

Pengaruh Variasi Sudut *Redundant* terhadap Pergeseran Titik Pusat Putar (*Uncompensatable Error*) Mekanisme Paralel 3-dof Rotasi Murni URU.

Syafri, ST^{1,a*}, Dr. Eng Syamsul Huda^{2,b}, Prof. Dr -Ing Mulyadi Bur^{3,c}

¹Jurusan Teknik Mesin Universitas Riau Kampus Bina Krida Jln. H. Soebrantas km 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru, Riau, Indonesia 28293.

² Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat Indonesia 25163.

Email: ^aPrie_00m022@yahoo.com, ^bSyamsulhuda@ft.unand.ac.id, ^cmulyadibur@ft.unand.ac.id

Abstrak

Mekanisme paralel URU rotasi murni didisain untuk diaplikasikan sebagai pengontrol orientasi pahat pada mesin perkakas. mekanisme ini disusun oleh *base*, *platform* dan tiga rantai kinematik yang menghubungkan *base* dan *platform* tersebut. Pada penelitian ini dikaji pengaruh kesalahan geometri dan dimensi terhadap unjuk kerja gerak *platform* berupa kesalahan translasi dan rotasi yang difokuskan kepada *compensatable error* dan *uncompensatable error*.

Terkait dengan aplikasi sebagai pengontrol orientasi, *platform* mempunyai satu derajat kebebasan berlebih berupa gerak rotasi yang memiliki arah tegak lurus bidang *platform* yang dikenal dengan derajat kebebasan berlebih (*redundant degree of freedom*). Derajat kebebasan berlebih ini akan digunakan untuk memperbaiki postur mekanisme paralel agar dapat mengurangi efek kesalahan geometri dan dimensi terhadap *compensatable error* dan *uncompensatable error*.

Dari hasil pengujian diperoleh kesimpulan bahwa pengaturan derajat kebebasan berlebih dapat digunakan untuk mereduksi *compensatable error* dan *uncompensatable error* yang besarnya bervariasi terhadap kemiringan *platform*. Untuk sudut kemiringan *platform* 20°, 40°, dan 60° diperoleh sudut redundant yang optimal senilai 60°, 80°, dan 70° dan berturut-turut dengan tingkat kesalahan sebesar 0,121 mm, 0,1 mm, dan 0,25 mm.

Kata kunci : Mekanisme paralel, *compensatable error*, *uncompensatable error*, kinematik

1. Latar Belakang

Pada umumnya mesin perkakas konvensional dibuat berdasarkan konfigurasi seri. Dengan konfigurasi ini untuk menghasilkan kekakuan yang tinggi diperlukan dimensi komponen bergerak yang besar, hal ini berakibat terhadap respon dinamik dan kestabilan yang rendah. Disamping itu mesin-mesin perkakas konvensional secara umum hanya dapat melakukan pergerakan translasi, akibatnya dalam pembuatan produk dengan bentuk tertentu harus dibutuhkan *jig* dan *fixture* sehingga ongkos produksi jadi bertambah.

Dalam rangka mengurangi keterbatasan mesin perkakas konvensional, maka perlu dicari alternatif lain agar mesin perkakas konvensional mampu berperilaku seperti mesin perkakas modern (*Five-axis machine tool*) [1]. Untuk itu dirancang dan dimanufaktur sebuah mekanisme paralel 3-dof rotasi murni yang nantinya dapat digunakan untuk menambahkan modus gerak pahat atau benda kerja berupa gerak rotasi

sehingga orientasi pahat atau benda kerja dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan [2].

Dalam aplikasinya, unjuk kerja mekanisme paralel rotasi murni dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah pergeseran titik pusat putar ketika *platform* mengalami perpindahan. Idealnya titik pusat putar tidak boleh berpindah, karena titik tersebut merupakan referensi yang menunjukkan tingkat ketelitian dan kepresisian gerak mekanisme paralel. Namun karena adanya keterbatasan bentuk disain rantai kinematik serta kekurangan pada saat proses manufaktur, maka kesalahan tersebut tidak dapat dihindari. Kesalahan ini selanjutnya tidak dapat diperbaiki dengan sistem kalibrasi biasa (*uncompensatable error*) [3], hanya dapat diperbaiki dengan cara merevisi bentuk disain rantai kinematik dan diproduksi lagi dengan mesin yang lebih teliti dan presisi. Hal ini jelas membutuhkan waktu dan biaya tambahan.

