



## **OPTIMISASI DESAIN PLANAR MANIPULATOR SIMETRIS 5R**

**Eka Marliana**

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya  
Jalan Semolowaru No. 45 Surabaya 60118, Tel. 031-5931800, Indonesia  
email: [ekamarliana@untag-sby.ac.id](mailto:ekamarliana@untag-sby.ac.id)

### **ABSTRAK**

Dalam jurnal ini akan dibahas tentang proses optimisasi desain dari planar manipulator simetris 5R, khususnya untuk mekanisme dalam mode kerja “+” dan konfigurasi “Up”. Tujuan utama dari jurnal ini adalah untuk mendapatkan ukuran *link* dari planar manipulator simetris 5R yang mampu menghasilkan indeks performa tinggi, khususnya *Global Conditioning Indeks* (GCI). Dalam proses optimisasi ini dipertimbangkan juga *workspace* dari mekanisme (teoritik, *usable* dan *Maximal Inscribed Workspace*) dan *Global Conditioning Index*-nya. Untuk mendapatkan kombinasi terbaik dari parameter panjang non-dimensional, *Global Conditioning Index* (GCI) telah dihitung untuk setiap kombinasi dari parameter non-dimensional. Desain mekanisme dengan GCI yang optimum telah didapatkan dengan menggunakan Matlab *optimization tools*. Dalam hal ini, *workspace* yang diinginkan memiliki radius 0.125 meter. *Usable Workspace* tidak bisa diinterpretasikan sebagai *workspace* mesin yang sesungguhnya karena *Local Conditioning Index* (LCI) dalam *usable workspace* nilainya bervariasi dari nilai kecil hingga besar. Sehingga perlu didefinisikan sebuah *Good Conditioning Workspace* (GCW) yang dibatasi oleh nilai spesifik dari *Local Conditioning Index* (LCI). Lingkaran terbesar didalam *Good Conditioning Index* (GCW) dapat digunakan sebagai untuk menghitung faktor dimensional yang berguna untuk mengkonversi parameter non-dimensional optimum menjadi parameter optimum dengan dimensi tertentu. Selanjutnya dilakukan identifikasi karakteristik dari desain tersebut dengan menggunakan Matlab Simulink dan Simscape Multibody. Didalam simulasi ini diasumsikan *link* tidak memiliki massa dan titik massa tunggal berada pada *end-effector* mesin. Titik massa ini merepresentasikan tangan manusia pada aplikasi mesin yang akan datang dan dikembangkan dari desain ini. Simulasi ini menghasilkan beberapa output yang penting, seperti koordinat x dan y dari *end-effector*, sudut, kecepatan angular, percepatan angular dan torsi yang dibutuhkan pada *joint*. Hasil simulasi ini digunakan untuk menentukan ukuran dan kapasitas aktuator pada mesin tersebut.

**Kata kunci:** paralel manipulator, 5R, optimisasi, simetris

### **PENDAHULUAN**

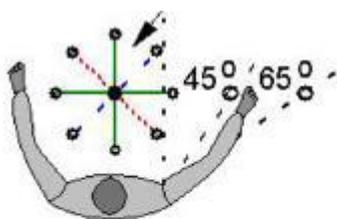
Dewasa ini seiring dengan berkembangnya teknologi informasi dan komunikasi khususnya di bidang teknologi sistem kendali (*control system*), maka semakin banyak pula implementasinya dalam kehidupan sehari-hari manusia. Hampir semua teknologi mekanis saat ini telah

mengimplementasikan teknologi sistem kendali untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dan presisi. Namun, untuk mengimplementasikan teknologi sistem kendali dalam sebuah sistem mekanis tidaklah mudah, diperlukan desain mekanis yang tepat agar hasilnya akurat dan presisi. Untuk mendapatkan sebuah sistem mekanis yang

mampu di kendalikan dengan mudah dan akurat, maka diperlukan sebuah sistem mekanis yang *controlable*.

