

Evaluasi Kesalahan Pemasangan Rantai Kinematik terhadap Gerak Translasi Titik Pusat Putar (*Uncompensatable Error*) Mekanisme Paralel 3-DOF Rotasi Murni 3-URU

Syafri^{1,*}, Syamsul Huda², Mulyadi Bur²

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Riau, Kampus Bina Widya Panam, Pekanbaru-28293

²Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang-25163

Email: prie_00m022@yahoo.com*

Abstrak

Pada penelitian ini dibahas tentang pengaruh kesalahan pemasangan rantai kinematik pada *base* dan *platform* untuk mekanisme paralel tiga derajat kebebasan rotasi murni. Penelitian dilakukan dengan cara mensimulasikan kesalahan pemasangan rantai kinematik dengan menggunakan Auto CAD Inventor 2013 yaitu dengan cara memutar *bracket* yang terdapat pada posisi *base* dan *platform* sebesar 1° , 2° , dan 3° . Pada setiap tahapan simulasi diukur pergeseran titik pusat putar (*uncompensatable error*) yang terjadi. Selanjutnya dilakukan perbandingan terhadap hasil yang diperoleh untuk melihat faktor mana yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pergeseran titik pusat putar pada mekanisme paralel. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa kesalahan pemasangan rantai kinematik sebesar 1° , 2° , dan 3° pada posisi *platform* menyebabkan terjadinya *uncompensatable error* sebesar 1 mm, 2,1 mm, dan 3,2 mm secara berturut-turut. Kesalahan pemasangan rantai kinematik pada *base* menyebabkan terjadinya *uncompensatable error* sebesar 1,5 mm, 3,1 mm dan 4,7 mm. Hal ini menunjukkan bahwa kesalahan pemasangan rantai kinematik pada posisi *base* memiliki kontribusi yang lebih besar terhadap terjadinya *uncompensatable error* mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU.

Kata kunci: Robot paralel 3-dof rotasi murni URU, *error analysis*, *uncompensatable error*

Abstract

In this research was studied the effect of angle errors of mounting of kinematic chains to base and platform on the 3-URU spherical parallel mechanism. Such kinematic errors caused translational motion of center of platform rotation called uncompensatable error. In this study, the errors were evaluated based on simulation result using the commercial programs, Auto CAD Inventor 2013. To clarify the effect of errors it was given the angle error of mounting kinematic chain to base and platform with magnitude 1° , 2° , and 3° . The magnitude uncompensatable error was measured by giving the magnitude of error separately to base and platform. Based the result, it was obtained for the 1° , 2° , and 3° error on the mounting kinematic chain to platform caused the uncompensatable error 1 mm, 2,1 mm, and 3,2 mm respectively. Using the same magnitude error for mounting angle of kinematic chains to base caused the uncompensatable error 1,5 mm, 3,1 mm and 4,7 mm. Based on the fact, that can be concluded that the mounting angle of kinematic chain to the base is more sensitive than to the platform.

Keywords: 3-dof parallel mechanism of URU pure rotation, *error analysis*, *uncompensatable error*

1. Pendahuluan

Mekanisme paralel adalah suatu konfigurasi dimana batang output (*platform*) dan batang diam (*base*) dihubungkan oleh beberapa rantai kinematik yang disusun secara paralel. Penelitian tentang mekanisme paralel telah dimulai semenjak ditemukannya *stewart platform* yang merupakan struktur dengan enam derajat kebebasan (6-dof) [1]. Pada *stewart platform* terjadi penggabungan *workingspace* posisi dan orientasi sehingga menyulitkan dalam pengontrolan. Dalam perkembangannya bentuk mekanisme 6-dof disederhanakan menjadi struktur dengan 2 hingga 5 derajat kebebasan atau yang lebih dikenal dengan mekanisme *lower dof*. Hal ini dikarenakan banyaknya aplikasi yang membutuhkan struktur dengan derajat kebebasan kurang dari enam. Salah satunya adalah alat pengontrol orientasi pahat dan benda kerja.