Terkait dengan aplikasi mekanisme paralel sebagai pengontrol orientasi, maka *platform*

memiliki satu derajat kebebasan berlebih. Dalam penelitian ini akan ditinjau pemanfaatan derajat kebebasan berlebih ini untuk mereduksi *uncompensatable error* atau kesalahan yang tidak dapat dikompensasi melalui pengontrolan input gerak.

2. Tinjauan Pustaka

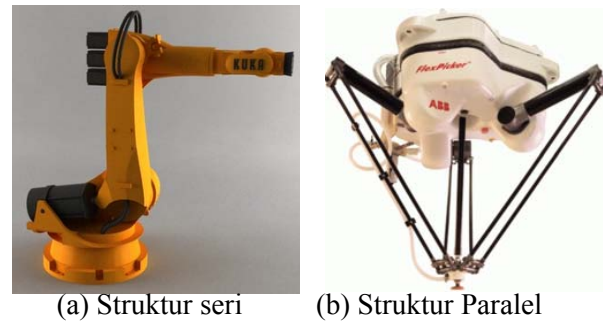
2.1 Mekanisme seri dan paralel

Mekanisme seri adalah konfigurasi yang disusun oleh gabungan beberapa benda kaku yang disatukan oleh sambungan (*joint*) sehingga membentuk sebuah rantai kinematik. Pada mekanisme seri untuk menghasilkan kekakuan yang tinggi diperlukan dimensi komponen mekanik yang besar, sehingga momen lentur komponen rantai kinematik daya motor yang dibutuhkan menjadi lebih besar. Disamping itu juga mengakibatkan besarnya inersia komponen bergerak sehingga kestabilan mekanisme ketika dioperasikan pada kecepatan tinggi menjadi rendah.

Di lain pihak Mekanisme paralel didefinisikan sebagai mekanisme dimana batang output (*platform*) dan batang diam (*base*) dihubungkan oleh beberapa rantai kinematik yang disusun secara paralel. Dengan konfigurasi ini untuk menghasilkan kekakuan yang tinggi rantai-rantai kinematik dapat dibuat lebih ramping sehingga inersia komponen bergerak dan daya motor yang dibutuhkan menjadi lebih kecil. Hal berpengaruh positif terhadap kestabilan struktur jika konfigurasi ini dioperasikan pada kecepatan tinggi. Namun pada konfigurasi paralel ini, susunan tiga rantai kinematik berpotensi menyebabkan terjadinya interferensi antar komponen rantai kinematik, sehingga *workingspace* yang dihasilkan relatif lebih kecil dibandingkan dengan konfigurasi seri.

2.2. Penerapan mekanisme seri dan paralel pada mesin perkakas

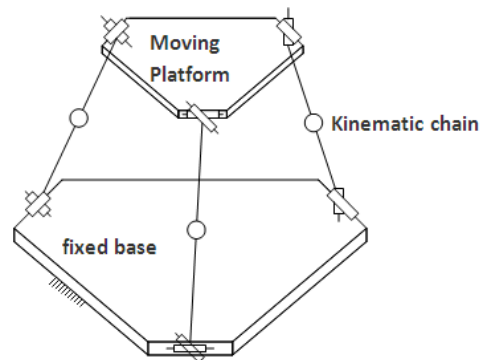
Secara umum mesin perkakas konvensional disusun oleh konfigurasi mekanisme seri, sehingga dimensi komponen bergerak cenderung besar dan kekakuannya relatif rendah. Sebagaimana diketahui bahwa massa yang mampu ditopang oleh komponen bergerak mesin dengan konfigurasi seri hanya 10% dari total massa komponen bergerak. Di sisi lainnya pada mesin perkakas dengan konfigurasi paralel untuk menghasilkan kekakuan yang sama batang-batang penyusun rantai kinematik dapat dibuat lebih ramping. Secara visual contoh mesin dengan kedua konfigurasi diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Mekanisme seri dan paralel [4]

