

Analisis Kinematika Sebuah Desain Manipulator 4-Sumbu dengan Gripper 2-Sumbu

Kinematic Analysis of A 4-Axis Manipulator Design with 2-Axis Gripper

Asmara Yanto ^{1,*}, Rozi Saferi ¹, Anrinal ¹, Fikri Azhar ²

¹ Department of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang

² Undergraduated Program of Mechanical Engineering, Institut Teknologi Padang
Jl. Gajah Mada Kandis Nanggalo, Padang, Indonesia

[doi.10.21063/JTM.2019.v9i1.5-13](https://doi.org/10.21063/JTM.2019.v9i1.5-13)

*Correspondence should be addressed to aasmarayanto@itp.ac.id

Copyright © 2019 A. Yanto. This is an open access article distributed under the [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Article Information

Submitted :
January 15, 2019

Accepted :
April 11, 2019

Published :
April 30, 2019

Abstract

The purpose of this work is to analyze the kinematic of a manipulator that was designed to has four revolute movements (R_1 , R_2 , R_3 and R_4) and is equipped with a gripper that has one revolute movement (R) and one prismatic movement (P). The analysis was conducted by varying R_1 , R_2 , R_3 and R_4 of manipulator and R and P of gripper. Kinematic analysis was carried out using the Forward Kinematics method based on DH-Parameters of manipulator and gripper. Manipulator was designed to be consist of 120 mm of Link-1, 200 mm of Link-2, 250 mm of Link-3 and 250 mm of Link-4. Revolute movements range of manipulator was designed for $-360^\circ \leq R_1 \leq +360^\circ$, $-15^\circ \leq R_2 \leq +60^\circ$, $-30^\circ \leq R_3 \leq +45^\circ$ and $-60^\circ \leq R_4 \leq +15^\circ$, and with movements range of gripper are $-360^\circ \leq R \leq +360^\circ$ and $-35 \text{ mm} \leq P \leq +35 \text{ mm}$. From this work can be concluded that manipulator has 228.5 mm of minimum range radius of end-effector and 547.0 mm of maximum range radius of end-effector.

Keywords: manipulator, gripper, kinematic, DH-Parameters, end-effector.

1. Pendahuluan

Robot pada awal mulanya berasal dari kata dalam bahasa Czech, yakni robota, yang mempunyai arti pekerja. Istilah ini mulai menjadi populer ketika seorang penulis berbangsa Czech (Ceko), Karl Capek, membuat pertunjukan dari lakon komedi yang ditulisnya pada tahun 1921 yang berjudul RUR (Rossum's Universal Robot) [1-2]. Definisi awal dari robot dikatakan sebagai segala peralatan otomatis yang dibuat untuk menggantikan fungsi yang selama ini dilakukan oleh manusia. Namun dalam perkembangan selanjutnya, robot diartikan sebagai manipulator multi fungsional yang dapat diprogram, yang dengan pemrograman itu ditujukan untuk melakukan sesuatu tugas tertentu [2].

Perkembangan teknologi robotika telah membuat kualitas kehidupan manusia semakin

tinggi. Saat ini perkembangan teknologi robotika telah mampu meningkatkan kualitas maupun kuantitas produksi berbagai pabrik. Teknologi robotika juga telah menjangkau sisi hiburan dan pendidikan bagi manusia [2].

Keunggulan dalam teknologi robotika tak dapat dipungkiri telah lama dijadikan ikon kebanggaan negara-negara maju di dunia. Kecanggihan teknologi yang dimiliki, gedung-gedung tinggi yang mencakar langit, tingkat kesejahteraan rakyatnya yang tinggi, kotanya yang modern, belumlah terasa lengkap tanpa popularitas kepiawaian dalam dunia robotik [2-3].

Robotika memiliki unsur yang sedikit berbeda dengan ilmu-ilmu dasar atau terapan yang lain dalam perkembangannya. Ilmu dasar biasanya berkembang dari suatu asa atau hipotesis yang kemudian diteliti secara metodis.

Ilmu terapan dikembangkan setelah ilmu-ilmu yang mendasarinya berkembang dengan baik. Sedangkan ilmu robotika lebih sering berkembang melalui pendekatan secara praktis pada awalnya. Kemudian melalui suatu pendekatan atau perumpamaan dari hasil pengamatan perilaku makhluk hidup atau benda/mesin/peralatan bergerak lainnya, kemudian dikembangkanlah penelitian secara teoritis. Dari teoritis kembali kepada praktis, sehingga robot berkembang menjadi lebih canggih [4].

Robot lengan atau yang lebih dikenal dengan *manipulator* adalah salah satu jenis robot yang paling banyak digunakan oleh masyarakat industri [5-6]. Sering juga dikatakan sebaliknya, sebuah *manipulator* industri umumnya sering disebut sebagai lengan robot, dengan *link* dan *joint*. *Manipulator* yang meniru karakteristik lengan manusia disebut juga dengan lengan diartikulasikan. Semua *joint*nya bersifat *rotary* (atau *revolute*) [7-9]. Walaupun demikian, gerakan diartikulasikan pada lengan robot berbeda dari gerakan lengan manusia. Sementara *joint* robot memiliki derajat lebih sedikit derajat kebebasan atau *degree of freedom (DOF)*. *Manipulator* dapat bergerak bebas walaupun dari suatu sudut tertentu dengan kebebasan yang lebih dibanding manusia. Misalnya, siku dari robot diartikulasikan dapat menekuk ke atas atau ke bawah, sedangkan seseorang hanya bisa menekuk siku mereka dalam satu arah, selebihnya hanya pada posisi lengan lurus [10].

