

# Analisis Kinematik *Singularaty* Pada Manipulator 7 DOF Dengan Software Simulasi ROBOAnalyzer

Nur Akhlis Sarihidaya Laksana<sup>1\*</sup>, Radhi Ariawan<sup>2</sup>, Unggul Satria Jati<sup>3</sup>, Jenal Sodikin<sup>4</sup>, Ulikaryani<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Cilacap

<sup>1,2,3,4,5</sup>Jln. Dr. Soetomo No.1 Karangcengis Sidakaya, Kabupaten Cilacap, 53212, Indonesia

E-mail: akhlissl@pnc.ac.id<sup>1</sup>, radhi.ariawan@pnc.ac.id<sup>2</sup>, unggulsatriajati@pnc.ac.id<sup>3</sup>, jenal.sodikin@pnc.ac.id<sup>4</sup>, ulikaryani@pnc.ac.id<sup>5</sup>

---

## Info Naskah:

Naskah masuk: 27 Mei 2022

Direvisi: 11 Juni 2022

Diterima: 21 Juni 2022

---

## Abstrak

Studi terkait manipulator masih dilakukan, seiring dengan perkembangan zaman dan kebutuhan. Pemanfaatan pada bidang manufaktur dan fabrikasi membuat banyaknya pengembangan manipulator. Pergerakan yang mulus, cepat dan akurat terus dikembangkan. Pada kasus multi manipulator 7 DOF ( *Degree of Freedom* ) merupakan jenis manipulator yang memiliki keistimewaan dalam hal *joint*. Invers kinematik merupakan parameter yang digunakan untuk mengendalikan orientasi dan pergerakan dari manipulator. Pada 7 DOF memiliki tiga *singularity wrist, elbow, dan sholder*. Pada simulasi tiap *singularity* menghasilkan matrik invers kinematik yang digunakan dalam mengendalikan pergerakan dari manipulator berhasil diperoleh. Metode yang digunakan dengan menentukan sudut gerak dari *joint (continues joint angel )* dengan simulasi untuk menghasilkan perhitungan yang cepat, presisi, akurat dan stabil. Target gerak masing-masing *joint* dengan nilai theta yang sudah ditentukan *singularity* berhasil dilakukan dengan error 0 %.

---

## Keywords:

kinematik;  
manipulator 7DOF;  
singularity.

---

## Abstract

Studies related to manipulators are still being carried out, along with the times and needs. Utilization in manufacturing and fabrication has led to the development of many manipulators. Smooth, fast, and accurate movement continue to be developed. In the case of the multi manipulator, 7 DOF (Degree of Freedom) is a type of manipulator that has special features in terms of joints. Inverse kinematic is a parameter used to control the orientation and movement of the manipulator. 7 DOF has three singularity wrist, elbow, and shoulder. In the simulation, each singularity produces an inverse kinematic matrix which is used to control the movement of the manipulator. The method used is to determine the angle of motion of the joint (continues joint angel) with simulation to produce calculations that are fast, precise, accurate, and stable. The target of each joint with the theta value that has been determined by the singularity was successfully carried out with an error of 0%.

---

\*Penulis korespondensi:

Nur Akhlis Sarihidaya Laksana

E-mail: akhlissl@pnc.ac.id

### 1. Pendahuluan

Manipulator merupakan salah satu teknologi penunjang. Pemanfaatan teknologi ini sudah banyak diterapkan dari mulai bidang manufaktur, fabrikasi, kesehatan dan banyak lagi[1][2]. Perkembangan lengan robot sangat pesat dan menjadi perhatian. Robot lengan dengan 7 *Degree of Freedom* (DOF) mulai banyak dibuat karena memiliki tingkat flexibiliti yang tinggi dibanding dengan yang sebelumnya [3][4][5][6].

Kinematik dan dinamik adalah paramater yang harus dipertimbangkan dalam mendesain secara struktur dan kendali dari sebuah manipulator. Simulasi digunakan untuk mengetahui lingkup kerja dari manipulator menggunakan *software* [3][7]. Ada beberapa metode yang dikembangkan sampai sekarang untuk mendapatkan kinematik dan dinamik dari manipulator, bisa menggunakan *Computer Aide Desain* (CAD). Pada manipulator 7 DOF juga dapat menggunakan jacobian matrik untuk mensolusi terkait invers kinematik [6]. Penggunaan jacobian matrik untuk mensolusi invers kinematik juga memiliki kelemahan diantaranya membutuhkan perhitungan yang kompleks dan waktu yang panjang. Akurasi sangat rendah karena terjadi penambahan secara kumulatif pada erornya. Analisis solusi untuk posisi menggunakan metode konfigurasi geometrik[2][6][8].

