistem otomatisasi [1]. Salah satu komponen sistem otomasi adalah manipulator robot. Robot adalah manipulator multifungsi yang dapat diprogram ulang dan dirancang untuk memindahkan material, *parts*, alat-alat atau sebuah perangkat khusus dengan variabel gerakan terprogram untuk melakukan pekerjaan khusus [2]. Secara garis besar robot dibedakan atas empat macam yaitu *mobile robot*, *manipulator robot*, gabungan *mobile robot* dan *manipulator robot* dan *humanoid robot*. Sedangkan manipulator sendiri terdiri dari manipulator seri dan paralel. Untuk manipulator seri terdiri dari 5 jenis, yaitu : *cartesian*, *cylindrical*, *spherical*, SCARA, dan *artificial manipulator* [3]. Pada penelitian ini akan difokuskan membahas mengenai *artificial serial manipulator*.

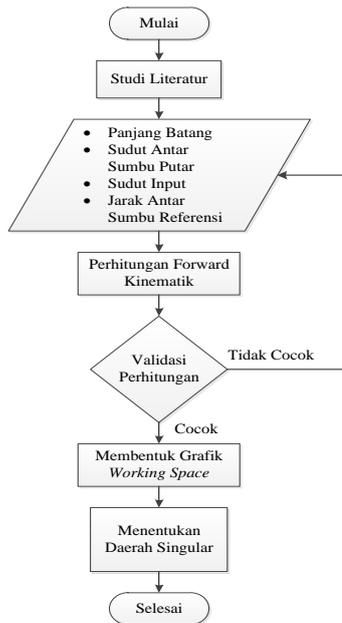
Terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dalam perancangan sebuah manipulator diantaranya adalah ketelitian dan jangkauan manipulator itu sendiri. Sebelumnya di Jurusan Teknik Mesin Universitas Riau telah dilakukan penelitian mengenai *trajectory planning parallel manipulator 3R* oleh Eka Setya Wahyudi [4], sedangkan untuk manipulator seri telah dilakukan penelitian mengenai representasi grafis area kerja oleh Ana Djuric [5], *Singularity Manipulator PUMA 6 DOF* oleh Fan-Tien Cheng [6] dan optimasi *posture robot 6R* oleh Yang Lin [7]. Pada penelitian ini akan dilakukan penelitian mengenai *working space serial manipulator* tipe 6R

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *forward kinematic*. *Forward Kinematic* merupakan metode dalam analisa kinematika robot dengan cara mengetahui input pada masing-masing *joint space* sehingga dapat diketahui koordinat dan orientasi pada *end effector*. [8]. Dalam merancang sebuah robot manipulator perlu diperhatikan area kerja yang akan dilalui oleh manipulator tersebut. *Working space* adalah seluruh area yang dapat dijangkau oleh *end effector* sebuah manipulator dalam batas *singularity* yang telah ditentukan. Sedangkan *singularity* secara umum adalah suatu kondisi dimana mekanisme atau rantai kinematik kehilangan satu atau lebih derajat kebebasan [8].

Penelitian ini dimulai dengan menentukan parameter DH pada manipulator yang akan diuji. Dengan membangun matriks jacobi untuk setiap konfigurasi manipulator yang kita inginkan. Kita dapat mengetahui derajat *singularity* dari konfigurasi tersebut. Apabila nilai determinan matriks jacobi tersebut mendekati nol maka konfigurasi tersebut mendekati posisi singular. Sebaliknya jika nilainya mendekati 1 maka konfigurasi berada pada posisi ideal. [8].

## 2. Metodologi

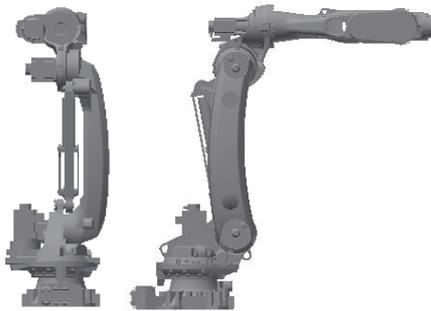
Pada penelitian ini dimulai dengan pemodelan 3D manipulator dengan *basic robot manipulator* Kawasaki tipe CX 210L. Adapun tahap-tahap pelaksanaan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

## 2.1 Objek Penelitian

Untuk objek dari penelitian ini adalah sebuah mode 3D yang didapatkan dari produsen robot industry Kawasaki Robotics melalui *website* perusahaan. Adapun objek penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar 2.