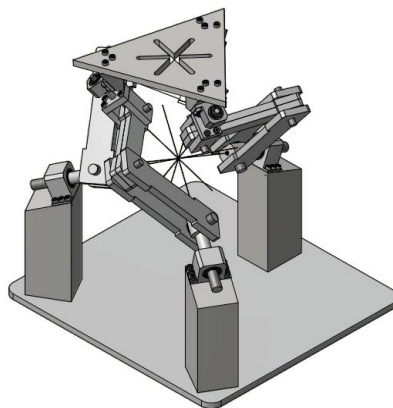
Dalam aplikasinya sebagai mesin perkakas mekanisme paralel dilaporkan memiliki kekakuan lima kali lebih besar, ketelitian tujuh kali lebih tinggi serta kecepatan empat kali lebih tinggi dibandingkan dengan mesin perkakas berkonfigurasi mekanisme seri [2] sehingga sangat cocok untuk pembuatan produk dengan ketelitian dan kepresisian yang tinggi. Untuk memperoleh mekanisme yang memiliki gerak output dengan tingkat ketelitian dan kepresisian yang tinggi, maka kesalahan yang berasal dari proses manufaktur (pemesinan dan perakitan) pada prototipe harus diminimalisir, hal ini karena kesalahan dimensi dan geometri akibat proses manufaktur dapat mengurangi tingkat ketelitian dan kepresisian gerak output pada mekanisme paralel. Salah satu bentuk kesalahan tersebut adalah kesalahan pemasangan rantai kinematik pada *base* dan *platform* robot.

Pada penelitian ini dievaluasi kesalahan pemasangan rantai kinematik terhadap ketelitian dan kepresisian gerak output mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan gerak output akibat kesalahan pemasangan rantai kinematik pada *base* dan *platform* robot. Pengujian dilakukan dengan cara menggunakan simulasi Auto CAD inventor 2013. Pada pengujian ini ketelitian dan kepresisian gerak output diwakili oleh pergeseran titik pusat putar (*uncompensatable error*) yang terjadi pada struktur mekanisme paralel.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni

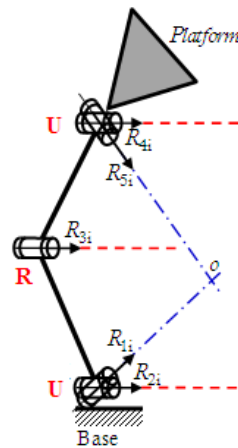
Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU merupakan struktur yang terdiri dari batang diam (*fix base*) dan batang output (*moving platform*) yang dihubungkan oleh tiga rantai kinematik (*kinematic chain*) [3] seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Dalam aplikasinya mekanisme ini dapat digunakan sebagai pengontrol orientasi pahat dan benda kerja [4].



Gambar 1. Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni.

Secara umum rantai kinematik mekanisme paralel 3-dof murni disusun oleh lima join revolute (5R). kelima join tersebut disusun sedemikian rupa sehingga membentuk dua kelompok arah sumbu join yaitu kelompok sumbu sejajar dan kelompok sumbu yang berpotongan. Kelompok sumbu sejajar berfungsi untuk mengatur arah gaya konstrain gerak translasi pada sumbu putar. Sedangkan sumbu berpotongan digunakan untuk mendefinisikan lokasi titik pusat putar *platform*.

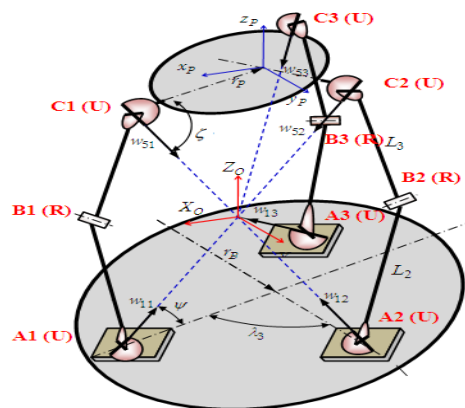
Selanjutnya bentuk rantai kinematik 5R disederhanakan menjadi *universal-revolute-universal* (URU) seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Hal ini bertujuan untuk mengurangi jumlah komponen mekanik robot, menyederhanakan proses perakitan serta memudahkan proses pengontrolan gerak rantai kinematik.



Gambar 2. Konfigurasi rantai kinematik URU

2.2 Konstanta kinematik mekanisme paralel rotasi murni

Untuk memperoleh disain mekanisme paralel 3-dof rotasi murni diperlukan optimasi konstanta kinematik agar dihasilkan *workingspace* dan kekakuan yang optimum. Sebuah mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU mempunyai 6 konstanta kinematik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Keenam konstanta kinematik tersebut antara lain adalah (a) L_2, L_3 yaitu panjang batang rantai kinematik, (b) r_B, r_P secara berurutan adalah jari-jari *base plate* dan jari-jari *platform* robot, (c) ψ, ζ merupakan sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *base* dan *platform* robot [5]. Nilai konstanta kinematik diperoleh berdasarkan analisa kondisi singularity.