Penggunaan metode CAD 3D menghasilkan parameter dinamik yang tidak dapat dihasilkan dari proses manufaktur [9][10]. Penggunaan *software* 3D dapat membantu dalam identifikasi untuk invers kinematik dan dinamik pada mainipulator [11]. Pada manipulator 7 DOF untuk mendeskripsikan secara spesifik konfigurasi manipulatir menggunakan Denavit Haternberg Parameter [3][7]. Tujuan identifikasi dari kinematik dan dinamik untuk meengetahui pergerakan dan flexibilitas untuk robot lengan 7 DOF. Salah satu hal yang terpenting dalam manipulator yaitu desain dari manipulator, yang akan mempengaruhi dari perfoma [12]. Pemilihan mekanisme pada manipulator untuk tujuan dan fokus tertentu akan mempengaruhi juga dalam menentukan dimensi *link*.

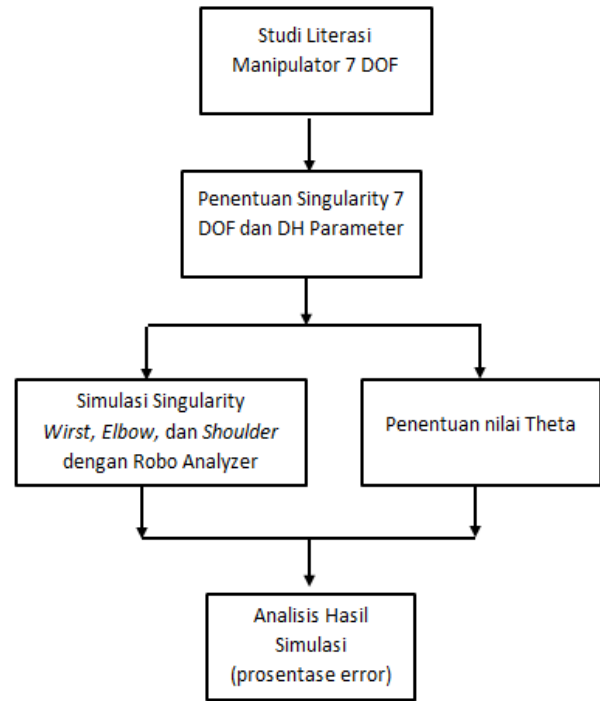
Dalam mendesain manipulator juga mempertimbangkan pula terkait dengan *singularity*. *Singularity* mempengaruhi mekanisme sebagai *kinetostatic properties* dari manipulator. *Singularity* harus dianalisis secara hati - hati dalam mendesain dari mekanisme manipulator. *Singularity* terdapat pada dua jenis manipulator dan seri dan parralel. Karena *singularity* berpengaruh pada mekanisme manipulator maka berpengaruh pula pada kinematik dan dinamik manipulator, serta pemanfaatannya [13][14][15].

Pada penelitian sebelumnya berfokus pada invers kinematik saja dari 7 DO, semua gerakan yang dihasilkan dalam proses *forward* kinematik dan *invers* kinematik tanpa mempertimbangkan *singularity* dan eror pada *singularity*. Tujuan penelitian pada artikel ini berfokus pada analisis *singularity* pada manipulator 7 DOF dengan nilai theta dari parameter dan referensi *plane* pada manipulator 7 DOF mencari dari errornya dan nilai matrik dari perubahan posisi. Nilai dari matrik yang dihasilkan dapat digunakan sebagai oroentasi untuk pengendalian.

### 2. Metode

#### 2.1 Frame Work Penelitian

Pada Gambar 1 merupakan alur penelitian simulasi kinematik dan dinamik manipulator 7 DOF. Penelitian dilakukan dengan menggunakan bantuan kajian pustaka dan analisis dari kinematik dan dinamik manipulator.



Gambar 1. Alur Penelitian

Pada proses penelitian ini studi literasi digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai manipulator 7 DOF. Untuk selanjutnya dilakukan analisis dengan simulasi untuk mendapatkan invers kinematik. Untuk set up kondisi awal dari manipulator pada kondisi *singularity wrist, elbow dan Shoulder*. Selanjutnya menggunakan parameter dari manipulator KUKA LBR iiwa 7 R800 untuk melakukan simulasi denga sudut theta yang sudah di optimasi pada penelitian yang sebelumnya.

