

Pengaruh Konstanta Kinematik terhadap Workingspace Alat Bantu Bedah Berbasis Mekanisme Paralel

Syafri^{1,*} dan Teguh Iman¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Riau - Pekanbaru

*Korespondensi: prie_00m022@yahoo.com

Abstrak. Tindakan bedah (operasi) merupakan bentuk penanganan terhadap pasien untuk mengangkat penyakit yang dideritanya. Sejauh ini rumah sakit dalam negeri masih mengandalkan tindakan operasi secara manual yang langsung dilakukan oleh dokter dalam pemotongan organ pasien yang mengalami kelainan medis. Tindakan operasi secara langsung ini cenderung memberikan efek yang kurang baik terhadap pasien berupa luka sayatan yang lebar, rasa nyeri yang berlebihan, serta pemulihan yang relatif lama. Untuk mengurangi resiko operasi tersebut, alternatif solusi yang dapat dilakukan adalah dengan pembedahan robotik yaitu pembedahan yang menggunakan teknologi lengan robot yang berfungsi sebagai perpanjangan tangan dokter bedah. Dalam penelitian ini dirancang sebuah prototipe alat operasi berbasis mekanisme paralel dengan aplikasi Autodesk Inventor 2017. Alat tersebut disusun oleh tiga rantai kinematik yang menghubungkan antara *base* robot dengan *platform*. Capai *workingspace* dan input sudut yang diberikan pada join aktif selanjutnya dievaluasi dengan metode invers kinematik. Pada prototipe mekanisme paralel tersebut, gerak output pada *platform* yang berupa translasi murni selanjutnya dimanfaatkan untuk menggerakan alat operasi dalam melakukan tindakan bedah. Berdasarkan hasil sintesa dimensi, selanjutnya dipilih konstanta kinematik mekanisme paralel jarak sisi *base* dan *platform* sebesar 312 mm dan 277 mm, panjang batang 1 dan batang 2 senilai 215 mm dan 340 mm, serta rentang input sudut seharga 78,°. Pemilihan konstanta kinematik tersebut didasari oleh capaian *workingspace* mekanisme paralel yang optimum serta terhindar dari kondisi singularity. Selanjutnya dari hasil pemilihan konstanta kinematik, didapatkan area *workingspace* mekanisme paralel dengan simulasi program sebesar 300, mm arah vertikal dan 250 mm searah horizontal sumbu x, serta 180 mm searah horizontal sumbu y.

Kata Kunci: mekanisme paralel, *workingspace*, invers kinematik, singularity

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara dengan jumlah penduduk terpadat nomor empat di dunia yaitu sekitar 261 juta jiwa. Dengan jumlah penduduk sebanyak itu sudah seharusnya indonesia memiliki teknologi dibidang kesehatan yang cukup memadai. Karena jumlah orang sakit dengan berbagai macam keluhan di Indonesia mencapai tiga puluh persen jumlah penduduk yang ada.

Dari seluruh total jenis penyakit yang diderita oleh pasien salah satu bentuk penanganan yang sering dilakukan oleh dokter untuk mengobatinya adalah tindakan bedah, baik itu bedah ringan, sedang maupun berat. Sejauh ini pelaksanaan tindakan bedah masih dilakukan secara manual, sehingga cendrung menyebabkan luka sayatan yang lebar, rasa sakit yang berlebihan serta masa pemulihan yang relatif lama. Sehingga kadang menimbulkan efek trauma bagi pasien.

Untuk mengatasi kondisi tersebut, berbagai alternatif cara telah dilakukan, salah satunya adalah metode pembedahan robot, yaitu pembedahan yang memanfaatkan lengan robot sebagai perpanjangan tangan dokter dalam melakukan tindakan bedah.

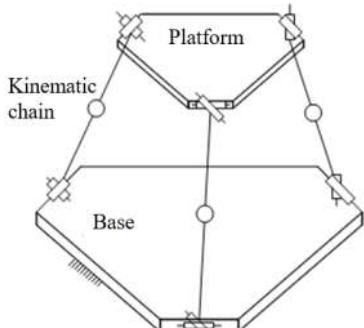
Untuk mendukung tindakan medis bedah robot, berbagai penelitian telah dilakukan dalam mengembangkan teknologi robot untuk proses pembedahan, diantaranya adalah robot bedah tenggorokan [1], robot vivo NB 2.1 yang merupakan robot bedah multi fungsi [2]. Namun kedua robot tersebut masih dikembangkan berdasarkan mekanisme seri, dimana mekanisme seri memiliki ketelitian dan kepresisian gerak yang relatif kurang baik.