Gambar 3. Konstanta kinematik 3-URU

2.3 Kondisi singularity mekanisme

Bentuk kondisi singular yang dialami oleh robot paralel 3-dof rotasi murni adalah *actuation singularity* dan *constraint singularity*. Kedua kondisi singular ini nantinya dijadikan acuan dalam menentukan nilai konstanta kinematik robot. *Actuation singularity* menyatakan dimana gerak *platform* tidak dapat dikontrol oleh penggerak, artinya *platform* tetap mengalami transformasi ketika tidak ada input sudut yang diberikan pada robot. *Actuation singularity* dievaluasi berdasarkan hubungan antara kecepatan input, $\dot{\theta}$ dan output, \dot{x} sehingga memenuhi persamaan berikut ini.

$$\{\dot{x}\} = [J_a]\{\dot{\theta}\} \tag{1}$$

Constraint singularity menyatakan bahwa gerak translasi pada *platform* tidak dapat dibatasi oleh ketiga rantai kinematik robot. Pada kondisi ini susunan tiga rantai kinematik robot tidak mampu menahan gaya eksternal yang diberikan pada robot. *Constraint singularity* dipengaruhi oleh hubungan antara gaya konstrain, f dan gaya luar F sehingga memenuhi persamaan berikut

$$\{F\} = [J_c]\{f\} \tag{2}$$

J_a, J_c adalah matriks 3x3 yang akan dievaluasi determinannya untuk menentukan kondisi singular. Untuk itu dibuatkan suatu indek yang mewakili dua kondisi singular tersebut untuk memilih konstanta kinematik yang dinyatakan dengan persamaan (3)

$$EV = |J_a||J_c| \quad (3)$$

3. Metodologi

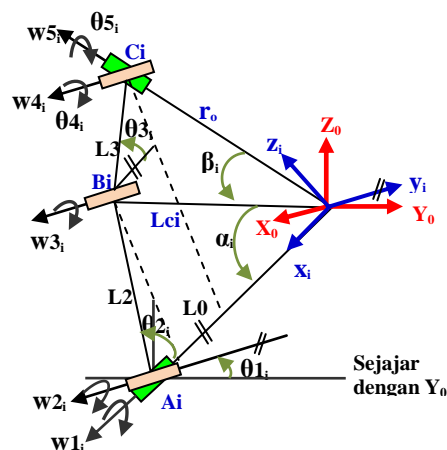
3.1 Kajian Konstanta dan Workingspace Mekanisme

Faktor yang harus dipertimbangkan dalam merancang rantai kinematik struktur adalah kekakuan dan *workingspace*. Untuk mendapatkan kondisi optimum, proses disain harus dimulai dengan merancang konfigurasi rantai kinematik yang meliputi pemilihan jenis sambungan, jenis join aktif yang akan digunakan dan lain-lain.

Setelah itu dilakukan pemilihan konstanta kinematik robot yang berhubungan dengan panjang batang, sudut input, kecepatan dan percepatan serta orientasi *platform*. Berikutnya dirancang komponen mekanik robot yaitu semua dimensi komponen mekanik yang tidak berkaitan dengan konstanta kinematik seperti bentuk sambungan, bentuk batang, pemilihan jenis material dan lain-lain.

3.2 Analisis screw dan reciprocal screw robot paralel 3-DOF rotasi murni

Metode *screw* digunakan untuk mendeteksi kondisi singular mekanisme. Pada Gambar 4 diperlihatkan sistem *screw* dari rantai kinematik URU. Arah *screw* untuk setiap join dinotasikan dengan w_{ji} dimana i menunjukkan rantai kinematik ke- i dan j notasi untuk join ke- j



Gambar 4. Perpindahan sistem koordinat $O-x_iz_iz_i$ dan join batang ke- i

Sistem *screw* ini dinyatakan dalam dua sistem koordinat yaitu lokal dan referensi. Hubungan antara perpindahan pada sistem koordinat $O-x_iz_iz_i$ dengan koordinat referensinya dapat dijabarkan seperti persamaan (4) [6]