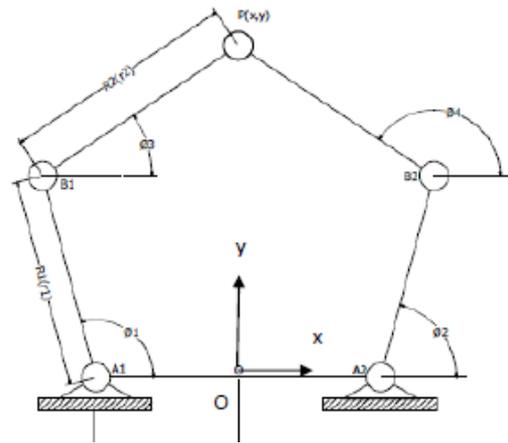
Salah satu jenis sistem mekanis yang banyak digunakan untuk kehidupan sehari-hari adalah planar manipulator 5R simetris. Manipulator ini memiliki derajat kebebasan yang minimal, dapat digunakan untuk memposisikan sebuah titik dalam sebuah area tertentu yang biasa disebut sebagai *workspace*. Manipulator ini terdiri dari 5 link yang saling tersambung dengan *revolute joint*, 2 diantaranya tersambung dengan *base*. Bagian yang digunakan untuk menunjukkan posisi sebuah titik tertentu didalam *workspace* disebut sebagai *end-effector* dan dinotasikan sebagai  $P(x, y)$ . Jenis mekanisme ini banyak digunakan karena memiliki inersia yang rendah, kekakuan dan akurasi yang tinggi. Karakteristik inilah yang diperlukan untuk robot medis dan rehabilitasi. Namun kelemahan dari mekanisme ini adalah memiliki *workspace* yang relatif kecil, hubungan input-output yang kompleks dan memiliki 3 jenis singularity dalam *workspace* nya. Untuk mendapatkan *workspace* yang optimum diperlukan pemilihan geometri link yang tepat.

Agar mekanisme tersebut dapat dikatakan *controlable*, tidak hanya memerlukan *workspace* yang optimum tetapi juga penting untuk menghitung indeks performa dari mekanisme tersebut. Dalam hal ini ada beberapa indeks performa yang perlu dijadikan konsiderasi dalam proses desain. Performa mekanisme secara umum dapat dinyatakan dengan *Global Conditioning Index* (GCI). Selain itu juga ada *Local Conditioning Index* (LCI) dan *Maximal Inscribed Circle*



Movement Component Training

Gambar 1. Gerak pada Robot Medis dan Rehabilitasi



Gambar 2. Planar Manipulator Simetris 5R

(MIC). Untuk mendapatkan dimensi link manipulator yang benar dan optimum, semua indeks performa tersebut harus dijadikan konsiderasi (Liu, 2006).

Robot rehabilitasi medik berinteraksi langsung dengan pasien, sehingga sangat penting untuk menggunakan alat yang stabil dan *controlable*. Dengan demikian, tujuan utama dari proses optimisasi ini adalah untuk mendapatkan mekanisme dengan indeks performa global yang tinggi, khususnya didalam *workspace* yang diinginkan. Berdasarkan Gosselin dan Angeles, performa keseluruhan pada sebuah mekanisme dapat disebut sebagai *Global Conditioning Index* (GCI).

### Inverse Kinematik

Invers kinematik adalah evaluasi dari gerak *joint* berdasarkan posisi *end-effector*. Dalam analisa ini, input yang diberikan dalam proses perhitungan adalah koordinat posisi dari *end-effector*  $P(x, y)$ . Sedangkan output analisa dari inverse kinematik adalah posisi sudut dari *joint* yang mengalami aktuasi. Posisi *end-effector* dapat dinotasikan sebagai posisi vektor  $p$ , sehingga,

$$p = (x \ y)^T$$

Dengan referensi terhadap *frame*  $O - xy$ , posisi vektor  $b_i$  dari titik  $B_i (i = 1, 2)$  dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} b_1 &= (r_1 \cos \theta_1 - r_3 & r_1 \sin \theta_1)^T & ; \\ b_2 &= (r_1 \cos \theta_2 + r_3 & r_1 \sin \theta_2)^T \end{aligned}$$

Dengan  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  adalah sudut input untuk dua *joint* yang diaktuator. Sehingga permasalahan inverse kinematik dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$|pb_i| = r_2, i = 1, 2$$

Sehingga didapatkan persamaan berikut,

$$\begin{aligned} (x - r_1 \cos \theta_1 + r_3)^2 + (y - r_1 \sin \theta_1)^2 &= r_2^2 \\ (x - r_1 \cos \theta_2 - r_3)^2 + (y - r_1 \sin \theta_2)^2 &= r_2^2 \end{aligned}$$

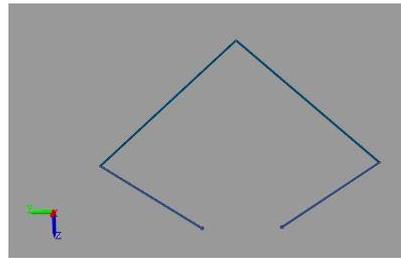
Jika posisi dari *end-effector*  $P(x, y)$  sudah diketahui, maka untuk mendapatkan nilai sudut pada masing-masing *joint* yang mengalami aktuasi digunakan persamaan dibawah ini.

$$\begin{aligned} \theta_i &= 2 \tan^{-1}(z_i), i = 1, 2 \\ z_i &= \frac{-b_i \pm \sigma_i \sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}}{2a_i}, i = 1, 2 \end{aligned}$$