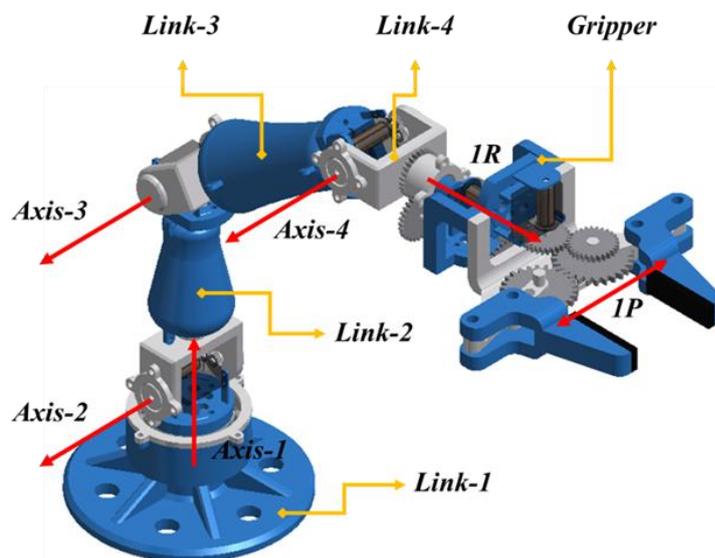
Penelitian-penelitian tentang *manipulator* telah banyak dilakukan oleh para peneliti [11-14]. Namun, tidak tergambar jelas secara detail analisis kinematika *manipulator* yang dapat menjadi acuan dalam pengembangan

manipulator oleh para pemula. Oleh karena itu, pada makalah ini dipaparkan analisis kinematika sebuah desain *Manipulator 4-Sumbu* yang dilengkapi dengan *Gripper 2-Sumbu*. Makalah ini diharapkan dapat menjadi salah satu referensi bagi user dalam menganalisis kinematika sebuah *manipulator* yang lebih kompleks lagi.

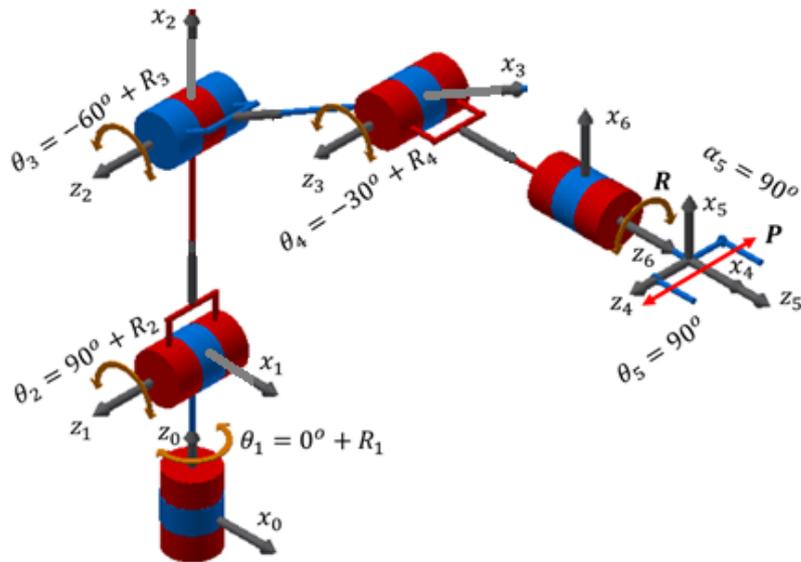
2. Metode

Pada makalah ini, desain *manipulator* dibuat dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Autodesk Inventor. *Manipulator* yang didesain terdiri atas empat buah *link* (*Link-1*, *Link-2*, *Link-3* dan *Link-4*). Setiap *link* dapat diputar dengan pusat perputaran pada sumbunya (*axis*-nya). Keempat *link* dari *manipulator* ini hanya didesain untuk berputar secara *revolute*. Pada *end-effector* dari *manipulator* dipasangkan sebuah *gripper* yang memiliki satu gerakan *revolute* dan satu gerakan *prismatic* sebagaimana yang ditunjukkan oleh **Gambar 1**.

Dari desain *manipulator* dan *gripper* ini kemudian diilustrasikan *DH-Parameters*nya sebagaimana yang diperlihatkan oleh **Gambar 2**. Harga-harga setiap *DH-Parameters* dari *manipulator* dan *gripper* ini dapat dilihat pada **Tabel 1**.



Gambar 1. Desain *Manipulator 4-Sumbu* dengan *Gripper 2-Sumbu*



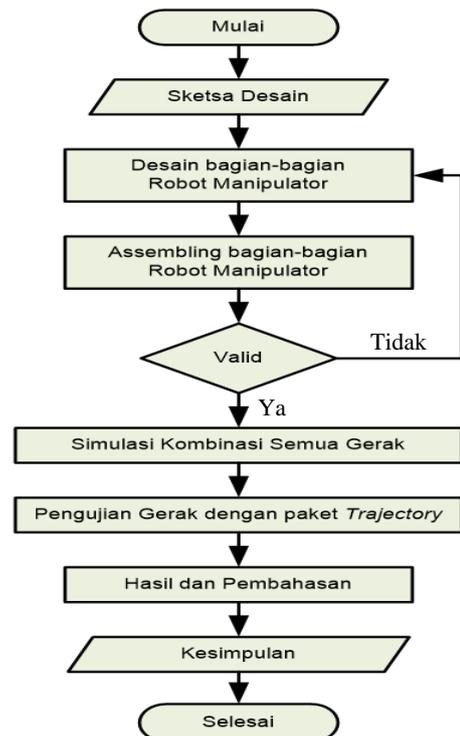
Gambar 2. DH-Parameters dari Manipulator 4-Sumbu dengan Gripper 2-Sumbu