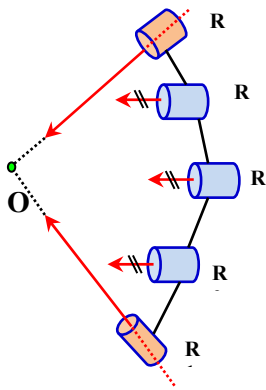
2.3 Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni

Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni merupakan sebuah struktur yang terdiri dari gabungan batang diam (*fix base*), rantai kinematik (*kinematic chain*) dan batang output (*moving platform*) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Dalam aplikasinya mekanisme ini dapat digunakan sebagai pengontrol orientasi pahat dan benda kerja.



Gambar 2 Mekanisme paralel 3-dof rotasi murni.

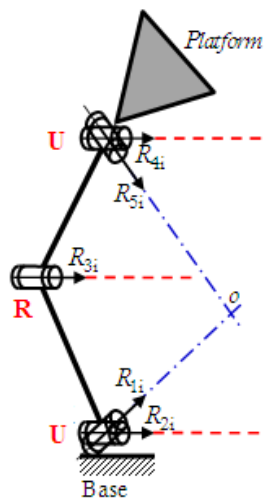
Agar dihasilkan output berupa gerak rotasi murni, maka dipilih bentuk konfigurasi ketiga rantai kinematik sehingga gerak translasi *platform* dapat dihilangkan. Secara umum satu rantai kinematik mekanisme paralel 3-dof disusun oleh lima join revolute (5R) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Hal ini agar memenuhi persamaan Kutzbach yang mendefinisikan jumlah derajat kebebasan sebuah mekanisme.



Gambar 3 Mekanisme seri dan paralel

Selanjutnya kelima join (5R) tersebut disusun sedemikian rupa sehingga terbentuk dua kelompok arah sumbu join. Pertama kelompok sumbu sejajar yang akan mengatur arah gaya yang berfungsi sebagai konstrain gerak translasi pada sumbu putar. Berikutnya sumbu berpotongan, dimana titik perpotongannya digunakan untuk mendefinisikan lokasi titik pusat putar *platform*.

Untuk penyederhanaan jumlah komponen mekanik bentuk rantai kinematik 5R selanjutnya disederhanakan menjadi *universal-revolute-universal* (URU) seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Penyederhanaan bentuk rantai kinematik ini juga memberikan kemudahan pada proses perakitan.



Gambar 4 Konfigurasi rantai kinematik URU

2.4 *Workspace* mekanisme paralel 3-dof rotasi murni

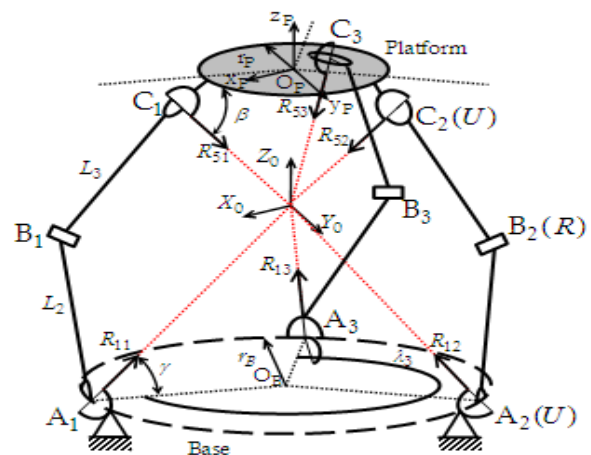
Workspace merupakan jangkauan maksimum yang mampu dicapai oleh *platform* mekanisme paralel. Jangkauan tersebut dibatasi oleh kondisi singular dan terjadinya interferensi antar komponen mekanik antara satu rantai kinematik dengan rantai kinematik lainnya.