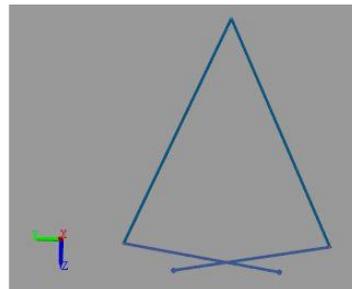
Dimana,

$$\begin{aligned} \sigma_i &= 1 \text{ atau } -1 \\ a_1 &= r_1^2 + y^2 + (x + r_3)^2 - r_2^2 + 2(x + r_3)r_1 \\ b_1 &= -4yr_1 \\ c_1 &= r_1^2 + y^2 + (x + r_3)^2 - r_2^2 - 2(x + r_3)r_1 \\ a_2 &= r_1^2 + y^2 + (x - r_3)^2 - r_2^2 + 2(x - r_3)r_1 \\ b_2 &= b_1 = -4yr_1 \\ c_2 &= r_1^2 + y^2 + (x - r_3)^2 - r_2^2 - 2(x - r_3)r_1 \end{aligned}$$

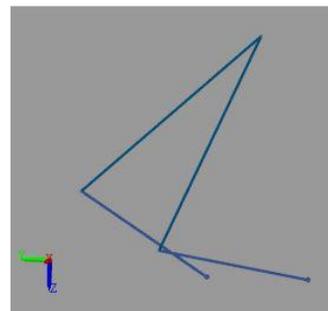
Berdasarkan analisa inverse kinematik diatas pada mekanisme planar simetris 5R terdapat 4 solusi yang mungkin didapatkan, “+-“, “++“, “-+” dan “--“. Solusi ini selanjutnya dapat disebut sebagai mode kerja. Jika  $\sigma_1 = 1$  and  $\sigma_2 = -1$ , maka didapatkan mode “+-“. Ke-empat solusi tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan posisi *end-effector* yang sama, meskipun dengan konfigurasi yang berbeda seperti yang ada pada gambar ().



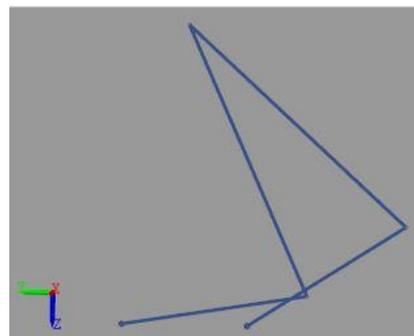
Gambar 3. Mode Kerja “+-“



Gambar 4. Mode Kerja “-+”



Gambar 5. Mode Kerja “--“



Gambar 6. Mode Kerja “++”

### Matriks Jacobi

Matriks Jacobi adalah salah satu komponen penting dalam yang diperlukan untuk analisa optimasi desain manipulator. Hal ini dikarenakan matriks Jacobi

dipengaruhi secara langsung oleh konfigurasi manipulator. Selanjutnya matriks jacobian akan digunakan untuk analisa singularity pada manipulator. *Condition-Number* dari matriks jacobian dipergunakan untuk memahami tingkat akurasi sebuah mekanisme. Dari persamaan sebelumnya dan diferensial terhadap waktu, maka didapatkan persamaan kecepatan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} r_1[y \cos\theta_1 - (x + r_3)\sin\theta_1]\dot{\theta}_1 &= (x + r_3 - r_1\cos\theta_1)\dot{x} + (y - r_1\sin\theta_1)\dot{y} \\ r_1[y \cos\theta_2 + (r_3 - x)\sin\theta_2]\dot{\theta}_2 &= (x - r_3 - r_1\cos\theta_2)\dot{x} + (y - r_1\sin\theta_2)\dot{y} \end{aligned}$$

Dengan menyusun ulang persamaan diatas berdasarkan bentuk berikut,

$$A\dot{\theta} = B\dot{p}$$

Dimana  $\dot{p}$  adalah vektor kecepatan output yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\dot{p} = (\dot{x} \ \dot{y})^T$$

Dan  $\dot{\theta}$  adalah input vektor kecepatan sudut yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2)^T$$

Jika A dan B adalah matriks 2x2 dan keduanya saling berhubungan, sehingga mengubah sudut pada *joint* yang mengalami aktuasi. A dan B adalah sebagai berikut,

$$A = \begin{bmatrix} y \cos\theta_1 - (x + r_3)\sin\theta_1 & 0 \\ 0 & y \cos\theta_2 + (r_3 - x)\sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} x + r - r_1\cos\theta_1 & y - r_3\sin\theta_1 \\ x - r_3 - r_1\cos\theta_2 & y - r_1\sin\theta_2 \end{bmatrix}$$

Sehingga matriks jacobian dapat ditulis sebagai berikut,

$$J = A^{-1}B$$

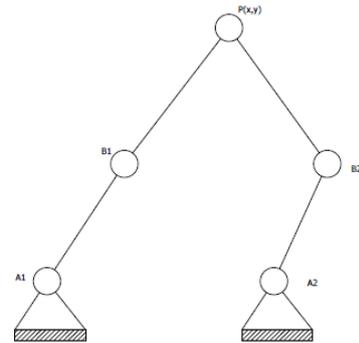
### Analisa Singularity

Berdasarkan riset yang telah dilaksanakan sebelumnya, dapat diketahui bahwa planar manipulator simetris 5R memiliki 3 jenis singularity.

