

Terbit online pada laman web jurnal : <http://metal.ft.unand.ac.id>**METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal**

| ISSN (Print) 2598-1137 | ISSN (Online) 2597-4483 |



Artikel Penelitian

Kinematik *Forward* dan Analisis Kesalahan Pada Kesejajaran Sumbu Join Mekanisme Paralel Rotasi Murni 3-URU

Syamsul Huda^a, Ilhami Fahmi^b, Mulyadi Bur^a

^aJurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas Padang, 25163 Indonesia

^bAlumni Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas Padang, 25163 Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 03 Maret 2020

Revisi Akhir: 03 Maret 2020

Diterbitkan Online: 05 April 2020

KATA KUNCI

Mekanisme paralel

Kinematik *forward*

Analisis kesalahan

Mekanisme rotasi murni

KORESPONDENSI

E-mail: syamsulhuda@eng.unand.ac.id

A B S T R A C T

In this paper we discussed the forward kinematic and constrain error of 3-URU parallel mechanism. The mechanism was composed of URU kinematic chain consisting of three parallel joint axes and two intersecting joint axes. The direction of parallel joint axis representing direction of force constraints acting on center of platform rotation. In this research was investigated the effect of error of direction of parallel joint axes on kinematic chains to the platform orientation and position of center of platform rotation. It is also developed the formulation of forward kinematic of the mechanism. The forward kinematic was carried out by taking account geometric constraint of platform motion which is derived analytically by using software Maple 16. On the other hand, the constraint error was evaluated using the CAD simulation Autodesk Inventor. Based on the result, it can be summarized that error of parallel joint axes produced significant effect on error of platform motion especially for location of the center of platform rotation which is classified as uncompensated error. The formulation of forward kinematic was successfully derived which is confirmed with inverse kinematic and CAD simulation.

1. PENDAHULUAN

Mekanisme paralel *spherical* merupakan mekanisme paralel yang mempunyai batang *output* (*platform*) yang dapat bergerak rotasi murni (*spherical*) [1]. Mekanisme ini mempunyai *workingspace* yang relatif besar dibandingkan dengan mekanisme paralel gerak terkopel seperti mekanisme paralel empat derajat kebebasan atau lebih. Secara umum mekanisme paralel rotasi murni ini disusun oleh tiga rantai kinematik, *base* dan *platform*.

Kajian terhadap mekanisme paralel *spherical* telah banyak dilakukan untuk berbagai fokus penelitian. Pada penelitian terkait dengan sintesis struktur rantai kinematik, lima join dasar yang terdiri dari

join revolute dan perismatik dimodifikasi menjadi tujuh buah alternatif rantai kinematik. Ketujuh alternatif rantai kinematik yang dapat dibentuk dari join dasar tersebut yaitu :

- a. 3-URU (*Universal Revolute Universal*)
 - b. 3-CRU (*Cylindrical Revolute Universal*)
 - c. 3-URC (*Universal Revolute Cylindrical*)
 - d. 3-UPU (*Universal Perismatik Universal*)
 - e. 3-CPU (*Cylindrical Perismatik Universal*)
 - f. 3-UPC (*Universal Perismatik Cylindrical*)
 - g. 3-CRC (*Cylindrical Revolute Cylindrical*)
- Masing-masing dari rantai kinematik tersebut mempunyai lima derajat kebebasan [2].

Pada penelitian ini dilakukan analisis kinematik *forward* pada mekanisme paralel tiga derajat kebebasan tipe *spherical* dan pengaruhnya terhadap *compensatable errors* dan *uncompensatable errors*. Hasil dari penelitian ini memperlihatkan bahwa kesalahan dimensi dan geometri menyebabkan terjadinya kesalahan yang dapat dikompensasi (*compensatable errors*) pada mekanisme paralel. Kesalahan dimensi juga menyebabkan terjadinya kesalahan yang tidak dapat dikompensasi (*uncompensatable errors*) pada mekanisme paralel yaitu pergeseran titik pusat putar ketika *platform* berotasi [3], [4]. Penelitian selanjutnya tentang evaluasi kesalahan dimensi konstanta kinematik terhadap respon perpindahan *platform* menggunakan simulasi inventor dan secara analitik untuk analisis posisi dengan menggunakan *invers kinematic*. Penelitian ini mendapatkan kesimpulan bahwa kesalahan konstanta kinematik berupa sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *platform* sangat sensitif terhadap konstrain gerak pusat putar *platform* dan kesalahan orientasi *platform* [5].

Pada penelitian ini akan dipelajari kinematik *forward* terhadap mekanisme 3-URU rotasi murni yang belum dikaji pada penelitian sebelumnya. Penelitian ini juga akan dibahas mengenai pengaruh kesalahan kesejajaran join terhadap konstrain geometri pada rantai kinematik. Kesejajaran sumbu join digunakan untuk membatasi gerak translasi pusat putar *platform*.

2. METODOLOGI

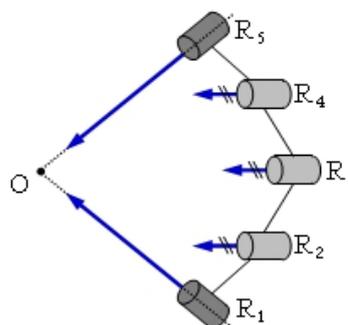
2.1. Mekanisme Spherical

Benda kaku yang bergerak *spherical* terjadi jika gerakan seluruh partikel pada benda kaku terbatas pada permukaan bola konsentris. Ketika benda kaku melakukan gerak *spherical* terdapat satu titik yang merupakan bagian dari benda yang tidak mengalami perpindahan translasi, titik ini disebut dengan pusat putar.

Gerakan seluruh partikel pada mekanisme *spherical* dapat dengan mudah dijelaskan oleh proyeksi radial pada permukaan bola. Join *revolute* adalah satu-satunya sambungan yang dapat

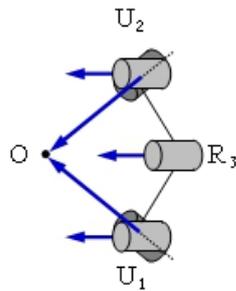
membangun mekanisme paralel *spherical*. Syarat untuk menghasilkan gerak *spherical* ini harus ada perpotongan sumbu sambungan pada satu titik dan gerakan dari rantai-rantai kinematiknya membentuk gerakan *spherical* terhadap posisi keseimbangannya.

Salah satu konfigurasi mekanisme paralel tiga derajat kebebasan *spherical* adalah RRRRR (5R). Join ini disusun sedemikian rupa sehingga terbentuk dua kelompok arah sumbu join, join disusun sejajar berfungsi sebagai penahan perpindahan translasi *platform*. Titik perpotongan yang dibentuk oleh sumbu berpotongan digunakan untuk mendefinisikan lokasi titik pusat putar *platform*. Salah satu bentuk konfigurasi rantai kinematik 5R diperlihatkan pada Gambar 1. Pada gambar tersebut terdapat titik sumbu join yang sejajar, dalam hal ini dinyatakan oleh R_4 , R_3 dan R_2 . Selanjutnya sumbu join yang berpotongan yaitu R_1 dan R_5 .



