

## SINTESA DIMENSI 2-DOF MEKANISME PARALEL (*PARALLEL MECHANISM*) DENGAN KONSTRAIN DISAIN *SINGULARITY* DAN *WORKINGSPACE*

Syamsul Huda, Mulyadi Bur and Hadi Rahman

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas

Kampus Unand Limau Manis, Padang 25163

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

### ABSTRAK

*Pada paper ini dipelajari disain kinematik berupa sintesa dimensi untuk mekanisme paralel 2-dof (degree of freedom). Mekanisme ini merupakan mekanisme loop tertutup (closed loop mechanism) dengan menggunakan rantai kinematik 5R (revolute joint) dengan konfigurasi simetri. Untuk menghasilkan mekanisme yang bebas dari poin singular pada workspace diperlukan sintesa dimensi yang mempertimbangkan aspek singularity. Hal ini terkait dengan perilaku mekanisme loop tertutup yang sangat bergantung kepada dimensi kinematik konstan. Evaluasi karakteristik workspace terkait dengan kinematik konstan dan singularity dilakukan untuk menentukan besaran kinematik konstan. Untuk keperluan sintesa dimensi tersebut telah dilakukan analisis kinematik berupa analisis posisi dan kecepatan. Dari hasil simulasi yang dilakukan diperoleh hubungan workspace dan singularity yang menunjukkan terdapatnya kurva singularity yang membatasi workspace atas beberapa bagian. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa jarak mounting rantai kinematik ke ground sangat berpengaruh terhadap workspace efektif dimana semakin besar jaraknya maka akan semakin besar workspace efektifnya. Kondisi seperti ini perlu menjadi pertimbangan dalam sintesa dimensi kerena meskipun mekanisme mempunyai workspace yang besar tapi tidak dapat menghasilkan gerakan yang kontinu end-effector.*

Keywords: Kinematik, sintesa dimensi, singularity, workspace

### 1. Pendahuluan

Terkait dengan perkembangan industri yang banyak menggunakan peralatan mekanis atau robot, telah meningkatkan kebutuhan akan robot dengan performa tinggi. Dalam hal ini mekanisme yang dapat menghasilkan kecepatan tinggi, kemampuan menahan beban yang besar, mempunyai inersia komponen bergerak yang rendah dan *workspace* besar telah menjadi topik kajian yang menarik bagi praktisi di bidang kinematik dan robotik. Dalam proses disain robot, berbagai performa kinematik tersebut dijadikan sebagai dasar utama dalam sintesa struktur. Berdasarkan kebutuhan terhadap gerak dengan percepatan dan kepresision tinggi telah menjadikan mekanisme loop tertutup (*parallel mechanism*) sebagai salah satu pilihan utama struktur robot.

Untuk mengakomodasi kebutuhan industri terhadap robot dengan kepresision dan percepatan tinggi telah banyak dikembangkan riset berbasis pada karakteristik mekanisme paralel baik dari segi keunggulan dan keterbatasannya. Mengacu kepada keterbatasan mekanisme loop tertutup dimana munculnya kondisi singular pada *workspace* yang besarnya terbatas telah menjadi topik kajian yang menarik dalam riset kinematik. Kajian mengenai metode evaluasi *singularity* untuk

*planar parallel mechanism* telah dilakukan oleh Deani dan Wolf dan Theingi et. al. [1,2]. Selanjutnya kajian mengenai *workspace* telah dilakukan oleh Szept et. al. [3].

Metode optimasi disain untuk mekanisme bidang dengan lima batang telah dipelajari oleh Liu, et. al [4]. Sebuah indikator unjuk kerja yang dikenal dengan *performance index* telah diterapkan untuk mengevaluasi kinerja mekanisme paralel 2-dof. Metode untuk pemodelan dan pengontrolan mekanisme dengan akurasi dan kecepatan tinggi telah dikembangkan oleh Junhong, et.al. [5]. Prosedur untuk sintesa struktur terkait dengan mekanisme bidang yang menggunakan *revolute joint* telah diusulkan oleh Liu and McPhee, [6].