- (1) Singularity stasioner, keadaan ini terjadi jika matrix A singular ( $\det(A)=0$ ), tetapi matriks B masih tetap invertible ( $\det(B) \neq 0$ ). Secara fisik singularity ini terjadi ketika salah

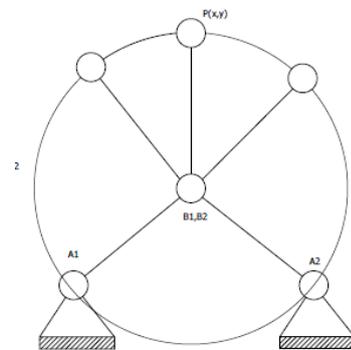
satu lengan  $A_1B_1P$  atau  $A_2B_2P$  sepenuhnya diperpanjang atau dilipat. Berdasarkan analisa *workspace*, singularity stasioner terjadi ketika output dari titik P mencapai batas maksimumnya atau berada pada batas *boundary workspace* (Liu, 2006).

- (2) Singularity tidak tentu, keadaan ini

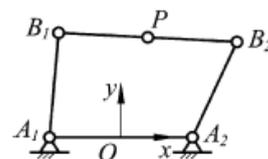


Gambar 7. Contoh Singularity Statis

hanya terjadi ketika rantai kinematik tertutup. Secara matematis, hal ini terjadi jika matrix B singular



Gambar 8. Contoh Singularity Tak Tentu Jenis Pertama

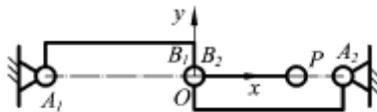


Gambar 9. Contoh Singularity Tak Tentu Jenis Kedua

( $\det(B)=0$ ), tetapi matrix A tetap invertible ( $\det(A) \neq 0$ ). Secara umum

terdapat 2 jenis singularity tak tentu, yang pertama terjadi ketika  $B_1PB_2$  sepenuhnya dilipat, contohnya saat  $B_1$  dan  $B_2$  bertemu di satu titik yang sama. Jenis kedua terjadi ketika  $B_1PB_2$  sepenuhnya diperpanjang. Singularity tak tentu jenis pertama tidak akan terjadi jika nilai  $r_1 < r_3$ . Sedangkan untuk menghindari singularity tak tentu jenis kedua nilai  $r_2 > r_1 + r_3$ .

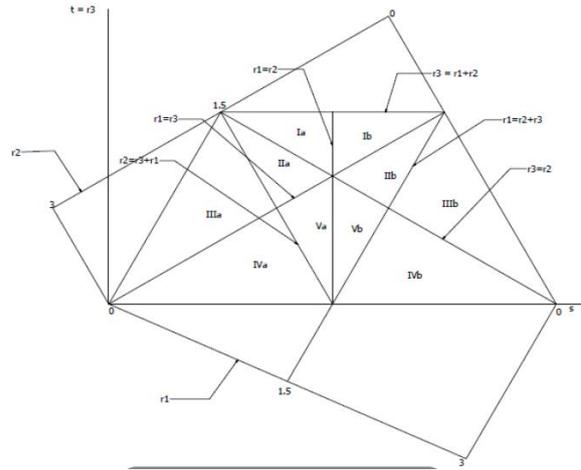
- (3) Singularity struktur, kondisi ini terjadi jika matriks A dan B singular secara simultan. Singularity ini tidak hanya tergantung pada konfigurasi dari mekanisme, tetapi juga tergantung pada arsitektur dari mekanisme tersebut. Parameter yang menyebabkan hal kondisi ini terjadi adalah sebagai berikut:
- (a)  $r_1 = r_3$
  - (b)  $r_2 = r_3$
  - (c)  $r_3 = r_1 + r_2$
  - (d)  $r_2 = r_1 + r_3$
  - (e)  $r_1 = r_3 + r_2$
  - (f)  $r_3 = 0$



Gambar 10. Contoh Singularity Struktur

**Design Space**

Grafik yang umum digunakan untuk menunjukan hubungan antara performa dan panjang link pada sebuah mekanisme planar parallel 5R adalah *design space*. Dalam grafik ini terapat semua panjang link ( $R_1, R_2$  dan  $R_3$ ) dari mekanisme, sehingga dapat langsung dibandingkan dengan performanya. Karena parameter link dapat bernilai 0 samai dengan tak terhingga, maka digunakan persamaan dibawah ini untuk membatasi nilai-nilai tersebut.