Pada penelitian ini dikembangkan robot bedah dengan mekanisme paralel. Apabila dibandingkan dengan mekanisme seri, mekanisme paralel cendrung memiliki kekakuan yang lebih tinggi, ketelitian dan kepresisian gerak yang lebih baik, sehingga dirasa cocok untuk dijadikan alat bantu bedah.

Mekanisme Paralel

Mekanisme paralel merupakan struktur yang terdiri dari *base* dan *platform* yang dihubungkan oleh beberapa rantai kinematik yang tersusun secara paralel seperti gambar 1. Mekanisme paralel memiliki beberapa kelebihan seperti kekakuan yang baik, gerak ouput yang teliti dan presisi, massa yang

ringan serta dapat bekerja dengan cepat [3]. Walaupun demikian mekanisme paralel juga memiliki kelemahan diantaranya adalah working-space yang terbatas dan sulitnya dalam menganalisa dan mengontrol.

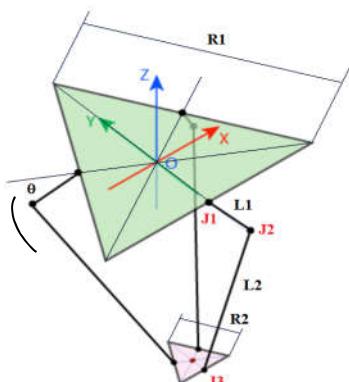


Gambar 1. Mekanisme paralel

Metode Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa tahapan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Untuk tahap awal penelitian difokuskan pada proses perancangan konfigurasi mekanisme paralel yang nantinya dijadikan sebagai alat bantu bedah.

Faktor yang harus dipertimbangkan dalam merancang rantai kinematik mekanisme paralel adalah kekakuan, *workingspace* dan kondisi singular. Untuk mendapatkan kondisi optimum, proses disain harus dimulai dengan menentukan konstanta kinematik mekanisme paralel. Adapun yang termasuk ke dalam konstanta kinematik diperlihatkan oleh gambar 4.



Gambar 4. Konstanta kinematik

dimana,

$R1$: sisi segitiga base

$R2$: sisi segitiga platform (end effector)

$L1$: panjang batang-1

$L2$: panjang batang-2

$J1$: join revolute base dengan platform

$J2$: join universal batang 1 dan batang 2

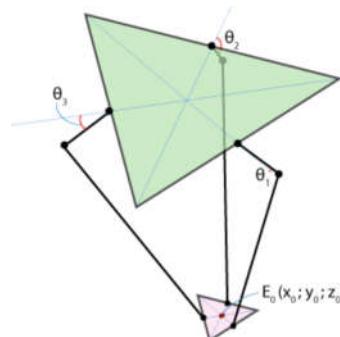
$J3$: join universal batang 2 dan platform

θ : Sudut input pada join aktif ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)

Pemilihan konstanta kinematik selanjutnya sangat berhubungan capain *workingspace* mekanisme

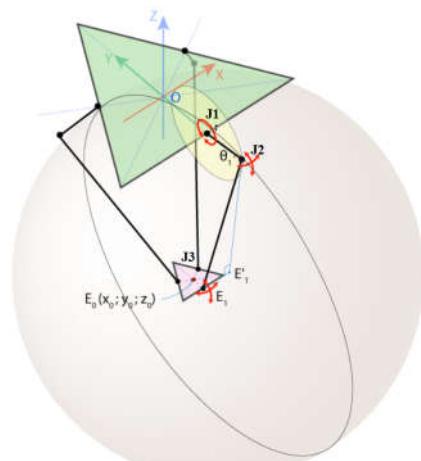
paralel, yaitu luas area kerja yang mampu dicapai oleh *platform*. Sudut θ pada join aktif merupakan input yang diberikan agar output pada *platform* bergerak sesuai dengan yang diharapkan. Hubungan antara sudut input dengan capaian area kerja yang mampu dicapai oleh *platform* dapat dianalisa melalui metode inverse kinematik

Invers kinematik merupakan kondisi dimana, posisi akhir output pada *platform* diketahui dan digunakan untuk menentukan input sudut pada join aktif. Pada gambar 5 dapat dilihat bahwa apabila posisi titik E_o diketahui nilainya, maka nilai tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan nilai sudut input ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) pada join aktif.