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = R(\psi)R(\theta_{ii}) \quad (4)$$

dengan ψ menyatakan sudut pergeseran kemiringan universal joint pada *base* dan *platform* dan θ_{ij} adalah sudut input. Dari **Gambar 7** dapat ditentukan persamaan *screw* untuk lima join pada masing-masing batang terhadap sistem koordinat $O-x_iz_iz_i$

$$\begin{aligned}
 S_{1i}^i &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\
 S_{2i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{26}]^T \\
 S_{3i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ a_{34} \ 0 \ a_{36}]^T \\
 S_{4i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ a_{44} \ 0 \ a_{46}]^T \\
 S_{5i}^i &= [a_{51} \ 0 \ a_{53} \ 0 \ 0 \ 0]^T
 \end{aligned} \tag{5}$$

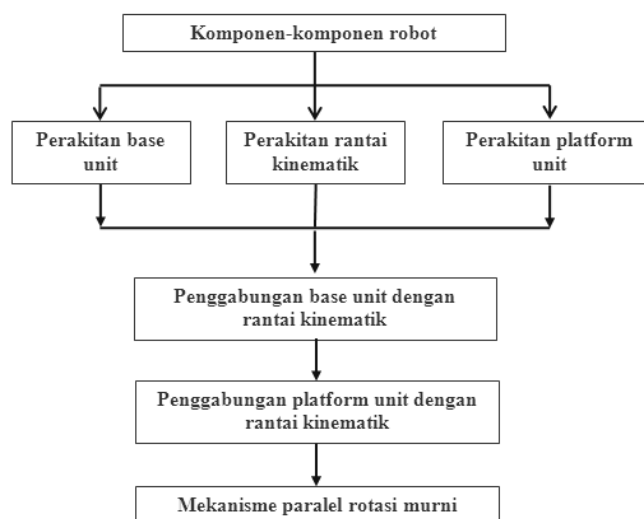
Mekanisme paralel yang disusun oleh 5 join akan memiliki 1 *reciprocal screw* yang merupakan irisan dari *reciprocal screw* masing-masing join yang berjumlah 25. Dengan menggunakan formulasi matematik maka didapatkan *reciprocal screw* join tersebut yaitu

$$S_{R1}^{(1)} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \tag{6}$$

3.2 Proses perakitan mekanisme paralel 3-dof rotasi murni

Agar memudahkan dalam proses *assembly*, komponen robot disatukan dalam lima tahapan proses yaitu perakitan *base unit*, rantai kinematik, *platform unit*, dan dilanjutkan dengan penyatuan *base unit* dengan rantai kinematik serta penggabungan *platform unit* dengan rantai kinematik seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Cara ini lebih efisien karena dengan lima tahapan proses *assembly* kemungkinan terjadinya pemasangan komponen-komponen robot secara paksa dapat dihindari sehingga *clearance* pada masing-masing komponen dapat diminimalisir.

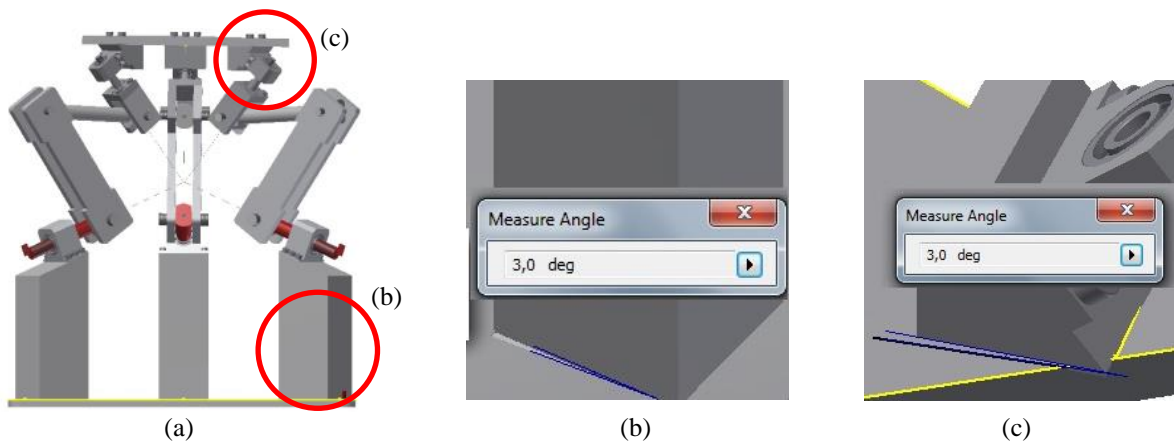
Pada proses *assembly*, salah satu penyimpangan yang harus dihindari adalah kesalahan pemasangan *bracket* pada *base plate* dan *platform plate*. Karena kesalahan tersebut secara langsung akan mengakibatkan bergesernya posisi dan kesejajaran rantai kinematik, sehingga menyebabkan terjadinya gerak translasi pada titik pusat putar. Untuk menghindari kesalahan tersebut maka dapat dilakukan dengan cara membuat marking khusus pada permukaan *base plate* dan *platform plate* sebagai lokasi pemasangan *bracket*.