Gambar 11. Design Space Trapezium

$$D = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}$$

$$r_1 = \frac{R_1}{D}, r_2 = \frac{R_2}{D}, r_3 = \frac{R_3}{D},$$

$$r_1 + r_2 + r_3 = 3$$

$$s = \frac{2r_1}{\sqrt{3}} + \frac{r_3}{\sqrt{3}}$$

$$t = r_3$$

Sehingga nilai  $r_1, r_2$  dan  $r_3$  dapat memiliki nilai diantara 0 dan 3, dengan demikian batasan dari *design space* adalah sebagai berikut:

$$r_1 \neq 0, r_2 \neq 0$$

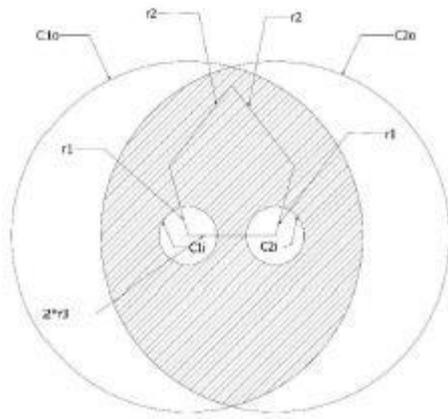
$$r_1 + r_2 \geq r_3$$

$$0 < r_1, r_2 < 3, 0 \leq r_3 \leq 1.5$$

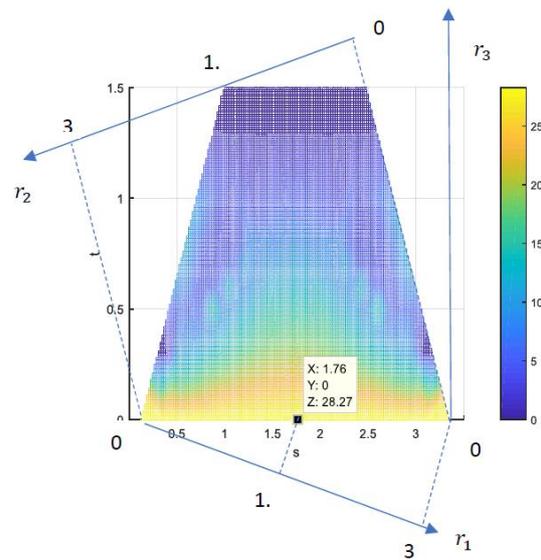
meminta izin kepada pemilik tanah (lokasi atau titik penangkap kabut) untuk pemasangan alat.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Penulis menggunakan perangkat lunak Simscape Simulink dari Matlab® untuk melakukan analisa matematis pada penelitian ini. Semua perhitungan dan grafik didapatkan dari perangkat lunak tersebut.



Gambar 12. *Theoretical Workspace*



Gambar 13. Atlas Persebaran Luas *Theoretical Workspace*

### **Theoretical Workspace**

*Theoretical workspace* didefinisikan sebagai area yang dapat dijangkau oleh output titik P jika sudut  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  berubah nilai dari 0 menuju  $2\pi$  tanpa mempertimbangkan adanya intervensi singularity. Berdasarkan persamaan dibawah ini, maka akan didapatkan *theoretical workspace* dengan luas maksimum sebesar 28.27, didapatkan ketika  $r_3 = 0, r_1 = r_2 = 1.5$ . Ketika nilai  $r_3 = 1.5$ , maka luas dari *theoretical workspace* adalah 0. Dapat disimpulkan bahwa  $r_3$  memiliki hubungan terbalik terhadap luasan *theoretical workspace*. Dengan menggunakan *design space* yang telah dibahas sebelumnya, dapat diketahui bagaimana korelasi antara panjang link dan luasan *theoretical workspace*.

$$C_{10}: (x + r_3)^2 + y^2 = (r_1 + r_2)^2$$

$$C_{1i}: (x + r_3)^2 + y^2 = (r_1 - r_2)^2$$

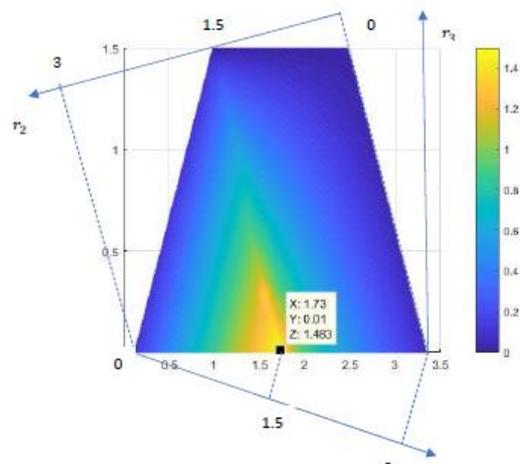
$$C_{20}: (x - r_3)^2 + y^2 = (r_1 + r_2)^2$$

$$C_{2i}: (x - r_3)^2 + y^2 = (r_1 - r_2)^2$$

Selain *theoretical workspace*, perlu diketahui juga tentang *usable workspace* yang didefinisikan sebagai area kontinu maksimum yang tidak memiliki lokus singular didalamnya, tetapi dibatasi oleh lokus singular pada bagian luarnya. Tidak semua bagian dari *theoretical workspace* dapat digunakan sebagai *usable workspace*.

