



Artikel Penelitian

Sintesis Mekanisme 3-URU Rotasi Murni dengan Aktuator SebidangSyamsul Huda ^a, Mulyadi Bur ^a^a Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas Padang, 25163

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 01 Juni 2026

Revisi Akhir: 12 Juni 2026

Diterbitkan Online: 26 Juni 2026

KATA KUNCI

Kinematik mekanisme paralel

Sudut transmisi

Kekakuan kinematik

Rotasi murni

Optimasi mekanisme

KORESPONDENSI

E-mail: syamsulhuda@eng.unand.ac.id**A B S T R A C T**

This study investigates the kinematic design of a parallel 3-URU pure rotation mechanism, with input joints arranged on a single plane to simplify the determination of the platform's rotation center. The design process was structured into three stages: establishing kinematic constants based on stiffness criteria, selecting supplementary constants using transmission angle considerations, and conducting a comprehensive analysis of the mechanism. Numerical results indicate normalized constants of $r_p = 1$, $r_B/r_p = 1.6$, $L/r_p = 2.5$, and $\beta = 58^\circ$. The proposed mechanism achieves a maximum platform tilt of 45° , with transmission angles ranging from 50° to 90° , and a minimum input torque transmissibility of 0.5. These findings demonstrate that the proposed kinematic design ensures adequate stability and transmission efficiency, making it suitable for applications requiring pure rotational motion.

1. PENDAHULUAN

Mekanisme paralel rotasi murni telah banyak dikaji dalam literatur mutakhir karena perannya yang signifikan dalam aplikasi berpresisi tinggi. Keunggulan utama mekanisme ini terletak pada kemampuannya menghasilkan gerakan orientasi yang stabil dengan kekakuan struktural lebih baik dibandingkan mekanisme serial. Konfigurasi 3-URU, yang terdiri atas tiga rantai kinematik dengan susunan *Universal–Revolute–Universal*, dirancang untuk menghasilkan rotasi murni tanpa translasi yang tidak diinginkan. Karakteristik tersebut menjadikan mekanisme ini sangat relevan untuk aplikasi seperti robot medis, simulator gerak, dan mesin manufaktur presisi, di mana akurasi orientasi merupakan faktor kritis.

<https://doi.org/10.25077/inomet.4.1.1-6.2026>

Namun demikian, tantangan utama yang diidentifikasi dalam berbagai penelitian adalah kesalahan sumbu join. Ketidaksejajaran kecil pada sumbu sejajar dapat menyebabkan pergeseran pusat rotasi hingga beberapa milimeter dan menghasilkan kesalahan orientasi yang signifikan, yang tidak dapat dikompensasi oleh kontrol kinematik konvensional. Zhang [1] menunjukkan bahwa strategi kompensasi berbasis redundansi kinematik mampu meminimalkan efek misalignment dengan memilih konfigurasi optimal. Li [2] melalui *Precision Engineering* mengusulkan koreksi parameter geometris Jacobi yang terbukti meningkatkan akurasi posisi pada mesin paralel multi-sumbu. Sementara itu, Wang [3] menekankan pentingnya pemodelan kesalahan berbasis *constraint motion* untuk mengidentifikasi *coupling*

[Attribution-NonCommercial 4.0 International](#). Some rights reserved

error kompleks antara translasi dan rotasi pada mekanisme paralel sferis.

Kajian lebih lanjut menegaskan bahwa kesalahan arah sumbu join pada mekanisme *spatial* jauh lebih sulit ditangani dibandingkan mekanisme planar. Kompleksitas orientasi tiga dimensi menghasilkan propagasi error multidimensi serta keterkaitan erat antara translasi dan rotasi. Wu [4] menunjukkan bahwa pada mekanisme planar, model koreksi dua tahap berbasis parameter geometris relatif efektif karena kesalahan terbatas pada bidang 2D. Sebaliknya, Ding [5] menekankan bahwa *joint clearance* pada mekanisme paralel spatial, seperti konfigurasi 3-RSU-U, menghasilkan akumulasi error orientasi yang lebih signifikan dan sulit diprediksi. Zhang [6] menambahkan bahwa strategi kompensasi berbasis redundansi kinematik lebih relevan untuk mekanisme spatial karena mampu memilih konfigurasi optimal yang meminimalkan efek *misalignment*. Dengan demikian, meskipun kesalahan planar dapat ditangani dengan metode koreksi sederhana, kasus spatial menuntut pendekatan lebih canggih berbasis model matematis tingkat lanjut, kontrol adaptif real-time, dan integrasi simulasi CAD.