Tabel 1. Harga DH-Parameters dari Manipulator 4-Sumbu dengan Gripper 2-Sumbu

| n | θ_n | α_n | d_n (mm) | a_n (mm) | Keterangan |
|----------------------------|-------------------|------------|------------|----------------|---|
| <i>Manipulator 4-Sumbu</i> | | | | | |
| 1 | $0^\circ + R_1$ | 90° | 120 | 0 | $-360^\circ \leq R_1 \leq +360^\circ$ |
| 2 | $90^\circ + R_2$ | 0° | 0 | 200 | $-15^\circ \leq R_2 \leq +60^\circ$ |
| 3 | $-60^\circ + R_3$ | 0° | 0 | 250 | $-30^\circ \leq R_3 \leq +45^\circ$ |
| 4 | $-30^\circ + R_4$ | 0° | 0 | 250 | $-60^\circ \leq R_4 \leq +15^\circ$ |
| <i>Gripper 2-Sumbu</i> | | | | | |
| 5 | 90° | 90° | 0 | 0 | Ganti orientasi |
| 6 | R | 0° | 0 | 0 | $-360^\circ \leq R \leq +360^\circ$ |
| 7 | 90° | 0° | 0 | 40 | Lengan Gripper kanan |
| 8 | 0° | 0° | 0 | $a_8 = -5 + P$ | $-35 \text{ mm} \leq P \leq +35 \text{ mm}$ |
| 9 | 0° | 0° | 70 | 0 | Gripper kanan |
| 10 | -90° | 0° | 0 | 40 | Lengan Gripper kiri |
| 11 | 0° | 0° | 0 | $a_{11} = a_8$ | |
| 12 | 0° | 0° | 70 | 0 | Gripper kiri |

A. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini berbasis penelitian robotika yang dimulai dengan membuat desain awal berupa sketsa sebuah manipulator. Pada tahapan ini, terlebih dahulu didefinisikan link-link dan joint-joint dari manipulator. Kemudian dilakukan pembuatan bagian-bagian manipulator. Semua bagian-bagian manipulator selanjutnya dirakit atau di-assembling. Jika semua bagian-bagian manipulator telah ter-assembling sempurna, maka tahapan desain selesai dan dapat diteruskan ke tahapan analisis kinematika. Pada tahapan analisis kinematika, semua kemungkinan gerakan manipulaotr disimulasikan agar diperoleh daerah kerja (workspace) dari manipulator. Tahapan berikutnya adalah menguji gerak manipulator dengan satu paket trajectory. Dari paket trajectory ini diperoleh koordinat end-effector melalui analisis kinematika serta waktu gerak yang diperlukan. Diagram alir analisis kinematika ini secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir analisis kinematika Manipulator 4-Sumbu dengan Gripper 2-Sumbu

B. Prosedur Analisis

Analisis dilakukan berdasarkan pengujian semua kemungkinan gerak *manipulator* untuk setiap jangkauan putaran *link*. Pada *Manipulator 4-Sumbu* ini, terdapat putaran *link-link* yang besarnya bergantung kepada kondisi awal perakitan *manipulator* ditambah dengan putaran motor penggerak (R_1 , R_2 , R_3 and R_4) dengan harga DH-Parameters seperti pada **Tabel 1**.

Matriks transformasi setiap *link*, A_n , berdasarkan DH-Parameters-nya dapat ditentukan dengan

$$A_n = \begin{bmatrix} c_{\theta_n} & -s_{\theta_n}c_{\alpha_n} & s_{\theta_n}s_{\alpha_n} & a_n c_{\theta_n} \\ s_{\theta_n} & c_{\theta_n}c_{\alpha_n} & -c_{\theta_n}s_{\alpha_n} & a_n s_{\theta_n} \\ 0 & s_{\alpha_n} & c_{\alpha_n} & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Di mana c_{θ_n} adalah $\cos(\theta_n)$, s_{θ_n} adalah $\sin(\theta_n)$, c_{α_n} adalah $\cos(\alpha_n)$ dan s_{α_n} adalah $\sin(\alpha_n)$. Persamaan (2), Persamaan (3), Persamaan (4) dan Persamaan (5) berikut adalah matriks transformasi untuk *Link-1*, *Link-2*, *Link-3* dan *Link-4* secara berturut-turut.

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & -c_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_4 c_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & a_4 s_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Di mana c_1 adalah $\cos(\theta_1)$, s_1 adalah $\sin(\theta_1)$, c_2 adalah $\cos(\theta_2)$, s_2 adalah $\sin(\theta_2)$, c_3 adalah $\cos(\theta_3)$, s_3 adalah $\sin(\theta_3)$, c_4 adalah $\cos(\theta_4)$ dan s_4 adalah $\sin(\theta_4)$.

Matriks kinematika dengan metode *Forward Kinematics* untuk *end-effector* dari *manipulator* diperoleh dengan

$${}^0T = A_1 A_2 A_3 A_4 = \begin{bmatrix} & & & \\ & {}^0R & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} {}^0P \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Bagian matriks 0R sebagai harga transformasi dapat ditulis sebagai

$${}^0R = \begin{bmatrix} {}^0R_{11} & {}^0R_{12} & {}^0R_{13} \\ {}^0R_{21} & {}^0R_{22} & {}^0R_{23} \\ {}^0R_{31} & {}^0R_{32} & {}^0R_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

dengan sertiap komponen matriks dari 0R adalah

$${}^0R_{11} = c_4(c_{123} - c_1s_{23}) - s_4(c_{12}s_3 + c_{13}s_2) \quad (8)$$

$${}^0R_{12} = -c_4(c_{12}s_3 + c_{13}s_2) - s_4(c_{123} - c_1s_{23}) \quad (9)$$

$${}^0R_{13} = s_1 \quad (10)$$

$${}^0R_{21} = c_4(c_{23}s_1 - s_{123}) - s_4(c_2s_{13} + c_3s_{12}) \quad (11)$$