### **Maximal Inscribed Circle (MIC)**

*Maximal Inscribed Circle (MIC)* didefinisikan sebagai lingkaran yang terletak pada sumbu y dan bersinggungan dengan *usable workspace* (Liu, 2006). Sedangkan daerah yang dibatasi oleh

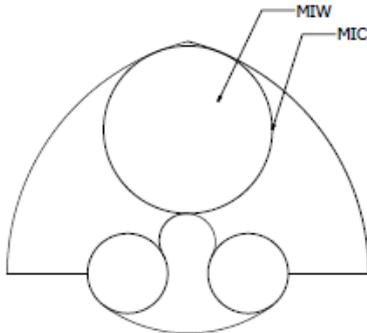


Gambar 14. Atlas Persebaran Radius MIC

lingkaran MIC disebut sebagai *Maximal Inscribed Workspace (MIW)*. Meskipun MIW tidak bisa dikaitkan secara langsung dengan performa mekanisme, radius dari MIC dapat mengidentifikasi *usable workspace* dari mekanisme tersebut dengan menggunakan bentuk karakteristik workspace

(Liu, 2006). Berdasarkan persamaan (), hubungan antara nilai MIC dan panjang link mekanisme digambarkan pada *design space* pada gambar.

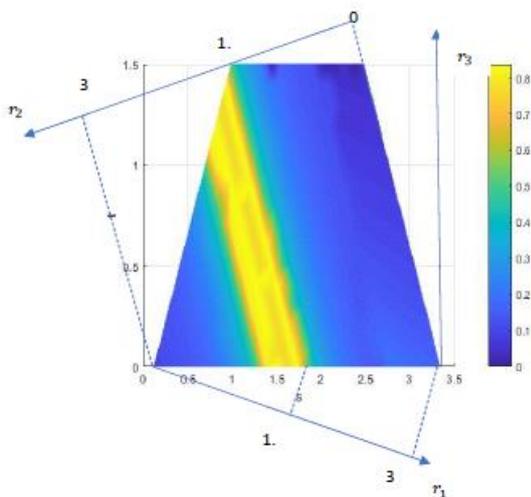
$$x^2 + (y - y_{MIC})^2 = r_{MIC}^2$$



Gambar 15. MIC dan MIW

$$r_{MIC} = \frac{r_1 + r_2 - |r_1 - r_2|}{2}$$

$$y_{MIC} = \sqrt{\frac{(r_1 + r_2 - |r_1 - r_2|)^2}{4 - r_3^2}}$$



Gambar 16. Atlas Persebaran Global Conditioning Index (GCI)

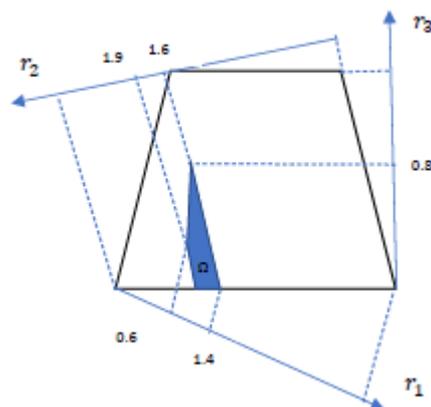
Berdasarkan grafik pada gambar, diketahui bahwa nilai maksimum dari MIC adalah 1.483. Kondisi ini didapatkan ketika nilai  $r_3 = 0$  dan  $r_1 = r_2 = 1.5$ . Nilai radius MIC maksimum didapatkan pada sub-region IV a pada *design space*.

**Indeks Performa: Local Conditioning Index (LCI)**

*Local Conditioning Index* (LCI) didefinisikan sebagai indeks performa lokal dari sebuah mekanisme yang tergantung pada konfigurasi mekanisme tersebut, sehingga setiap konfigurasi akan memiliki nilai LCI yang mungkin berbeda. LCI memberikan informasi tentang tingkat akurasi kontrol pada setiap spesifik posisi dan konfigurasi. Nilai LCI didapatkan dari matriks Jacobi, ketika matriks Jacobi diaplikasikan *conditioning number* ( $k_j$ ) akan digunakan untuk mengukur akurasi dari kontrol manipulator (Liu, 2006). Selain itu, *conditioning number* juga digunakan untuk mengevaluasi *dexterity* dan isotropi dari manipulator (Gosselin, 1992). Nilai LCI adalah sama dengan  $\frac{1}{k_j}$  ( $0 < \frac{1}{k_j} \leq 1$ ).

$$k_j = \|J\| \|J^{-1}\|$$

Dalam menghitung LCI, semua posisi sudut actuator yang mungkin harus diperhitungkan.