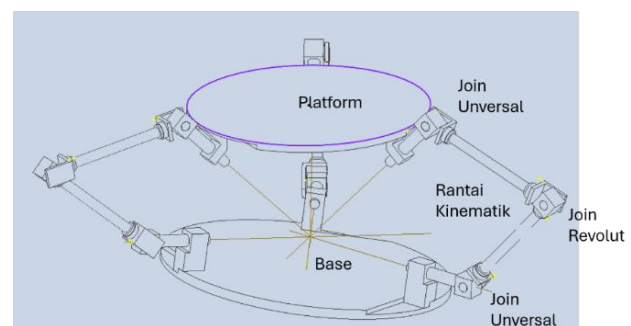
Selain itu, penelitian mengenai mekanisme paralel rotasi murni juga menekankan pentingnya penempatan join aktif dalam satu bidang. Strategi ini terbukti mampu mengurangi efek *coupling* translasi-rotasi serta mempermudah proses kalibrasi. Zhang [1] menunjukkan bahwa konfigurasi join aktif *co-planar* dapat meminimalkan propagasi error orientasi. Li et al. [2] menambahkan bahwa penempatan join sejajar mempercepat koreksi parameter geometris karena kesalahan dapat dimodelkan lebih sederhana. Wang [3] menegaskan bahwa mekanisme dengan join aktif dalam satu bidang memiliki kekakuan struktural lebih baik dan lebih tahan terhadap akumulasi error. Chen [6] mengemukakan bahwa konfigurasi *co-planar* meningkatkan efisiensi kontrol adaptif real-time, sementara Huang [7] menekankan keunggulan desain optimal yang mempermudah integrasi dengan metode kalibrasi berbasis CAD. Zhao [8] menyoroti peningkatan kekakuan struktural melalui penempatan join aktif terkoordinasi, dan Kim [9] menunjukkan bahwa

konfigurasi *co-planar* menghasilkan propagasi error yang lebih terkendali dibandingkan konfigurasi spatial.

Sebagai landasan penelitian, fokus diarahkan pada desain kinematik mekanisme 3-URU rotasi murni dengan strategi penempatan join aktif dalam satu bidang. Pendekatan ini dipilih karena terbukti mampu meningkatkan stabilitas gerak sekaligus mengurangi propagasi kesalahan orientasi. Desain kinematik tidak hanya menekankan konfigurasi struktural, tetapi juga diarahkan untuk menentukan konstanta kinematik yang memenuhi sejumlah kriteria penting. Kriteria tersebut meliputi pencapaian *working space* yang bebas dari singularitas, sehingga mekanisme dapat beroperasi stabil tanpa kehilangan derajat kebebasan, serta pencapaian indeks transmisibilitas yang optimal untuk menjamin distribusi gaya dan momen tetap efisien sepanjang ruang kerja. Dengan demikian, penelitian ini berupaya menghasilkan rancangan mekanisme paralel rotasi murni yang tidak hanya unggul secara teoritis, tetapi juga siap diaplikasikan pada bidang berpresisi tinggi seperti robot medis, simulator gerak, dan manufaktur presisi.