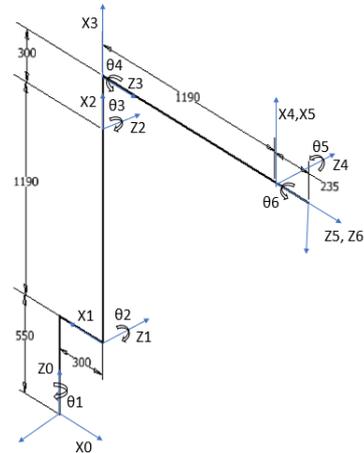


Gambar 2. Objek Penelitian

## 2.2 DH Parameter

DH Parameter merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengetahui posisi perpindahan suatu mekanisme terhadap posisi awalnya dengan cara mentransformasikan koordinat antara dua *link* yang berdekatan.

Untuk pengambilan data penelitian berupa DH Parameter, dilakukan secara grafis dengan mengukur dimensi model 3D yang didapatkan menggunakan *software* Inventor. Setelah disederhanakan, dapat dilihat rantai kinematik mekanisme sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Rantai Kinematik Manipulator 6R

Untuk nilai DH Parameter mekanisme, masing-masing dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. DH Parameter

Join	a (mm)	d(mm)	$\Theta$	A
0-1	300	550	$\theta_1$	$-90^\circ$
1-2	1190	0	$\theta_2(90)$	$0^\circ$
2-3	300	0	$\theta_3$	$90^\circ$
3-4	0	1190	$\theta_4$	$90^\circ$
4-5	0	0	$\theta_5$	$-90^\circ$
5-6	0	235	$\theta_6$	$0^\circ$

## 2.3 Perhitungan *Working Space* dengan Metode Matriks Transformasi

Setelah didapatkan DH parameter, selanjutnya dilakukan perhitungan *forward kinematik* untuk mendapatkan posisi *end effector* untuk masing-masing konfigurasi. Pada persamaan 1 dapat dilihat persamaan baku yang menyatakan hubungan antara sebuah titik dengan titik selanjutnya pada rantai kinematik. Matriks ini disebut sebagai matriks *homogeneous transformation*.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Keterangan :

— = koordinat

— = orientasi posisi

Untuk mendapatkan posisi *end effector* ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) relatif terhadap titik referensi ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) dapat dilakukan dengan cara menentukan matriks *homogeneous transformation* untuk masing-masing *joint space* dan kemudian mengalikan semua matriks yang didapatkan. Dalam penelitian ini sesuai dengan objek penelitian yang memiliki 6 derajat kebebasan maka didapatkan 6 buah matriks *homogeneous transformation*, yaitu :

${}^1T, {}^2T, {}^3T, {}^4T, {}^5T, {}^6T$ . Posisi akhir dari *end effector* adalah matriks 3x1 yang ditunjukkan pada persamaan 2.

### 2.4 Perhitungan Singularity Menggunakan Metode Matriks Jacobi

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian derajat *singularity* dengan menggunakan metode matriks jacob. Penelitian akan dimulai dengan menentukan titik sampel pada daerah *working space* manipulator yang telah didapatkan. Setelah itu dapat dibangun matriks jacob untuk setiap titik yang telah ditentukan. Selanjutnya masing masing matriks jacob tersebut akan didetrminasikan untuk mengetahui nilai *singularity* masing-masing titik tersebut.

$$\dot{Y}_{6x1} = \begin{bmatrix} \frac{df_m}{dq_n} \end{bmatrix}_{n \times m} \dot{q}_{6x1} \quad (2)$$

$$\dot{Y} = J\dot{q}$$

$$Y = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \end{bmatrix} \quad \dot{Y}_{6x1} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dq} \end{bmatrix}_{6 \times n} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_1} & \frac{\partial f_3}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_1} & \frac{\partial f_4}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_5}{\partial q_1} & \frac{\partial f_5}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_5}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \frac{\partial f_6}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dari kedua persamaan di atas didapatkan matriks jacob adalah sebagai berikut :