Gambar 17. Daerah Optimum dalam Design Space Trapezium

**Indeks Performa: Global Conditioning Index (GCI)**

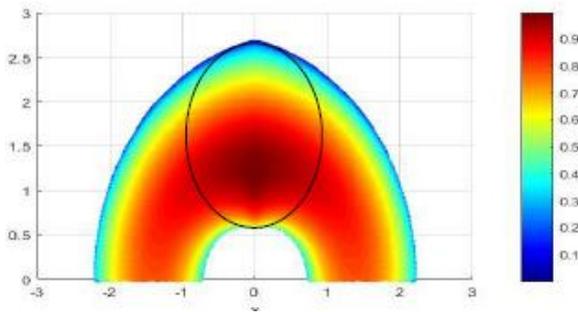
LCI digunakan untuk menunjukkan performa mekanisme secara lokal, sedangkan untuk menilai performa mekanisme secara global dapat digunakan GCI. Secara matematis GCI dinotasikan dengan  $\eta$  dan dideskripsikan dengan persamaan dibawah ini.

$$\eta = \frac{\int_w \frac{1}{k_j} dW}{\int_w dW}$$

dimana  $W$  adalah *workspace* dari mekanisme. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan bahwa nilai GCI pada *design space* terbagi menjadi 2 bagian, yang dibagi oleh garis  $r_1 + r_3 = r_2$ . Bagian sebelah kiri *design space* proporsional terhadap  $r_3$ . Nilai maksimum GCI yang didapatkan adalah sebesar 0.83, ketika nilai  $r_2 \in [1.56, 1.9]$  GCI lebih besar dari pada 0.6.

**Proses Optimasi Desain**

Dalam proses optimasi desain, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan radius MIC yang diinginkan,



Gambar 18. Distribusi LCI pada Mekanisme Optimum dengan Mode Kerja “+” dan Mode Assembly “Up”

serta menentukan nilai minimum GCI. Dalam proses optimasi ini, ditentukan bahwa nilai  $r_{MIC} > 0.8$  dan nilai GCI  $\eta > 0.6$ . Dengan data awal tersebut, berdasarkan konstrain *design space* yang telah dibahas sebelumnya, didapatkan bahwa  $0.6 \leq r_1 \leq 1.4$ ,  $1.6 \leq r_2 \leq 1.9$ ,  $0 \leq r_3 \leq 0.8$ . Sehingga daerah optimalnya ( $\Omega$ ) dapat ditunjukkan seperti pada gambar.

Setelah mengetahui daerah optimal ( $\Omega$ ) pada *design space*, selanjutnya adalah mendefinisikan permasalahan optimasi, seperti pada tabel.

Tabel 1. Konstrain Optimasi

Parameter optimasi	$r_1, r_2, r_3$
Data input	<i>Workspace</i> berbentuk lingkaran dengan $r = 0.125$ meter

Fungsi objektif	Memaksimalkan GCI $\eta = \frac{\int_w \frac{1}{k_j} dW}{\int_w dW}$
Konstrain	$r_1 + r_2 + r_3 = 3$ $0.6 \leq r_1 \leq 1.4$ $1.6 \leq r_2 \leq 1.9$ $0 \leq r_3 \leq 0.8$ $\eta > 0.6$

Dari data tersebut, dengan menggunakan *optimization tools* pada Matlab®, didapatkan hasil seperti pada tabel.

Tabel 2. Hasil Optimasi

$r_1$	1.053
$r_2$	1.666
$r_3$	0.352
$r_{MIC}$	1.053
$x_{MIC}$	0
$y_{MIC}$	1.692418
MIW	$1.108\pi$

Dari parameter optimal tersebut didapatkan grafik plot distribusi LCI seperti pada gambar. Nilai LCI terbesar adalah 0.9.