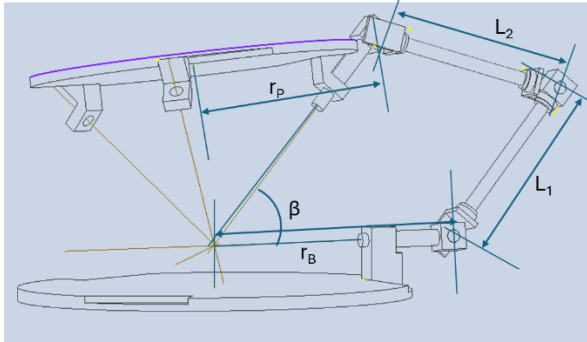
2. METODOLOGI

Penelitian mengenai mekanisme paralel 3-URU rotasi murni dengan penempatan join aktif dalam satu bidang disusun melalui tahapan analisis matematis, simulasi numerik, dan validasi kriteria performa. Mekanisme terdiri atas platform, base, serta tiga rantai kinematik identik yang masing-masing tersusun dari sambungan universal-revolute-universal. Diagram CAD mekanisme ditunjukkan pada Gambar 1.



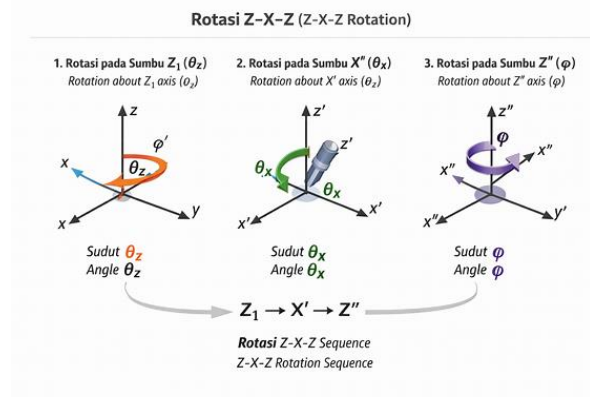
Gambar 1. CAD Diagram Mekanisme 3-URU

Konstanta kinematik yang digunakan meliputi jari-jari platform (r_p), jari-jari base (r_B), panjang batang (L_1, L_2), serta sudut β . Konstanta ini berfungsi untuk menentukan lokasi titik pusat platform sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konstanta Kinematik Mekanisme 3-URU

Pemilihan konstanta kinematik dilakukan berdasarkan spesifikasi *workspace* mekanisme. Orientasi platform didefinisikan oleh tiga parameter sudut θ_x , θ_z , ϕ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Formulasi rotasi platform dinyatakan dengan matriks rotasi:



Gambar 3. Sistem Rotasi Platform

Rotasi pada ketiga sumbu bergerak tersebut dapat dinyatakan dalam formulasi matematika dinyatakan dengan

$$R = R_z(\theta_z) \cdot R_x(\theta_x) \cdot R_z(\phi) \quad (1)$$

Dimana,

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

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

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

Tahapan Penelitian:

1. Perumusan Model Kinematik

Membangun model kinematik mekanisme 3-URU rotasi murni.

- Mendefinisikan konstanta kinematik (panjang link, orientasi join, posisi pusat rotasi)
- Menyusun persamaan constraint untuk memastikan platform hanya menghasilkan rotasi murni
- Persamaan constraint dituliskan sebagai: $f(q) = 0$

2. Analisis Singularitas

Mengidentifikasi kondisi kehilangan derajat kebebasan.

- Menyusun matriks Jacobian (J)
- Menentukan kondisi singularitas dengan

$$\det(J) = 0 \quad (2)$$

- Menghindari konfigurasi yang menyebabkan instabilitas mekanisme

3. Evaluasi Sudut Transmibilitas

Menganalisis kemampuan mekanisme mentransmisikan gaya dan gerakan.