#### 2.2 Singularity 7 DOF dan DH Parameter

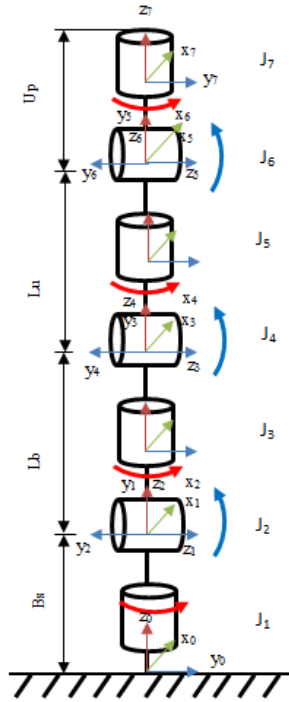
Manipulator untuk 7 DOF secara skematik ditunjukkan dengan hubungan antara *links* atau komponen – komponen mekanik yang terhubung sebagai *kinematik chain* dari *rigid body*. Hubungan antar *body* berupa *joint revolute* dan *prismatic*. Dinamik pada lengan robot merupakan deskripsi dari hubungan diantara torsi pada *joint actuator* dan pergerakan dari struktur robot [3]. Hubungan kinematik antar *joint* ditunjukkan pada persamaan (1).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{0(1,4)}^7 \\ T_{0(2,4)}^7 \\ T_{0(3,4)}^7 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Forward kinematic untuk model lengan robot 7 DOF maka didapatkan.

$$T_0^7 = T_0^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^6 T_6^7 \quad (2)$$

Pada persamaan (2) merupakan transformasi dari manipulator 7 DOF dengan masing masing joint. Pada persamaan (2) [16] sebagai dasar untuk DH Parameter yang ditunjukkan pada Tabel 1. Untuk Gambar Manipulator 7 DOF ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model dari manipulator 7 DOF

Tabel 1. DH Parameter

i	$a_i$ (m)	$\alpha_i$ (rad)	$d_i$ (m)	$\theta_i$ (rad)
1	0	1,57	0,34	$\theta_1$
2	0	-1,57	0	$\theta_2$
3	0	1,57	0,4	$\theta_3$
4	0	-1,57	0	$\theta_4$
5	0	1,57	0,4	$\theta_5$
6	0	-1,57	0	$\theta_6$
7	0	1,57	0,078	$\theta_7$

Hubungan antara frame (i) dengan frame yang lain secara geometri ditunjukkan dengan matrik

$T_{i-1}^i = \text{Rotasi}(z, \theta_i) \times \text{Translasi}(z, d_i) \times \text{Rotasi}(x, \alpha_i) \times \text{Rotasi}(x, \alpha_i)$

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & \alpha_i \\ \sin \theta_i \cos \alpha_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & -\sin \alpha_i d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_i & \cos \theta_i \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \cos \alpha_i d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Pada jenis maipulator atau robot lengan 7 DOF ketika  $\theta_3 = 0$  atau 90 derajat biasanya joint 2 dan joint 3 sama dengan paralel dan pedikular [6].

### 2.3 Singularity

Singularity merupakan hal maupun sifat yang ada pada setiap manipulator atau lengan robot, yang membentuk suatu pose. Untuk jenis struktur manipulator model S-R-S, singularity dibagi menjadi 3 sub-problem yaitu, shoulder, elbow, dan wrist [6]. Tabel 2 merupakan paramter jenis manipulator seri.

Tabel 2. Contoh Parameter Manipulator 7 DOF Untuk Milling

i	$a_i$ (m)	$d_i$ (m)	$\theta_i$ (°)
1	0	0,34	(-170,170)
2	0	0	(-120,120)
3	0	0,4	(-170,170)
4	0	0	(-120,120)
5	0	0,4	(-170,170)
6	0	0	(-120,120)
7	0	0,078	(-175,175)

Singularity wrist dimana posisi dari manipulator berdiri tegak membentuk 180° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Singularity elbow pisisi manipulator menekuk seperti membentuk siku. Secara oprasional dilihat dari Gambar 1 pada joint ke 2 (J2) atau joint 4 (j4) membentuk sudut tertentu ( $\Psi \leq 120^\circ$ ). Singularity shoulder merupakan posisi yang membentuk bahu. Dari Gambar 1 maka untuk posisi J2, J4, dan J6 membentuk sudut yang menyerupai bahu [6].

### 2.4 Penentuan Nilai Theta

Studi mengenai manipulator khususnya pada manipulator dengan 6 DOF dan selebihnya biasanya mempunyai 8 posisi konfigurasi. Pada jenis ini manipulator memiliki tiga parameter untuk referensi dari plane manipulator yaitu, shoulder, elbow, dan wrist [17]. Konfigurasi parameter dari manipulator atau global arm sering disebut orientation Control yang digunakan untuk menentukan invers kinematik dari lengan manipulator. Orientasi kontrol menggunakan nilai theta yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya [6].