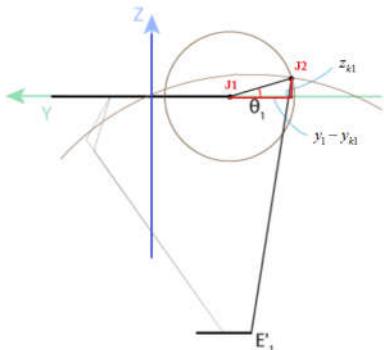
Gambar 5. Metode inverse kinematik

Metode invers kinematik pada mekanisme paralel dilakukan berdasarkan analisa konstanta kinematik. Join revolut $J1$ pada *base* menyebabkan batang-1 ($L1$) hanya dapat bergerak secara rotasi pada bidang XY , sehingga terbentuk sebuah lingkaran-1 dengan titik pusat $J1$ dan jari-jari $L1$. Selanjutnya join universal ($J2$) dirancang agar batang-2 ($L2$) dapat bergerak rotasi secara bebas sehingga terbentuk bola dengan diameter $L2$ dengan titik pusat E_1 seperti pada gambar 6. Perpotongan antara bola dengan bidang XY membentuk lingkaran-2 yang baru dengan jari-jari $J2E_1'$ dan titik pusat E_1' dimana E_1' merupakan proyeksi titik E terhadap bidang YZ .



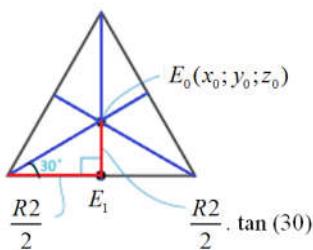
Gambar 6. Proyeksi bidang XY.

Apabila ditinjau dari bidang XY , maka perpotongan antara lingkaran-1 dengan lingkaran-2 bertemu pada titik join J_2 seperti terlihat pada gambar 7. Dengan adanya titik perpotongan dua lingkaran tersebut maka nilai θ_1 pada join aktif dapat ditentukan.



Gambar 7. Penentuan nilai θ_1

Nilai-nilai koordinat titik E_0, E_1, E' yang terdapat pada *platform* diuraikan pada gambar 8. Nilai-nilai tersebut kemudian ditentukan berdasarkan oleh pers (4) hingga (9)



Gambar 8. Platform mekanisme paralel

$$\begin{aligned} E_0 E_1 &= \frac{R^2}{2} \tan 30 \\ &= \frac{R^2}{2\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$E_1(x_0, y_0 - \frac{R^2}{2\sqrt{3}}, z_0) \quad (5)$$

maka dari nilai tersebut, didapatkan nilai jarak berikut ini

$$\begin{aligned} E'_1(0, y_0 - \frac{R^2}{2\sqrt{3}}, z_0) \\ E'_1 E_1 = x_0 \\ E'_1 J_2 = \sqrt{L^2 + x_0^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$J_1(x_0, -\frac{R^2}{2\sqrt{3}}, 0) \quad (7)$$

Dari jarak tersebut selanjutnya berlaku persamaan

segitiga siku-siku pada L_1 dan L_2 seperti pada persamaan (8)

$$\begin{aligned} (y_{j2} - y_{j1})^2 + (z_{j2} - z_{j1})^2 &= L_1^2 \\ (y_{j2} - y_{E'_1})^2 + (z_{j2} - z_{E'_1})^2 &= L_2^2 - x_0^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$J_2(x_0, y_{j2}, Z_{j2})$$

Selanjutnya diperoleh nilai θ_1 seperti pada persamaan (9)

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{z_{j2}}{y_{j1} - y_{j2}} \right) \quad (9)$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, nilai θ_2 dapat diperoleh dengan cara memutar bidang XY sebesar 120° berlawanan arah jarum jam. Sedangkan nilai θ_3 diperoleh dengan cara memutar bidang referensi searah jarum jam sebesar 120° . Selanjutnya matiks rotasi digunakan untuk menentukan titik koordinat referensi yang baru.