Workspace dapat dievaluasi dengan uji statik yang diawali dengan pengukuran orientasi

dan dilanjutkan dengan pengujian kemiringan *platform* robot. Dari hasil pengukuran *workspace* mekanisme paralel ditunjukkan oleh kemiringan sudut *platform* (μ) yang disebut dengan sudut *inklinasi*. pada pengukuran tersebut juga diperoleh satu derajat kebebasan berlebih yang disebut dengan *redundant* (Φ) yaitu perputaran mekanisme paralel dengan arah tegak lurus bidang *platform* robot. Besar kecilnya *workspace* pada mekanisme paralel sangat dipengaruhi oleh pemilihan konstanta kinematik yang menyusun struktur robot.

2.5 Konstanta kinematik

Dalam perancangan mekanisme paralel diperlukan analisis dimensi untuk menentukan konstanta kinematik agar dihasilkan *workspace* dan kekakuan yang optimum. Sebuah mekanisme paralel 3-dof rotasi murni URU mempunyai 6 konstanta kinematik [5] seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5 konstanta kinematik 3-URU

Keenam konstanta kinematik tersebut adalah (a) L_2, L_3 yaitu panjang batang rantai kinematik yang dihitung berdasarkan capaian *workspace* 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 mekanisme. Keenam konstanta kinematik dipilih berdasarkan analisa indek dua kondisi singular yang terjadi pada mekanisme paralel.

2.6 Analisa kondisi singulariti

Singulariti pada mekanisme paralel menyatakan kondisi dimana gerakan *platform* tidak dapat dikontrol oleh penggerak yang disebut dengan *actuation singularity* dan gerakan translasi *platform* tidak dapat dibatasi oleh tiga rantai kinematik yang disebut dengan *constraint singularity*. Pada *actuation singularity* evaluasi dilakukan berdasarkan hubungan antara kecepatan input, $\dot{\theta}$ dan output, \dot{x} , sedangkan pada *constraint singularity* evaluasi dilakukan berdasarkan hubungan gaya konstrain, f dan gaya luar, F , sehingga diperoleh hubungan seperti yang terdapat pada persamaan (1) dan (2)

$$\dot{x} = J_a \dot{\theta} \quad (1)$$

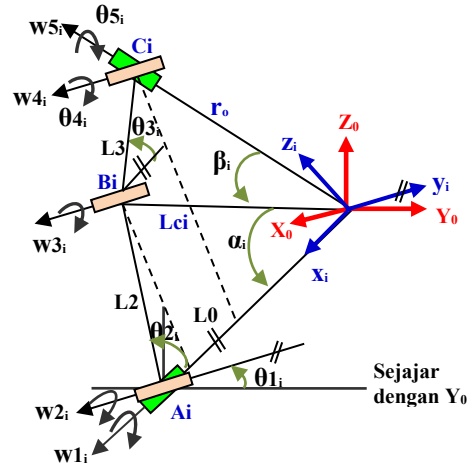
$$F = J_c f \quad (2)$$

J_q, J_x adalah matriks 3x3 yang akan dievaluasi determinannya untuk menentukan kondisi singular. Untuk itu dibuatkan suatu indeks yang mewakili dua kondisi singular yang nantinya digunakan memilih konstanta kinematik seperti yang dinyatakan pada persamaan (3). Dua kondisi singular pada mekanisme paralel dapat dianalisis dengan metode *screw* dan *reciprocal screw*

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

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

Metode *screw* dapat digunakan untuk menganalisa kekakuan dan transmisibilitas yang terjadi pada struktur paralel. Dari analisa tersebut dapat dideteksi kondisi singular yang terjadi pada struktur robot. Pada Gambar 6 diperlihatkan sistem *screw* dari rantai kinematik URU. Arah *screw* untuk setiap joint dinotasikan dengan w_{ji} dimana i menunjukkan rantai kinematik ke- i dan j notasi untuk joint ke- j



Gambar 6. Perpindahan system koordinat $O-x_i, y_i, z_i$ dan joint batang ke- i

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

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

dimana

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

dan

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

dengan ψ menyatakan sudut pergeseran kemiringan universal joint pada *base* dan *platform* dan θ_{ij} adalah sudut input. Dari Gambar 6 dapat ditentukan persamaan *screw* untuk lima joint pada masing-masing batang terhadap sistem koordinat $O-x_i, y_i, z_i$

