

SENSITIFITAS KESALAHAN DIMENSI DAN GEOMETRI MEKANISME PARALEL TIGA DERAJAT KEBEBAAN TIPE SPHERICAL DAN PENGARUHNYA TERHADAP COMPENSATABLE ERRORS DAN UNCOMPENSATABLE ERRORS

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

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Riau, Kampus Bina Krida, Pekanbaru, 28293.

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

*prie_00m022@yahoo.com

Abstrak

Pada penelitian ini, dikaji tentang aplikasi mekanisme paralel tiga derajat kebebasan (3-dof) tipe *spherical* untuk meningkatkan kemampuan mesin perkakas konvensional agar dapat berperilaku sebagai *five-axis machine tool*. Penelitian difokuskan pada perancangan dan pembuatan sebuah prototipe mekanisme paralel 3-dof tipe *spherical* yang akan diaplikasikan untuk menambah derajat kebebasan pahat atau benda kerja berupa gerak rotasi sehingga orientasinya dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan.

Mekanisme paralel yang dikembangkan disusun oleh rantai kinematik URU (*universal-revolute-universal*) dengan indikasi capaian berupa *workingspace* yang besar dan kekakuan yang tinggi. Sintesa dimensi dilakukan untuk menentukan enam konstanta kinematik dengan mempertimbangkan *constraint singularity* dan *actuation singularity*. Selanjutnya dua kondisi singular tersebut disintesa dengan metode *screw* dan *reciprocal screw*. Pengujian statik dilakukan untuk melihat pengaruh sensitifitas kesalahan dimensi dan geometri terhadap *compensatable error* dan *uncompensatable error*. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh kesalahan dimensi yang terjadi akibat proses menufaktur dan *assembly* yaitu kesalahan pemasangan rantai kinematik pada *base* dan *platform* sebesar $0,5^\circ$, ketidak sejajaran sumbu join revolut sebesar $0,15^\circ$ serta ketidak simetrisan pemasangan rantai kinematik pada *base* dan *platform* sebesar $0,1^\circ$.

Mengacu pada kesalahan dimensi yang terjadi pada prototipe mekanisme paralel 3-dof tipe *spherical*, selanjutnya dilakukan evaluasi *compensatable error* dan *uncompensatable error* secara eksperimental. Dari hasil pengukuran diperoleh *compensatable error* maksimum sebesar 1° dan *uncompensatable error* maksimum sejauh 1,06 mm.

Kata Kunci : *spherical parallel mechanism, compensatable error, uncompensatable error*

Pendahuluan

Mekanisme paralel merupakan suatu mekanisme dimana batang diam (*base*) dan batang output (*platform*) dihubungkan oleh beberapa rantai kinematik yang disusun secara paralel. Apabila dibandingkan dengan mekanisme seri, maka mekanisme paralel memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah mekanisme paralel

memiliki kekakuan yang tinggi sehingga strukturnya lebih stabil jika dioperasikan pada kecepatan tinggi. Disamping itu inersia komponen bergerak mekanisme paralel dapat dibuat lebih rendah sehingga daya dan ukuran motor penggerak yang dibutuhkan pun juga relatif lebih kecil. Selanjutnya mekanisme paralel memiliki modus gerak yang berlebih, sehingga

memungkinkan untuk digunakan sebagai penambah derajat kebebasan pahat dan benda kerja. Dari beberapa kelebihan yang dimilikinya, maka mekanisme paralel dirasa cocok diaplikasikan sebagai mesin perkakas yang membutuhkan ketelitian dan kepresisan yang tinggi serta mampu bergerak dalam beberapa axis.

Dari beberapa riset terdahulu, telah dilakukan penelitian terkait penggunaan mekanisme paralel sebagai mesin perkakas. Pada tahun 2006 telah dibuat sebuah prototipe mesin freis untuk aplikasi *high speed machining*. Struktur mekanik prototipe tersebut menggunakan mekanisme paralel tiga derajat kebebasan dengan konfigurasi RRRPRR [1]. Kemudian pada tahun 2011 juga telah dikembangkan sebuah tripod berbasis mekanisme paralel untuk aplikasi mesin perkakas. Tripod tersebut terdiri dari *fix base* dan *moving platform* yang dihubungkan oleh tiga rantai kinematik dengan konfigurasi UPU [2]. Selanjutnya pada tahun 2013 telah dirancang sebuah prototipe mesin CNC 3-axis berbasis mekanisme paralel. Mesin CNC tersebut ditopang oleh dua rantai kinematik dengan konfigurasi berbasis 2PRR-PPR [3].

Pada penelitian ini, sebelumnya juga telah dilakukan perancangan prototipe mekanisme paralel tiga derajat kebebasan (3-dof) tipe *spherical* URU untuk aplikasi *machine tools* [4]. Prototipe tersebut telah didesain sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk menambah modus gerak pahat dan benda kerja. Hal ini dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan mesin perkakas konvensional agar berprilaku seperti mesin perkakas modern (*five axis machine tools*).