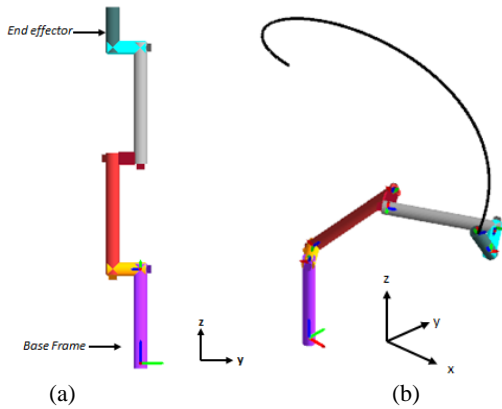
## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Simulasi dan Analisis Hasil

Simulasi gerak dari manipulator 7 DOF menggunakan bantuan software RoboAnalyzer. Simulasi menggunakan parameter manipulator 7 DOF yang ada pada Tabel 2. Simulasi mengasumsikan pada masing-masing singularity. Posisi pertama sudut manipulator dengan posisi awal atau initial value 180° membentuk singularity wrist. Nilai theta menggunakan dari penelitian sebelumnya [6].

Untuk nilai theta sudut kerja pertama posisi pada joint ke 1, mengalami perubahan  $\theta_1 = -144,26^\circ$ , posisi pada joint ke 2, mengalami perubahan  $\theta_2 = 46,924^\circ$ , posisi pada joint ke 3, mengalami perubahan  $\theta_3 = 0^\circ$ , posisi pada joint ke 4, mengalami perubahan  $\theta_4 = 49,148^\circ$ , posisi pada joint ke 5, mengalami perubahan  $\theta_5 = -153,95^\circ$ , posisi pada joint ke 6, mengalami perubahan  $\theta_6 = 112,46^\circ$ , posisi pada joint ke 7, mengalami perubahan  $\theta_7 = 105,85^\circ$  mengacu pada

penelitian sebelumnya [6]. Nilai  $\theta$  merupakan solusi dari *invers* kinematik untuk kondisi *singularity wrist* dengan kondisi awal dari manipulator adalah  $0^\circ$ . Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar (a) posisi awal manipulator atau lengan robot, (b) posisi dan *workspace* manipulator dengan sudut orientasi,

Pada Gambar 3 menunjukkan posisi dari *singularity wrist*. *Base Frame* ditunjukkan oleh warna ungu dan *end-Effector* dan ditunjukkan oleh warna *dark grey*. Dengan kondisi awal dari *initial value* adalah  $0^\circ$  dasar input sudut yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya [6]. Gambar 3.a menunjukkan *singularity wrist* sebagai kondisi awal dari manipulator. Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (4) tanpa memperhitungkan offset menunjukkan hasil sebagai berikut:

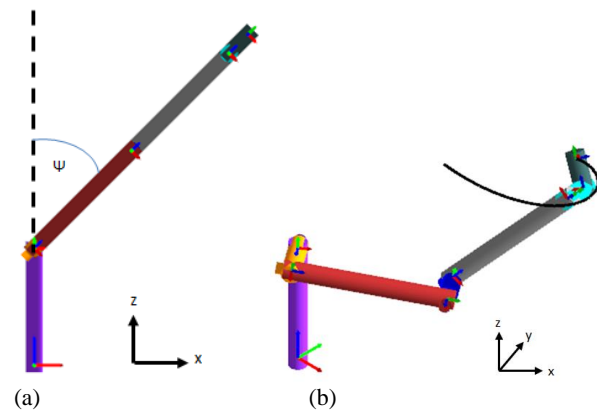
$$T_7^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pada Gambar 3 b perubahan dari manipulator yang diberikan nilai atau posisi pada *joint* ke 1, mengalami perubahan  $\theta_1 = -144,26^\circ$  bergerak dari sumbu x ke y. pada *joint* ke 2 bergerak dari sumbu x ke y mengalami perubahan  $\theta_2 = 46,924^\circ$ . Pada *joint* ke 3 dari sumbu x ke y, mengalami perubahan dengan  $\theta_3 = 0^\circ$ . Pada *joint* ke 4, mengalami perubahan dari sumbu x ke y  $\theta_4 = 49,148^\circ$ . Pada *joint* ke 5, mengalami perubahan dari sumbu x ke y dengan  $\theta_5 = -153,95^\circ$ , pada *joint* ke 1, mengalami perubahan dari sumbu x ke y pada *joint* ke 6, mengalami perubahan dari sumbu x ke y  $\theta_6 = 112,46^\circ$ ,  $\theta_7 = 105,85^\circ$ . Dari hasil analisis menggunakan *software* menunjukkan hasil matrik sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,70708 & -1,1E-05 & 0,7071 & 0,5210 \\ 0,61239 & -0,5000 & 0,6123 & 0,3601 \\ 0,353571 & 0,866017 & 0,3535 & 0,5349 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrik diatas merupakan hubungan antara *base frame* dengan *end effector*. Matrik dari posisi *wrist* pada Gambar 3 a menjadi Gambar 3 b yang menunjukkan matrik perubahan nilai posisi dari *Link 7* dengan *base frame*. Nilai diatas menunjukkan vektor dari *variabel joint*. Sehingga menghasilkan garis kerja dari *end effector*. Ke presisian dalam manipulator juga kan dipengaruhi oleh *invers kinematik*. Pada Gambar 3 b menunjukkan *workspace* dilihat dari 2 Dimensi, dan secara isometrik ditunjukkan pada Gambar 3 c.