Ada dua kondisi singular yang dialami oleh mekanisme paralel yaitu *actuation singularity* dimana pada kondisi ini gerakan *platform* tidak dapat dikontrol oleh penggerak. Berikutnya adalah *constraint singularity* yaitu gerakan translasi pada *platform* tidak dapat dibatasi oleh tiga rantai kinematik.

Pada *actuation singularity* kondisi singular dievaluasi berdasarkan hubungan antara kecepatan input, $\dot{\theta}$ dan output, \dot{x} , sedangkan pada *constraint singularity* kondisi singular dievaluasi menurut hubungan gaya konstrain, f dan gaya luar, F . Dua kondisi singular tersebut dinyatakan dengan persamaan (10) dan (11) [8]

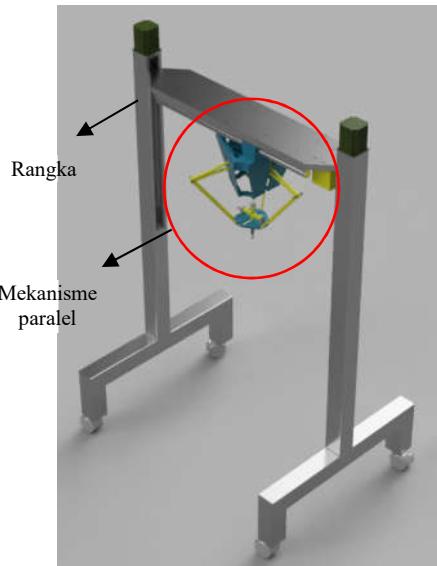
$$\{x\} = [J_a] \{\theta\} \quad (10)$$

$$\{F\} = [J_c] \{f\} \quad (11)$$

J_a, J_c adalah matriks 3×3 yang akan dievaluasi determinannya untuk menentukan kondisi singular. Untuk itu dibuatkan suatu indeks yang mewakili dua kondisi singular tersebut untuk memilih konstanta kinematik yang dinyatakan dengan persamaan (12)

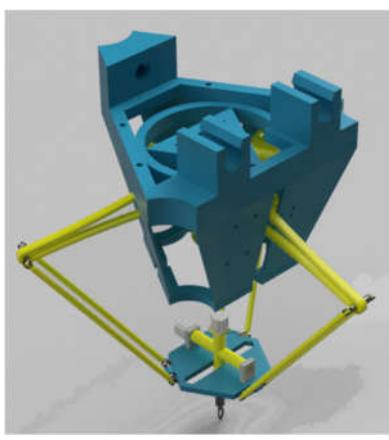
$$EV = |J_a| |J_c| \quad (12)$$

Pada tahap berikutnya didesain bentuk fisik alat bantu bedah dengan aplikasi program Auto Desk Inventor seperti terlihat pada gambar 9.



Gambar 9. Robot hasil disain CAD

Alat bantu bedah tersebut terdiri dari dua komponen utama yaitu rangka dan mekanisme paralel. Rangka pada dasarnya merupakan tumpuan bagi mekanisme paralel. Rangka dilengkapi dengan dua motor penggerak yang difungsikan untuk memposisikan mekanisme paralel pada objek yang akan dibedah. Sedangkan mekanisme paralel merupakan perangkat yang nantinya berfungsi sebagai robot untuk melakukan tindakan bedah. Mekanisme paralel pada alat ini terdiri dari *base*, rantai kinematik, *platform* seperti pada gambar 10. Ketiga komponen tersebut dihubungkan oleh join revolut pada *base*, dan join universal pada rantai kinematik serta *platform*. Pada ujung *platform* yang alat ini dilengkapi dengan alat bantu bedah sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 10. Desain CAD mekanisme paralel

Pada dasarnya mekanisme paralel mempunyai output berupa gerak translasi murni pada *platform*, yaitu gerak translasi searah tiga sumbu koordinat. Oleh karena nya untuk menambah orientasi alat tersebut, maka pada alat bedah ditambahkan dua motor penggerak agar alat bedah dapat bergerak rotasi searah tiga sumbu.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil perancangan yang telah dilakukan diperoleh dimensi dan konstanta kinematik mekanisme paralel yang difungsikan sebagai alat bantu bedah seperti pada tabel 1.