Namun dalam pembuatan sebuah prototipe mesin perkakas berbasis mekanisme paralel, ketelitian dan kepresisan gerak output yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh ketelitian dimensi dan geometri komponen bergerak yang menyusun mekanisme tersebut. Penelitian yang dilakukan oleh NI Yanbing

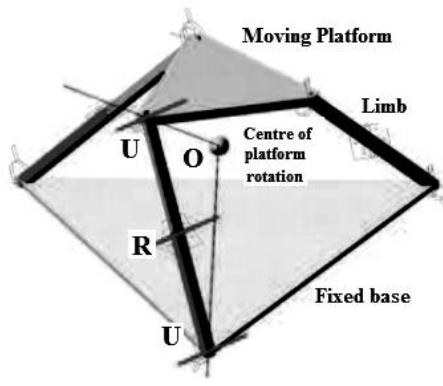
menunjukkan bahwa kesalahan dimensi mekanisme paralel 2T1R berpengaruh negatif terhadap gerak output mekanisme yang dihasilkan [5]. Hal yang sama juga dilakukan oleh Xin-Jun Liu, bahwa *error index* yang terjadi pada mobilitas *tools head* 3-PVPHS and 3-PVRS juga dipengaruhi oleh ketidak-tepatan konstanta kinematik dan dimensi struktur [6].

Untuk memperoleh gerak output prototipe mekanisme paralel tiga derajat kebebasan (3-dof) tipe *spherical* URU yang sesuai dengan desain awal, maka pada penelitian ini dilakukan investigasi kesalahan dimensi dan geometri yang bersumber dari proses manufaktur. kesalahan tersebut selanjutnya dianalisa untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *compensatable errors* dan *uncompensatable errors* yang terjadi pada struktur mekanisme paralel tersebut.

Mekanisme paralel tiga derajat kebebasan (3-dof) tipe *spherical* URU

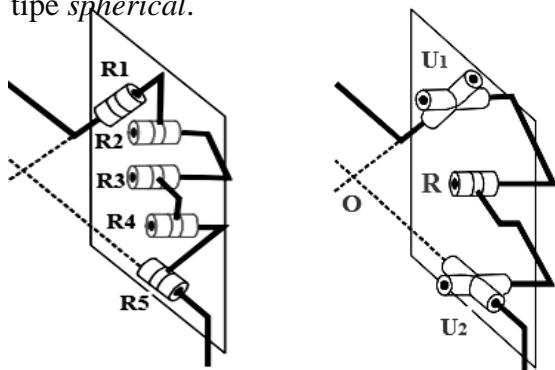
Mekanisme paralel tipe *spherical* merupakan mekanisme yang dirancang untuk mampu bergerak secara rotasi murni. Mekanisme ini terdiri dari tiga rantai kinematik yang berfungsi sebagai penghubung *fix base* dengan *moving platform* seperti diperlihatkan pada Gambar 1.

Pada dasarnya tiga rantai kinematik yang menopang mekanisme paralel tipe *spherical* disusun oleh lima join revolut (R1, R2, R3, R4, R5). Namun dengan komposisi lima join revolut (5R) mekanisme paralel sangat sulit untuk dikontrol. Oleh karenanya untuk kesederhanaan konfigurasi mekanisme paralel tersebut, maka bentuk 5R selanjutnya dirubah menjadi bentuk *Universal Revolute Universal* (URU).



Gambar 1. Mekanisme paralel tipe *spherical*

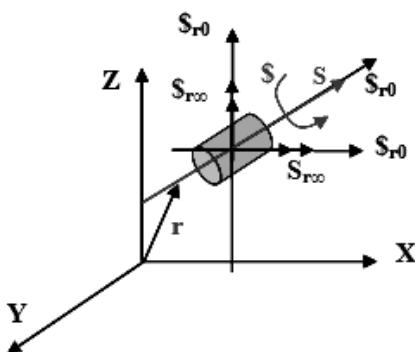
Penyederhanaan dilakukan dengan cara menggabungkan dua join revolut yang saling berpotongan dan berdekatan (R1 dan R2, R4 dan R5) menjadi join universal, sehingga bentuk 5R berubah menjadi URU seperti pada Gambar 2. Perpotongan kedua sumbu join universal (U_1 dan U_2) pada titik O selanjutnya disebut titik pusat putar mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU tipe *spherical*.



Gambar 2. Penyederhanaan rantai kinematik 5R menjadi URU

Teori Screw dan Reciprocal Screw

Screw dan *reciprocal screw* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menganalisis dua kondisi singular yang terjadi pada mekanisme paralel. Pada Gambar 3 ditampilkan *screw* dan *reciprocal screw* satu join revolut. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa $\$$ dan $\$_r$ menyatakan vektor *screw* dan *reciprocal screw*. S melambangkan arah sumbu *screw* dan r merupakan konstanta untuk vektor posisi sumbu *screw*.



Gambar 3. Vektor *screw* dan *reciprocal screw*

Formulasi matematis *screw* untuk satu join revolut yang terdapat pada Gambar 3 disajikan oleh pers 1.

$$\$ = \begin{bmatrix} s \\ r \times s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ s_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dari pers 1 dapat diuraikan bahwa nilai *screw* untuk satu join revolut terdiri dari vektor rotasi $s = [s_x, s_y, s_z]^T$, serta vektor translasi $s_0 = [s_{0x}, s_{0y}, s_{0z}]^T$. Dari komponen dua vektor dapat dinyatakan bahwa *screw* untuk satu join revolut memiliki enam komponen vektor.