Gambar 1. Konfigurasi rantai kinematik 5R

Konfigurasi rantai kinematik 5R ini dapat disederhanakan menjadi rantai kinematik dengan struktur 3-URU seperti dapat dilihat pada Gambar 2. Dua sumbu join yang saling tegak lurus dan berdekatan RR diubah menjadi U (join universal). Dalam kasus ini R_4 dan R_5 diubah menjadi U_2 , R_1 dan R_2 diubah menjadi U_1 .



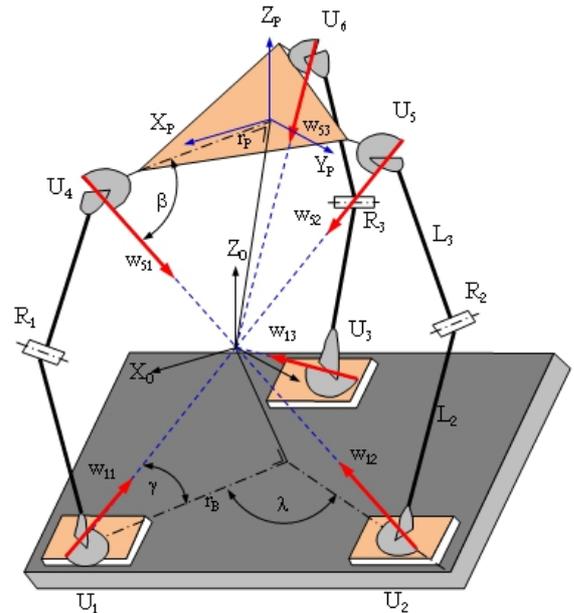
Gambar 2. Penyederhanaan bentuk rantai kinematik 5R menjadi URU

2.2. Konstanta Kinematik Mekanisme Paralel Rotasi Murni

Mekanisme paralel 3-DoF rotasi murni URU mempunyai enam konstanta kinematik seperti diperlihatkan pada Gambar 3, keenam konstanta tersebut adalah L_2 dan L_3 yang merupakan panjang rantai kinematik. Jari-jari *base* ditunjukkan r_B dan r_P adalah jari-jari *platform*. Sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *base* dilambangkan dengan γ , dan β merupakan sudut pemasangan rantai kinematik dengan *platform*.

Konstanta kinematik didapatkan melalui proses sintesis dimensi. Secara umum konstanta kinematik harus ditentukan agar mekanisme dapat beroperasi dengan baik sesuai dengan *workingspace* yang ingin dicapai. Ruang kerja pada robot paralel rotasi murni ditentukan oleh tiga parameter yang mewakili orientasi dari *platform*. Agar mekanisme beroperasi dengan baik untuk mencapai *workingspace* kondisi berikut harus terpenuhi

1. *Workingspace* hasil gerak mekanisme harus mencapai *workingspace* yang ditentukan.
2. Tidak ada titik singular dalam *workingspace*.

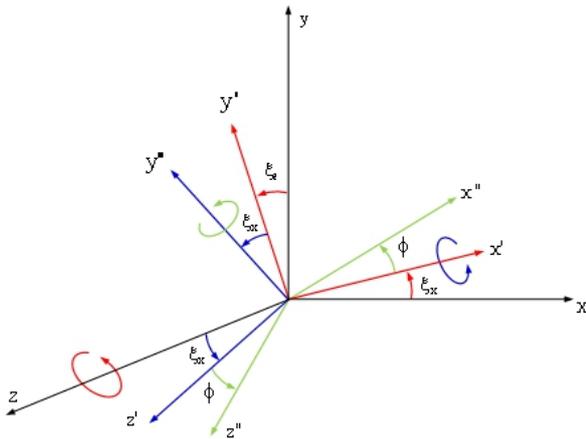


Gambar 3. Konstanta kinematik mekanisme paralel 3-URU

Sintesis dimensi dilakukan dengan tiga langkah, pertama penentuan konstanta kinematik yaitu γ , β , r_B , dan r_P berdasarkan kondisi *singularity*. Posisi pusat putar juga dipertimbangkan dalam proses ini. Kedua menentukan konstanta kinematik selain γ , β , r_B , dan r_P berdasarkan *workingspace* yang dapat dicapai. Konstanta kinematik ini yaitu L_2 dan L_3 . Langkah ketiga yaitu optimalisasi konstanta kinematik dengan menggunakan indeks kinerja dari mekanisme [6].

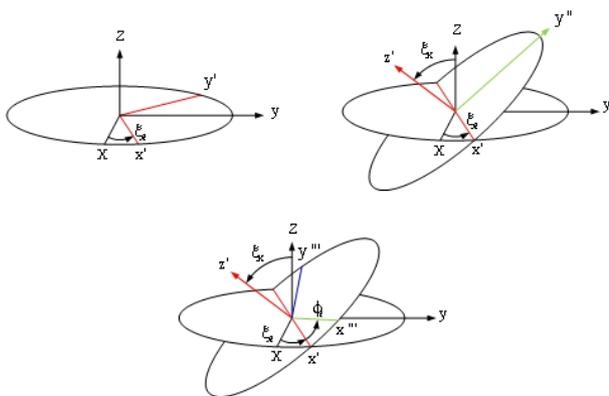
2.3. Interpretasi Orientasi Platform

Orientasi *platform* menunjukkan parameter gerak *output* pada mekanisme paralel. Orientasi tersebut diperoleh dengan menggunakan metode *successive rotation*, yaitu sistem rotasi berurut yang dinyatakan dalam tiga parameter gerak. Berdasarkan konsep *euler angle*, perpindahan *platform* secara berurut dapat diwakili oleh rotasi terhadap sumbu Z (R_{ξ_z}), dilanjutkan dengan rotasi pada sumbu X (R_{ξ_x}), dan sumbu Y (R_{y^ϕ}) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Kelemahan dari sistem rotasi berurut Z-X-Y ini adalah sangat sulit diterapkan pada mekanisme paralel dalam mengatur orientasi *platform* nya.



Gambar 4. Parameter orientasi platform Z-X-Y

Alternatif lain yang dapat digunakan untuk menyatakan orientasi platform adalah dengan menggunakan sistem rotasi Z-X-Z dimana orientasi platform digambarkan dengan rotasi berurutan yang diwakili oleh tiga parameter sudut. Pertama platform diputar dengan sudut ξ_z terhadap sumbu z, kemudian dilanjutkan dengan ξ_x terhadap sumbu x' dan diakhiri dengan ϕ_z terhadap sumbu z' seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Dalam pengaplikasiannya platform mekanisme paralel diperlukan dua derajat kebebasan yang diwakili oleh ξ_z dan ξ_x . Kondisi ini menyebabkan platform mempunyai satu derajat kebebasan berlebih yaitu ϕ . Sudut ϕ dapat digunakan untuk mengoptimasi konfigurasi sehingga dihasilkan kekakuan yang lebih tinggi untuk berbagai orientasi platform.