$${}^0R_{22} = -c_4(c_2s_{13} + c_3s_{12}) - s_4(c_{23}s_1 - s_{123}) \quad (12)$$

$${}^0R_{23} = -c_1 \quad (13)$$

$${}^0R_{31} = c_4(c_2s_3 + c_3s_2) + s_4(c_{23} - s_{23}) \quad (14)$$

$${}^0R_{32} = c_4(c_{23} - s_{23}) - s_4(c_2s_3 + c_3s_2) \quad (15)$$

$${}^0R_{33} = 0 \quad (16)$$

Sedangkan bagian matriks 0P sebagai harga posisi atau koordinat dari *end-effector* dari *manipulator* dapat dinyatakan sebagai berikut

$${}^0P = \begin{Bmatrix} {}^0P_X \\ {}^0P_Y \\ {}^0P_Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^0X \\ {}^0Y \\ {}^0Z \end{Bmatrix} \quad (17)$$

dengan

$${}^0X = a_2c_{12} + a_4c_4(c_{123} - c_1s_{23}) - a_4s_4(c_{123} + c_{13}s_2) - a_3c_1s_{23} + a_3c_{123} \quad (18)$$

$${}^0Y = a_2c_2s_1 + a_4c_4(c_{23}s_1 - s_{123}) - a_4s_4(c_2s_{13} + c_3s_{12}) - a_3s_{123} + a_3c_{23}s_1 \quad (19)$$

$${}^0Z = d_1 + a_2s_2 + a_3c_2s_3 + a_3c_3s_2 + a_4c_4(c_2s_3 + c_3s_2) + a_4s_4(c_{23} - s_{23}) \quad (20)$$

Di mana:

$$c_{12} = \cos(\theta_1) \cos(\theta_2), \quad (21)$$

$$c_{13} = \cos(\theta_1) \cos(\theta_3), \quad (22)$$

$$c_{23} = \cos(\theta_2) \cos(\theta_3), \quad (23)$$

$$c_{123} = \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3), \quad (24)$$

$$s_{12} = \sin(\theta_1) \sin(\theta_2), \quad (25)$$

$$s_{13} = \sin(\theta_1) \sin(\theta_3), \quad (26)$$

$$s_{23} = \sin(\theta_2) \sin(\theta_3), \text{ dan} \quad (27)$$

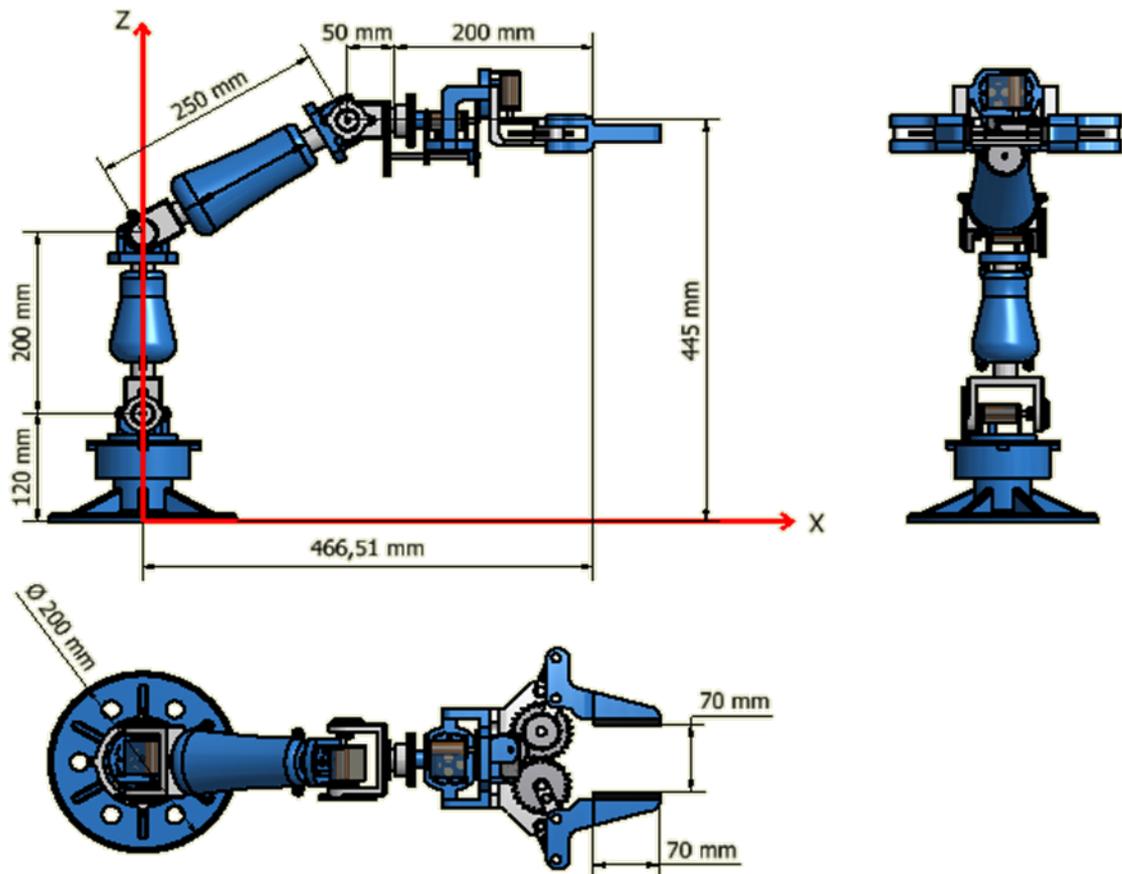
$$s_{123} = \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3). \quad (28)$$

Analisis kinematika *manipulator* dilakukan terhadap sebuah paket *trajectory* dengan putaran *link* berturut-turut yaitu $R_4 = -50^\circ$ (gerakan

Link-4), $P = -5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper*), $R_2 = +50^\circ$ (gerakan *Link-2*), $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1*), $R = 360^\circ$ (gerakan *gripper*), $R_2 = -50^\circ$ (gerakan *Link-2*), $P = +5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper*), $R_4 = +50^\circ$ (gerakan *Link-4*) dan $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1*).