Gambar 5. Skematik proses *assembly*

3.3 Pengujian kesalahan pemasangan rantai kinematik pada base dan platform mekanisme paralel

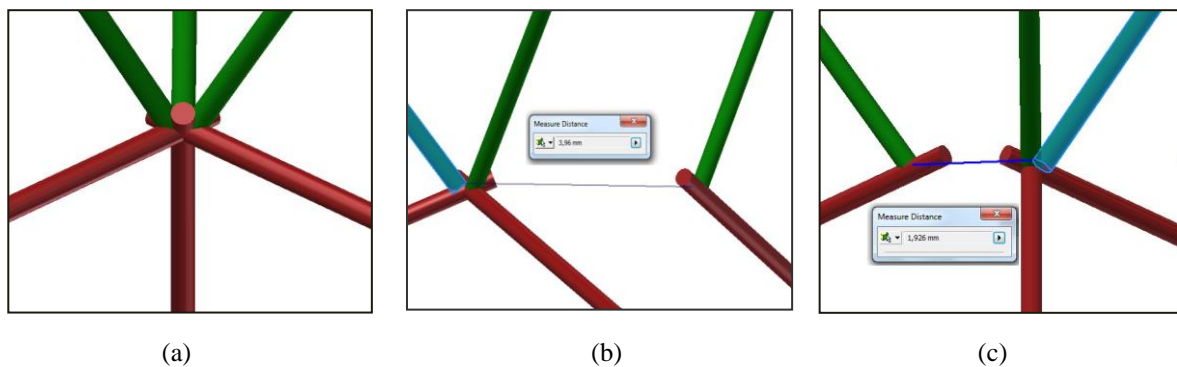
Pengujian kesalahan pemasangan rantai kinematik dilakukan dengan simulasi CAD inventor 2013. Pada pengujian ini kesalahan pemasangan rantai kinematik disimulasikan dengan memutar *bracket* yang terdapat pada *base plate*, *platform plate* secara berturut-turut sebesar 1° , 2° , dan 3° seperti diperlihatkan oleh Gambar 6. Selanjutnya diukur pergeseran titik pusat putar (*uncompensatable error*) yang terjadi akibat pemutaran posisi *bracket* terhadap *base* dan *platform* untuk masing-masing sudut.



Gambar 6. (a) Simulasi kesalahan pemasangan rantai kinematik (b) Pemutaran *bracket* terhadap *base* sebesar 3° (c) Pemutaran *bracket* terhadap *platform* sebesar 3°

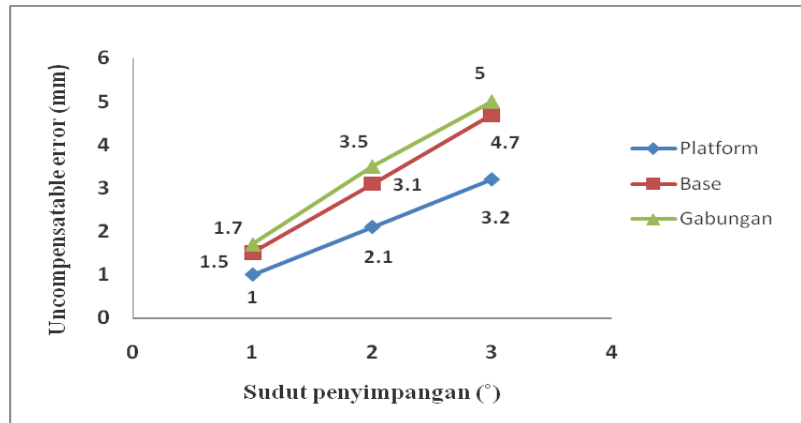
4. Hasil dan Pembahasan

Dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh hasil seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7 (a) diperlihatkan bahwa pada saat *bracket* pada *base* dan *platform* dipasang sesuai dengan bentuk desain, maka keenam garis sumbu joint berpotongan bertemu pada satu titik. Sedangkan pada Gambar 7 (b) dan (c) secara berurutan diperlihatkan bahwa garis sumbu joint berpotongan tidak bertemu pada satu titik, hal ini disebabkan karena *bracket* yang terpasang pada *base* dan *platform* robot diputar sebesar 1° , 2° hingga 3° . Penyimpangan titik pusat putar tersebut selanjutnya disebut dengan *uncompensable error*.