Gambar 5. Parameter orientasi platform Z-X-Z

Pada Gambar 5 nilai perpindahan platform akibat rotasi terhadap Z dengan parameter sudut ξ_z dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (1).

$$\text{Rot}(z, \xi_z) = \begin{bmatrix} \cos \xi_z & -\sin \xi_z & 0 \\ \sin \xi_z & \cos \xi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sedangkan perpindahan yang disebabkan oleh rotasi pada sumbu X dengan sudut putar ξ_x bisa diketahui dengan menggunakan persamaan (2)

$$\text{Rot}(x, \xi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi_x & -\sin \xi_x \\ 0 & \sin \xi_x & \cos \xi_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rotasi platform pada sumbu Z dengan sudut ϕ menghasilkan perpindahan seperti yang dinyatakan pada persamaan (3).

$$\text{Rot}(z, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Kombinasi ketiga rotasi berurutan menghasilkan orientasi sudut platform robot yang besarnya merupakan hasil perkalian ketiga matriks yang terdapat pada persamaan (1), (2), (3) sehingga diperoleh persamaan (4) [7].

$$R = \begin{bmatrix} c_{\xi_z} c_{\phi} - s_{\xi_z} c_{\xi_x} s_{\phi} & -c_{\xi_z} s_{\phi} - s_{\xi_z} c_{\xi_x} c_{\phi} & s_{\xi_z} c_{\xi_x} \\ s_{\xi_z} c_{\phi} + c_{\xi_z} c_{\xi_x} s_{\phi} & -s_{\xi_z} s_{\phi} + c_{\xi_z} c_{\xi_x} c_{\phi} & -c_{\xi_z} s_{\xi_x} \\ s_{\xi_x} s_{\phi} & s_{\xi_x} c_{\phi} & c_{\xi_x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dengan singkatan c menyatakan cosinus dan s menyatakan sinus.

2.4 Kinematik Forward

Kinematik forward adalah suatu metode untuk menyelesaikan persamaan gerak pada suatu mekanisme dengan menentukan sudut input pada masing-masing joint aktif (θ_1, θ_2 , dan θ_3) kemudian akan didapatkan posisi batang output (orientasi platform). Posisi platform pada mekanisme paralel secara teoritik dilakukan dengan cara kinematik forward dimana nilai output pada platform dapat diketahui dengan memberikan sudut input pada

joint aktif. Orientasi *platform* didapatkan dengan menentukan sudut input pada joint aktif ($\theta_1, \theta_2,$ dan θ_3) kemudian akan terjadi transmisi perpindahan dan diperoleh sudut antara rantai kinematik dengan *platform* ($\xi_z, \xi_x,$ dan ϕ). Pada mekanisme paralel URU ada tiga parameter yang tidak diketahui pada masing-masing rantai kinematik, parameter tersebut adalah ($\xi_z, \xi_x,$ dan ϕ). Vektor untuk masing-masing joint dilambangkan dengan S_{ji} ($i=1,2,3$ dan $j=1,2,3,4,5$).

Pada Gambar 6 diperlihatkan satu rantai kinematik mekanisme URU, pada joint U_2 diperoleh vektor S_{11} dengan diketahui jarak antara U_1 dengan titik pusat putar. Nilai vektor dari S_{12} dan S_{13} diperoleh dengan cara mengalikan matriks rotasi $R (\lambda_i)$ dengan matriks S_{11} , dapat menggunakan persamaan (5).

$$S_{1i}=R(\lambda_i) \cdot S_{11} \tag{5}$$

Di mana

$$R(\lambda_i) = \begin{bmatrix} \cos \lambda_i & -\sin \lambda_i & 0 \\ \sin \lambda_i & \cos \lambda_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (i=2,3)$$

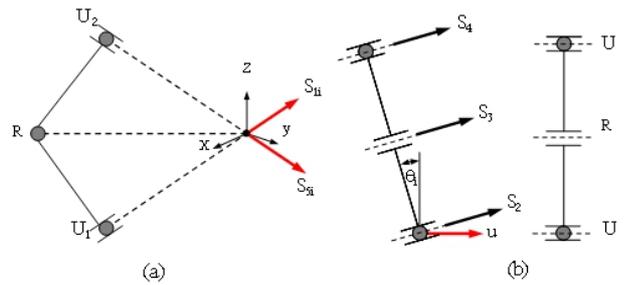
Nilai $\lambda_2 = 120^\circ$ untuk S_{12} , sedangkan untuk S_{13} nilai $\lambda_3 = 240^\circ$. Pada *platform* terdapat vektor S_{51} , sedangkan nilai dari vektor S_{52} dan S_{53} diperoleh dengan mengalikan matriks rotasi $R (\lambda_i)$ ditunjukkan pada persamaan (6)

$$S_{5i}=R(\lambda_i) \cdot S_{51} \tag{6}$$

Nilai S_{51} pada saat *platform* bergerak diperoleh dengan mengalikan S_{5i} dengan matrik rotasi R pada persamaan (4).

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa S_{2i} tegak lurus dengan S_{1i} dan S_{5i} , maka S_{2i} dapat dihitung dengan cara perkalian silang (*cross product*) antara S_{1i} dengan S_{5i} dapat dilihat pada persamaan (7).

$$S_{2i} = S_{1i} \times S_{5i} \quad (i=1,2,3) \tag{7}$$



Gambar 6. (a) Rantai kinematik URU, (b) Pergerakan akibat sudut input θ_i

Vektor u adalah vektor referensi yang arahnya tegak lurus terhadap joint sejajar. Hubungan antara sudut input, vektor S_2 dan vektor u dapat dinyatakan pada persamaan (8).

$$S_{2i} \cdot u = |S_{2i}| |u| \cos \theta_i \tag{8}$$

Tiga persamaan terdiri atas variabel ($\xi_z, \xi_x,$ dan ϕ) akan didapatkan dari tiga rantai kinematik. Metode numerik dengan menggunakan Newton Raphson diterapkan untuk menyelesaikan persamaan (8) dalam rangka menghitung nilai dari ($\xi_z, \xi_x,$ dan ϕ).

2.5. Kesalahan Geometri dan Dimensi

Proses manufaktur dan *assembly* secara umum dapat mengakibatkan *error* pada mekanisme seperti kesalahan posisi dalam perakitan joint universal pada *base* dan *platform*, kesalahan panjang batang, dan kesalahan sumbu joint [8]. 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 orientasi *platform* (*compensatable error*)[4].

2.6. Analisis Perpindahan Platform

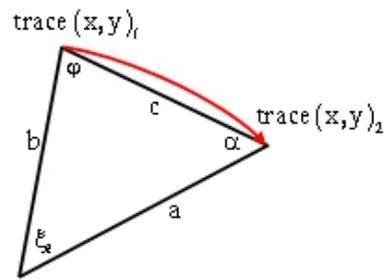
2.6.1. Evaluasi dengan kinematik invers

Metode kinematik *forward* digunakan untuk analisis posisi secara teoritik dengan menggunakan program yang dibuat dengan Maple 16. Dalam hal ini akan ditentukan orientasi *platform* yang dinyatakan dengan ξ_z , ξ_x , dan ϕ . Langkah pertama mendapatkan persamaan yang di dalamnya terdapat variabel dari (ξ_z , ξ_x , dan ϕ) dapat diturunkan dengan menggunakan persamaan (6) dan (7). Selanjutnya persamaan (8) digunakan untuk menunjukkan keterkaitan antara (ξ_z , ξ_x , dan ϕ) dengan sudut input θ_i ($i=1,2,3$). Langkah kedua yaitu menerapkan persamaan tersebut untuk ketiga rantai kinematik, maka akan didapatkan tiga persamaan dengan tiga variabel yang tidak diketahui. Langkah terakhir menggunakan metode Newton Raphson untuk menyelesaikan persamaan aljabar non linier tersebut.