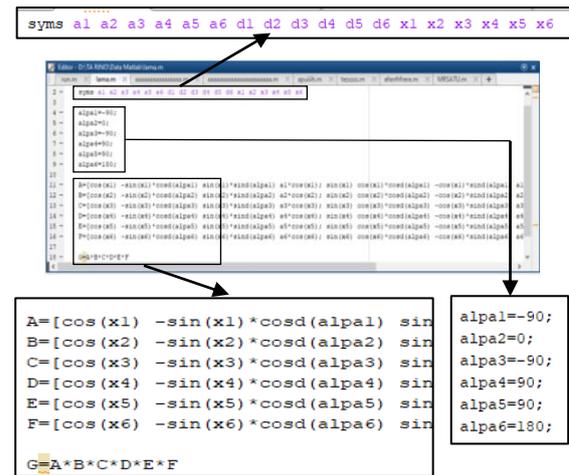
$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_1} & \frac{\partial f_3}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_3}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_1} & \frac{\partial f_4}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_5}{\partial q_1} & \frac{\partial f_5}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_5}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_6}{\partial q_1} & \frac{\partial f_6}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

### 3. Hasil

Setelah dilakukan perhitungan didapatkanlah hasil dalam bentuk area kerja dan derajat *singularity* dari manipulator tersebut. Hasil perhitungan dapat dilihat pada pembahasan berikut ini:

### 3.1 Hasil Perhitungan Working Space

Setelah didapatkan matriks transformasi untuk masing-masing *joint space* tersebut, maka dapat dilakukan perhitungan nominal dengan menggunakan aplikasi Matlab. Pada gambar 4 diperlihatkan proses perhitungan dimana dimulai dengan mendefinisikan variabel dan koefisien yang akan digunakan, menginput matriks *homogeneous transformation* dan kemudian memberikan perintah perkalian.



Gambar 4. Perhitungan Matriks Transformasi

Dari perhitungan *forward kinematic* didapatkan sebuah matriks transformasi (4x4) yang menunjukkan hubungan antara *end effector* ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) dan titik referensi ( $X_0, Y_0, Z_0$ ). Hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan 4.

$${}^6T = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & R14 \\ R21 & R22 & R23 & R24 \\ R31 & R32 & R33 & R34 \\ R41 & R42 & R43 & R44 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dimana :

$$R11 = c6c5s1s4 - c4c1s2s3 - c1c2c3 - s5c1c2s3 + c1c3s2 - s6c4s1 + s4c1s2s3 - c1c2c3$$

$$R21 = s6c1c4 + s4c2c3s1 - s1s2s3 - c6c5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 + s5c2s1s3 + c3s1s2$$

$$R31 = -c6s5c2c3 - s2s3 + c4c5c2s3 + c3s2 - s4s6c2s3 + c3s2$$

$$R41 = 0$$

$$R12 = c6c4s1 + s4c1s2s3 - c1c2c3 + s6c5s1s4 - c4c1s2s3 - c1c2c3 - s5c1c2s3 + c1c3s2$$

$$R22 = -c6c1c4 + s4c2c3s1 - s1s2s3 - s6c5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 + s5c2s1s3 + c3s1s2$$

$$R32 = c6s4c2s3 + c3s2 - s6s5c2c3 - s2s3 + c4c5c2s3 + c3s2$$

$$R42 = 0$$

$$R13 = -s5s1s4 - c4c1s2s3 - c1c2c3 - c5c1c2s3 + c1c3s2$$

$$R23 = s5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 - c5c2s1s3 + c3s1s2$$

$$R33 = c4s5c2s3 + c3s2 - c5c2c3 - s2s3$$

$$R43 = 0$$

$$R14 = d6s5s1s4 - c4c1s2s3 - c1c2c3 + c5c1c2s3 + c1c3s2 - d4c1c2s3 + c1c3s2 + a1c1 - d2s1 - d3s1 - d5c4s1 + s4c1s2s3 - c1c2c3 - a5s5c1c2s3 + c1c3s2 + a6c6c5s1s4 - c4c1s2s3 - c1c2c3 - s5c1c2s3 + c1c3s2 + a2c1c2 + a4s1s4 + a5c5s1s4 - 4c1s2s3 - c1c2c3 - a6s6c4s1 + s4c1s2s3 - c1c2c3 - a4c4c1s2s3 - c1c2c3 + a3c1c2c3 - a3c1s2s3$$

$$R24 = d5c1c4 + s4c2c3s1 - s1s2s3 - d4c2s1s3 + c3s1s2 - d6s5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 - c5c2s1s3 + c3s1s2 + d2c1 + d3c1 + a1s1 + a4c4c2c3s1 - s1s2s3 - a5s5c2s1s3 + c3s1s2 - a6c6c5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 + s5c2s1s3 + c3s1s2 + a2c2s1 - a4c1s4 - a5c5c1s4 - c4c2c3s1 - s1s2s3 + a6s6c1c4 + s4c2c3s1 - s1s2s3 + a3c2c3s1 - a3s1s2s3$$