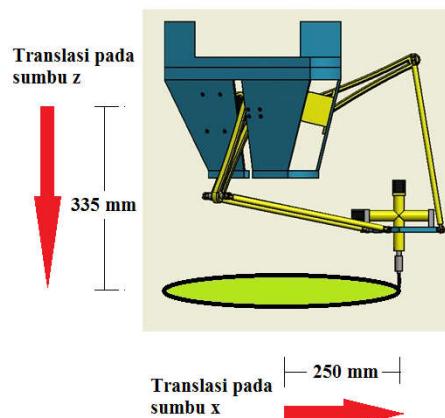
Tabel 1. Konstanta kinematik mekanisme

No	Parameter Kinematik	Dimensi
1	Jarak Sisi base (R1)	312 mm
2	Jarak sisi platform (R2)	277 mm
3	Batang 1 (L1)	215 mm
4	Batang 2 (L2)	340 mm
5	Jari-jari Base	90 mm
6	Jari-jari platform (E ₀ E ₁)	80 mm
7	Rentang sudut input (θ)	78°

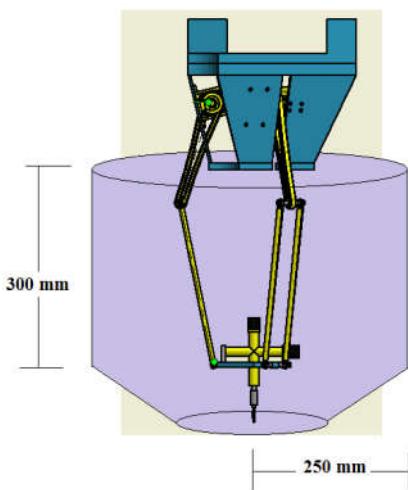
Dari hasil perancangan bentuk fisik mekanisme paralel, selanjutnya dilakukan simulasi untuk mengetahui luas area kerja (*workingspace*) yang mampu dilakukan oleh mekanisme paralel. Luas area *workingspace* tersebut dievaluasi berdasarkan gerak *platform* secara *successive translations* (translasi berurut) dalam tiga arah sumbu bidang koordinat.

Workingspace platform yang pertama dievaluasi adalah searah sumbu *z*, dimana *platform* digerakkan secara translasi pada sumbu *z* dari titik tertinggi hingga titik terendah yang mampu dicapai oleh *platform*. Dalam arah sumbu tersebut area kerja yang mampu dicapai oleh *platform* adalah sejauh 300 mm, dimulai dari titik yang berada pada jarak 235 mm dari koordinat join aktif hingga menuju jarak 535 mm.

Simulasi pengukuran *workingspace* mekanisme paralel kemudian dilanjutkan pada arah sumbu *x*. Pada simulasi ini *platform* diposisikan dalam area kerja sumbu *z* terlebih dahulu pada titik 335 mm dari join aktif, kemudian *platform* digeser lagi ke arah sumbu *x*. Dari hasil pengukuran ini area kerja yang mampu dicapai oleh *platform* dalam sumbu *x* adalah 250 mm seperti pada gambar 11.

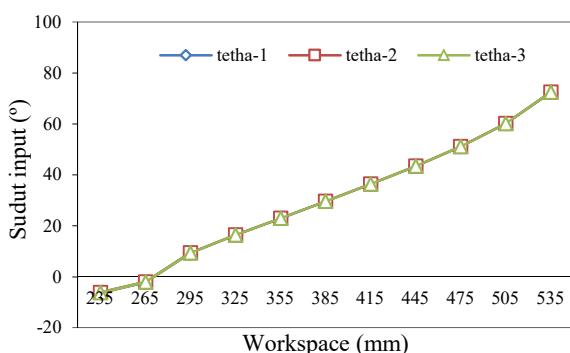
Gambar 11. Pengukuran secara *successive translations*

Selanjutnya hal yang sama juga dilakukan dalam mengevaluasi area kerja searah sumbu y , dimana *platform* digerakan dulu secara translasi dalam arah sumbu z sejauh 335 mm dari join aktif kemudian diikuti oleh gerak translasi searah sumbu y . Dari hasil evaluasi ini diperoleh area kerja dalam arah sumbu y sejauh 180 mm. Hasil pengukuran area kerja dalam arah tiga sumbu selanjutnya digabungkan sehingga membentuk *workingspace* mekanisme paralel dalam tiga dimensi seperti yang terlihat pada gambar 12.