Kondisi selanjutnya yaitu *singularity elbow* dimana manipulator memiliki *initial value* atau posisi awal miring dengan pada *joint* kedua mementuk sudut  $45^\circ$ . Pada gambar 4 ditunjukkan pososo *singularity elbow*.



Gambar 4. Gambar (a) posisi awal manipulator atau lengan robot, (b) posisi dan *workspace* manipulator dengan sudut orientasi.

Pada Gambar 4 menunjukkan posisi dari *singularity elbow* dengan insial posisi  $\Psi = 45^\circ$ . Dengan dasar input sudut yang sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya [6]. Pada *joint* 1 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_1 = -144,26^\circ$ . Pada *joint* 2 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_2 = 46,924^\circ$ , Pada *joint* 3 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_3 = 0^\circ$ . Pada *joint* 4 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_4 = 49,148^\circ$ . Pada *joint* 5 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_5 = -153,95^\circ$ . Pada *joint* 6 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_6 = -153,95^\circ$ . Pada *joint* 7 bergerak dari sumbu x ke y dengan dengan sudut target  $\theta_7 = -105,85^\circ$ . Gambar 4a menunjukkan *singularity elbow* sebagai kondisi awal dari manipulator. Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (3) tanpa memperhitungkan offset menunjukkan hasil sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,0895 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,9952 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

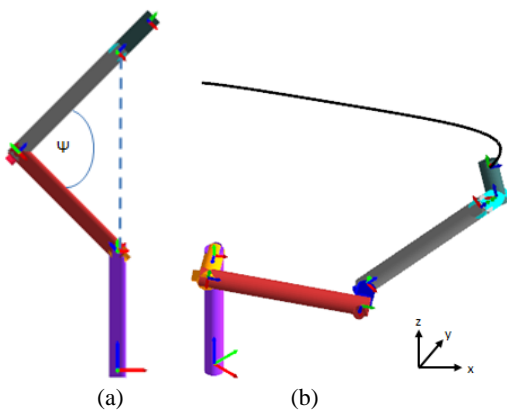
Pada Gambar 4b perubahan dari manipulator yang *joint* 1 dengan target  $\theta_1 = -144,26^\circ$ , *joint* 2 dengan target  $\theta_2 = 46,924^\circ$ , *joint* 3 dengan target  $\theta_3 = 0^\circ$ , *joint* 4 dengan target  $\theta_4 = 49,148^\circ$ , *joint* 5 dengan target  $\theta_5 = -$

153,95°, *joint* 6 dengan target  $\theta_6 = 112,46^\circ$ , dan *joint* 7 dengan target  $\theta_7 = 105,85^\circ$  berhasil tercapai tanpa terjadi eror. Dari hasil analisis menggunakan *software* menunjukkan hasil matrik sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,5220 & -0,4518 & 0,7233 & 0,446 \\ 0,7690 & 0,1174 & 0,6283 & 0,3953 \\ -0,3688 & 0,8843 & 0,2861 & 0,7018 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrik diatas merupakan hubungan antara *base frame* dengan *end effector*. Matrik dari posisi *elbow* dengan *initial value* 45°. Pada Gambar 4 a menjadi Gambar 4 b yang menunjukan marik perubahan nilai posisi dari *Link* 7 dengan *base frame*. Nilai diatas menunjukkan vektor dari *variabel joint*. Sehingga menghasilkan garis kerja dari *end effector*. Ke presisian dalam manipulator juga kan dipengaruhi oleh invers kinematik. Perubahan posisi pada x dengan nilai awal 0,0895 mengalsi rotasi sehingga menjadi 0,446 dan mengalami translasi pada sumbu z pada kondisi awal 0,9952 menajdi 0,7018.

Pada kondisi *singularity shoulder* dengan *initial value* sudut arm adalah  $\Psi=90^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 1 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_1 = 35,74^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 2 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_2 = -96,072^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 3 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_3 = 0^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 4 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_4 = 49,148^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 5 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_5 = 157,08^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 1 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_6 = -67,284^\circ$ . Sudut target untuk *joint* ke 1 bergerak dari sumbu x ke y,  $\theta_7 = -75,349^\circ$ .



Gambar 5. Gambar (a) posisi awal manipulator atau lengan robot, (b) posisi dan *workspace* manipulator dengan sudut orientasi

Pada Gambar 5 (a) perubahan dari manipulator yang *joint* dengan kondisi awal atau *initial value* dari manipulator membentuk *singularity elbow* dengan sudut  $\Psi=90^\circ$ . Dari hasil analisis untuk kondisi tersebut menghasilkan matrik sebgai berikut dengan perubahan posisi karena rotasi sumbu x 0,0895.