Sedangkan untuk satu join prismatic, persamaan *screw* nya dinyatakan oleh pers 2.

$$\$ = \begin{bmatrix} 0 \\ s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Berbeda dengan join revolut, *screw* pada join prismatic hanya memiliki vektor translasi saja yang disusun oleh tiga komponen vektor $s = [s_x, s_y, s_z]^T$

Reciprocal screw ($\$_r$) merupakan vektor yang apabila dilakukan perkalian dot dengan *screw* nya akan menghasilkan nilai nol seperti dinyatakan dengan pers 3. *Reciprocal screw* memiliki enam elemen vektor yang dikelompokan menjadi dua

yaitu vektor gaya $\mathbf{s}_r = [s_{rx}, s_{ry}, s_{rz}]^T$, dan vektor momen $\mathbf{s}_{\infty} = [s_{\infty x}, s_{\infty y}, s_{\infty z}]^T$. Sedangkan pada join prismatic, *reciprocal screw* hanya memiliki vektor momen saja yang terdiri dari tiga komponen vektor $\mathbf{s}_{\infty} = [s_{\infty x}, s_{\infty y}, s_{\infty z}]^T$

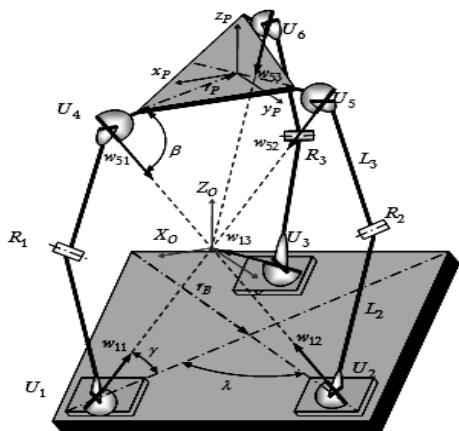
$$\mathbf{S}_{ri} \cdot \mathbf{S} = 0 \quad (3)$$

Untuk satu join revolut jumlah *screw* dan *reciprocal screw* nya adalah enam yang terdiri dari satu *screw* dan lima *reciprocal screw* (tiga *reciprocal screw* revolut, dua *reciprocal screw* prismatic) seperti pada pers 4.

$$\Pi S_{ri} + \Pi S = 6 \quad (4)$$

Konstanta kinematik

Mekanisme paralel 3-dof URU tipe *spherical* mempunyai 6 konstanta kinematik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Keenam konstanta kinematik tersebut adalah (a) L_2, L_3 yaitu panjang batang rantai kinematik yang dihitung berdasarkan capaian *workingspace* oleh *platform*, (b) r_B, r_P secara berurutan adalah jari-jari *base plate* dan jari-jari *platform* robot yang digunakan menentukan posisi titik pusat robot paralel. (c) ψ, ζ merupakan sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *base* dan *platform* robot yang mempengaruhi kondisi singular.

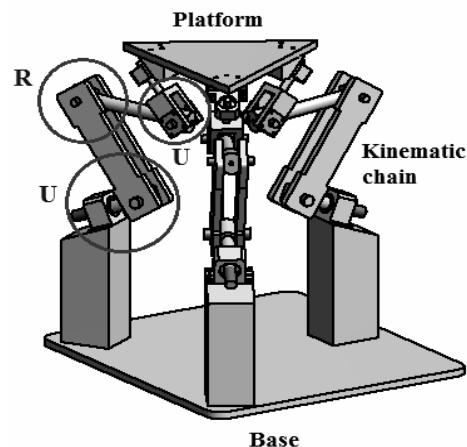


Gambar 4. Konstanta kinematik 3-URU

Metodologi

Desain Komponen Mekanik

Bentuk desain mekanisme paralel 3-dof URU tipe *spherical* dengan program aplikasi Autodesk Inventor 2013 diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Desain mekanisme paralel

Setelah dilakukan optimasi maka diperoleh dimensi konstanta kinematik masing-masing bagian mekanisme parel yaitu jari-jari *base plate* (r_B) sebesar 172 mm, sudut antara *fix base* terhadap rantai kinematik (γ) adalah sebesar 52° , jari-jari *platform* (r_P) senilai 110 mm, dan sudut antara rantai kinematik terhadap *moving platform* (β) sebesar 22° . Disamping itu juga diperoleh Panjang batang *Limb 1* sebesar 160 mm, dan panjang batang *Limb 2* senilai 140 mm

Analisis kondisi singular

Ada dua kondisi singular yang terjadi pada mekanisme paralel, yang pertama adalah *actuation singularity* yaitu kondisi dimana gerakan *platform* tidak dapat dikontrol oleh motor penggerak, kondisi ini dapat dianalisa berdasarkan hubungan antara kecepatan input ($\dot{\theta}$) dan output (\dot{x}). Yang kedua adalah *constraint singularity* yaitu kondisi dimana ketiga rantai kinematik tidak dapat membatasi gerakan translasi *platform*. Kondisi ini dapat dievaluasi berdasarkan hubungan gaya konstrain (f) dan gaya luar (F). Kedua bentuk singular dapat

dinyatakan dengan pers 5 dan 6

$$\dot{x} = J_a \dot{\theta} \quad (5)$$

$$F = J_c f \quad (6)$$

J_q, J_x adalah matriks 3×3 yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dua kondisi singular. Selanjutnya dibuatkan suatu indek yang mewakili dua kondisi singular tersebut untuk memilih konstanta kinematik yang dinyatakan dengan pers 7

$$EV = |J_a| |J_c| \quad (7)$$

Analisis metode screw

Pada Gambar 6 diperlihatkan sistem *screw* rantai kinematik URU. Arah *screw* untuk setiap join dinotasikan dengan w_{ji} . Sistem *screw* ini dinyatakan dalam dua sistem koordinat yaitu lokal dan referensi. Hubungan perpindahan antara sistem koordinat $O - x_i y_i z_i$ dengan koordinat referensinya dapat dijabarkan seperti pers 8 [7].