Gambar 12. Area kerja mekanisme dalam bentuk 3D

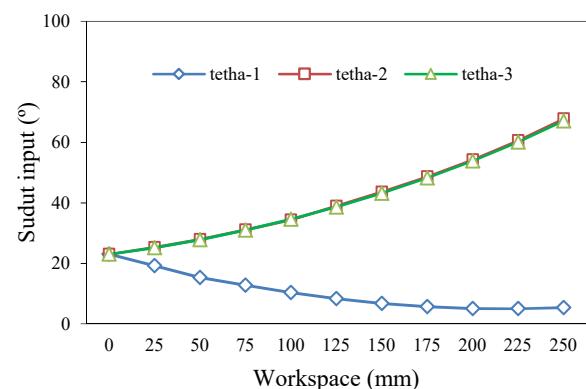
Apabila *platform* hanya digerakan secara translasi searah sumbu z , maka diperoleh hubungan sudut input dengan output *platform* seperti grafik pada gambar 13. Dalam arah sumbu z , *workspace* minimum mekanisme paralel berada pada jarak 235 mm dari titik koordinat join aktif dengan sudut input sebesar $-6,2^\circ$. Sudut input bernilai minus karena join aktif bergerak rotasi berlawanan arah jarum jam dari titik reverensi. Sedangkan jangkauan maksimum *platform* berada pada jarak 535 mm dari titik join aktif dengan sudut input senilai $72,4^\circ$. Sehingga secara keseluruhan area kerja searah sumbu z sepanjang adalah 300 mm. Dari rentang jarak 300 mm, area kerja terbaik yang jauh dari kondisi singular berada pada jarak 335-458 mm dari titik sumbu join aktif.



Gambar 13. Hubungan sudut input dengan gerak output pada platform searah sumbu z

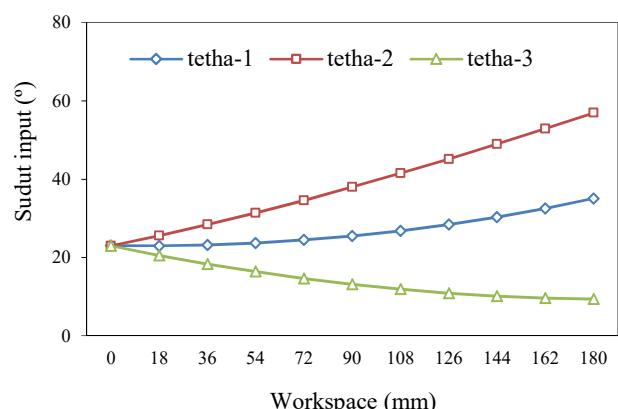
Dari grafik pada gambar 13, terlihat bahwa semua input sudut ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) berimpit pada satu titik yang sama. Hal ini karena tiga rantai kinematik mekanisme paralel dirancang dengan bentuk yang sama dan identik, sehingga apabila *platform* bergerak dalam sumbu z , maka sudut input cenderung bernilai sama.

Pada simulasi area kerja secara *successive translations* dari sumbu z dan dilanjutkan dengan sumbu x diperoleh hubungan sudut input dengan output seperti diperlihatkan pada gambar 14. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada satu titik hasil pengukuran *workingspace* diperoleh sudut input yang berbeda. Seperti Pada titik 250 mm diperoleh $\theta_1 = 5,3^\circ$, $\theta_2 = 67,7$ dan $\theta_3 = 67,7$. Dan begitu seterusnya untuk masing-masing titik pengukuran.