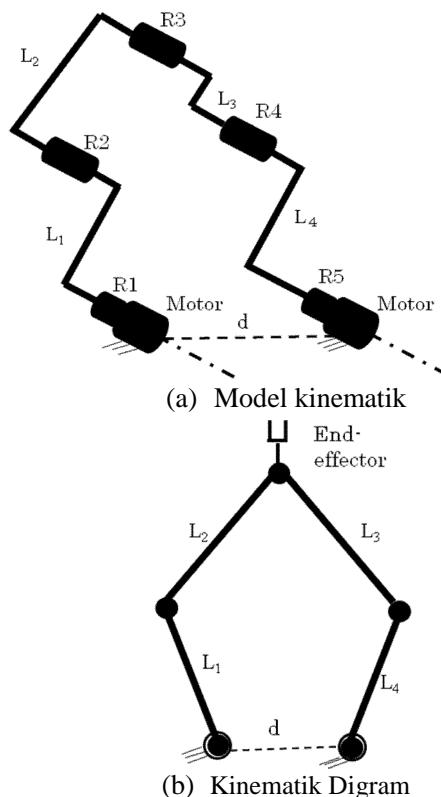
Pada paper ini dilakukan studi mengenai analisis kinematik dan sintesa dimensi mekanisme paralel 2-dof dengan struktur 5R (*Revolute joint*). Studi ini bertujuan untuk melihat keterkaitan antara kinematik konstan dengan capaian *workspace* dan perilaku *singularity*. Karakteristik *singularity* pada *workspace* dijadikan sebagai pertimbangan utama dalam proses sintesa dimensi karena kurva *singularity* tersebut membuat *workspace* terbagi atas beberapa daerah diskret.

### 2. Konfigurasi Kinematik

Kinematik diagram mekanisme paralel 2-dof



diperlihatkan pada gambar 1. Mekanisme ini disusun oleh lima batang yaitu  $L_1, L_2, L_3, L_4$  dan  $d$  yang merupakan set kinematik konstan dan lima buah *revolute joint* (R) dan *end-effector* yang ditempatkan pada salah satu *revolute joint* yang merupakan batang output. Selanjutnya karena mekanisme ini mempunyai 2-dof gerakan batang output, maka dibutuhkan dua buah motor penggerak yang ditempatkan pada *ground* (base).



Gambar 1 2-5R Mekanisme paralel

Mekanisme ini dikenal dengan 5R mekanisme paralel, dimana  $L_i$  ( $i = 1,2,3,4,5$ ) merupakan set kinematik konstan yang harus didefinisikan untuk menghasilkan performan tertentu dari gerakan *end-effector*.

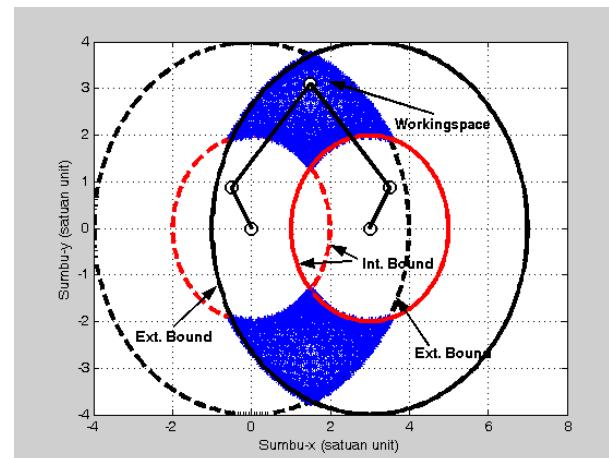
### 3. Workingspace

*Workingspace* merupakan salah satu parameter tinjauan kinematik yang sangat penting untuk mekanisme loop tertutup. Dalam kenyataannya mekanisme dengan loop tertutup ini mengalami keterbatasan terhadap capaian *workingspace*. Untuk itu diperlukan kajian yang penting terhadap sintesa dimensi dalam hal penentuan kinematik konstan untuk menghindari interferensi masing-masing komponen yang bergerak.