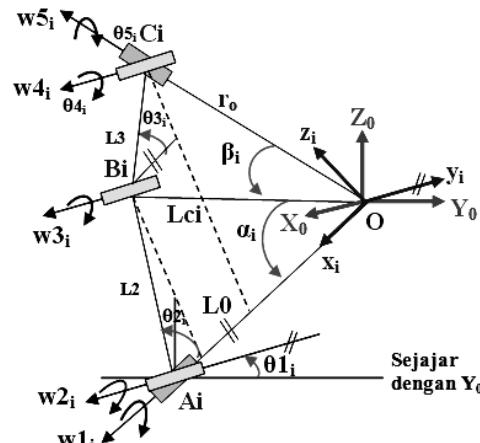
$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = R(\psi) R(\theta_{ii}) \quad (8)$$

dimana

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}, \text{ dan}$$

$$R(\theta_{ii}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{ii} & \sin \theta_{ii} \\ 0 & -\sin \theta_{ii} & \cos \theta_{ii} \end{bmatrix}$$

dengan ψ menyatakan sudut pergeseran kemiringan universal join pada *base* dan *platform* dan θ_{ii} adalah sudut input.



Gambar 6. Perpindahan sistem koordinat $O - x_i y_i z_i$ dan join batang ke- i

Dari Gambar 6, dapat ditentukan persamaan *screw* untuk lima join pada masing-masing batang terhadap sistem koordinat $O - x_i y_i z_i$

$$\begin{aligned} S_{1i}^i &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ S_{2i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ a_{26}]^T \\ S_{3i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ a_{34} \ 0 \ a_{36}]^T \\ S_{4i}^i &= [0 \ -1 \ 0 \ a_{44} \ 0 \ a_{46}]^T \\ S_{5i}^i &= [a_{51} \ 0 \ a_{53} \ 0 \ 0 \ 0]^T \end{aligned} \quad (9)$$

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 pers 10 maka didapatkan *reciprocal screw* join tersebut yaitu

$$S_{RI}^{(1)} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (10)$$

Bila pers 10 disubsitusikan ke dalam pers 8, maka nilai *reciprocal screw* ($S_{RI}^{(1)}$) pada dapat dinyatakan dengan pers 11

$$S_{RI}^{(0)} = [s\psi s\theta_{11} \ c\theta_{11} \ c\psi s\theta_{11} \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (11)$$

Sedangkan dua *reciprocal screws* lainnya untuk batang kedua ($S_{R2}^{(0)}$) dan ketiga ($S_{R3}^{(0)}$) dapat ditentukan dengan cara menggunakan transformasi seperti pada pers 12.

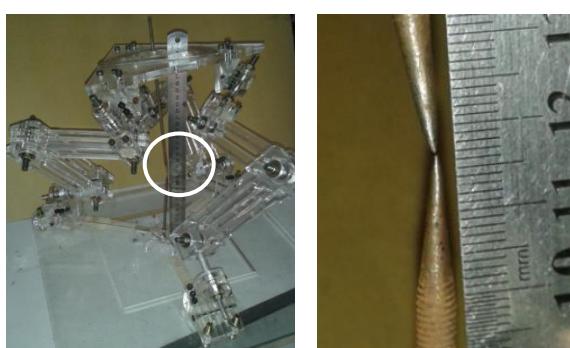
$$S_{R^I}^{(0)} = \begin{bmatrix} R(\lambda_i) & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & R(\lambda_i) \end{bmatrix} S_{R^I}^{(0)} \quad (12)$$

0_{3x3} adalah matrix nol dengan ukuran 3x3. Apabila disubsitusikan nilai $\lambda_1 = -2\pi/3$ rad dan $\lambda_2 = -4\pi/3$ rad ke dalam pers 12, maka diperoleh nilai *reciprocal screw* rantai kinematik kedua ($S_{R^2}^{(0)}$) dan ketiga ($S_{R^3}^{(0)}$)

$$\begin{aligned} S_{R^2}^{(0)} &= \begin{bmatrix} S_{R^2}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} c\theta_{12} - \frac{1}{2} s\psi s\theta_{12} - \frac{1}{2} c\theta_{12} + \frac{\sqrt{3}}{2} s\psi s\theta_{12} c\psi s\theta_{12} \right]^T \\ S_{R^3}^{(0)} &= \begin{bmatrix} S_{R^3}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \left[\frac{\sqrt{3}}{2} c\theta_{13} - \frac{1}{2} s\psi s\theta_{13} - \frac{1}{2} c\theta_{13} + \frac{\sqrt{3}}{2} s\psi s\theta_{13} c\psi s\theta_{13} \right]^T \end{aligned}$$

Penentuan pusat putar robot

Titik pusat putar pada mekanisme paralel merupakan titik referensi yang diperoleh dari perpotongan ke enam sumbu join *universal* (join yang berpotongan). Idealnya titik pusat putar mekanisme paralel tidak boleh bergeser ketika *platform* mengalami perpindahan. Secara aktual, titik pusat putar mekanisme dapat ditentukan secara sederhana yaitu dengan memasang *thread bar* (poros berulir) pada masing-masing titik tengah *platform* dan *base* seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Titik pertemuan kedua ujung *thread bar* merupakan titik pusat putar.