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

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 persamaan (5) maka didapatkan *reciprocal screw* join tersebut yaitu

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

Bila disubsitusikan ke dalam persamaan (4), maka nilai *reciprocal screw* ($S_{R1}^{(1)}$) pada persamaan (6) dapat dinyatakan dengan persamaan (7)

$$S_{R1}^{(0)} = [s\psi_s\theta_{11} \ c\theta_{11} \ c\psi_s\theta_{11} \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (7)$$

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

$$S_{Ri}^{(0)} = \begin{bmatrix} R(\lambda_i) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R(\lambda_i) \end{bmatrix} S_{R1}^{(0)} \quad (8)$$

$0_{3 \times 3}$ adalah matrix nol dengan ukuran 3x3. Apabila disubsitusikan nilai $\lambda_1 = -2\pi/3$ rad dan $\lambda_2 = -4\pi/3$ rad ke dalam persamaan (8), maka diperoleh nilai *reciprocal screw* rantai kinematik kedua ($S_{R2}^{(0)}$) dan ketiga ($S_{R3}^{(0)}$)

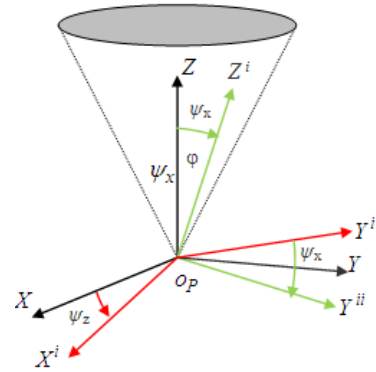
$$S_{R2}^{(0)} = \begin{bmatrix} S_{R2}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2}c\theta_{12} - \frac{1}{2}s\psi_s\theta_{12} - \frac{1}{2}c\theta_{12} + \frac{\sqrt{3}}{2}s\psi_s\theta_{12} & c\psi_s\theta_{12} \end{bmatrix}^T$$

$$S_{R3}^{(0)} = \begin{bmatrix} S_{R3}^{(0)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}c\theta_{13} - \frac{1}{2}s\psi_s\theta_{13} - \frac{1}{2}c\theta_{13} + \frac{\sqrt{3}}{2}s\psi_s\theta_{13} & c\psi_s\theta_{13} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

3. Metodologi Penelitian

3.1 Interpretasi Sudut Rotasi Platform

Interpretasi platform menunjukkan gerak output yang mampu dihasilkan oleh platform mekanisme paralel. Output tersebut berupa orientasi platform yang digambarkan dengan rotasi berurut yang diwakili oleh tiga parameter ψ_z , ψ_x dan φ seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 7. Ketiga parameter input tersebut mewakili rotasi berurut pada sistem koordinat Z-X-Z.



Gambar 7. Parameter orientasi platform

Dari Gambar 7 diketahui bahwa perpindahan platform akibat rotasi berurut platform terhadap sumbu Z sebesar sudut ψ_z , dan rotasi pada sumbu X sebesar sudut ψ_x , serta rotasi pada sumbu Z sebesar sudut φ , dapat dinyatakan oleh Persamaan (10), (11), (12)

$$Rot(z, \psi_z) = \begin{bmatrix} C\psi_z & -S\psi_z & 0 \\ S\psi_z & C\psi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Rot(x, \psi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\psi_x & -S\psi_x \\ 0 & S\psi_x & C\psi_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

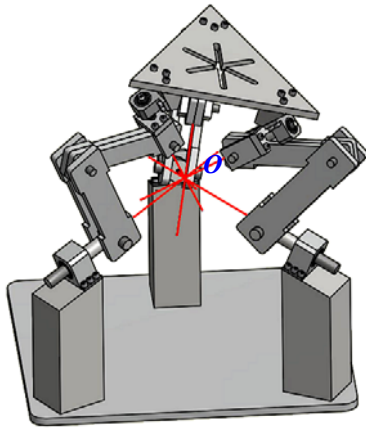
$$Rot(z, \varphi) = \begin{bmatrix} C\varphi & -S\varphi & 0 \\ S\varphi & C\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kombinasi ketiga rotasi berurut menghasilkan output berupa orientasi platform yang merupakan perkalian ketiga matriks yang terdapat pada Persamaan (10), (11), dan (12) sehingga diperoleh Persamaan (13)