Secara umum *workingspace* didefinisikan sebagai daerah yang dapat dijangkau oleh *end-effector*. Untuk mekanisme paralel 2dof yang diperlihatkan pada gambar 1, *workingspace* merupakan daerah sekutu yang

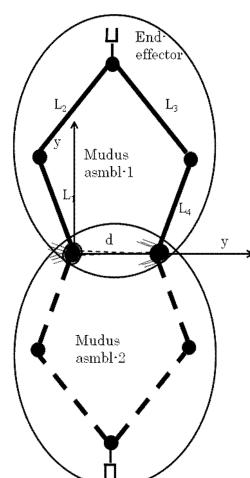
dihasilkan oleh dua rantai kinematik. Rantai kinematik pertama dibentuk oleh  $R_1-L_1-R_2-L_2-R_3$  dan rantai kinematik kedua disusun oleh  $R_5-L_4-R_4-L_3-R_3$  dan kemudian diperlukan satu kinematik konstan lagi dalam hal ini,  $d$  yang merupakan jarak antara penempatan kedua rantai kinematik pada *ground*.

*Workingspace* yang terbentuk merupakan irisan dari *workingspace* yang dihasilkan oleh kedua rantai kinematik seperti diperlihatkan pada gambar 2 yang mempunyai batas internal dan eksternal. Irisan capaian kedua *end-effector* masing-masing mekanisme seri menghasilkan *workingspace* mekanisme paralel 2-dof seperti diperlihatkan pada gambar 2. *Workingspace* tersebut diperoleh dari dua proses asembli kedua rantai kinematik seperti diperlihatkan pada gambar 3.



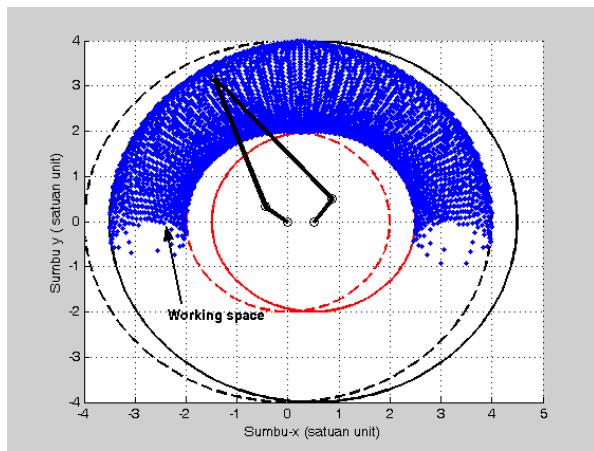
Gambar 2 Pendefinisian *workingspace*

Bentuk dan capaian *workingspace* untuk berbagai konfigurasi kinematik konstan,  $L_i$  ( $i = 1,2,3,4,5$ ) diperlihatkan pada gambar 4.