Gambar 7. Penentuan titik pusat putar mekanisme paralel secara aktual

Apabila kedua ujung *thread bar* masih bergeser pada saat *platform* mengalami transformasi, maka titik pusat putar dapat diperbaiki dengan cara mengkompensasinya. Yaitu dengan cara menggeser posisi salah satu *thread bar* atau mengatur ulang panjang salah satu *thread bar* sedikit demi sedikit hingga nilai pergeseran tersebut menjadi minimum.

Hasil

Berdasarkan hasil desain, selanjutnya dimanufaktur komponen mekanik mekanisme paralel sesuai dengan dimensi dan toleransi yang telah ditentukan. Berikutnya dilanjutkan dengan proses *assembly*, sehingga diperoleh sebuah prototipe mekanisme paralel 3-dof URU tipe *spherical* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Prototipe mekanisme paralel 3-dof URU tipe *spherical*

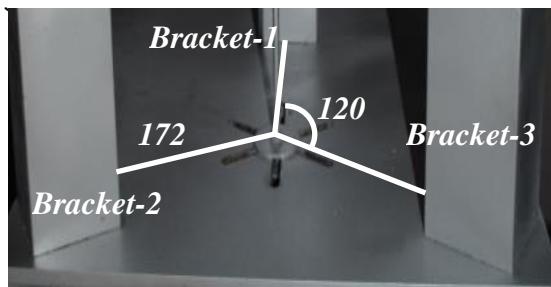
Evaluasi Kesalahan Geometri dan Dimensi

Kesalahan dimensi dan geometri mekanisme paralel merupakan penyimpangan ukuran komponen dan bentuk fisik struktur dari desain awalnya. Kesalahan ini bersumber dari proses pemesinan yang kurang teliti dan presisi. Kesalahan ini selanjutnya akan

terakumulasi pada saat semua komponen mekanik dirakit menjadi satu. Pada mekanisme paralel, kesalahan geometri dan dimensi menyebabkan terjadinya gerak translasi pada titik pusat putar *platform* (*uncompensatable error*) dan kesalahan pada sudut input (*compensatable error*). Dari pengukuran yang telah dilakukan, diperoleh beberapa bentuk kesalahan geometri dan dimensi yang terjadi pada mekanisme paralel diantaranya adalah :

1. Kesalahan pemasangan *bracket* pada *base plate*.

Pada mekanisme paralel 3-dof tipe *spherical* terdapat tiga unit *bracket* yang terpasang pada *base plate*. *Bracket* ini berfungsi sebagai penumpu rantai kinematik dan *platform* mekanisme. Posisi pemasangan ketiga *bracket* berjarak 172 mm dari titik pusat *base plate* serta membentuk sudut 120° seperti yang diperlihatkan pada Gambar 9.



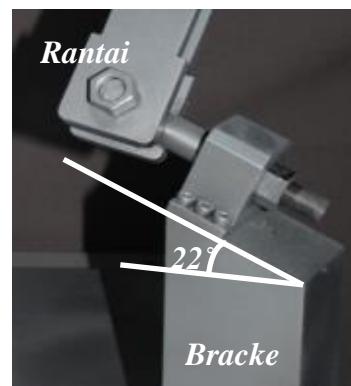
Gambar 9. Penyimpangan pemasangan *bracket* pada *base plate*

Pemasangan *bracket* pada *base plate* dikunci oleh 4 buah baut. Namun karena tidak adanya *marking* khusus tempat pemasangan *bracket* pada permukaan *base plate* maka pada saat baut dikencangkan posisi *bracket* ikut berubah. Setelah dilakukan beberapa kali perbaikan, masih terdapat sedikit penyimpangan sudut pada perpotongan ketiga sumbu *bracket*, yaitu sebesar 0,1°. Sehingga sudut perpotongan antara sumbu *bracket-1* dengan *bracket-2* menjadi 120,1° dan sudut

perpotongan sumbu antara *bracket-2* dengan *bracket-3* menjadi 119,9°.

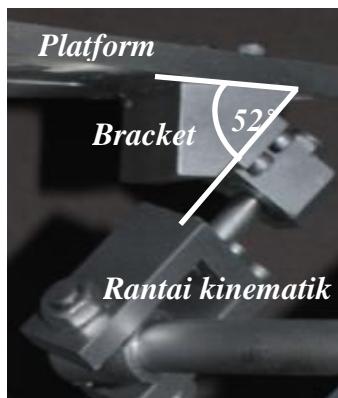
2. Penyimpangan kemiringan sudut antara *base plate* dengan rantai kinematik (γ).