$$R34 = d1 - d4c2c3 - s2s3 - a2s2 + d6c5c2c3 - s2s3 - c4s5c2s3 + c3s2 - a4c4c2s3 + c3s2 - a5s5c2c3 - s2s3 - d5s4c2s3 + c3s2 - a3c2s3 - a3c3s2 - a6c6s5c2c3 - s2s3 + c4c5c2s3 + c3s2 - a5c4c5c2s3 + c3s2 - a6s4s6c2s3 + c3s2$$

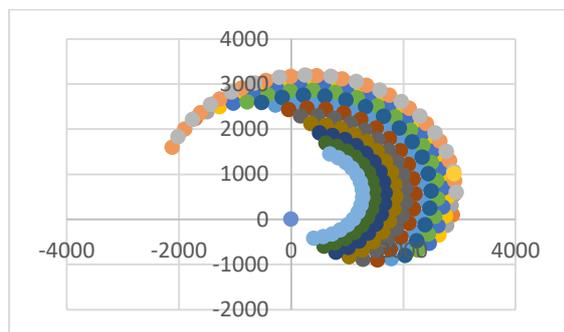
$$R44 = 1$$

Keterangan :

$$c = \cos(\theta)$$

$$s = \sin(\theta)$$

Selanjutnya untuk mendapatkan grafik *working space* dapat dilakukan dengan memvariasikan sudut input  $\theta_2$  mulai dari  $30^\circ$  sampai  $180^\circ$  dan  $\theta_3$  dari  $-60^\circ$  sampai  $70^\circ$ . Dengan variasi tersebut didapatkan grafik *working space* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5:



Gambar 5. Grafik *Working Space*

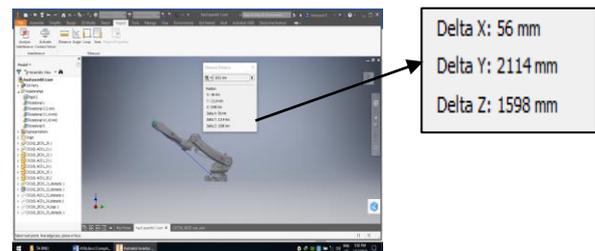
### 3.2 Validasi Perhitungan *Forward Kinematik*

Selanjutnya akan dilakukan pengujian untuk beberapa titik yang telah dikalkulasi menggunakan *software* Matlab yaitu untuk posisi pertama ( $X = 2114.7$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 1597.7$ ) posisi kedua ( $X = -2015$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 1831.2$ ) dan posisi ketiga ( $X = -1876.4$ ,  $Y = 0$ ,  $Z = 2043.8$ ). Validasi

dilakukan untuk memastikan bahwa perhitungan yang dilakukan sudah tepat. Proses validasi akan dilakukan secara grafis menggunakan *software* Inventor

#### 1. Posisi pertama

Untuk posisi pertama sudut input yang diberikan pada masing-masing *joint space* adalah;  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 30^\circ$ ,  $\theta_3 = -90^\circ$ ,  $\theta_4 = 0^\circ$ ,  $\theta_5 = 0^\circ$  dan  $\theta_6 = 0^\circ$ . Posisi yang didapatkan dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil Untuk Posisi Pertama

Koordinat yang didapatkan adalah :

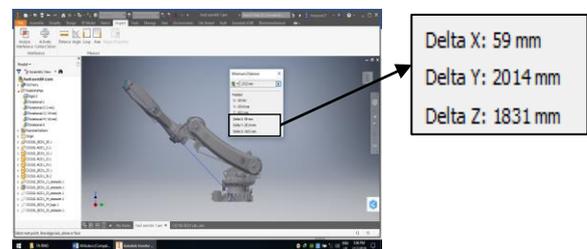
$$X = 56 \text{ mm}$$

$$Y = 2114 \text{ mm}$$

$$Z = 1598 \text{ mm}$$

#### 2. Posisi kedua

Untuk posisi kedua dengan kondisi  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 30^\circ$ ,  $\theta_3 = -80^\circ$ ,  $\theta_4 = 0^\circ$ ,  $\theta_5 = 0^\circ$  dan  $\theta_6 = 0^\circ$ . Posisi yang didapatkan diperlihatkan pada gambar 7.