3. Hasil dan Pembahasan

Desain *manipulator* menghasilkan model *manipulator* 3-Dimensi dari perakitan komponen-komponen yang telah sempurna hubungannya untuk setiap bagian yang ada. Pada *end-effector* dari *manipulator* ditempatkan sebuah *gripper*. Ukuran *link-link* yang ada sesuai dengan desain yaitu *Link-1* dengan panjang sebesar 120 mm, *Link-2* dengan panjang sebesar 200 mm, *Link-3* dengan panjang sebesar 250 mm dan *Link-4* dengan panjang sebesar 250 mm sebagaimana yang dapat dilihat pada gambar proyeksi *manipulator* 4R seperti yang diperlihatkan oleh **Gambar 4**.



Gambar 4. Proyeksi *Manipulator* 4-Sumbu dengan *Gripper* 2-Sumbu

Hasil *assembling* komponen-komponen memperlihatkan posisi awal atau kondisi awal *manipulator*. *Link-1* sebagai *base link* dari *manipulator* ini memanjang searah sumbu vertikal global (Z). *Link-2* sebagai *shoulder link* juga searah dengan *Link-1*. Berikutnya *Link-3*

sebagai *elbow link* dikondisikan pada posisi awal adalah miring sebesar 30° terhadap sumbu horizontal global (X). Selanjutnya *Link-4* sebagai *wrist link* dikondisikan pada posisi awal adalah sejajar dengan sumbu horizontal global (X). Pada *end-effector* dari *manipulator* yaitu

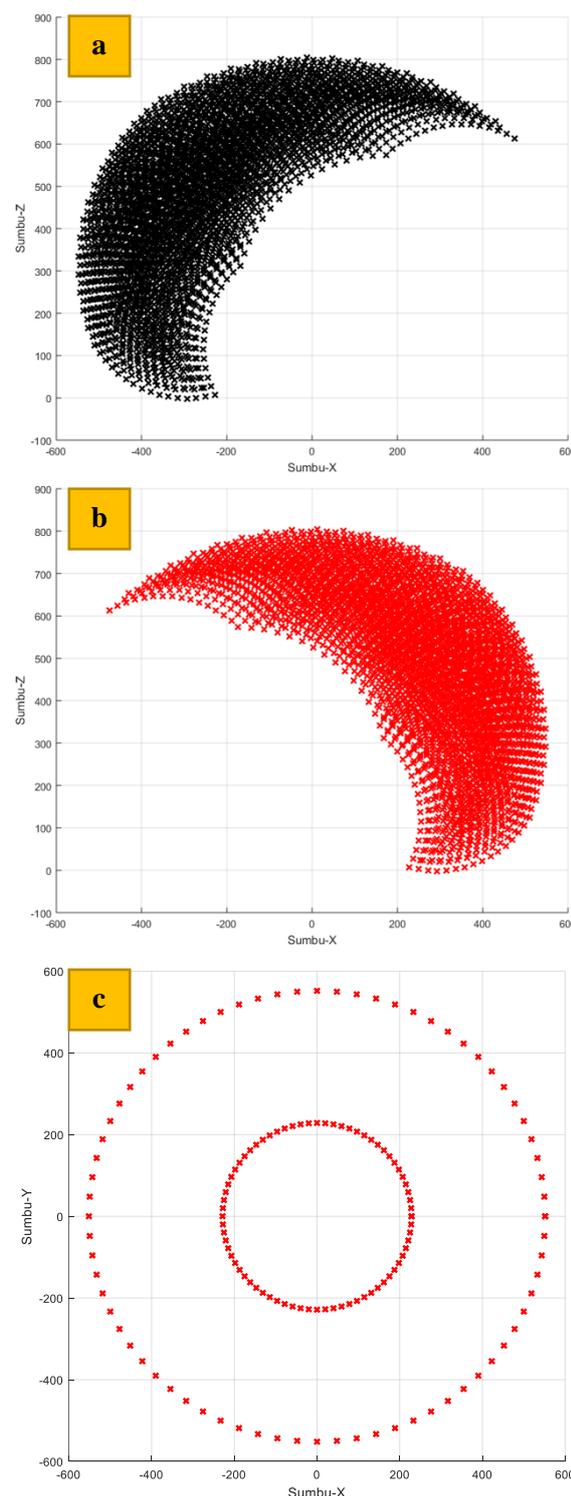
yang berada di ujung *Link-4*, ditempatkan sebuah *gripper* dengan daerah yang dapat menjepit benda sebesar 70 mm x 70 mm. Pada kondisi awal terpasang, *end-effector* dari *manipulator* berada sejauh 456.51 mm searah sumbu X dan sejauh 445 mm searah sumbu Z. Diameter pada *Link-1* sebagai *base link* memiliki diameter sebesar 200 mm. Semua desain baik desain komponen maupun desain *manipulator* secara keseluruhan dibuat dengan memanfaatkan perangkat lunak Autodesk Inventor. Pada desain *manipulator* ini, pemasangan bagian-bagian *manipulator* hingga terpasang sempurna merupakan faktor utama yang mempengaruhi kevalidan hasil-hasil analisis kinematikanya.