Program kinematik *invers* digunakan untuk memvalidasi hasil dari kinematik *forward*. Sudut input untuk rantai kinematik didapatkan dari program *inverse* akan menjadi input untuk program kinematik *forward*.

2.6.2. Evaluasi dengan simulasi CAD

Analisis orientasi *platform* yang bergerak rotasi murni secara simulasi akan dianalisis menggunakan aplikasi inventor 2015. Dari hasil simulasi CAD ini juga akan diperoleh orientasi *platform*. Orientasi pada simulasi menggunakan data perpindahan *trace* (x, y, z) pada *platform* yang terdapat pada simulasi. Perhitungan ini berdasarkan metode segitiga untuk mendapatkan sudut output ξ_z dengan pendekatan berupa garis lurus disetiap garis bujur yang terbentuk. Metode pendekatan dengan menggunakan sudut segitiga dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Metode sudut segitiga

Nilai dari ξ_z dapat dinyatakan dengan persamaan (9)

$$\cos \xi_z = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (9)$$

Pengukuran *workspace* suatu robot bertujuan untuk mengetahui jangkauan maksimum yang dapat dicapai oleh *platform* robot sebelum terjadinya *interferensi* antara komponen mekanik mekanisme. *Workspace* optimal pada robot diperoleh dari sudut kemiringan *platform* maksimum (μ) yang disebut juga dengan sudut *inklinasi*. Capaian sudut *inklinasi* dipengaruhi oleh sudut *redundant* yaitu derajat kebebasan berlebih pada robot (ϕ) yang merupakan perputaran robot dalam sumbu tegak lurus terhadap *platform* [4].

Pengukuran sudut *inklinasi* dilakukan dengan penambahan *part* yaitu *thread bar* pada *platform* dan *base*. Titik pertemuan *thread bar* disebut dengan titik pusat putar, kemiringan yang dibentuk oleh *thread bar* akan diukur dengan menggunakan *tools* yang ada dalam *software* inventor 2015. Sudut kemiringan *platform* pada program *inverse kinematic* dilambangkan dengan ξ_x .

2.7. Perancangan Komponen Mekanik

Robot paralel 3-DoF URU terdiri dari beberapa komponen-komponen mekanik. Perancangan akan dilakukan modifikasi pada sistem penyambungan, dengan meminimalkan jumlah sambungan dan mengoptimalkan dimensi serta geometri mekanisme paralel URU. Tujuan dari modifikasi tersebut untuk meningkatkan kekakuan mekanisme. Kekakuan komponen berbanding lurus dengan

ketahanan benda menahan deformasi plastis, sedangkan kekakuan kinematik akan mempengaruhi *mobility* dari suatu mekanisme. Kekakuan kinematik yang rendah menyebabkan rantai kinematik tidak mampu menahan gaya luar yang diberikan pada susunan rantai kinematik [5].

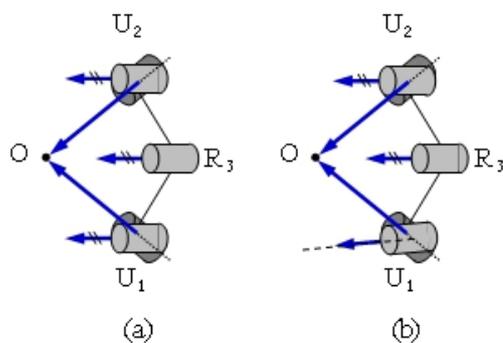
Komponen-komponen yang akan dirancang ulang adalah :

1. Perancangan *link 1 dan link 2*
2. Perancangan poros penghubung *platform*
3. Perancangan *connecting base unit*

Komponen-komponen yang telah dirancang akan dirakit (*assembly*) menjadi suatu mekanisme paralel 3-DoF URU menggunakan *Software Inventor 2015*.

2.8. Kesalahan Join Sejajar

Mekanisme paralel URU mempunyai tiga buah join yang sejajar pada satu rantai kinematik. Pada penelitian ini, tiga buah join sejajar ini akan dipasang pada keadaan yang tidak sejajar. Join sejajar dan ketidaksejajaran join dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. (a) Join sejajar, (b) Ketidaksejajaran join

Pada Gambar 8(a) menunjukkan pemasangan join sejajar pada rantai kinematik mekanisme paralel URU dimana rantai kinematik tersebut terletak pada bidang yang sama, pada Gambar 8(b) salah satu dari tiga join sejajar dipasang dengan adanya penyimpangan dari posisi awal. Rantai kinematik yang awalnya berada pada bidang yang sama akan mengalami perbedaan bidang. Kesalahan kesejajaran join dilakukan dengan memberikan sudut sebesar 1° pada U_1 , U_2 , dan R_3 kemudian

dilihat pengaruhnya terhadap *konstrain* gerak atau titik pusat putar. Jarak penyimpangan titik pusat putar didapatkan dan dibandingkan dengan mekanisme tanpa adanya kesalahan. Pengaruh lainnya terhadap orientasi gerak *platform*, dilakukan dengan membandingkan penyimpangan yang terjadi sebelum dan sesudah dilakukan kesalahan.

2.9. Optimasi Kesalahan dengan ϕ

Kemiringan *platform* dipengaruhi oleh derajat kebebasan berlebih (ϕ), maka dengan mengatur nilai ϕ kesalahan pergeseran titik pusat putar akan berkurang. Nilai ϕ diatur dan akan dilihat nilai yang paling optimum untuk mengurangi pergeseran titik pusat yang terjadi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan penelitian maka didapatkan hasil tentang formulasi kinematik *forward* dari mekanisme paralel 3-URU rotasi murni. Selanjutnya juga diperoleh pengaruh dari kesalahan pada sumbu join yang sejajar terhadap pergeseran titik pusat putar serta kesalahan yang muncul pada orientasi *platform*.

3.1. Analisis Perpindahan Platform

Perpindahan *platform* terjadi jika diberikan sudut input pada join aktif di masing-masing rantai kinematik. Sudut input tersebut diperoleh dari kinematik *invers* dan simulasi CAD. Kedua hasil tersebut digunakan sebagai alat validasi terhadap hasil formulasi kinematik *forward*.