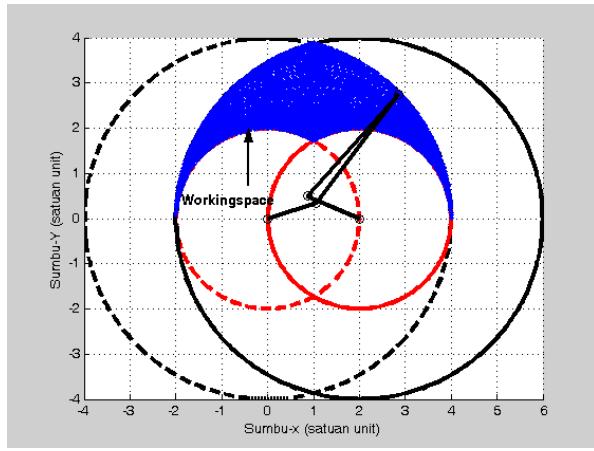


Gambar 3 Modus asembli mekanisme



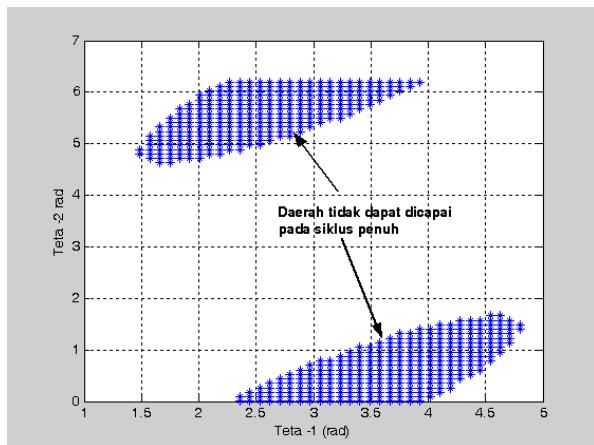


(a) Working space ( $L_3=L_1$ ,  $L_2=L_4=2L_1$ ,  $d=0.5L_1$ )



(b) Working space ( $L_3=L_1=L_2=L_4=2L_1$ ,  $d=2L_1$ )  
(c)

Gambar 4 Hubungan *workingspace* terhadap perubahan kinematik konstan



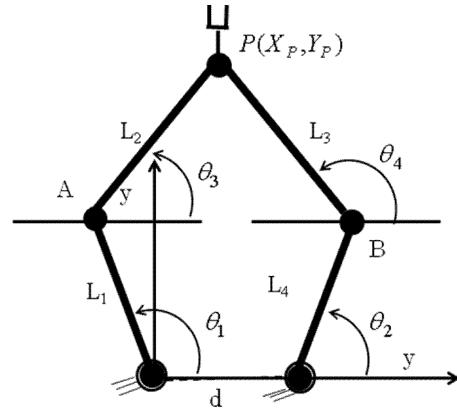
Gambar 5 Batasan putaran input ( $\theta_1, \theta_2$ ) untuk  $L_3=L_1$ ,  $L_2=L_1=L_1$ ,  $d=L_1$

*Workingspace* tersebut diperoleh dari gerakan batang

input dengan siklus penuh,  $0 \leq \theta_{1,2} \leq 2\pi$ . Dari gambar 4 terlihat bahwa untuk perbandingan  $L_2$  terhadap  $L_1$  tetapi harga  $d$  sangat berpengaruh terhadap capaian *workingspace*. Semakin besar perbandingan  $d$  terhadap  $L_1$  maka semakin menurun capaian *workingspace*. Di sisi lain untuk panjang  $L_1=L_2=L_3=L_4$ , untuk berbagai harga  $d$ , mekanisme tidak dapat mengalami siklus penuh atau  $0 \leq \theta_{1,2} \leq 2\pi$  seperti diperlihatkan pada gambar 5. Berdasarkan gambar 5, terlihat ada kombinasi kedua sudut input yang tidak dapat dicapai oleh mekanisme. Ini menunjukkan bahwa mekanisme tersebut tidak dapat diopersikan pada siklus penuh (*fully-cycle*).

#### 4. Analisis Perpindahan

Berdasarkan diagram kinematik pada gambar 6 dapat diturunkan persamaan perpindahan yang menyatakan hubungan antara putaran input  $(\theta_1, \theta_2)$  dan posisi *end-effector*  $(X_P, Y_P)$ . Panjang batang  $L_i$  ( $i = 1,2,3,4,5$ ),  $d$  dan posisi sudut  $\theta_i$  ( $i = 1,2,3,4$ ) adalah parameter yang digunakan pada persamaan perpindahan. Persamaan perpindahan ini diturunkan berdasarkan asumsi atau batasan disain bahwa mekanisme mempunyai rantai kinematik yang simetri (identik).