Analisis kinematika *manipulator* dilakukan untuk semua kemungkinan pergerakan *manipulator* dalam interval putaran setiap *link*. *Manipulator* dapat digerakan secara *revolute* dengan mengatur putaran *Link-1* hingga *Link-4* yang memiliki rentang putaran masing-masing sebesar $-360^\circ \leq R_1 \leq +360^\circ$, $-15^\circ \leq R_2 \leq +60^\circ$, $-30^\circ \leq R_3 \leq +45^\circ$ dan $-60^\circ \leq R_4 \leq +15^\circ$. Sedangkan *gripper* dapat digerakkan secara *revolute* sebesar $-360^\circ \leq R \leq +360^\circ$ dan juga secara *prismatic* sebesar $-35 \text{ mm} \leq P \leq +35 \text{ mm}$.

Dari kombinasi dari putaran *Link-1*, *Link-2*, *Link-3* dan *Link-4* (R_1 , R_2 , R_3 dan R_4) diperoleh 8192 *record* data posisi *end-effector* dari *manipulator*. Data-data ini dipresentasikan dengan grafik posisi *end-effector* sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 5**. Posisi *end-effector* untuk posisi awal *manipulator* menghadap ke arah sumbu X+ pada **Gambar 5** adalah pada bagian (a) dan posisi *end-effector* untuk posisi awal *manipulator* menghadap ke arah sumbu X- pada **Gambar 5** adalah pada bagian (b). Sedangkan bagian (c) pada **Gambar 5** adalah jangkauan *end-effector* dengan radius minimum dan maksimum. Untuk melihat sejauh mana daerah kerja (*workspace*) dari *end-effector* ini, maka dilakukan *mapping* terhadap hasil simulasi pada **Gambar 5**. Hasil *mapping* dapat dilihat pada **Gambar 6**.

Dari analisis yang telah dilakukan diperoleh jangkauan *end-effector* dengan radius minimum sebesar 228.5 mm dari sumbu *Link-1* (*base link*). Jangkauan minimum ini menjadi daerah kerja terdekat *manipulator* untuk melakukan kerja melalui *gripper* yang ditempatkan pada *end-effector*. Demikian juga halnya dengan jangkauan *end-effector* dengan radius maksimum sebesar 547 mm. Jangkauan maksimum ini menjadi daerah kerja terjauh

manipulator untuk melakukan kerja melalui *gripper* yang ditempatkan pada *end-effector*.

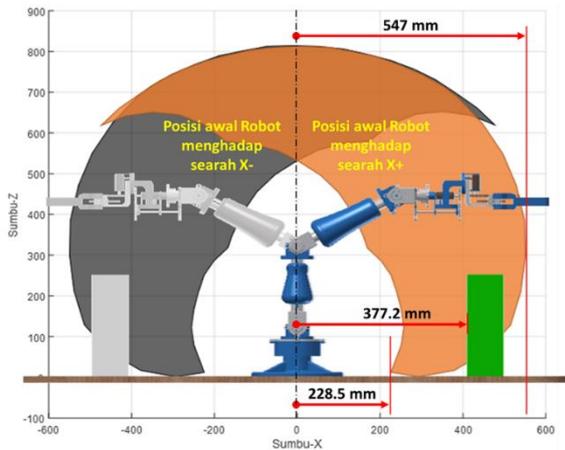


Gambar 5. Analisis *end-effector* dari *manipulator* sebanyak 8192 *record* data posisi

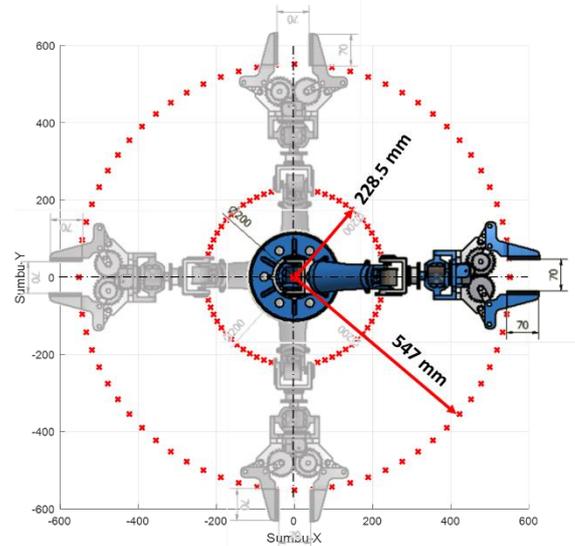
Pada **Gambar 7** diperlihatkan pula hasil *mapping* posisi *end-effector* pada bidang X-Y untuk lebih memperjelas radius jangkauan minimum dan jangkauan maksimum *end-effector* dari *manipulator*. Radius jangkauan minimum diperoleh apabila *manipulator* dengan putaran *link* secara berturut-turut dari *Loi*nt-1

hingga *Link-4* yaitu sebesar 0° , -15° , -30° dan -60° atau dengan sudut *axis* (θ) *DH-Parameters* dari *manipulator* secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu sebesar 0° , 75° , -90° dan -90° . Sedangkan jangkauan *end-effector* dengan radius maksimum dengan putaran *link* dari