Gambar 7. Hasil Untuk Posisi Kedua

Koordinat yang didapatkan adalah :

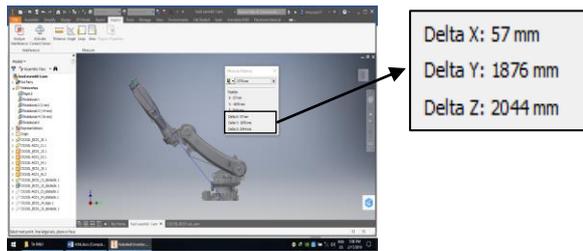
$$X = 59 \text{ mm}$$

$$Y = 2014 \text{ mm}$$

$$Z = 1831 \text{ mm}$$

#### 3. Posisi ketiga

Untuk posisi ketiga dengan kondisi  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 30^\circ$ ,  $\theta_3 = -70^\circ$ ,  $\theta_4 = 0^\circ$ ,  $\theta_5 = 0^\circ$  dan  $\theta_6 = 0^\circ$ . Posisi yang didapatkan dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Hasil Untuk Posisi Ketiga

Adapun koordinat yang didapatkan adalah :

- X = 57 mm
- Y = 1876 mm
- Z = 2044 mm

Setelah dilakukan perhitungan tersebut dapat dilakukan komparasi dengan perhitungan menggunakan Matlab. Tabel 2 menunjukkan perbandingan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

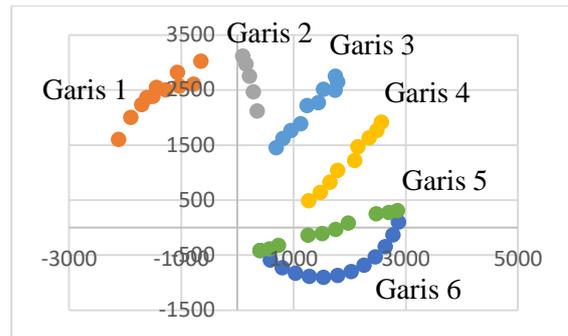
Tabel 2 Perbandingan Hasil Perhitungan

Variasi Sudut (°)		Hasil Perhitungan dengan Matlab (mm)			Hasil Perhitungan dengan Inventor (mm)		
$\theta_2$	$\theta_3$	X	Y	Z	X	Y	Z
30	-90	-2114.7	0	1597.7	2114	56	1598
30	-80	-2015	0	1831.2	2014	59	1831
30	-70	-1876.4	0	2043.8	1876	57	2044

Dari perbandingan tersebut dapat dilihat bahwasanya perhitungan yang dilakukan dengan Matlab dan Inventor memiliki hasil yang identik. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwasanya perhitungan *forward kinematik* yang telah dilakukan sudah tepat.

### 3.3 Hasil Perhitungan Singularity

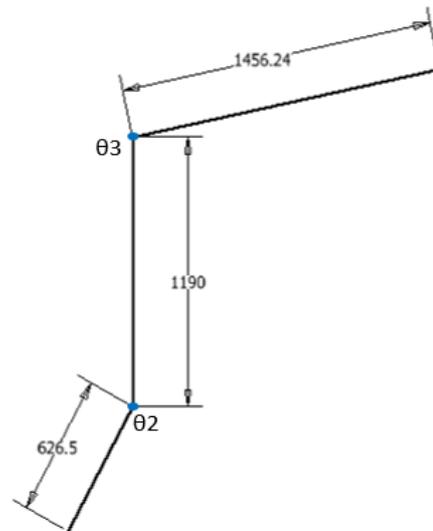
Dari titik-titik yang didapatkan pada gambar 5 akan diambil beberapa sampel untuk melihat kecenderungan derajat *singularity* di sepanjang area *working space* tersebut. Adapun sampel yang diambil terdiri dari 6 buah garis yang ditarik dari bagian terdalam hingga terluar dari area *working space* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Sampel Pengujian Singularity

Masing-masing titik pengujian tersebut akan diuji menggunakan metode matriks jacobii. Apabila nilai determinasi matriks jacobii mendekati 0 maka mekanisme dikatakan berada pada konfigurasi singular. Sedangkan untuk membangun matriks Jacobii dapat dilihat pada persamaan 2 dan persamaan 3.

Selanjutnya untuk menyederhanakan proses perhitungan, dilakukan simplifikasi terhadap rantai kinematik dari mekanisme tersebut. Rantai kinematik direduksi dari sebelumnya 6 DOF (*artificial*) menjadi 2 DOF (*planar*) seperti diperlihatkan pada gambar 10.