Gambar 6 Kinematik parameter mekanisme paralel 2-dof

Posisi *end-effector*,  $P$  dapat dinyatakan dengan:

$$(X_P - X_A)^2 + (Y_P - Y_A)^2 = (L_2)^2 \quad (1)$$

$$(X_P - X_B)^2 + (Y_P - Y_B)^2 = (L_3)^2. \quad (2)$$

Posisi titik A dan B dapat dinyatakan sebagai:

$$(X_A, Y_A) = (L_1 \cos \theta_1, L_1 \sin \theta_1) \quad (3)$$

$$(X_B, Y_B) = (L_4 \cos \theta_2, L_4 \sin \theta_2). \quad (4)$$

Dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) maka dapat diperoleh dua solusi yang menyatakan hubungan antara sudut input dan posisi *end-effector* yang dapat dituliskan dalam bentuk:



$$Y_{P(1,2)} = \frac{-c_2 \pm \sqrt{(c_2)^2 - 4c_1c_3}}{2c_1} \quad (5)$$

$$c_1 = (k_3)^2 + 1 \quad (6)$$

$$c_2 = 2k_2k_3 - 2X_Ak_3 - 2Y_A \quad (7)$$

$$c_3 = (k_2)^2 - 2X_Ak_2 + (X_A)^2 + (Y_A)^2 - (L_2)^2 \quad (8)$$

$$k_1 = (X_B)^2 + (Y_B)^2 - (X_A)^2 + (Y_A)^2 \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{2(X_A - X_B)} \quad (11)$$

$$k_3 = \frac{Y_B - Y_A}{X_A - X_B} \quad (12)$$

$$X_{P(1,2)} = Y_{P(1,2)} + K_2 \quad (13)$$

## 5. Analisis Kecepatan

Analisis kecepatan didasarkan pada kinematik kopel (*couple kinematic*), dimana rotasi dari satu aktuator dapat didistribusikan pada dua join yang terkopel. Rotasi tersebut dapat dikontrol dengan parameter kinematik kopel. Sistem transmisi melalui roda gigi planet dan penggerak *differential gear* merupakan salah satu contoh kinematik kopel.

Berdasarkan parameter kinematik pada gambar 6, sebuah sistem pengerak diferensial diaplikasikan pada mekanisme 2-dof tersebut, dimana gerakan input diwakili oleh  $\omega_1$  dan  $\omega_2$  untuk masing-masing rantai kinematik. Hubungan antara satu input dengan dua output gerak dapat dinyatakan dengan:

$$\varphi_1 \dot{\theta}_1 + \eta_1 \dot{\theta}_3 = \omega_1 \quad (14)$$

$$\varphi_2 \dot{\theta}_2 + \eta_1 \dot{\theta}_4 = \omega_2 \quad (15)$$

dimana  $\varphi_{1,2}$  dan  $\eta_{1,2}$  adalah parameter dari penggerak diferensial *gear*. Kecepatan *end-effector*  $\dot{\mathbf{P}}$  dapat ditentukan dari kondisi geometri kedua rantai kinematik yang dinyatakan dengan:

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\theta}_1 \mathbf{L}_1 + \dot{\theta}_3 \mathbf{L}_2 \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\theta}_2 (\mathbf{L}_4 - \mathbf{d}) + \dot{\theta}_4 \mathbf{L}_3, \quad (17)$$

dimana  $\mathbf{L}_i (i=1,2,3,4)$  adalah vektor posisi titi A, B, dan P ditinjau dari dua rantai kinematik O-A-P dan O-d-B-P. Selanjutnya dengan substitusi persamaan (14), (15) ke persamaan (16) dan (17) diperoleh persamaan (18) dan (19):