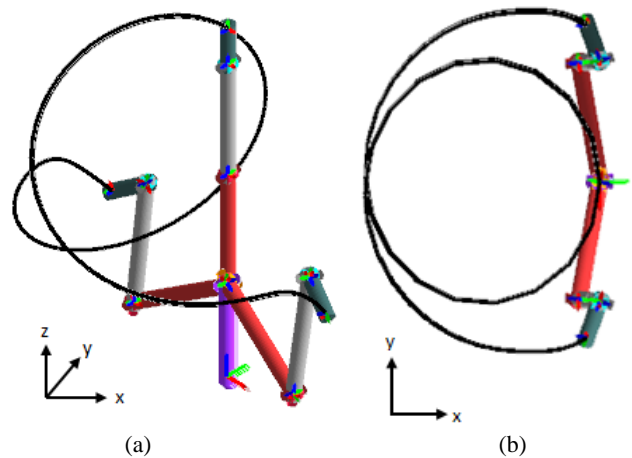
$$T_7^0 = \begin{bmatrix} 0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,0895 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -0,7071 & 0,7071 & 0 & 0,9952 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pada Gambar 5 (b) perubahan dari manipulator yang dengan nilai target untuk setiap *joint* yang sudah ditentukan menghasilkan matrik sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,4180 & -0,4541 & 0 & 0,5025 \\ -0,5352 & 0,8228 & 0,1906 & 0,5071 \\ -0,7339 & -0,3414 & -0,5870 & 0,5276 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrik diatas merupakan hubungan antara *base frame* dengan *end effector*. Matrik dari posisi *shoulder* pada. Dari hasil simulasi dan analisis menunjukkan target sudut yang di tentukan dengan hasil simulasi menunjukkan tidak adanya eror yang artinya tidak ada simpangan.

Merujuk pada Tabel 2 yang merupakan parameter manipulator 7 DOF KUKA LBR iiwa 7 R800. Dengan menggunakan paramter pada Tabel 2 selanjutnya dilakukan simulasi untuk mendapatkan *workspace* yang ditunjukan pada Gambar 6. Gambar 6 a menunjukan secara isometri ruang kerja dari manipulator 7 DOF dengan posisi awal membentuk *singularity wrist* dengan sudut awal lengan membentuk 0°

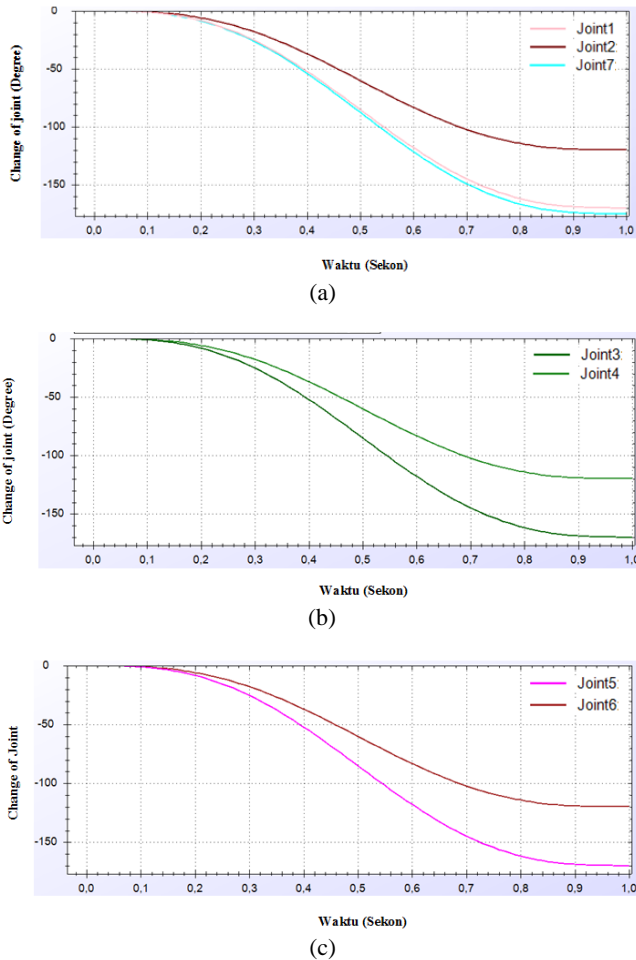


Gambar 6. (a) *workspace* manipulator 7 DOF secara isometri, (b) *workspace* dilihat dari pandangan atas.