- Mendefinisikan sudut transmibilitas sebagai sudut antara gaya batang penghubung dan arah gerakan efektif
- Mengevaluasi variasi sudut transmibilitas selama pergerakan
- Menentukan rentang sudut ideal untuk efisiensi transmisi gaya

4. Validasi Kriteria Performan

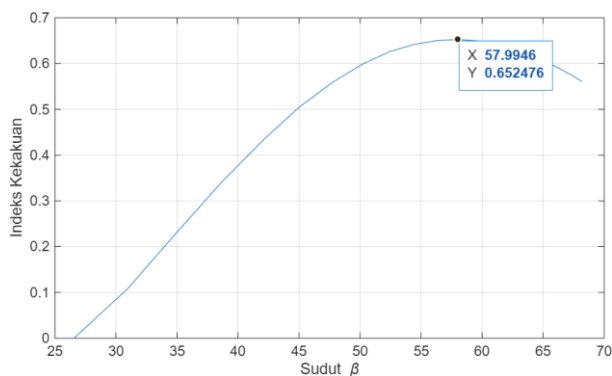
Menentukan konstanta kinematik optimal berdasarkan hasil analisis.

- Mengevaluasi *workspace* bebas singularitas
- Menentukan indeks transmibilitas optimal
- Memastikan stabilitas gerak dan efisiensi distribusi gaya
- Melakukan simulasi numerik berbasis CAD untuk validasi hasil

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan merujuk pada tahapan sintesis, diperoleh dua kelompok konstanta kinematik pada mekanisme paralel 3-URU rotasi murni. Kelompok pertama merupakan konstanta kinematik yang mendefinisikan lokasi pusat rotasi platform. Dalam penelitian ini, seluruh joint aktif ditempatkan pada satu bidang, sehingga pusat rotasi platform secara otomatis berada pada bidang tersebut. Konstanta kinematik lain yang berpengaruh terhadap posisi pusat rotasi adalah sudut β , sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.

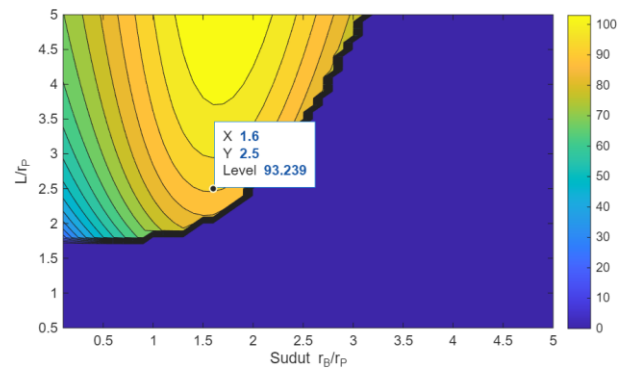
Untuk menentukan nilai konstanta tersebut digunakan suatu indeks kekakuan, yang didefinisikan sebagai kemampuan mekanisme dalam menahan gaya eksternal sehingga posisi pusat platform tetap stabil. Hubungan antara sudut β dan indeks kekakuan ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan analisis, untuk jangkauan platform dengan kemiringan maksimum sebesar 45° , sudut optimal yang diperoleh adalah $\beta = 58^\circ$. Nilai ini memberikan tingkat kekakuan yang memadai, sehingga mekanisme mampu mempertahankan postur gerakannya tanpa terjadi pergeseran posisi pusat rotasi.



Gambar 4. pemilihan sudut kemiringan pemasangan universal joint pada platform

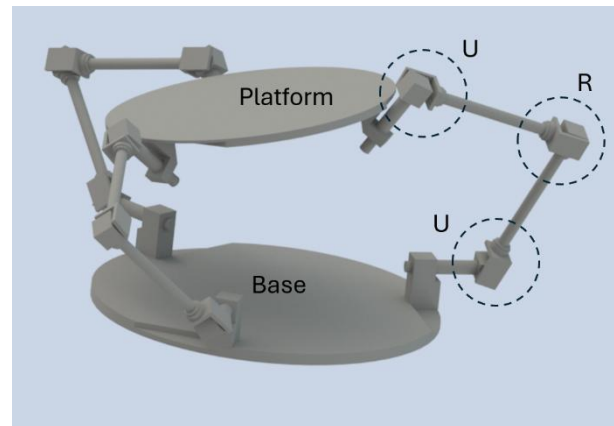
Pemilihan konstanta kinematik lainnya, yaitu panjang batang penghubung (L) dan jari-jari base (r_B), dilakukan dengan mengoptimalkan sudut transmisi yang dihasilkan oleh masing-masing batang penghubung terhadap platform. Proses sintesis dilakukan dengan menormalisasi parameter tersebut terhadap jari-jari platform (r_P). Evaluasi sudut transmisi kemudian dilakukan pada ruang