Gambar 7. (a) Titik pusat putar mekanisme paralel (b) Gerak traslasi pada titik pusat putar akibat pergeseran posisi *bracket* pada *base plate* (c) Gerak traslasi pada titik pusat putar akibat pergeseran posisi *bracket* pada *platform plate*

Besarnya nilai *uncompensable error* akibat pergeseran posisi *bracket* pada *base* dan *platform* diperlihatkan oleh grafik yang terdapat pada Gambar 8. Pada grafik dapat diketahui bahwa kesalahan pemasangan *bracket* pada *base* memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap terjadinya *uncompensable error* pada mekanisme paralel yaitu berturut-turut sebesar 1,5 mm, 3,1 mm dan 4,7 mm. Sedangkan kesalahan pemasangan *bracket* pada *platform* menyebabkan terjadinya *uncompensable error* sebesar 1 mm, 2,1 mm dan 3,2 mm. Gabungan kesalahan pemasangan *bracket* pada *base* dan *platform* menyebabkan terjadinya *uncompensable error* sebesar 1.7 mm, 3,5 mm dan 5 mm pada mekanisme paralel.



Gambar 8. Grafik *uncompensable error* akibat kesalahan pemasangan rantai kinematik

5. Kesimpulan

Dari rangkaian penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa kesalahan pemasangan rantai kinematik pada mekanisme paralel dapat menyebabkan terjadinya gerak translasi pada titik pusat putar. Kesalahan pemasangan rantai kinematik pada posisi *base* memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap *uncompensable error* dibandingkan dengan kesalahan pada *platform*.

Ucapan Terima Kasih

Paper ini ditulis berdasarkan sebagian hasil yang diperoleh dari Penelitian yang dibiayai oleh dana BOPTN Universitas Andalas tahun 2014 melalui hibah Penelitian Fundamental dengan No. Kontrak 29.UN.16/PL/D-FD/2014.

Nomenklatur

L_2, L_3	Panjang batang rantai kinematik
r_B	Jari-jari base <i>plate</i>
r_P	Jari-jari platform
ψ	Sudut pemasangan rantai kinematik terhadap <i>base</i>
ζ	Sudut pemasangan rantai kinematik terhadap <i>platform</i>
β	Sudut kemiringan antara <i>platform</i> dengan rantai kinematik
γ	Sudut kemiringan antara <i>base plate</i> dengan rantai kinematik
R_1-R_5	Join revolusi no 1-5
λ	Derajat kebebasan bidang atau ruang tempat mekanisme berada
θ	Sudut putar sumbu <i>screw</i>
$\dot{\theta}$	Kecepatan input pada <i>actuation singularity</i>
\dot{x}	Kecepatan output pada <i>actuation singularity</i>
$\{\dot{x}\}$	Matriks output mekanisme paralel
$[J_a]$	Matriks Jacobi
$\{\dot{\theta}\}$	Matriks input mekanisme paralel
$\{F\}$	Matriks gaya luar

Daftar Pustaka

- [1] Vinogradov Oleg, 2000, Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanism, CRC Press LLC, N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431
- [2] Lewis, G., 1996, Automation Technology From imagination to Reality: Catalog Gidding & Lewis. Li, Y., et.al., 2010, Dynamic performance comparison and counterweight optimization of two 3-DOF parallel manipulators for a new hybrid machine tool Mechanism and Machine Theory, Vol.45, No.11, pp.1668-1680.
- [3] Syafri, Huda, 2014, Pengaruh variasi sudut *redundant* terhadap pergeseran titik pusat putar (*uncompensatable error*) mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU, Proceeding Seminar SNTTM XIII, UI Jakarta
- [4] Huda, S. dan Jufrizal, 2012, Disain Alat Bantu Pengaturan Orientasi Benda Kerja Pada Proses Pemesinan Berbasis Mekanisme Paralel, proceeding Seminar SNTTM XI & Thermofluid IV, UGM Yogyakarta.
- [5] Huda, S. and Takeda, Y., 2008, Kinematic Design of 3-URU Pure Rotational Parallel Mechanism with Consideration of Uncompensatable Error, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Vol.2, No. 5, pp. 874-886.
- [6] Huda, S. and Takeda, Y., 2007, Kinematic Analysis and Synthesis of a 3-URU Pure Rotational Parallel Mechanism with Respect to Singularity and Workspace, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing Vol.1, No. 1, pp. 81-92.