Dari hasil simulasi pada Gambar 6 menunjukan *singularity* pada manipulator 7 DOF KUKA LBR iiwa 7 R800, menunjukan 3 *singularity* yang umumnya ada yaitu *wrist*, *elbow*, dan *shoulder*. Matrik transformasi dari 7 DOF pada saat kondisi *singularity wrist* menjadi:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sebelumnya kondisi awal dari manipulator adalah *singularity wrist*. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan *step time* 1 sekon. Hasil dari simulasi dengan sudut target yang ditunjukkan pada Tabel 2 dengan sudut yang negatif ditunjukkan pada Gambar 7 membentuk *singularity elbow*. Hasil simulasi menunjukkan perubahan sudut dari *joint* terlihat mulus tanpa gangguan.



Gambar 7. (a) perubahan sudut pada joint 1,2,7, (b) Perubahan sudut pada joint 3, dan 4, (c) Perubahan sudut pada joint 5 dan 6

Pada Gambar 7 menunjukkan perubahan sudut disetiap *joint*. Dengan sudut akhir / *final joint value* pada *joint* 1 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_1 = -170^\circ$ , *joint* 2 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_2 = -120^\circ$ , *joint* 3 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_3 = 170^\circ$ , *joint* 3 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_4 = -120^\circ$ , *joint* 5 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_5 = -170^\circ$ , *joint* 6 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_6 = -120^\circ$ , *joint* 7 dengan rotasi dari sumbu x dan y  $\theta_7 = -175^\circ$ , dengan posisi akhir sumbu pada *end effector* (-0,453,-0,038,1,26), sehingga didapatkan matrix transformasi  $T_7^0$

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,520 & -0,826 & 0,212 & -0,453 \\ 0,083 & -0,297 & -0,951 & -0,038 \\ 0,849 & -0,477 & 0,224 & 0,475 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pada Gambar 7(a) sampai 7(c) perubahan sudut yang di targetkan terlihat mulus tidak terjadi gangguan dan menunjukkan hasil tanpa eror. Perubahan posisi akibat rotasi pada sumbu x adalah -0,453, dan sumbu y adalah -0,038. Dan mengalami translasi pada sumbu z sebesar 0,475.

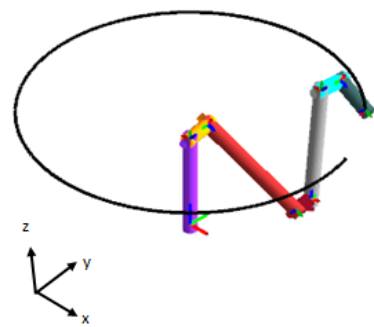
Pada kondisi intial kondisi dari dari *joint* 1 memiliki nilai  $\theta_1 = 170^\circ$ , *joint* ke 2  $\theta_2 = 120^\circ$ , *joint* ke 3  $\theta_3 = 170^\circ$ , *joint* ke 4  $\theta_4 = 120^\circ$ , *joint* 5  $\theta_5 = 170^\circ$ , *joint* ke 6  $\theta_6 = 120^\circ$ , dan *joint* ke 7  $\theta_7 = 175^\circ$ . Mengalami rotasi dari sumbu x ke y sebesar  $340^\circ$  yang ditunjukkan pada Gambar 8. Posisi tersebut *workspace* dari manipulator KUKA LBR iiwa 7 sebelum kembali dalam posisi *singularity wrist*. Nilai matrik transformasi yang dihasilkan sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,520 & -0,826 & 0,212 & 0,505 \\ 0,083 & -0,297 & -0,951 & 0,254 \\ 0,849 & -0,477 & 0,224 & 0,445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pada matriks di atas matriks transformasi untuk kondisi awal atau *intial value* sebelum kembali ke posisi *default* yaitu kondisi *singularity wrist*. Kondisi *singularity shoulder* . setelah mengalami rotasi dari sumbu x ke sumbu y maka matrik rotasi yang di hasilkan sebagai berikut:

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -0,460 & -0,826 & 0,125 & 0,387 \\ -0,256 & 0,0034 & -0,966 & 0,411 \\ -0,849 & -0,477 & 0,224 & 0,445 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Perubahan nilai posisi dari sumbu x saat kondisi awal 0,505 menjadi 0,387 dan untuk sumbu y kondisi awal 0,254 menjadi 0,411. Untuk sumbu z tidak mengalami perubahan posisi karena tidak terjadi gerakan translasi.



Gambar 8. *Singularity Shoulder* dan *workspace* pada KUKA LBR iiwa 7

#### 4. Kesimpulan

Manipulator 7 DOF memiliki karakteristik tersendiri dalam halnya *motion* yang memiliki *singularity wrist*, *elbow*, dan *shoulder*. Hasil dari simulasi pada *singularity wrist* tidak mengalami eror (0%), saat kondisi *singularity elbow* tidak mengalami eror (0%) dan *singularity shoulder* tidak mengalami eror (0%). Pada manipulator 7 DOF KUKA LBR iiwa 7 memiliki karakteristik *singularity wrist*,

*elbow* dan *shoulder*. Error untuk ketiga *singularity* 0% . trajektori untuk masing–masing *singularity* dapat dihasilkan. Selanjutnya dapat digunakan untuk implementasi maupun pengembangan dari algoritma untuk invers kinematikanya.