3.1.1. Evaluasi dengan kinematik forward

Orientasi *platform* ditinjau dari perubahan sudut input sebesar θ_1 , θ_2 , dan θ_3 . Orientasi *platform* tersebut dinotasikan dengan ξ_z , ξ_x , dan ϕ , dimana ξ_x adalah rotasi *platform* terhadap sumbu x, ξ_z menyatakan rotasi *platform* terhadap sumbu z, dan ϕ mewakili perputaran *platform* terhadap sumbu yang tegak lurus terhadap bidang *platform*. Hubungan perpindahan *platform* terhadap sudut input dinyatakan dengan persamaan kinematik

forward, persamaan tersebut berisikan konstanta kinematik berupa jari-jari *platform* (r_P), jari-jari *base* (r_B), sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *platform* (β), dan sudut pemasangan rantai kinematik terhadap *base* (γ).

Berdasarkan persamaan kinematik *forward* yang diperoleh dihasilkan tiga buah persamaan yang mewakili dari masing-masing rantai kinematik mekanisme paralel 3-URU. Persamaan tersebut masing-masing terdiri dari tiga variabel yang mewakili orientasi *platform* yaitu ξ_z , ξ_x , dan ϕ .

Ketiga persamaan tersebut diselesaikan dengan menggunakan metode numerik berupa metode Newton Raphson. Persamaan kinematik *forward*

ini akan dievaluasi menggunakan kinematik *invers* yang telah diteliti oleh peneliti sebelumnya [5]. Orientasi *platform* yang diwakili oleh ξ_z , ξ_x , dan ϕ akan menjadi sudut input pada persamaan kinematik *invers* sehingga akan menghasilkan output berupa θ_1 , θ_2 , dan θ_3 . Input pada kinematik *invers* yaitu $\xi_x = 0$, $\phi = 0$ dan $0^\circ \leq \xi_z \leq 80^\circ$. Output dari kinematik *invers* akan menjadi input pada persamaan kinematik *forward*. Output dari kinematik *forward* akan dibandingkan dengan input pada kinematik *invers*. Persamaan kinematik *forward* dapat digunakan apabila hasil yang didapatkan mendekati atau sama dengan input pada kinematik *invers*. Perbandingan nilai antara kinematik *invers* dan kinematik *forward* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi kinematik forward dengan menggunakan kinematik invers.

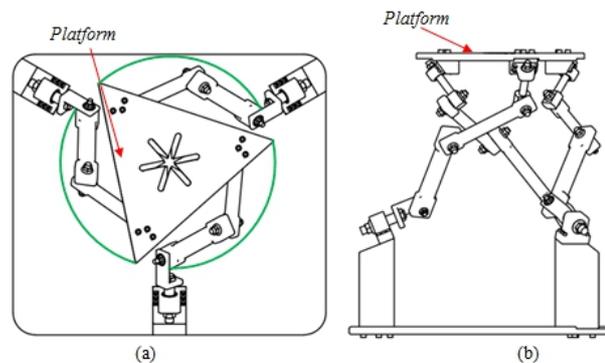
NO	Kinematik <i>invers</i>				Kinematik <i>forward</i>			
	input	Output			input			output
	$\xi_z (^\circ)$	$\theta_1 (^\circ)$	$\theta_2 (^\circ)$	$\theta_3 (^\circ)$	$\theta_1 (^\circ)$	$\theta_2 (^\circ)$	$\theta_3 (^\circ)$	$\xi_z (^\circ)$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	10	6.369	6.369	6.369	6.369	6.369	6.369	10
3	20	12.531	12.531	12.531	12.531	12.531	12.531	20
4	30	18.308	18.308	18.308	18.308	18.308	18.308	30
5	40	23.565	23.565	23.565	23.565	23.565	23.565	40
6	50	28.219	28.219	28.219	28.219	28.219	28.219	50
7	60	32.222	32.222	32.222	32.222	32.222	32.222	60
8	70	35.552	35.552	35.552	35.552	35.552	35.552	70
9	80	38.193	38.193	38.193	38.193	38.193	38.193	80

Hasil pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa sudut orientasi *platform* yang didapatkan mempunyai nilai yang sama. Secara numerik program kinematik *forward* telah dapat digunakan sebagai persamaan untuk menentukan orientasi *platform*.

3.1.2. Evaluasi dengan menggunakan simulasi CAD

Setelah program kinematik *forward* dievaluasi dengan kinematik *invers* kemudian dievaluasi dengan menggunakan simulasi CAD dengan menggunakan *software* Inventor. Kinematik *invers* digunakan untuk mendapatkan sudut input θ_1 , θ_2 , dan θ_3 yang digunakan sebagai input pada kinematik *forward* dan pada masing-masing rantai

pada simulasi CAD. Evaluasi pertama dengan kondisi $\xi_x = 0$, $\phi = 0$ dan $0^\circ \leq \xi_z \leq 107.225^\circ$ perpindahan *platform* diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Orientasi *platform* saat $\xi_x = 0$ (a) bidang X-Y (b) bidang Y-Z

Pada Gambar 9(a) dapat dilihat pergerakan *platform* membentuk lingkaran, ini karena mekanisme yang digunakan adalah mekanisme paralel rotasi murni. Gambar 9(b) dapat dilihat bahwa tidak ada rotasi selain dari sumbu z, ini diperlihatkan oleh *platform* yang tetap datar dan hanya berotasi terhadap sumbu z.

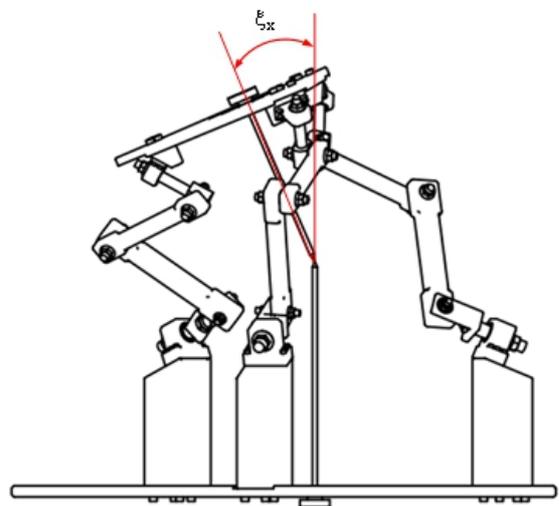
Untuk mencari berapa sudut putar dari *platform* terhadap sumbu z maka digunakan persamaan (9). Perbandingan sudut putar yang didapatkan melalui persamaan kinematik *forward* dengan simulasi CAD dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan kinematik *forward* dengan simulasi CAD ($\xi_x = 0$)

NO	Kinematik <i>forward</i>				Simulasi CAD			
	$\xi_z(^{\circ})$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta_3(^{\circ})$	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta_3(^{\circ})$	$\xi_z(^{\circ})$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	10.000	6.369	6.369	6.369	6.369	6.369	6.369	9.998
3	20.001	12.531	12.531	12.531	12.531	12.531	12.531	19.999
4	30.000	18.308	18.308	18.308	18.308	18.308	18.308	29.998
5	39.999	23.565	23.565	23.565	23.565	23.565	23.565	39.999
6	50.000	28.219	28.219	28.219	28.219	28.219	28.219	49.998
7	59.999	32.222	32.222	32.222	32.222	32.222	32.222	59.999
8	69.999	35.552	35.552	35.552	35.552	35.552	35.552	69.999
9	80.001	38.193	38.193	38.193	38.193	38.193	38.193	79.996
10	90.000	40.119	40.119	40.119	40.119	40.119	40.119	89.994
11	107.139	41.599	41.599	41.599	41.599	41.599	41.599	107.165

Sudut orientasi ξ_z yang dihasilkan berdasarkan kinematik *forward* dapat dinyatakan sama dengan simulasi CAD, hal ini dikarenakan gesekan yang terjadi antara join diabaikan. Simulasi CAD memperlihatkan bahwa robot dapat berotasi maksimal terhadap sumbu z sebesar 107.165°.