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\theta}_1 \mathbf{L}_1 + \frac{\omega_1}{\eta_1} \dot{\theta}_3 \mathbf{L}_2 - \frac{\varphi_1}{\eta_1} \dot{\theta}_3 \mathbf{L}_2 \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\theta}_2 (\mathbf{L}_4 - \mathbf{d}) + \frac{\omega_2}{\eta_2} \dot{\theta}_4 \mathbf{L}_3 - \frac{\varphi_2}{\eta_2} \dot{\theta}_4 \mathbf{L}_3. \quad (19)$$

Dengan menyusun kembali persamaan (18) dan (19) diperoleh hubungan kecepatan input dan kecepatan output yang dapat dituliskan sebagai :

$$J_A \dot{\mathbf{P}} = J_B \dot{\theta} \quad (20)$$

$$J_A \text{ dan } J_B \text{ adalah matriks Jacobi dan } \dot{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \dot{X}_P \\ \dot{Y}_P \end{bmatrix}, \\ \dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}.$$

## 6. Evaluasi Singularity

Kelemahan lain dari mekanisme paralel adalah munculnya titik singular dari *end-effector* pada *workspace*. Pada kondisi singular tersebut gerakan *end-effector* tidak dapat dikontrol oleh aktuator. Berdasarkan persamaan (20) *singularity* dapat dievaluasi berdasarkan determinan matriks,  $J_A$  dan  $J_B$ .

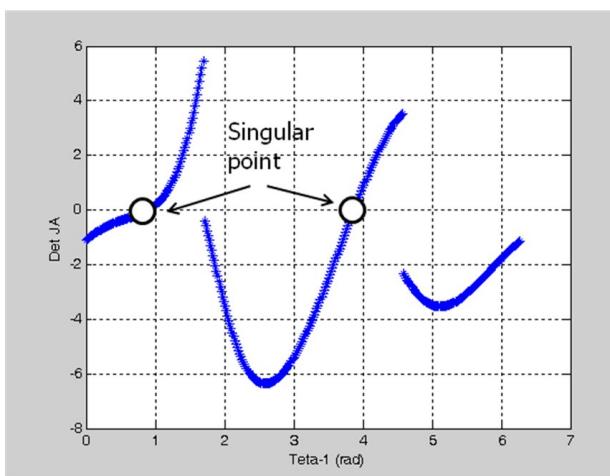
Jika determinan  $J_B$  bernilai nol maka ada nilai kecepatan input yang menyebabkan kecepatan output bernilai nol. Kondisi ini disebut *inverse singularity*. Dalam kondisi fisiknya mekanisme kehilangan satu atau lebih derajat kebebasan, dimana mekanisme menghasilkan momen atau gaya internal meskipun input torsi dari aktuator adalah nol.

Di sisi lain jika determinan  $J_A$  bernilai nol maka ada kecepatan *end-effector* meskipun kecepatan aktuator adalah nol. *Singularity* jenis ini disebut *direct singularity*, dimana mekanisme mempunyai tambahan derajat kebebasan, sehingga mekanisme tidak dapat menahan gaya dan momen meskipun aktuator terkunci (*zero motion*).

Berdasarkan kinematik konstan yang muncul pada persamaan (16) dan (17) maka dapat dievaluasi kondisi singular untuk berbagai konfigurasi mekanisme (set kinematik konstan). Hubungan antara kinematik konstan dan tampilan kondisi singular dievaluasi secara numerik. Selanjutnya untuk kondisi singular maka determinan matriks  $J_A$  dan  $J_B$  adalah nol. Secara numerik mendapatkan poin singular dilakukan dengan melihat perubahan tanda dari determinan matriks Jacobi tersebut. Jika terjadi perubahan tanda dalam kurva yang kontinu maka akan ditemukan poin singular seperti diilustrasikan pada gambar 7. Cara evaluasi ini diusulkan oleh Takeda [7]. Dari gambar 7 tersebut diperoleh dua poin singular yang ditandai dengan perubahan tanda kurva kontinu dari plot determinan matriks  $J_A$ .