Gambar 10. Rantai Kinematik Planar

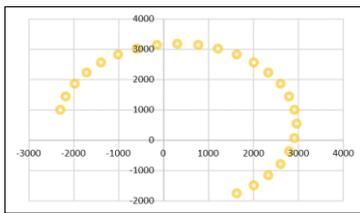
Setelah dibentuk rantai kinematik yang lebih sederhana, maka DH parameter untuk mekanisme tersebut menjadi seperti pada tabel 3.

Tabel 3. DH Parameter sederhana

Join	a (mm)	d(mm)	$\theta$	$\alpha$
0-1	1190	0	$\theta_2(90^\circ)$	$0^\circ$
1-2	1456,24	0	$\theta_3(281,85^\circ)$	$0^\circ$

Dari perhitungan yang telah dilakukan didapatkan daerah singular sebagaimana ditunjukkan pada gambar 11. Pada dapat dilihat

bahwa manipulator mengalami konfigurasi singular ketika  $\theta_3 = -78,15^\circ$ .



Gambar 11. Grafik Daerah *Singularity*

#### 4. Pembahasan

Setelah dilakukan pemodelan 3D untuk manipulator yang akan diuji didapatkan dimensi manipulator pada konfigurasi *default* adalah : tinggi = 2197.35 mm, lebar ; 760 mm dan panjang = 2140 mm,

Pada perhitungan *forward kinematic* terdapat perbedaan hasil antara perhitungan dengan Matlab dan Inventor. Perbedaan hasil ini diakibatkan karena ketidaksesuaian yang terjadi pada proses *assembly* 3D seperti ketidaksesuaian dimensi *part-part* manipulator, ketidaksesuaian sumbu referensi masing-masing *part* sehingga nilai sudut input yang diberikan tidak dapat presisi.

Mekanisme mengalami konfigurasi singular pada saat  $\theta_3$  mencapai  $-78,15^\circ$ , oleh karena itu pada saat pengoperasian nilai sudut input yang diberikan pada  $\theta_3$  harus dibatasi sehingga tidak menyentuh nilai tersebut.

#### 5. Simpulan

Dari perhitungan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan seperti berikut ini:

- Nilai DH Parameter dari manipulator adalah :

Join	a (mm)	d(mm)	$\theta$	A
0-1	300	550	$\theta_1$	$-90^\circ$
1-2	1190	0	$\theta_2(90)$	$0^\circ$
2-3	300	0	$\theta_3$	$90^\circ$
3-4	0	1190	$\theta_4$	$90^\circ$
4-5	0	0	$\theta_5$	$-90^\circ$
5-6	0	235	$\theta_6$	$0^\circ$

- Jangkauan maksimal yang dapat dicapai manipulator adalah  $x = -2114,7$  mm sampai 2945,4 dan  $y = -905,4$  mm sampai 3195,4 mm
- Manipulator berada pada konfigurasi singular ketika  $\theta_3$  mencapai  $-78,15^\circ$

#### Daftar Pustaka

- [1] Yahya, M. 2018. Era industri 4.0: tantangan dan peluang perkembangan Pendidikan kejuruan Indonesia. makassar : Universitas Negri Makassar
- [2] Kumar, V. 2018. Introduction to Robotics Philadelphia: University of Pennsylvania
- [3] Syam, Rafiuddin. 2015. Seri Buku Ajar Robot: Kinematika dan Dinamika Robot Lengan Untuk kasus Robot Penjinak Bom dan Robot Tari Pakkarena. Universitas Hasanuddin. Indonesia.
- [4] Wahyudi, Eka. 2018. Analisa Trajectory Planning Manipulator 3R. Pekanbaru: Universitas Riau.
- [5] Djuric, Ana M, dkk. 2013. Graphical Representation of the Significant 6R KUKA Robots Space. *International Symposium on Inteligent System and Informatics*
- [6] Cheng, Fan-Tien. 1997. Study and Resolution of Singularities for a 6-DOF PUMA Manipulator. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 27, No. 2
- [7] Lin, yang, dkk 2016. Posture Optimizasion Methodology of 6R Industrial Robots for Machining Using Performance Evaluation Indexes. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huangzong University of Science and Technology, China.
- [8] Jazar, Reza N. 2010. “Theory of Applied Robotics Kinematics Dinamics and Control Second Edition”. University of Melbourne. Autralia.