Sudut γ didesain berada pada bagian atas *bracket* yang terhubung langsung dengan rantai kinematik seperti terlihat pada Gambar 10. Agar memiliki *workspace* yang besar maka dipilih sudut γ sebesar 22°. Namun karena keterbatasan pada proses manufaktur, maka terjadi penyimpangan sudut γ pada masing-masing *bracket* sebesar 0,5° pada *bracket-1*, 0,2° pada *bracket-2*, dan 0,3° pada *bracket-3*



Gambar 10. Sudut kemiringan *base plate* terhadap rantai kinematik

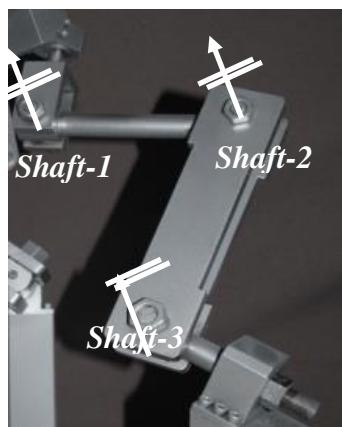
3. Penyimpangan sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *platform* (β)
Pemilihan besarnya sudut β dipengaruhi oleh kondisi singular yang terjadi pada mekanisme. Dalam perancangannya sudut β dipilih sebesar 52° yang terdapat pada salah satu sisi *bracket* yang terhubung dengan *platform* seperti pada Gambar 11. Dalam proses produksinya terjadi penyimpangan sudut β sebesar 0,5° pada *bracket-1* dan 0,2° masing-masing pada *bracket-2* dan *bracket-3*.



Gambar 11 Sudut kemiringan *platform* terhadap rantai kinematic

4. Penyimpangan kesejajaran sumbu join revolut rantai kinematik

Mekanisme paralel 3-dof tipe *spherical* disusun oleh tiga rantai kinematik. Ketiganya dirancang dengan bentuk yang simetri dan identik. Pada satu rantai kinematik terdapat tiga sumbu sejajar seperti terlihat pada Gambar 12. Namun karena adanya kekurangan pada proses manufaktur dan *assembly*, maka jarak titik pusat kedua sisi pin yang terdapat pada satu join terhadap *base plate* menjadi tidak sama. Penyimpangan yang terjadi antara lain adalah pada rantai kinematik-1 sebesar 0,2 mm dan rantai kinematik-3 senilai 0,05 mm. Apa bila dikonversi kedalam bentuk sudut, maka terjadi ketidak sejajaran sumbu join revolut ketiga rantai kinematik adalah sebesar $0,05^\circ$ pada rantai kinemtik-1 dan $0,15^\circ$ pada rantai kinematik-3.



Gambar 12 Rantai kinematik pada mekanisme paralel

5. Penyimpangan kesesumbuan rantai kinematik
Kesesumbuan rantai kinematik terbentuk apabila garis sumbu semua komponen mekanik berada pada satu garis lurus seperti yang diperlihatkan oleh gambar 13. Dalam hal ini sumbu join universal yang dipasangkan pada *platform* harus segaris dengan sumbu join universal pada *base*.



Gambar 13. Kesesumbuan rantai kinematik

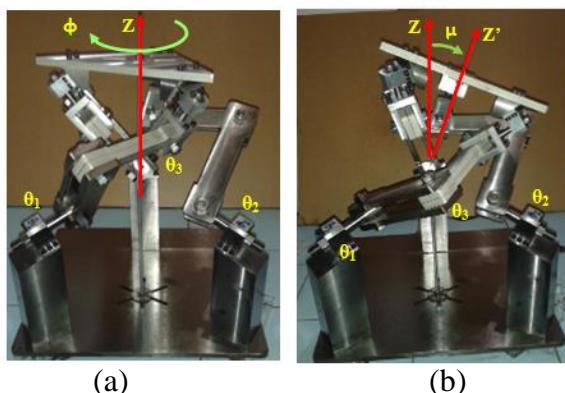
Kesesumbuan ini dapat dilihat dengan cara mempertemukan permukaan ujung *shaft-4* yang berada pada sisi sebelah kiri dengan *shaft-1* yang berada pada posisi sebelah kanan rantai kinematik. Apabila rantai kinematik ini sesumbu, maka titik pusat ujung *shaft-1* tepat bertemu dengan titik pusat ujung *shaft-4*.

Namun akibat adanya akumulasi kesalahan pada yang berasal dari proses manufaktur dan *assembly*, maka diperoleh satu unit rantai kinematik yang tidak sesumbu. Dimana ketika kedua ujung *shaft-1* dan *shaft-4* dipertemukan terjadi penyimpangan titik pusat sebesar 0,4 mm. Apabila dikonversi ke dalam dalam bentuk sudut, maka besarnya nilai penyimpangan tersebut adalah sebesar $0,1^\circ$.

Evaluasi *Workingspace* Robot

Pengukuran *workingspace* mekanisme paralel bertujuan untuk mengetahui jangkauan maksimum yang mampu dicapai oleh *platform*. *Workingspace* pada mekanisme paralel dibatasi oleh kondisi singular dan interferensi antara satu rantai kinematik dengan rantai kinematik lainnya.

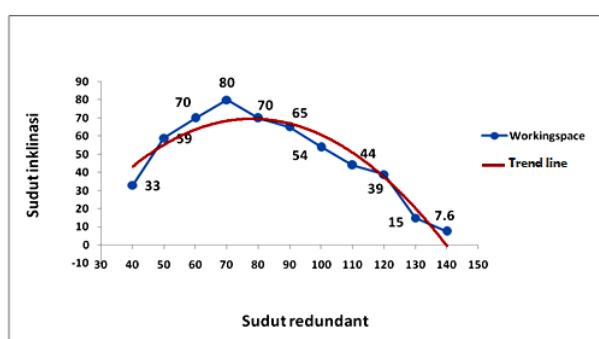
Workingspace dapat dievaluasi secara manual yang diawali dengan pengukuran orientasi dan dilanjutkan dengan pengujian kemiringan *platform* seperti pada Gambar 14. *Workingspace* selanjutnya ditunjukkan oleh kemiringan *platform* sebesar μ yang disebut juga dengan sudut *inklinasi*.