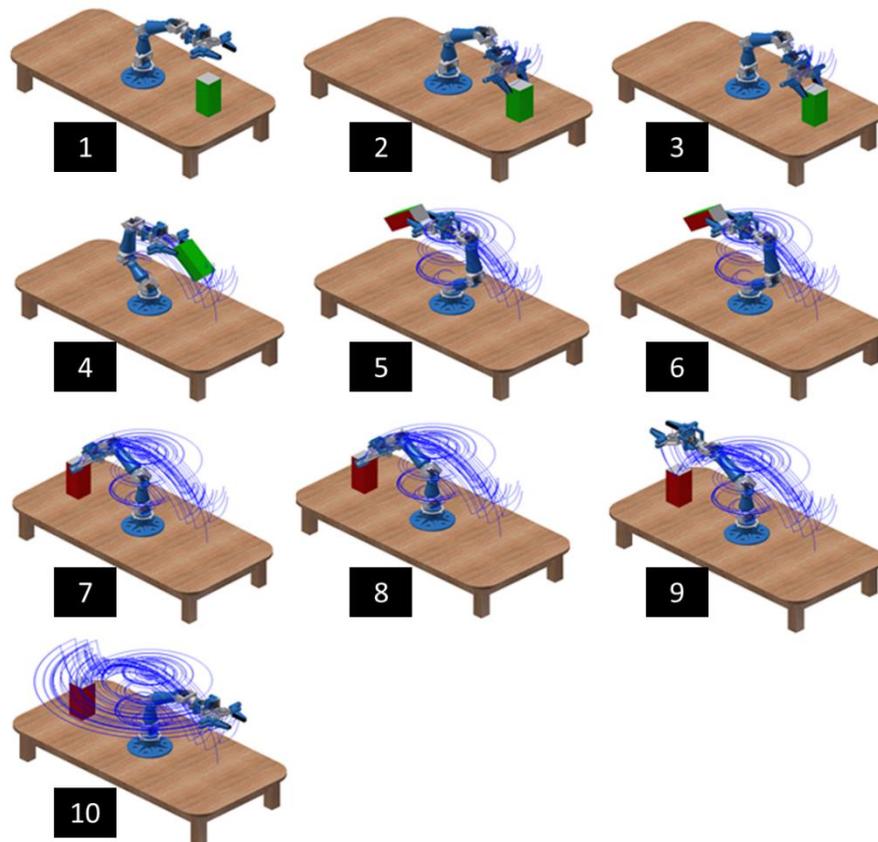
manipulator secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu sebesar 0° , -15° , -5° dan $+15^\circ$ atau dengan sudut *axis* (θ) *DH-Parameters* dari *manipulator* secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu sebesar 0° , 75° , -65° dan -15° .



Gambar 6. Mapping Posisi *end-effector* pada bidang X-Z



Gambar 7. Mapping Posisi *end-effector* pada bidang X-Y



Gambar 8. Paket *Trajectory* untuk analisis kinematika *manipulator* 4-Sumbu dengan *Gripper* 2-Sumbu

Dengan diperoleh harga radius jangkauan minimum dan maksimum *end-effector*, *trajectory* untuk analisis kinematika *manipulator* dapat dilakukan sebagai tahapan berikutnya dalam sebuah penelitian robotika.

Analisis kinematika *manipulator* berikutnya dilakukan dengan satu paket *trajectory* dengan menggunakan metode *Direct/Forward Kinematics*. Paket *trajectory* di sini adalah kumpulan *trajectory* dengan putaran *link-link*

dari *manipulator* secara berturut-turut dari posisi awal *manipulator* (bagian 1 **Gambar 8**) yaitu $R_4 = -50^\circ$ (gerakan *Link-4* seperti pada bagian 2 **Gambar 8**), $P = -5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper* pada bagian 3 **Gambar 8**), $R_2 = +50^\circ$ (gerakan *Link-2* pada bagian 4 **Gambar 8**), $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1* pada bagian 5 **Gambar 8**), $R = 360^\circ$ (gerakan *gripper* pada bagian 6 **Gambar 8**), $R_2 = -50^\circ$ (gerakan *Link-2* pada bagian 7

Gambar 8), $P = +5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper* pada bagian 8 **Gambar 8**), $R_4 = +50^\circ$ (gerakan *Link-4* pada bagian 9 **Gambar 8**) dan $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1* pada bagian 10 **Gambar 8**). Dari kesepuluh *trajectory* pada **Gambar 8** ini dapat dihitung waktu gerak *manipulator* melakukan kerja sebagaimana yang diperlihatkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil analisis kinematika *manipulator* dengan paket *trajectory*

| No | Trajectory | Gerakan R/P | Posisi <i>end-effector</i> | | | Waktu, t (s) |
|--------------------|--------------------------|---------------------|----------------------------|--------|--------------|--------------|
| | | | X (mm) | Y (mm) | Z (mm) | |
| 1 | Posisi awal | - | 466.5 | 0 | 445.0 | 0,00 |
| 2 | Menuju benda | $R_4 = -50^\circ$ | 377.2 | 0 | 253.5 | 0.83 |
| 3 | Menjepit benda | $P = -5 \text{ mm}$ | 377.2 | 0 | 253.5 | 1.00 |
| 4 | Mengangkat benda | $R_2 = +50^\circ$ | 140.2 | 0 | 494.8 | 0.83 |
| 5 | Memindahkan benda | $R_1 = +180^\circ$ | -140.2 | 0 | 494.8 | 3.00 |
| 6 | Memutar benda | $R = 360^\circ$ | -140.2 | 0 | 494.8 | 1.00 |
| 7 | Meletakkan benda | $R_2 = -50^\circ$ | -377.2 | 0 | 253.5 | 0.83 |
| 8 | Melepaskan jepitan | $P = +5 \text{ mm}$ | -377.2 | 0 | 253.5 | 1.00 |
| 9 | Mengangkat <i>Link-4</i> | $R_4 = +50^\circ$ | -466.5 | 0 | 445.0 | 0.83 |
| 10 | Kembali ke posisi awal | $R_1 = +180^\circ$ | 466.5 | 0 | 445.0 | 3.00 |
| Total waktu | | | | | 12.32 | |

Hasil analisis kinematika *manipulator* pada **Tabel 2** diperoleh dari analisis gerakan *manipulator* untuk kecepatan putaran rata-rata *Link* (R_1, R_2, R_3 dan R_4) sebesar $\omega_L = 60^\circ/s$, kecepatan *gripper* rata-rata menjepit atau melepaskan jepitan terhadap benda sebesar $v_G = 5 \text{ mm/s}$ dan kecepatan *gripper* rata-rata memutar benda sebesar $\omega_G = 360^\circ/s$.