$$R = R_{Z\psi_z} R_{X\psi_x} R_{Z\varphi} = \begin{pmatrix} c\psi_z c\varphi & -c\psi_z s\varphi & s\varphi s\psi_x \\ -s\psi_z s\varphi c\psi_x & -s\psi_z c\varphi c\psi_x & s\varphi c\psi_x \\ s\psi_z c\varphi & -s\psi_z s\varphi & -c\psi_z s\psi_x \\ +c\psi_z s\varphi c\psi_x & +c\psi_z c\varphi c\psi_x & -c\psi_z c\psi_x \\ s\varphi s\psi_x & c\varphi s\psi_x & c\psi_x \end{pmatrix} \quad (13)$$

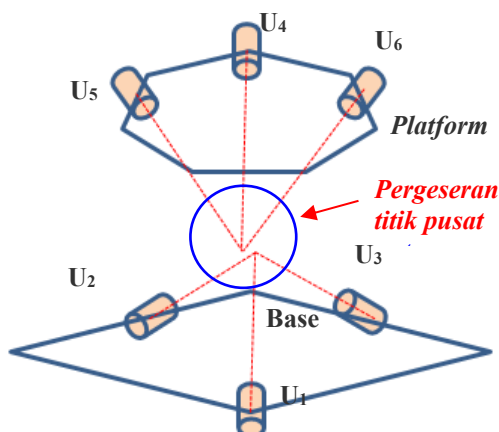
3.2 Gerak translasi titik pusat putar (*uncompensatable error*) mekanisme paralel 3-dof rotasi murni

Titik pusat putar mekanisme paralel merupakan titik yang terbentuk dari perpotongan keenam sumbu join universal pada rantai kinematik seperti diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Titik pusat putar teoritik

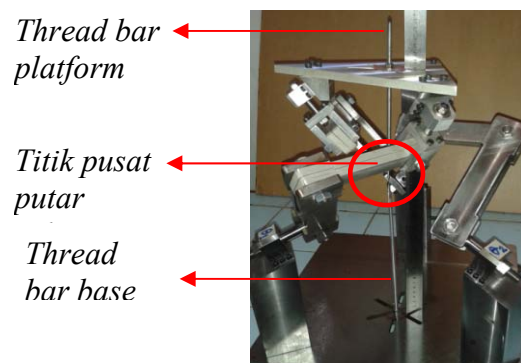
Idealnya titik pusat putar tidak boleh bergeser pada saat *platform* mengalami perpindahan, karena titik tersebut merupakan referensi yang dijadikan acuan untuk melihat ketelitian dan kepresisian gerak *platform*. Namun karena adanya keterbatasan yang terjadi pada tahapan disain dan manufaktur, maka pergeseran titik pusat putar mekanisme paralel tidak dapat dihindarkan. Secara teoritis pergeseran titik pusat putar diilustrasikan oleh Gambar 9. Kesalahan ini selanjutnya tidak dapat dikompensasi dengan sistem kalibrasi biasa, hanya dapat diperbaiki dengan cara merevisi bentuk disain konfigurasi rantai kinematika.



Gambar 9. Pergeseran Titik pusat putar teoritik

3.3 Pengukuran titik pusat putar prototip mekanisme paralel secara aktual

Penentuan titik pusat putar prototip mekanisme paralel 3-dof rotasi murni secara aktual dilakukan dengan cara memasang *thread bar* pada titik tengah *base* dan *platform* robot seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10. Titik pertemuan kedua ujung *thread bar* berikutnya disebut sebagai pusat robot yang berfungsi sebagai titik referensi ketika *platform* mengalami transaformasi.