Gambar 14. Pengukuran *workingspace* mekanisme Paralel

- Sudut orientasi *redundant* (Φ)
- Sudut kemiringan *inklinasi* (μ)

Pada pengukuran *workingspace* diperoleh satu derajat kebebasan berlebih yang disebut dengan *redundant* (Φ) yaitu perputaran mekanisme paralel dengan arah tegak lurus permukaan *platform*. Sudut *redundant* ini nantinya akan berpengaruh terhadap capaian maksimum sudut *inklinasi* pada mekanisme paralel. Hasil pengukuran *workingspace* prototipe mekanisme paralel 3-dof URU tipe *spherical* disajikan oleh grafik yang terdapat pada Gambar 15.



Gambar 15. *Workingspace* prototipe mekanisme paralel 3-dof URU

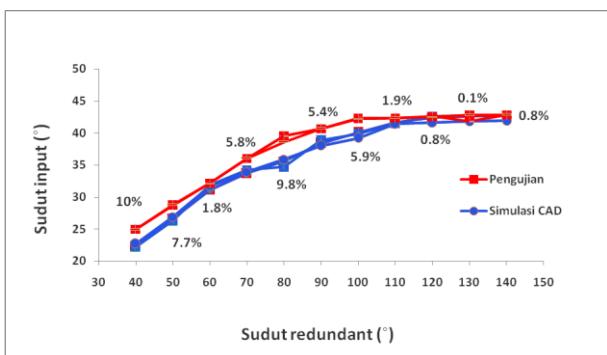
Pada Gambar 15 dapat dilihat hubungan antara *workingspace* dengan sudut *redundant* (Φ), dimana pada sudut *redundant* (Φ) bernilai minimum sebesar 40° , maka *workingspace* yang diperoleh relatif kecil seharga 33° . Hal ini karena pada saat sudut *redundant* bernilai minimum, maka mekanisme berada dekat dengan kondisi singularnya. Selanjutnya ketika sudut *redundant* (Φ) bernilai sebesar 140° maka *workingspace* mekanisme paralel tetap relatif kecil senilai 7.6° . Hal ini karena pada saat sudut *redundant* bernilai besar mobiliti rantai kinematik dibatasi oleh interferensi antar komponen mekanik rantai kinematik. *Workingspace* terbaik yang mampu dicapai oleh *platform* berada dalam rentang sudut 54° hingga 80° dengan sudut *redundant* seharga 50° hingga 100° .

Evaluasi *compensatable error* (kesalahan yang dapat dikompensasi)

Pada saat pengukuran *workingspace* mekanisme paralel, juga diukur sudut input yang berada pada joint aktif. Nilai sudut input tersebut diwakili oleh $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Pada orientasi tertentu, nilai sudut input $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ idealnya harus sama, karena semua rantai kinematik dirancang dengan bentuk yang simetri dan identik. Namun karena adanya kesalahan bentuk geometri dan dimensi yang bersumber dari proses manufaktur, maka perbedaan nilai ketiga sudut input tidak bisa dihindari. Perbedaan sudut input tersebut selanjutnya disebut dengan *compensatable errors*.

Compensatable errors pada joint aktif θ_{li} ($i = 1, 2, 3$) berbeda untuk setiap posisi pengukuran. Pada pengujian dengan posisi *platform* horizontal ($\mu=0$) dan sudut *redundant* bervariasi diperoleh *compensatable errors* minimum sebesar $0,1^\circ$ dan maksimum senilai 1° . Bila dibandingkan dengan simulasi program Autodesk Inventor 2013, nilai kesalahan input pada joint aktif yang diperoleh relatif lebih baik, yaitu rata-rata mendekati nilai

nol. Hal ini karena pada simulasi Autodesk Inventor 2013 semua komponen mekanik mekanisme paralel didesain sebaik mungkin sehingga kesalahan dimensi dan geometri penyebab terjadinya *compensatable errors* dapat diabaikan. Perbandingan nilai sudut input hasil pengujian dengan hasil simulasi disajikan pada Gambar 16.



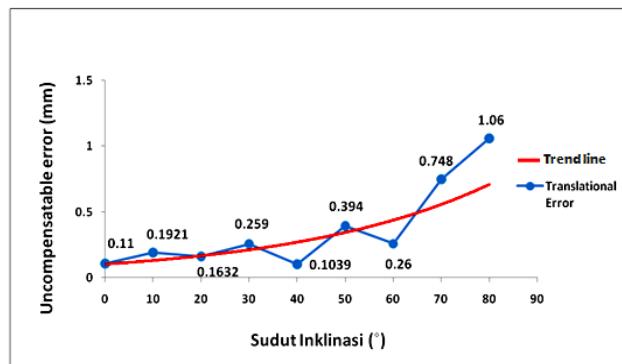
Gambar 16. Grafik perbandingan *compensatable error*

Evaluasi Kesalahan yang tidak dapat dikompensasi (*uncompensatable error*)

Disamping kesalahan sudut input, pada penelitian ini juga diukur pergeseran titik pusat putar (*translational error*) yang terjadi pada mekanisme paralel. Pada dasarnya *translational error* bersumber dari kesalahan bentuk desain rantai kinematik. Namun dalam pembuatannya kesalahan dimensi dan geometri yang berasal dari proses manufaktur juga mempengaruhi terjadinya gerak translasi pada pusat putar robot. *Translational error* ini tidak dapat dikompensasi dengan proses kalibrasi biasa sehingga dikenal dengan *uncompensatable error*. Untuk mengatasinya hanya dapat dilakukan dengan cara memperbaiki kembali bentuk desain mekanisme paralel yang sudah ada.