Workingspace yang dapat dicapai oleh robot paralel 3-dof URU dapat dihitung dengan melihat sudut kemiringan *platform* tanpa adanya *interferensi* antara komponen mekanik. Sudut input untuk join aktif didapatkan dengan menggunakan program kinematik *invers*. Output dari kinematik *invers* akan menjadi input untuk kinematik *forward*. Untuk mencapai ξ_x yang diinginkan maka akan diatur ξ_z dan ϕ , fungsinya agar konstrain gerakanya tidak mengalami perpindahan. ξ_z dapat diatur dengan rentang $0^{\circ} \leq \xi_z \leq 2\pi$ dan ϕ dibuat $\phi = -\xi_z + \phi'$. ϕ' merupakan suatu konstanta yang dimasukkan agar mengoptimasi kesalahan yang terjadi. Kemiringan *platform* pada simulasi CAD diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kemiringan *platform*

Kemiringan pada *platform* dapat diukur dengan menggunakan *tools* yang ada pada *software* inventor.

Pada Tabel 3 diperlihatkan perbandingan ξ_x yang diperoleh dengan menggunakan kinematik *forward* dan yang diperoleh dari simulasi CAD dengan

kondisi $\xi_z = 315^\circ$; $\xi_x = 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 40^\circ$; $\phi = -\xi_z + 0$. Dalam simulasi CAD kondisi *singularity* terjadi jika sumbu join *revolute* berada dalam kondisi sejajar dengan *base*, maka perlu diberikan

sudut input untuk posisi awal dari masing-masing rantai kinematik. Sudut input sebesar 30° diberikan pada masing-masing rantai kinematik sebagai kondisi awal pada mekanisme.

Tabel 3. Perbandingan antara kinematik forward dengan simulasi CAD ($\xi_x \geq 0$)

NO	Sudut Input (Kinematik <i>Invers</i>)			Simulasi CAD	Kinematik <i>forward</i>
	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta_3(^{\circ})$	$\xi_y(^{\circ})$	$\xi_z(^{\circ})$
1	0	0	0	0	0
2	-2.883	3.95	-1.072	4.999	4.999
3	-5.749	7.885	-2.177	9.999	9.999
4	-8.621	11.806	-3.328	14.999	14.999
5	-11.525	15.721	-4.540	19.999	19.999
6	-14.489	19.635	-5.83	24.999	24.999
7	-17.551	23.556	-7.221	29.999	29.999
8	-14.489	19.635	-5.831	34.999	34.999
9	-25.154	29.458	-12.393	39.999	39.999

Tabel 3 memperlihatkan bahwa sudut input yang diperoleh dari persamaan kinematik *invers* menjadi input untuk kinematik *forward* dan sudut input untuk joint aktif simulasi CAD. Hasil yang diperoleh dari simulasi CAD dapat dikatakan sama dengan kondisi yang diinginkan. Kinematik *forward* secara numerik telah benar setelah dilakukan evaluasi menggunakan simulasi CAD.

3.2. Pemodelan Komponen Mekanik

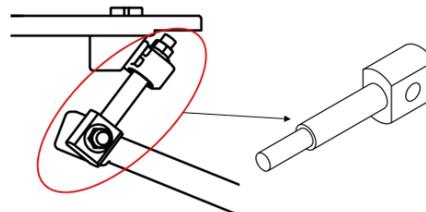
Pemodelan mekanisme paralel 3-URU terdiri dari beberapa komponen mekanik, komponen tersebut ditentukan dimensi dan geometrinya. Berikut komponen mekanik yang dimodelkan ulang dari pemodelan sebelumnya.

3.2.1. Poros Penghubung

Sumbu dari komponen ini merupakan vektor yang saling berpotongan untuk menentukan titik pusat putar dan juga penghubung antara *platform* dengan *link 2*. Komponen ini dimodifikasi agar tidak terjadi *interferensi* antara *link 2* dengan poros penyambung. Poros penghubung dapat dilihat pada Gambar 11.

Panjang dari poros tersebut akan mempengaruhi jari-jari *platform*. Jika poros terlampau pendek

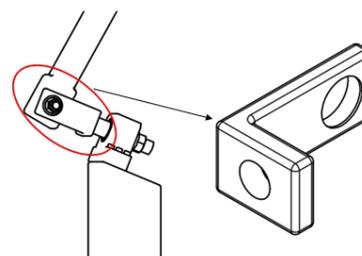
akan semakin mudah terjadi *interferensi* dengan *link 2*.



Gambar 11. Poros penghubung

3.2.2. Penghubung rantai kinematik ke Base

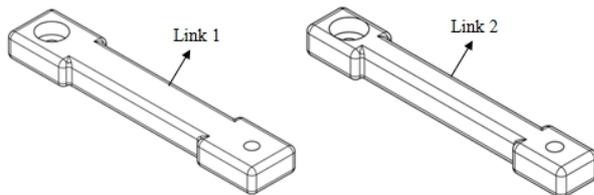
Penghubung antara *link 1* dengan *base* dinamakan *connecting base unit* yang dihubungkan dengan poros sehingga dapat berfungsi sebagai joint *revolute*. *Link 1* dihubungkan dengan menggunakan poros terhadap *connecting base unit* sehingga menjadi joint *universal*. *Connecting base unit* dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. *Connecting base unit*

3.2.3. Batang Penghubung

Link 1 dan link 2 tidak termasuk faktor untuk menentukan titik pusat putar, namun panjang batang sangat berpengaruh terhadap *workspace* yang ingin dicapai. Pada pemodelan kali ini panjang link 1 sebesar 175 mm dan link 2 sepanjang 160 mm, diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Batang penghubung

Bagian batang yang merupakan lokasi untuk menyambungkan diberi luas yang lebih besar, lokasi tersebut digunakan untuk pemasangan *bearing*/ bantalan sebagai *joint revolute*.

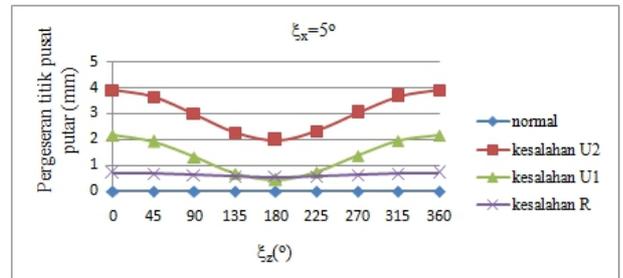
3.3. Analisis Kesalahan Kesejajaran Join

Pada bagian ini disimulasikan pengaruh ketidaksejajaran sumbu join pada rantai kinematik 3-URU. Kesalahan pada kesejajaran join dapat terjadi saat *assembly* robot paralel dan toleransi dalam proses pembuatan. Kesalahan ini dilakukan pada ketiga sumbu join yang sejajar dalam satu rantai kinematik secara *independent*, pengaruh kesalahan dilihat untuk masing-masing penyimpangan. Penyimpangan akibat kesalahan tersebut berakibat pada pergeseran titik pusat putar dan orientasi *platform*.