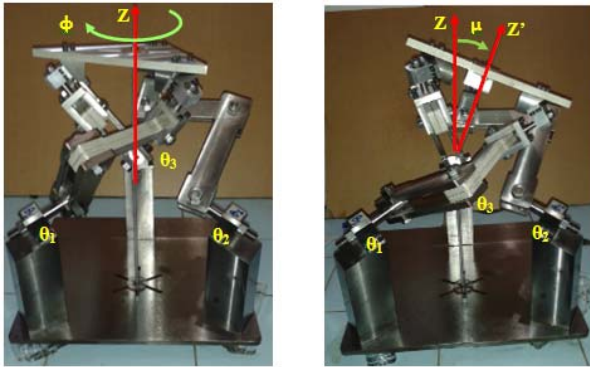


Gambar 10. Penentuan titik pusat secara aktual

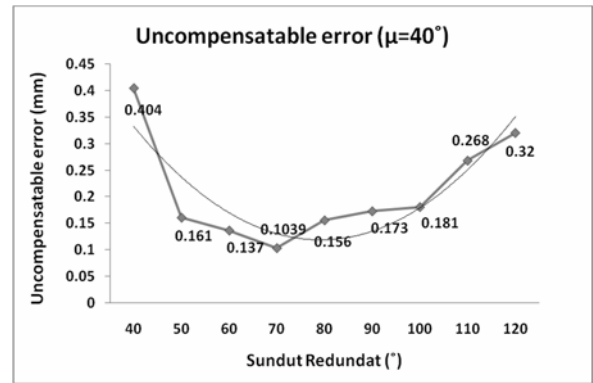
Ada dua bentuk kesalahan yang terjadi ketika menentukan pusat putar robot secara aktual yaitu ketidak sejajaran pusat putar terhadap *platform* dan penyimpangan ketegak lurusan pusat putar terhadap *platform*. Kedua kesalahan tersebut nantinya dapat diminimalisir dengan cara mengatur ulang posisi dan panjang kedua *thread bar* yang terpasang

3.4 Pengukuran *uncompensatable error* dengan variasi sudut redundan

Pengujian dilakukan dengan cara memutar *platform* dengan sudut *redundant* Φ dan diikuti dengan memiringkannya dengan sudut *inklinasi* μ seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 11. Pengujian dilakukan secara berkelanjutan dimulai dari sudut inklinasi 10° dan dilanjutkan dengan kelipatan 10° hingga nilai maksimum 60° . Untuk satu posisi kemiringan sudut divariasikan sudut *redundant* nya mulai dari 40° dilanjutkan dengan kelipatan 10° hingga mencapai kondisi singulariti.



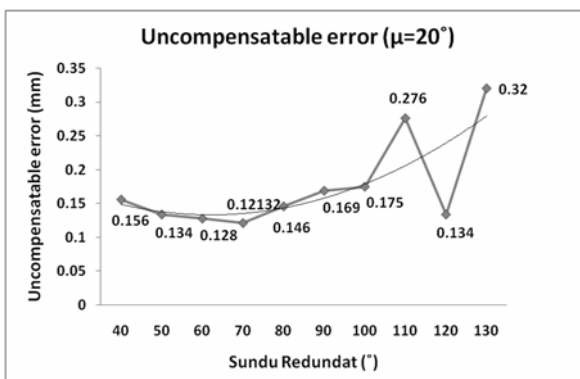
Gambar 11. Pengukuran *uncompensatable error* dengan variasi sudut redundant



Gambar 13. Grafik hasil pengukuran dengan kemiringan sudut 40°

4. Hasil dan Pembahasan

Dari percobaan yang telah dilakukan dicuplik beberapa hasil yang telah diperoleh. Pada pengukuran dengan kemiringan sudut 20° diperoleh hasil seperti yang ditampilkan pada Gambar 12. Dari grafik dapat dilihat bahwa, *platform* dengan kemiringan 20° mampu mencapai sudut *redundant* 130°. Pada pengukuran ini pengaruh variasi sudut redundant terhadap fluktuasi nilai *uncompensatable error* masih relatif kecil, hal ini dilihat dari trend grafik yang cenderung linier. Untuk hasil terbaik diperoleh *uncompensatable error* sebesar 0,12 mm dan maksimum sebesar 0,32 mm.