#### Daftar Pustaka

- [1] Y. H. Chang, Y. C. Liu, and C. C. Lan, “An End-Effector Wrist Module for the Kinematically Redundant Manipulation of Arm-Type Robots,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 6075–6080, 2020, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9197258.
- [2] K. M. El Dine, J. A. Corrales-Ramon, Y. Mezouar, and J. C. Fauroux, “A Unified Mobile Manipulator Control for On-line Tip-over Avoidance Based on ZMP Disturbance Observer,” *2018 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2018*, no. September, pp. 1437–1443, 2018, doi: 10.1109/ROBIO.2018.8665042.
- [3] A. Imran and B. J. Yi, “Performance Analysis of 7-DOF Robotic Arm for Drilling and Milling Applications,” *2018 15th Int. Conf. Ubiquitous Robot. UR 2018*, pp. 157–161, 2018, doi: 10.1109/URAI.2018.8441826.
- [4] S. Li, Z. Wang, Q. Zhang, and F. Han, “Solving Inverse Kinematics Model for 7-DoF Robot Arms Based on Space Vector,” *2018 Int. Conf. Control Robot. ICCR 2018*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICCR.2018.8534498.
- [5] H. S. Lim, S. W. Hwang, K. S. Shin, and C. S. Han, *Design optimization of the robot manipulator based on global performance indices using the grey-based taguchi method*, vol. 43, no. 18. IFAC, 2010.
- [6] X. Tian, Q. Xu, and Q. Zhan, “An analytical inverse kinematics solution with joint limits avoidance of 7-DOF anthropomorphic manipulators without offset,” *J. Franklin Inst.*, vol. 358, no. 2, pp. 1252–1272, 2021, doi: 10.1016/j.jfranklin.2020.11.020.
- [7] T. Xu *et al.*, “Dynamic Identification of the KUKA LBR iiwa Robot with Retrieval of Physical Parameters Using Global Optimization,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108018–108031, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3000997.
- [8] P. P. Kumar and L. Behera, “Visual servoing of redundant manipulator with Jacobian matrix estimation using self-organizing map,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 58, no. 8, pp. 978–990, 2010, doi: 10.1016/j.robot.2010.04.001.
- [9] R. Karakuş and E. Tanik, “Novel compliant wiper mechanism,” *Mech. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 327–336, 2018, doi: 10.5194/ms-9-327-2018.
- [10] P. P. Rebouças Filho, S. P. Suane, V. N. Praxedes, J. Hemanth, and V. H. C. de Albuquerque, “Control of singularity trajectory tracking for robotic manipulator by genetic algorithms,” *J. Comput. Sci.*, vol. 30, pp. 55–64, 2019, doi: 10.1016/j.jocs.2018.11.006.
- [11] W. Xiang and S. Yan, “Dynamic analysis of space robot manipulator considering clearance joint and parameter uncertainty: Modeling, analysis and quantification,” *Acta Astronaut.*, vol. 169, pp. 158–169, 2020, doi: 10.1016/j.actaastro.2020.01.011.
- [12] Y. Tong, J. Liu, Y. Liu, and Y. Yuan, “Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 155, p. 104006, 2021, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [13] F. Vigoriti, F. Ruggiero, V. Lippiello, and L. Villani, “Control of redundant robot arms with null-space compliance and singularity-free orientation representation,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 100, pp. 186–193, 2018, doi: 10.1016/j.robot.2017.11.007.
- [14] M. LiBretto, Y. Qiu, E. Kim, K. Pluckter, N. S. Yuk, and J. Ueda, “Singularity-free solutions for inverse kinematics of degenerate mobile robots,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 153, 2020, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103988.
- [15] R. Jha, D. Chablat, L. Baron, F. Rouillier, and G. Moroz, “Workspace, joint space and singularities of a family of delta-like robot,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 127, pp. 73–95, 2018, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.05.004.
- [16] S. E. E. Profile, “Design and Analysis of Multi-Layer Artificial Neural Network Used for Training in Inverse Kinematic Solution of 7-DOF Serial Robot 7-DOF Seri Robotun Ters Kinematik Çözümünde Eğitim Amaçlı Kullanılan Çok Katmanlı Yapay Sinir Ağının Tasarlanması ve Sonuç,” no. December, 2019.
- [17] M. Gong, X. Li, and L. Zhang, “Analytical Inverse Kinematics and Self-Motion Application for 7-DOF Redundant Manipulator,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 18662–18674, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895741.