4. Simpulan

Dari analisis kinematika *Manipulator* 4-Sumbu dengan *Gripper* 2-Sumbu ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Desain *manipulator* terdiri atas 4 buah *Link* dengan panjang secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu sebesar 120 mm, 200 mm, 250 mm dan 250 mm dengan *gripper* yang memiliki daerah kerja (*workspace*) sebesar 70 mm x 70 mm.
2. Sudut *axis* (θ) *DH-Parameters* dari *manipulator* pada kondisi awal secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu $0^\circ, 90^\circ, -60^\circ$ dan -30° .
3. Melalui analisis diperoleh jangkauan *end-effector* dengan radius minimum sebesar 228,5 mm dan radius maksimum sebesar 547 mm.
4. Jangkauan *end-effector* dengan radius minimum dengan putaran *joint* dari *manipulator* secara berturut-turut dari *Joint-1* hingga *Joint-4* yaitu $0^\circ, -15^\circ, -30^\circ$ dan -60° atau dengan sudut *axis* (θ) *DH-Parameters* dari *manipulator* secara

berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu $0^\circ, 75^\circ, -90^\circ$ dan -90° .

5. Jangkauan *end-effector* dengan radius maksimum dengan putaran *joint* dari *manipulator* secara berturut-turut dari *Joint-1* hingga *Joint-4* yaitu $0^\circ, -15^\circ, -5^\circ$ dan $+15^\circ$ atau dengan sudut *axis* (θ) *DH-Parameters* dari *manipulator* secara berturut-turut dari *Link-1* hingga *Link-4* yaitu $0^\circ, 75^\circ, -65^\circ$ dan -15° .
6. Dari analisis kinematika dengan paket *trajectory* di mana putaran *joint* berturut-turut yaitu $R_4 = -50^\circ$ (gerakan *Link-4*), $P = -5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper*), $R_2 = +50^\circ$ (gerakan *Link-2*), $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1*), $R = 360^\circ$ (gerakan *gripper*), $R_2 = -50^\circ$ (gerakan *Link-2*), $P = +5 \text{ mm}$ (gerakan *gripper*), $R_4 = +50^\circ$ (gerakan *Link-4*) dan $R_1 = +180^\circ$ (gerakan *Link-1*) diperoleh waktu total gerak *manipulator* sebesar 12.32 s untuk kecepatan putaran rata-rata *Link* (R_1, R_2, R_3 dan R_4) sebesar $60^\circ/s$, kecepatan *gripper* rata-rata menjepit atau melepaskan jepitan terhadap benda sebesar 5 mm/s dan kecepatan *gripper* rata-rata memutar benda sebesar $360^\circ/s$.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih penulis ucapkan kepada asisten-asisten Laboratorium Konstruksi Mesin-ITP atas segala bantuan dalam mendisain *manipulator* dengan *gripper*.

Referensi

- [1]. F. Afrianto (2011, Juni 18), “Sejarah dan Perkembangan Robot,” Retrieved April 02, 2017, from Teknologi Bidang Robotik: robot-q.blogspot.co.id
- [2]. E. M. Petriu, “Robotics Introduction, Manipulator Arms,” diakses pada <http://www.site.uottawa.ca/~petriu/CEG4392-IntroRobotics-Arms.pdf>
- [3]. Y. Hasan et. al. (2011), “Rancang Bangun Robot Manual Pengangkat Mikro Kontroler AT89S52,” 8(3), pp.52–74.
- [4]. Havitz et al. (2008), “Rancang Bangun Gerak Robot Pemindah Barang Berdasarkan Jalur Garis Hitam Dengan Basis Mikrokontroler AT89S52 E-31,” Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2008 Bidang Teknik Elektro E-32, pp.31–38.
- [5]. Jonathan (2013, Mei 28), “Sistem Program Robot Lengan Pemindah Dus Barang Pada Conveyor,” Retrieved April 02, 2017, from sintongjonathan-jonathan.blogspot.co.id
- [6]. Anonim (2012, April 05), “Kontrol Robot Arm dengan Arduino,” Retrieved Maret 06, 2017, from inkubator-teknologi.com
- [7]. E. Pitowarno (2006), “Robotika disain, kontrol dan kecerdasan buatan,” Yogyakarta: Andi Offset
- [8]. G. Purnawan (2013, Maret 03), “Conveyor,” Retrieved Maret 02, 2017, from Definisi roller conveyor: gustypurnawan.blogspot.co.id
- [9]. R. Prasetia and C.E. Widodo (2004), “Interfacing port paralel dan port serial komputer dengan visual basic 6.0,” Yogyakarta : Andi Offset.
- [10]. Wardana, G. Tri, D. E. Setiawan, A. Rahman, and N. Prasetia (1978), “Robot Lengan Pemindah Barang Berdasarkan Ukurannya Berbasis Mikrokontroler.” (x): 1–12.
- [11]. Z. Yuanshen, L. Gong, C. Liu and Y. Huang, “Dual-arm Robot Design and Testing for Harvesting Tomato in Greenhouse,” www.sciencedirect.com
- [12]. B. Zhang, B. Liang, X. Wang, G. Li, Z. Chen and X. Zhu (2016), “Manipulability Measure of Dual-Arm Space Robot and Its Application to Design an Optimal Configuration,” <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.07.040>.
- [13]. J. Kruger, G. Schreck b and D. Surdilovic, “Dual arm robot for flexible and cooperative assembly,” <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>
- [14]. L. Shi, S. Kayastha and J. Katupitiya, “Robust coordinated control of a dual-arm space robot,” www.elsevier.com/locate/actaastro