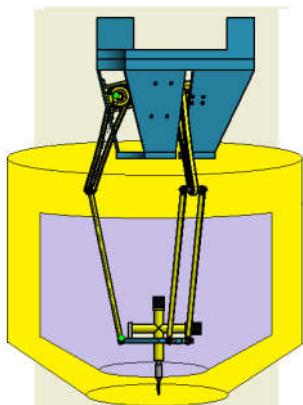
Gambar 14. Hubungan sudut input dengan output pada *successive translations* sumbu z dan sumbu x

Selanjutnya pada simulasi area kerja secara *successive translations* dari sumbu z dan dilanjutkan dengan sumbu y diperoleh hubungan sudut input dengan output seperti diperlihatkan pada gambar 15. Pada grafik dapat diketahui bahwa pada titik area *workingspace* tertentu diperoleh sudut input yang berbeda pada join aktif. Hasil pengukuran mekanisme paralel pada titik 180 mm diperoleh $\theta_1 = 35,07^\circ$, $\theta_2 = 56,96$ dan $\theta_3 = 9,4$.



Gambar 15. Hubungan sudut input dengan output pada *successive translations* sumbu z dan sumbu y

Area *singularity* yang terjadi pada mekanisme paralel terlihat pada gambar 16. Warna kuning pada gambar merupakan area dimana *platform* berada dekat dengan kondisi singularnya. Apabila *platform* berada pada area tersebut, maka *platform* cenderung untuk kehilangan satu atau beberapa derajat kebebasannya sehingga sulit untuk dikontrol.



Gambar 16. Kondisi singular mekanisme paralel

Kondisi singular yang terjadi pada area yang berada di bawah *platform* seperti pada gambar 16 lebih disebabkan karena tiga rantai kinematik berada pada sudut input yang maksimum, sehingga pergerakan *platform* sulit untuk dikontrol. Sedangkan kondisi singular yang terjadi pada area di dekat *base* mekanisme paralel dikarenakan oleh terjadinya interferensi antara satu rantai kinematik dengan batang mekanisme yang lainnya sehingga area kerja jadi terbatas.

Berdasarkan hasil evaluasi area kondisi *singularity* mekanisme paralel tersebut, maka alat bantu tersebut sangat direkomendasikan untuk bekerja pada area warna abu-abu, agar mekanisme dapat bekerja secara optimal sesuai dengan yang diharapkan serta mudah untuk dikontrol.

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut

1. Telah diperoleh sebuah desain mekanisme paralel yang difungsikan sebagai alat bantu bedah dengan konstanta $R1 = 312$ mm, $R2 = 277$ mm, $L1 = 215$ mm, $L2 = 340$ mm, $\theta = 78^\circ$.
2. Berdasarkan simulasi *workspace* mekanisme paralel tersebut diperoleh area kerja searah sumbu z sejauh 300 mm dengan sudut input $72,4^\circ$
3. Pada pengujian *successive translations* sumbu z dan sumbu x didapatkan area kerja sejauh 250 mm dengan sudut input $\theta_1 = 5,3^\circ$, $\theta_2 = 67,7$ dan $\theta_3 = 67,7$.

4. Pada pengujian *successive translations* sumbu z dan sumbu y didapatkan area kerja sejauh 180 mm dengan sudut input $\theta_1 = 35,07^\circ$, $\theta_2 = 56,96$ dan $\theta_3 = 9,4$.

Referensi

- [1] Wang, Kinematic Design for Robo assisted Laryngeal Surgery Systems, Proceedings of the IEEE/RSJ, China, 2006
- [2] Wortman, Design, Analysis, and Testing Of *In Vivo* Surgical Robots, Engineering Dissertations, Teses, and Student Research, University of Nebraska, Lincoln, 2011
- [3] William Robert, Mechanics and Control of Robotic Manipulators, Dr. Bob Productions, Ohio University, 2011.
- [4] Xie Ming, 2003, Fundamentals of Robotics : Linking Perception to Action, Singapore-MIT Alliance & Nanyang Technological University, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224
- [5] Criag jhon, Introduction to Robot Mechanic and Control 3rd Edition, Pearsrsons Education, USA,
- [6] Chen Xiang, Singularity Analysis of the Planar 3-RRR Parallel Manipulator Considering the Motion/Force Transmissibility, ICIRA 2012, Part I, LNAI 7506, pp. 250–260, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [7] Huda, Investigation of Geometric Error Management with Respect to Compensatable and Uncompensatable Error on the Three Degree of Freedom Spherical Parallel Mechanism, SNTTM XII Bandar Lampung, 2013.