kerja (*workspace*) mekanisme, sehingga diperoleh plot kontur yang menunjukkan hubungan antara r_B dan L terhadap sudut transmisi seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Plot Kontur Jari-jari Base dan Panjang Batang Hubung terhadap Sudut Transmisi

Dengan mengacu pada kondisi ideal bahwa sudut transmisi paling baik berada di sekitar 90° , maka kombinasi konstanta kinematik dipilih berdasarkan kriteria tersebut. Dalam penelitian ini, hasil optimasi menunjukkan bahwa nilai $r_B = 1.6$ dan $L = 2.5$ merupakan kombinasi yang memenuhi syarat, sehingga mekanisme mampu mencapai sudut transmisi optimal dan mendukung performa gerak platform secara efisien.



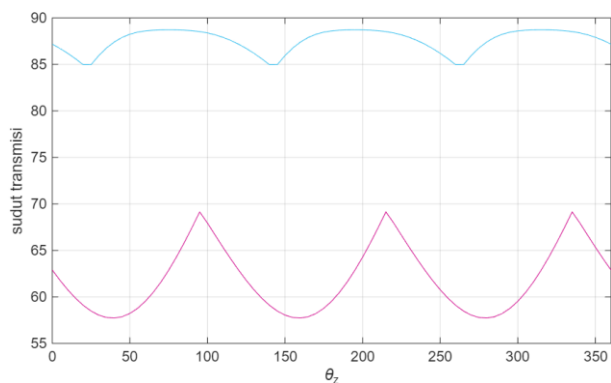
Gambar 6. Diagram CAD Mekanisme 3-URU Rotasi Murni untuk Joint Aktif Sebidang

Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, diperoleh konstanta kinematik mekanisme paralel 3-URU rotasi murni dengan batasan bahwa seluruh joint aktif ditempatkan pada bidang yang sama. Nilai konstanta tersebut adalah $r_P = 1$, $r_B/r_P = 1.6$,

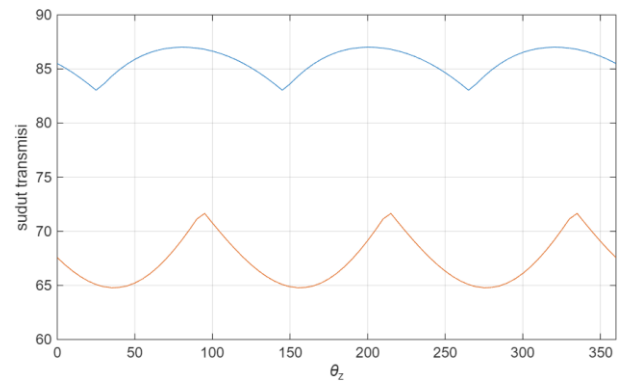
$L/r_p = 2.5$, dan $\beta = 58^\circ$. Dengan menggunakan konstanta kinematik tersebut, rancangan mekanisme kemudian divisualisasikan dalam bentuk diagram CAD sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.

Selanjutnya mekanisme tersebut dievaluasi sudut transmisinya untuk berbagai posisi di dalam working space. Dalam hal ini disajikan tiga kemiringan dari platform berupa $\vartheta_x = 10^\circ$, $\vartheta_x = 30^\circ$ dan $\vartheta_x = 45^\circ$ seperti diperlihatkan pada Gambar 7, 8 dan 9 secara berturut-turut. Dari gambar yang diperoleh dapat diketahui bahwa mekanisme ini memiliki sudut transmisi untuk masing-masing rantai kinematik berkisar antara 50° - 90° . Hal ini telah jauh dari kondisi singular dimana dipersyaratkan 30° - 150° [10].