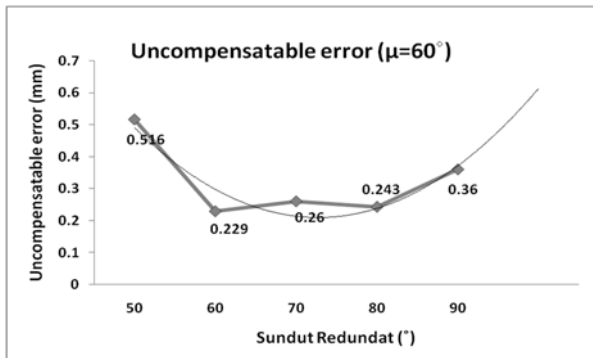


Gambar 12. Grafik hasil pengukuran dengan kemiringan sudut 20°

Pada pengukuran dengan kemiringan sudut (μ) 40° terjadi penurunan sudut putar maksimum yang mampu dicapai oleh *platform* yaitu menjadi 120°. Namun perubahan nilai *uncompensatable error* akibat variasi sudut *redundant* sudah sangat terlihat seperti yang ditampilkan pada Gambar 13.

Pada grafik dapat dilihat ketika *platform* diputar dengan sudut *redundant* 40° dan 50° nilai *uncompensatable error* masih relatif tinggi yaitu sebesar 0,4 mm dan 0,16 mm. Hal ini karena pada kondisi tersebut mekanisme paralel berada dekat dengan kondisi singularnya. Nilai *uncompensatable error* kemudian cenderung turun pada saat sudut *redundant* berada pada posisi 60° hingga 80° yaitu berturut-turut sebesar 0,13 mm, 0,10 mm dan 0,15 mm, hal ini karena pada saat sudut *redundant* berada pada posisi 60 hingga 80, mekanisme paralel berada pada area *workingspce* yang jauh dari kondisi singularnya. Kemudian pada saat sudut *redundant* berada pada sudut 90° hingga 120° nilai *uncompensatable error* kembali meningkat yaitu sebesar 1,7 mm, 1,8 mm, 0,26 mm dan maksimum sebesar 0,32 mm. Hal ini karena pada kondisi tersebut struktur mekanisme paralel berada dekat dengan kondisi singularnya yaitu terjadi interferensi antara komponen mekanik pada tiga rantai kinematik .

Pada pengukuran dengan kemiringan sudut 60° diperoleh hasil seperti yang ditampilkan pada Gambar 14. Dari grafik dapat dilihat bahwa sudut putar yang mampu dicapai oleh *platform* menurun hingga sudut *redundant* 90. Selanjutnya diperoleh nilai *uncompensatable error* maksimum diperoleh sebesar 0,5 mm dan nilai minimum sebesar 0,2 mm. pada pengukuran ini dapat dilihat bahwa nilai *uncompensatable error* cenderung menurun ketika sudut putar *platform* ditingkatkan.



Gambar 14. Grafik hasil pengukuran dengan kemiringan sudut 60°

Kesimpulan

Dari hasil evaluasi unjuk kerja gerak *platform* yang terkait dengan gerak translasi titik pusat putar maka dapat disimpulkan hal berikut ini.

1. Pengontrolan derajat kebebasan berlebih dapat mereduksi *uncompensatable error*.
2. Besar sudut *redundant* yang optimal bergantung pada kemiringan *platform*. Untuk sudut kemiringan *platform* 20° , 40° , dan 60° diperoleh sudut *redundant* yang optimal senilai 60° , 80° , dan 70° dan berturut-turut dengan tingkat kesalahan sebesar 0,121 mm, 0,1 mm, dan 0,25 mm.

Referensi

- [1] Huda dan Jufrizal, 2011, Disain Alat Bantu Pengaturan Orientasi Benda Kerja Pada Proses Pemesinan Berbasis Mekanisme Paralel, SNTTM UGM, Yogyakarta
- [2] Syafri dan Huda, 2012, Analisis Pengaruh Kesalahan Geometri Pada Kinematika Mekanisme Robot Paralel 3-Dof Rotasi Murni, SINTERIN UNAND. Padang
- [3] 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.
- [4] (www.turbosquid.com)
- [5] Jufrizal, 2013, Rancang bangun prototype mekanisme paralel rotasi murni berbasis join revolot dan universal, Dinamika Struktur, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas, Padang.
- [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.