Tampilan poin singular pada *workspace* untuk berbagai konfigurasi mekanisme diperlihatkan pada gambar 8, 9 dan 10. Pada gambar tersebut ditunjukkan hubungan antar set kinematik konstan dengan tampilan poin singular. Tiga set kinematik konstan untuk berbagai perbandingan panjang batang diperlihatkan pada Tabel 1.





Gambar 7 Cara mengevaluasi poin *singularity*

Tabel 1. Kinematik konstan untuk mekanisme paralel 2-dof

No	$L_1$ (unit)	$L_2$ (unit)	$L_3$ (unit)	$L_4$ (unit)	$d$ (unit)
Tipe-1	1	3	3	1	0.5
Tipe-2	1	3	3	1	2
Tipe-3	1	3	3	1	3

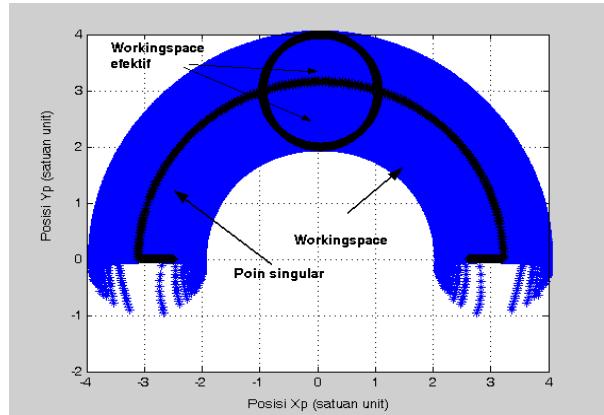
Data kinematik konstan untuk tiga tipe mekanisme sebagai studi kasus yang diperlihatkan pada Tabel 1 adalah dipilih sedemikian sehingga perbandingan  $\left(\frac{L_2}{L_1}\right)$  dan  $\left(\frac{L_4}{L_3}\right)$  tetap dengan variasi jarak *mounting* ke

*ground*,  $d$ . Hal ini ditujukan untuk melihat pengaruh jarak *mounting* terhadap perilaku mekanisme terhadap tampilan poin singular di *workspace*.

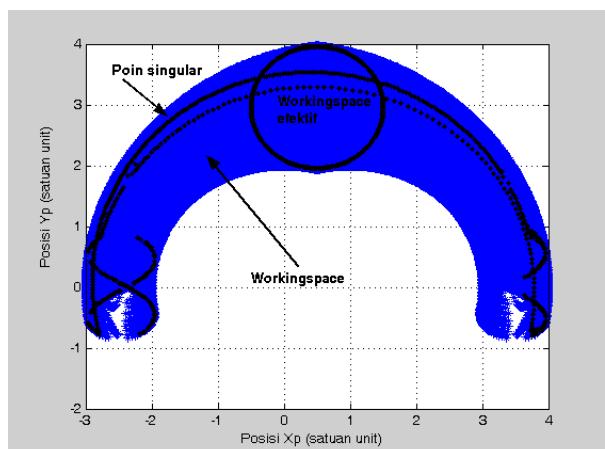
Dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa *workspace* dibagi atas beberapa daerah yang bebas dari poin singular. Poin singular tersebut membentuk kurva di *workspace*. Dalam pengoperasian mekanisme, *end-effector* tidak dapat melewati kurva singular karena pada saat melewati kurva tersebut gerakan *end-effector* tidak dapat dikontrol. Berdasarkan alasan kepraktisan dengan merujuk kepada disain mekanisme yang simetri maka daerah *workspace* yang bebas dari kurva singular dan simetri terhadap salah satu sumbu dipilih sebagai *workspace* efektif.