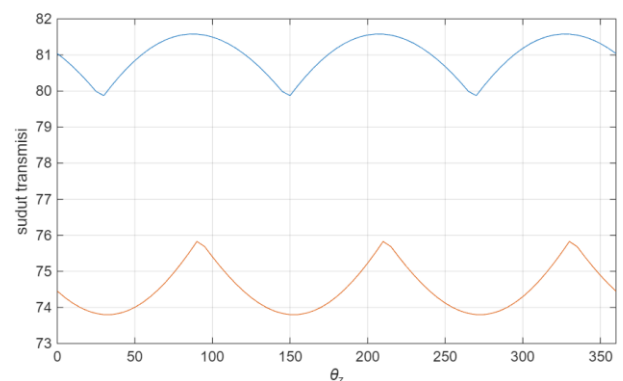
Selanjutnya, mekanisme dievaluasi berdasarkan sudut transmisinya pada berbagai posisi di dalam workspace. Dalam analisis ini disajikan tiga kondisi kemiringan platform, yaitu $\vartheta_x = 10^\circ$, $\vartheta_x = 30^\circ$ dan $\vartheta_x = 45^\circ$, sebagaimana ditunjukkan secara berturut-turut pada Gambar 10, 11, dan 12. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa mekanisme ini memiliki sudut transmisi untuk setiap rantai kinematik yang berada dalam rentang 50° - 90° . Nilai tersebut berada jauh dari kondisi singular. Dengan demikian, mekanisme yang dirancang dapat dikatakan memiliki performan transmisi yang stabil dan aman dalam ruang kerja yang dianalisis.