Dari hasil pengujian, nilai *uncompensatable error* selalu bervariasi untuk setiap orientasi *platform*, hal ini dipengaruhi oleh nilai sudut *redundant* dan sudut *inklinasi*. Pada pengukuran

uncompensatable error dengan sudut *redundant* (ϕ) konstan sebesar 70° dan sudut *inklinasi* (μ) bervariasi dari 0° hingga 80° diperoleh hasil pengukuran seperti pada grafik yang terdapat Gambar 17.



Gambar 17. Grafik *uncompensatable error* vs sudut *inklinasi*

Dari grafik dapat diketahui bahwa pergeseran titik pusat putar (*uncompensatable error*) berbanding lurus dengan sudut *inklinasi* pada *platform*. Hal ini dapat dilihat ketika sudut *inklinasi* bernilai maksimum 80° , maka nilai penyimpangan titik pusat putar juga maksimum sebesar 1,06 mm. Kondisi ini terjadi karena pada saat sudut *inklinasi* bernilai maksimum, maka kemiringan *platform* mendekati kondisi *singular* nya. Ini menyebabkan kesalahan dimensi dan geometri mekanisme paralel menjadi lebih sensitif sehingga *uncompensatable error* pada pusat putar robot menjadi relatif besar. Sedangkan pada saat sudut *inklinasi* bernilai 40° , *platform* mekanisme paralel berada pada area *workspace* yang jauh dari kondisi singular sehingga sensitifitas kesalahan dimensi dan geometri robot juga berkurang. Akibatnya *uncompensatable error* yang terjadi pada mekanisme relatif lebih kecil yaitu sebesar 0.103 mm.

Dari beberapa penelitian sebelumnya telah dinyatakan bahwa *uncompensatable error* merupakan bentuk kesalahan yang tidak dapat diperbaiki dengan sistem kalibrasi biasa, karena bersumber dari bentuk desain rantai kinematik. Namun

kesalahan ini masih bisa diminimalisir dengan cara memvariasikan sudut *redundant* pada saat *platform* berada pada kemiringan tertentu. Pada dasarnya *uncompensatable error* merupakan fungsi dari sudut *redundant*, sehingga perubahannya akan mempengaruhi nilai *uncompensatable error* yang terjadi pada titik pusat putar mekanisme.

Kesimpulan

Dari penelitian sensitifitas kesalahan dimensi dan geometri struktur mekanisme paralel 3-dof tipe *spherical* terhadap *compensatable errors* dan *uncompensatable errors* ini, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Dari hasil pengukuran terhadap prototipe mekanisme paralel diperoleh kesalahan dimensi akibat proses manufaktur dan *assembly* yaitu kesalahan konstanta kinematik β maksimum sebesar $0,5^\circ$, dan γ maksimum senilai $0,5^\circ$. Selain itu juga diperoleh ketidak sejajaran sumbu join revolut diantara ketiga rantai kinematik terbesar seharga $0,15^\circ$ serta ketidak sesumbuan rantai kinematik terjauh sebesar $0,1^\circ$.
2. Kesalahan dimensi dan geometri menyebabkan terjadinya *compensatable errors* pada mekanisme paralel yaitu *error* berupa perbedaan sudut input $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ pada join aktif maksimum sebesar 1° .
3. Disamping itu, kesalahan dimensi juga menyebabkan terjadinya *uncompensatable errors* pada mekanisme paralel yaitu pergeseran titik pusat putar ketika *platform* berotasi. Harga *uncompensatable errors* maksimum diperoleh sebesar 1,06 mm dengan sudut *inklinasi* senilai 80° , dimana pada kondisi tersebut struktur mekanisme paralel berada sangat dekat dengan kondisi singularnya.

Referensi

- [1] M. Petko, G. Karpel, Virtual Prototyping of a New Parallel Robot for Milling, link springer journal. Poland, 2006.
- [2] M. Hu and J.S Shi, The Kinematic Analyses of the 3-DOF Parallel Machine Tools, International Journal of Automation and Computing, Shenyang, 2011.
- [3] A. Rezaei and A. Akbarzadeh, Position and stiffness analysis of a new asymmetric 2PRR–PPR parallel CNC machine, Advanced Robotics journal, Iran, 2013
- [4] Huda, Juprizal, Disain Alat Bantu Pengaturan Orientasi Benda Kerja Pada Proses Pemesinan Berbasis Mekanisme Paralel, Proceeding SNTTM XI, Yogyakarta, 2012
- [5] N. Yanbing and Wu, Dimensional Synthesis of a 3-DOF Parallel Manipulator with Full Circle Rotation, Chinese Journal Of Mechanical Engineering vol 28 no 4, China, 2015
- [6] X.J. Liu and A. Bonev, Orientation Capability, Error Analysis, and Dimensional Optimization of Two Articulated Tool Heads With Parallel Kinematics, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 130, 2008
- [7] 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.