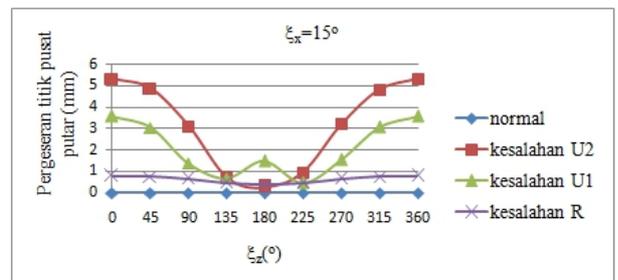
3.3.1. Pengaruh terhadap pergeseran titik pusat putar platform

Kesalahan sumbu join sejajar dilakukan pada join universal antara batang dua dan *platform*, antara batang satu dengan *base* dan join revoluit antara link 1 dan link 2. Kesalahan hanya dilakukan pada satu rantai kinematik secara *independent* dan dilihat besar pergeseran titik pusat putar akibat adanya kesalahan tersebut. Pengaruh ketidaksejajaran sumbu join ini dievaluasi untuk

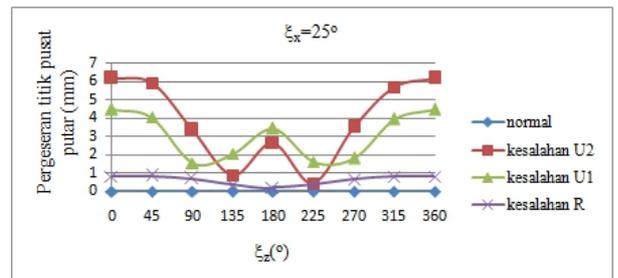
berbagai kemiringan *platform*. Dalam hal ini dinyatakan dengan *workspace* untuk sudut kemiringan *platform* sebesar $\xi_x = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 40^\circ$. Untuk orientasi $0^\circ \leq \xi_z \leq 360^\circ$ dan $\phi' = 10^\circ$ besar pergeseran titik pusat putar disajikan pada gambar Gambar 14 sampai Gambar 17.



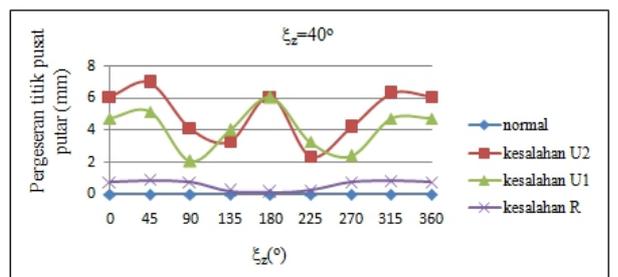
Gambar 14. Pergeseran titik pusat putar dengan $\xi_x = 5^\circ$



Gambar 15. Pergeseran titik pusat putar dengan $\xi_x = 15^\circ$



Gambar 16. Pergeseran titik pusat putar dengan $\xi_x = 25^\circ$

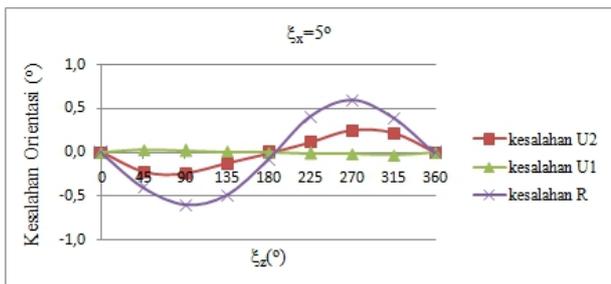


Gambar 17. Pergeseran titik pusat putar dengan $\xi_x = 40^\circ$

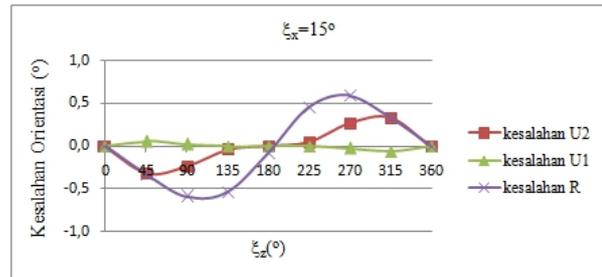
Pada Gambar 14 sampai gambar 16 tersebut diperlihatkan tiga sumber kesalahan, dimana sumbu vertikal menyatakan pergeseran absolut titik pusat putar yang dibandingkan dengan variasi orientasi ξ_z . Pergeseran titik pusat putar maksimum terjadi pada kondisi untuk $\xi_x = 40^\circ$, $\xi_x = 45^\circ$, $\phi = 10^\circ$ dengan pergeseran titik pusat putar sebesar 6.958 mm. Sumber kesalahan pada join *revolute* antara *link 1* dan *link 2* menyebabkan pergeseran titik pusat yang paling besar dibandingkan dengan kesalahan yang lain. Disamping itu perubahan orientasi *platform* juga berpengaruh terhadap sensitivitas kesalahannya. Semakin besar sudut kemiringan *platform* maka kesalahan berupa pergeseran titik pusat putar akan semakin besar. Hal ini dipengaruhi oleh kekakuan kinematik, dimana kekakuan kinematik merupakan arah sumbu yang tegak lurus terhadap bidang sumbu yang berpotongan. Semakin besar sudut kemiringan *platform* maka determinannya semakin kecil.

3.3.2. Pengaruh terhadap orientasi platform

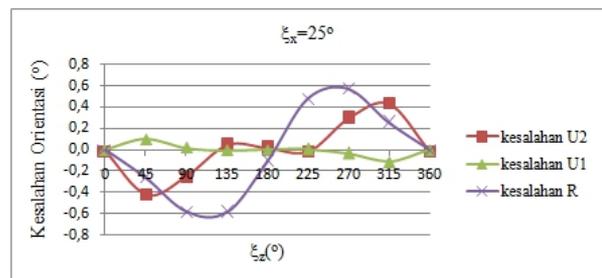
Kesalahan sumbu join sejajar juga mempengaruhi orientasi gerak *platform*. Sudut kemiringan *platform* akan berbeda dari yang diinginkan jika terdapat kesalahan pada sumbu join sejajar. Sudut kemiringan *platform* yang diinginkan sebesar $\xi_x = 5^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 40^\circ$. Untuk orientasi $0^\circ \leq \xi_z \leq 360^\circ$ dan $\phi = 10^\circ$ besar perbedaan orientasi gerak *platform* dapat dilihat pada Gambar 18 sampai Gambar 21.