Dari ketiga tipe mekanisme tersebut Tipe-3 memiliki lebih luas *workspace* efektif. Kandidat mekanisme Tipe-3 adalah lebih baik dari kedua tipe lainnya. Namun hal ini bukanlah tipe yang optimal karena *workspace* efektif hanya dievaluasi untuk tiga tipe tersebut sebagai studi kasus simulasi. Dari kondisi ini terlihat bahwa untuk perbandingan  $\left(\frac{L_2}{L_1}\right)$  dan  $\left(\frac{L_4}{L_3}\right)$  konstan jarak *mounting* mekanisme ke *ground*,  $d$  yang

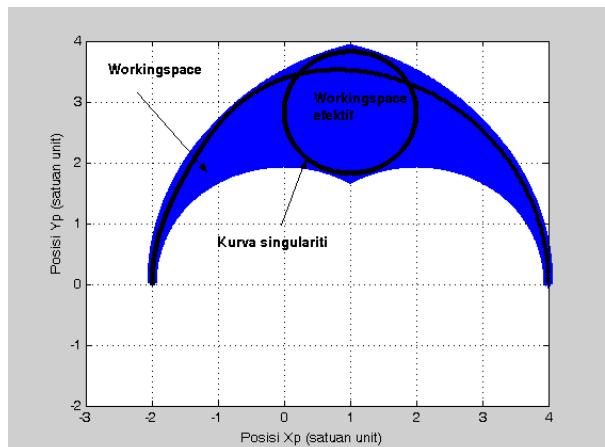
lebih besar memberikan luas daerah efektif yang lebih besar.



Gambar 8 *Workspace* dan tampilan poin singular mekanisme Tipe-1



Gambar 9 *Workspace* dan tampilan poin singular mekanisme Tipe-2



Gambar 10 *Workspace* dan tampilan poin singular mekanisme Tipe-3



## 7. Kesimpulan

Dari hasil kajian kinematik terhadap mekanisme paralel 2-dof 5R dengan konfigurasi simetri diperoleh bahwa jarak *mounting* mekanisme ke *ground* sangat berpengaruh terhadap *workspace* secara keseluruhan. Untuk jarak *mounting* yang lebih kecil akan memberikan *workspace* yang lebih besar. Namun sebaliknya untuk jarak *mounting* yang kecil tersebut memberikan *workspace* efektif yang lebih kecil. Dari segi capaian *workspace*, jika kondisi geometrik panjang batang  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$  dipenuhi maka berapa pun jarak *mounting* ke *ground*,  $d$  tidak akan menghasilkan mekanisme dengan siklus penuh ( $0 \leq \theta_{1,2} \leq 2\pi$ ).

## Referensi

- [1] Degani, A. And Wolf, A., "Graphical Singularity Analysis of Planar Parallel Mechanism", Proceeding of the 2006 IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, 2006, pp. 751-756.
- [2] Li, C. T., at. al., "Singularity Management of 2dof Planar Manipulator Using Copule Kinematics", Seventh Int. Conf. On Control, Automation and Vision, Dec. 2002, pp. 402-407.
- [3] Szep, C , at. al., "Kinematics, Workspace, Design and Accuracy Analysis of RPRPR Medical Parallel Robot", HSI, Catania, Italy, 2009, pp. 75-80.
- [4] Liu, X-J., at. al., "Performance Atlases and Optimum Design of Planar 5R Symetrical Parallel Mechanism", Mechanism and Machine Theory Vo. 41, 2006, pp. 119-144.
- [5] Ji, J., at. al., " A Novel High-Speed and High-Accuracy Manipulator of Planar Five-Link Structure: Modeling adn Calibration", Advanced Robotics, Vol. 23, 2009, pp. 89-112.
- [6] Liu, Y. And Mcphee, J., "Automated Kinematic Synthesis of Planar Mechanism with Revolute Joints", Mechanics Based Design of Structures and Machine, Vol. 35, 2007, pp. 405-445.
- [7] Takeda, Y and Funabashi, H, "Kinematics and Statics Characteristics of in-parallel actuated manipulators at singular points and their neighbourhood", JSME Int. Journal Serries C, Vol 39, No. 1, 1996, pp. 89-93.