Gambar 7. Nilai Sudut Transmisi untuk Kemiringan $\vartheta_x = 45^\circ$

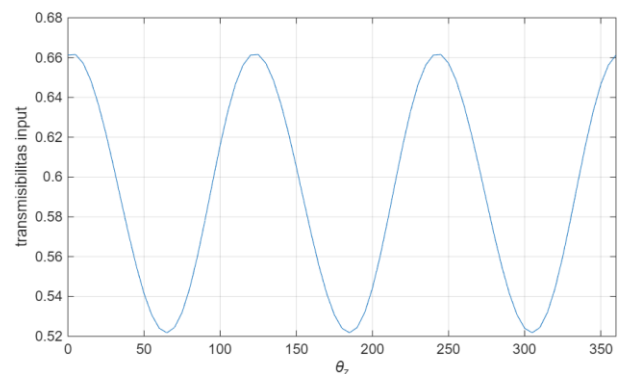


Gambar 8. Nilai Sudut Transmisi untuk Kemiringan $\vartheta_x = 30^\circ$

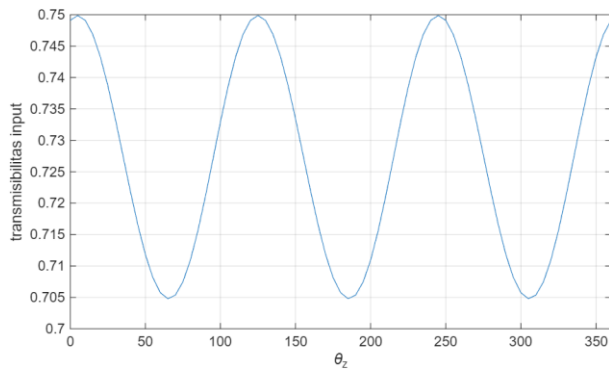


Gambar 9. Nilai Sudut Transmisi untuk Kemiringan $\vartheta_x = 10^\circ$

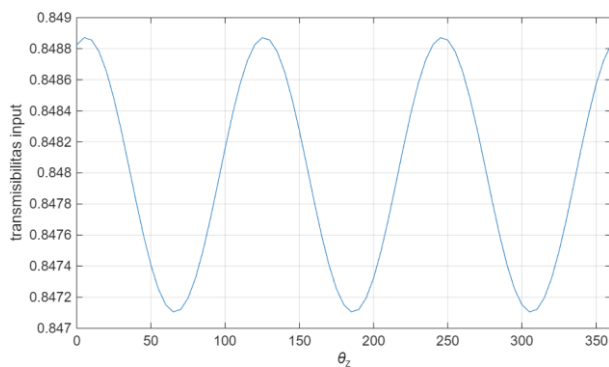
Bagian berikutnya yang dianalisis adalah transmisibilitas torsi input terhadap platform, yang merepresentasikan kemampuan join input dalam mengendalikan pergerakan platform. Evaluasi dilakukan pada tiga kondisi kemiringan platform, yaitu $\vartheta_x = 45^\circ$, $\vartheta_x = 30^\circ$ dan $\vartheta_x = 10^\circ$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, 11, dan 12.



Gambar 10. Nilai Transmisibilitas untuk Kemiringan $\vartheta_x = 45^\circ$



Gambar 11. Nilai Transmisibilitas untuk Kemiringan $\theta_x = 30^\circ$



Gambar 12. Nilai Transmisibilitas untuk Kemiringan $\theta_x = 10^\circ$

Hasil analisis memperlihatkan bahwa mekanisme ini mampu mempertahankan nilai transmisibilitas torsi input dengan kisaran minimum sebesar 0.5. Nilai tersebut menunjukkan bahwa mekanisme berada jauh dari kondisi singular, sehingga sistem tetap stabil dan mampu mentransmisikan torsi secara efektif pada berbagai konfigurasi kemiringan platform.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil merancang model kinematik mekanisme 3-URU rotasi murni, dengan konfigurasi join input yang ditempatkan pada satu bidang. Proses optimasi dilakukan melalui penentuan konstanta kinematik yang didasarkan pada parameter kekakuan kinematik serta sudut transmisibilitas. Hasil analisis numerik menunjukkan konstanta kinematik dalam bentuk normalisasi terhadap jari-jari platform, yaitu $r_p = 1$, $r_B/r_p = 1.6$, $L/r_p = 2.5$, dan $\beta = 58^\circ$. Mekanisme yang dihasilkan mampu mencapai kemiringan maksimum platform sebesar 45° ,

dengan sudut transmisibilitas berada pada rentang 50° – 90° , serta nilai minimum transmisibilitas torsi input sebesar 0.5. Temuan ini menegaskan bahwa rancangan kinematik yang diusulkan memiliki stabilitas dan efisiensi transmisi yang memadai untuk aplikasi mekanisme rotasi murni.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, Y., et al. (2026). *Error avoidance compensation strategy for parallel mechanisms with kinematic redundancy*. Mechanism and Machine Theory.
- [2] Li, H., et al. (2024). *Accurate error compensation via Jacobi geometric parameter correction in multi-axis parallel machines*. Precision Engineering.
- [3] Wang, J., et al. (2026). *Error modeling and analysis of spherical parallel mechanisms based on constraint motion*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.
- [4] Wu, X., et al. (2026). *Two-stage error modeling and compensation for planar parallel mechanisms*. Mechanism and Machine Theory.
- [5] Ding, Y., et al. (2023). *Error propagation analysis of joint clearance in spatial parallel mechanisms*. In *IFTToMM World Congress Proceedings*. Springer.
- [6] Chen, L., et al. (2025). *Adaptive control strategies for co-planar active joint placement in parallel robots*. IEEE Transactions on Robotics.
- [7] Huang, Z., et al. (2024). *Design optimization of parallel mechanisms with co-planar active joints*. Journal of Mechanical Design.
- [8] Zhao, Q., et al. (2025). *Structural stiffness enhancement in parallel manipulators through active joint alignment*. ASME Journal of Mechanisms and Robotics.
- [9] Kim, S., et al. (2026). *Error propagation analysis in co-planar versus spatial active joint configurations*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.
- [10] Zhang, D., & Song, C. (2019). *Transmission angle and stiffness analysis of parallel robots*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 57, 1–10.