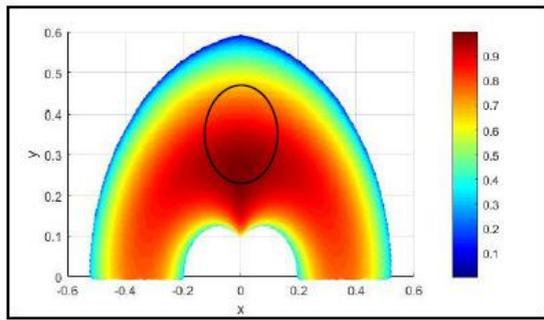
Langkah terakhir adalah menentukan dimensi dari *link* untuk mekanisme tersebut, karena ukuran hasil proses optimasi sifatnya masih non-dimensional. Karena nilai LCI yang diinginkan harus lebih besar dari 0.6, maka *Good Conditioning Workspace* (GCW) yang didapatkan adalah 5.7564. GCW dihitung dengan menggunakan rumus luasan lingkaran. GCW selanjutnya akan didefinisikan sebagai  $W_{non-dim}$ . Untuk mengubah  $r_1, r_2, r_3$  menjadi  $R_1, R_2, R_3$  yang merupakan panjang *link* dengan dimensi tertentu, maka perlu ditentukan juga faktor dimensi  $D$ . Selanjutnya,  $D$  dihitung dengan persamaan dibawah ini.

$$W_{dim} = D^2 W_{non-dim}$$

$$D = \sqrt{\frac{0.0962}{2.05193}} \text{ meter} \approx 0.2165 \text{ meter}$$

dengan  $W_{dim}$  adalah luasan *workspace* yang diinginkan. Dalam hal ini adalah sebuah lingkaran dengan  $r = 0.125$  meter dan

luasnya 0.0962 meter. Jika  $R_i = Dr_i$ , maka  $R_1 = 0.228\text{ m}$ ,  $R_2 = 0.36\text{ m}$ ,  $R_3 = 0.0762\text{ m}$ .



Gambar 19. Distribusi LCI pada Mekanisme Optimum dengan Dimensi dalam Meter

Jika dimensi sesungguhnya telah diketahui, maka dapat dibuat plot distribusi LCI dengan dimensi parameter yang sesungguhnya seperti pada gambar.

Dengan menerapkan invers kinematik, untuk mendapatkan nilai  $LCI > 0.6$  dan memperhitungkan dimensi sesungguhnya, maka batas sudut input yang didapatkan adalah  $\theta_1 \in [51.89^\circ, 204.35^\circ]$  and  $\theta_2 \in [-24.76^\circ, 46.87^\circ]$ .

#### KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil optimasi desain dengan target  $GCI > 0.6$ , maka  $r_1 = 1.053$ ,  $r_2 = 1.666$ ,  $r_3 = 0.352$ . Untuk target *workspace* dengan radius 0.125 m dan GCW 5.7564 didapatkan dimensi optimal  $R_1 = 0.228\text{ m}$ ,  $R_2 = 0.36\text{ m}$ ,  $R_3 = 0.0762\text{ m}$ . Batas sudut input aktuator adalah  $\theta_1 \in [51.89^\circ, 204.35^\circ]$  and  $\theta_2 \in [-24.76^\circ, 46.87^\circ]$ .

#### PENGHARGAAN

Penghargaan setinggi-tingginya kepada Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya untuk dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

#### REFERENSI

- C. Gosselin, J. Angeles. A Global Performance Index for the Kinematic Optimization of Robotic Manipulators. ASME, Mechanical Design 113 (1991) 220-226.
- Erick Macho, Oscar Altuzarra, Charles Pinto, Alfonso Hernandez. Workspace

Associated to Assembly Modes of the 5R Planar Parallel Manipulator. Robotica, 26, pp 395-403 doi:10.1017/S0263574707004109

Feng Gao, Xinjun Liu, William A. Gruver. Performance Evaluation of Two-Degree-of-Freedom Planar Parallel Robots. Mech. Mach. Theory, 33, No. 6, pp. 661-668.

H.Giberti, S.Cinquemani, S.Ambrosetti. 5R 2dof Parallel Kinematic Manipulator- A Multidisciplinary Test Case in Mechatronics. Mechatronics 23 (2013) 949-959.

J. Jesús Cervantes-Sánchez, J. Cesar Hernández-Rodríguez, J. Gabriel Rendón-Sánchez. On the Workspace, Assembly Configuration and Singularity Curves of the RRRRR-type Planar Manipulator. Mechanism and Machine Theory 35 (2000) 1117-1139.

X.-J.Liu, Wang Jinsong, G. Pritschow. Kinematics, Singularity and Workspace of Planar 5R Symmetrical Parallel Mechanism. Mechanism and Machine Theory 41 (2006) 145-169.

X.-J.Liu, Wang Jinsong, G. Pritschow. Performance Atlases and Optimum Design of Planar 5R Symmetrical Parallel Mechanism. Mechanism and Machine Theory 41 (2006) 119-144.

X.-J.Liu, Wang Jinsong, Hao-Jun Zheng. Optimum Design of the 5R Symmetrical Parallel Manipulator with Surrounded and Good-Condition Workspace. Robotics and Autonomous System 54 (2006) 221-233.