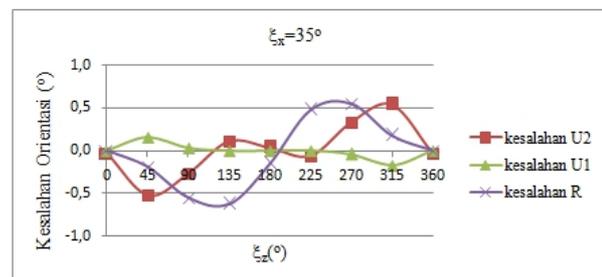
Gambar 18. Grafik perbedaan orientasi gerak platform dengan $\xi_x = 5^\circ$



Gambar 19. Grafik perbedaan orientasi gerak platform dengan $\xi_x = 15^\circ$



Gambar 20. Grafik perbedaan orientasi gerak platform dengan $\xi_x = 25^\circ$



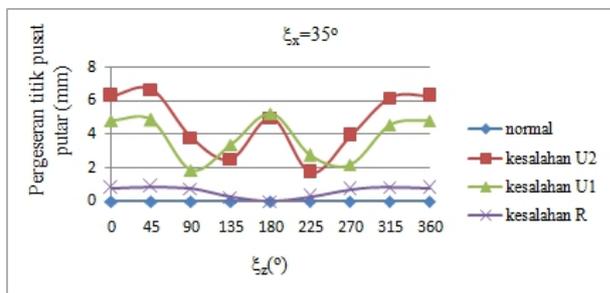
Gambar 21. Grafik perbedaan orientasi gerak platform dengan $\xi_x = 35^\circ$

Nominal kesalahan orientasi terjadi tidak sensitif terhadap perubahan orientasi *platform*. Untuk berbagai sudut kemiringan kesalahan terbesar berkisar pada harga 0.6° . Hal dapat dikaitkan dengan tidak terjadinya kasus aktuasi singular dimana *platform* dapat merespon perubahan pergerakan join input. Dalam kondisi ini dapat terlihat nominal kesalahan orientasi yang dialami platform memiliki besaran yang hampir sama untuk berbagai sudut kemiringan. Di sisi lain kesalahan seperti ini dapat dikompensasi dengan mengontrol pergerakan join input.

3.4. Optimasi Kesalahan dengan ϕ

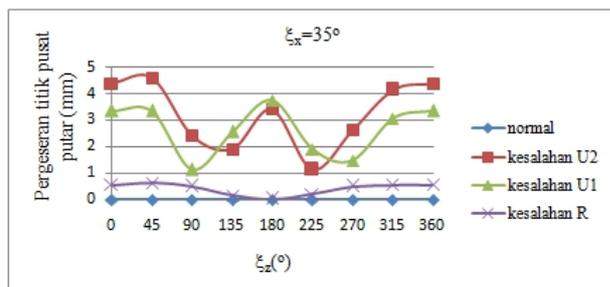
Penyimpangan yang dilakukan terhadap simulasi CAD dari robot paralel URU menyebabkan terjadinya pergeseran titik pusat putar. Pergeseran titik pusat putar tersebut dapat dikurangi nilainya dengan menambah nilai derajat kebebasan berlebih ϕ setelah dilakukan optimasi maka nilai ϕ yang optimal adalah sebesar 15° dengan menimbang *workingspace* yang dapat dicapai oleh simulasi tersebut.

Pada Gambar 22 diberikan nilai ϕ sebesar 10° , maka pergeseran titik pusat putarnya paling besar mencapai nilai 6.279 mm.



Gambar 22. Pergeseran titik pusat putar dengan $\phi=10^\circ$

Pada Gambar 22 terlihat penyimpangan kesalahan terhadap join universal *link 2* dengan *platform* memiliki pergeseran titik pusat putar yang besar. Dilakukan optimasi dengan merubah nilai ϕ dan didapatkan nilai optimal yaitu sebesar 15° , jika melebihi nilai tersebut maka *workingspace* yang dicapai oleh robot paralel 3-URU akan berkurang akibat adanya interferensi antar komponen mekanik. Pada Gambar 23 dapat dilihat bahwa nilai pergeseran titik pusat putar menjadi lebih kecil apabila diberikan perubahan pada ϕ .



Gambar 23. Pergeseran titik pusat putar dengan $\phi=15^\circ$

Pergeseran titik pusat putar berkurang menjadi 4.59 mm dapat dilihat dari Gambar 22 dan 23. Semakin besar sudut ϕ maka kekakuan kinematik dari mekanisme paralel 3-URU akan meningkat, ini dapat dilihat dari kondisi gaya konstrain yang dihasilkan oleh ketiga rantai kinematik yang mempunyai komponen pada ketiga sumbu pada sistem koordinat kartesian (sistem XYZ).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian terhadap mekanisme 3-URU rotasi murni yang difokuskan kepada kinematik *forward* dan pengaruh kesalahan geometri berupa kesejajaran sumbu join dapat disimpulkan hal berikut:

1. Telah berhasil diturunkan persamaan kinematik *forward* yang menyatakan hubungan antara sudut input dan sudut perpindahan *platform* yang telah divalidasi dengan kinematik *invers* dan simulasi CAD.
2. Ketidaksejajaran sumbu join sangat mempengaruhi pergeseran titik pusat putar dan perubahan orientasi *platform*. Kesalahan orientasi sumbu join yang menghubungkan rantai kinematik dengan *platform* sangat sensitive terhadap pergeseran pusat putar *platform*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sepriyanto. 2015. Analisis Kinematik dan Evaluasi Unjuk Kerja Robot Paralel 3 Derajat Kebebasan Rotasi Murni. *Tesis*. Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas. Padang.
- [2] Ryu, J.-H. 2008. *Parallel Manipulator New Development*. I-Tech Education and Publishing. Vienna. Australia.
- [3] Syafri, Huda, S., Bur, M. 2014. Evaluasi Kesalahan Pemasangan Rantai Kinematik Terhadap Gerak Translasi Titik Pusat Putar (*Uncompensatable Error*) Mekanisme Paralel 3-DoF Rotasi Murni URU. *Teknika*. Vol.21, No.3.
- [4] Syafri, Huda, S., Bur, M. 2016. Sensitifitas Kesalahan Dimensi dan Geometri Mekanisme Paralel Tiga Derajat Kebebasan Tipe Spherical dan Pengaruhnya Terhadap *Compensatable Errors* dan *Uncompensatable Errors*. *Proceeding Seminar*

Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV). 5-7 Oktober 2016, Bandung, Indonesia.

[5] Mardi, N, R, M,. 2017. Evaluasi Pengaruh Kesalahan Dimensi Konstanta Kinematik Mekanisme Paralel 3-URU Rotasi Murni Terhadap Respon Perpindahan *Platform*. *Skripsi*. Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas. Padang.

[6] Huda, S., Takeda, Y. 2007. Dimensional Synthesis of 3-URU Pure Rotational Mechanism with Respect to Singularity and Workspace. *12th IFToMM World Congress*. 18-21 Juni 2007, Besancon, Perancis.

[7] Tsai, L,-W. 1999. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. United States of America: John Willey & Son..

[8] Huda, S., 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*. 2(5): 874-886.