TUGAS AKHIR – TM 184835

# ANALISA DINAMIS ROBOT PARALEL 4-CRU SEBAGAI 3D *PRINTER* BANGUNAN PADA MODE OPERASI 3 DERAJAT KEBEBASAN

INES AYU AMBARWATI
NRP 02111640000144

Dosen Pembimbing
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR – TM 184835

# ANALISA DINAMIS ROBOT PARALEL 4-CRU SEBAGAI 3D PRINTER BANGUNAN PADA MODE OPERASI 3 DERAJAT KEBEBASAN

INES AYU AMBARWATI
NRP. 02111640000144

Dosen Pembibing:
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

*FINAL PROJECT– TM 184835*

# DYNAMIC ANALYSIS OF 4-CRU PARALLEL ROBOT AS CONSTRUCTION 3D PRINTER WITH 3 DEGREES OF FREEDOM OPERATION MODE

INES AYU AMBARWATI
NRP. 02111640000144

*Supervisor*:
Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

*DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING*
*Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering*
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

**HALAMAN PENGESAHAN**

# ANALISA DINAMIS ROBOT PARALEL 4-CRU SEBAGAI 3D PRINTER BANGUNAN PADA MODE OPERASI 3 DERAJAT KEBEBASAN

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk memenuhi Salah Satu syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Ines Ayu Ambarwati**
NRP. 02111640000144

Disetujui oleh:

1. Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.. ..... (Pembimbing)
   NIP. 1986201712037
2. Ari Kurniawan Saputra, S.T. M.T ..... (Penguji I)
   NIP. 198604012015041001
3. Dr.Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc. ..... (Penguji II)
   NIP. 197805102001121001
4. Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. ..... (Penguji III)
   NIP. 196912031994031001

SURABAYA
AGUSTUS,2020

# ANALISA DINAMIS ROBOT PARALEL 4-CRU SEBAGAI 3D *PRINTER* BANGUNAN PADA MODE OPERASI 3 DERAJAT KEBEBASAN

**Nama** : **Ines Ayu Ambarwati**
**NRP** : **02111640000144**
**Pembimbing** : **Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.**

## Abstrak

Beberapa dekade terakhir, teknologi 3D *printer* telah ditemukan dan tim riset teknik telah melakukan eksperimen-eksperimen sehingga teknologi 3D *printer* dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan industri konstruksi. Riset 3D *printer* oleh Cesaretti et. al. membuktikan bahwa 3D *printer* dapat menghasilkan bentuk-bentuk yang rumit, namun mekanisme yang digunakan membuat *printability* dari 3D *printer* kurang baik karena tidak adanya orientasi. Robot paralel 4 kaki dikembangkan dengan mempertimbangkan *workspace* yang lebih luas serta kemudahan proses desain dan kontrol dibandingkan dengan robot paralel 6-*DoF;* dengan kekakuan, momen inersia, dan kapasitas *payload* yang relatif sama.Riset awal mengenai mekanisme 3D printer baru telah dilakukan oleh Putrayudanto *et al.* yang membahas mengenai analisa kinematika. Riset ini selanjutnya dikembangkan oleh Istito *et al.* dengan menganalisa perilaku dinamis pada mekanisme robot paralel 4-CRU. Dari riset ini diketahui perilaku dinamis mekanisme pada 4 geometri dan dihasilkan data berupa gaya aktuasi dan daya motor yang diperlukan untuk melakukan mengerakan dengan lintasan yang telah disediakan. Pada riset yang dilakukan Istito *et al.* perilaku dinamis pada mekanisme robot hanya dianalisa pada mode operasi Schoenflies sehingga belum bisa menjelaskan apa yang terjadi pada mekanisme ketika beroperasi pada mode operasi tambahan. Oleh karena itu, tugas akhir ini bertujuan menyempurnakan desain

robot paralel 4-CRU dengan melakukan analisa dinamis pada mekanisme ketika beroperasi pada mode operasi tambahan.

Proses diawali dengan melakukan analisa posisi untuk memperoleh matriks rotasi dari *moving frame* pada setiap lengan ke *fixed frame*. Matriks rotasi tersebut digunakan untuk mengubah orientasi gaya yang bekerja pada lengan. Setelah itu, dilakukan analisa kecepatan dan percepatan sesaat *(Instantaneous velocity and acceleration)* sehingga diperoleh kecepatan dan percepatan sesaat dari *moving platform*. Data tersebut digunakan untuk mendapatkan kecepatan dan percepatan dari *moving platform* dan setiap lengan. Setelah kecepatan dan percepatan dari *moving platform* dan setiap lengan telah diperoleh, maka dilakukan analisa dinamis pada lengan dan *moving platform*. Persamaan yang diperoleh dari analisa dinamis pada *moving platform* dan lengan digunakan untuk menentukan gaya aktuasi, gaya reaksi, gaya constraint, momen constraint, dan momen reaksi yang bekerja pada robot paralel tersebut.

Persamaan kesetimbangan dinamis diturunkan berdasarkan metode *Newton-Euler* pada masing-masing kondisi geometri yang memiliki 2 gerakan translasi dan 1 gerakan rotasi. Gaya aktuasi dan daya dari keempat geometri telah diperoleh dengan memberikan lintasan sesuai dengan masing-masing parameter gerak mode operasi. Keempat geometri memiliki daerah *singularity* yang berbeda dan apabila *moving platform* mendekati atau berada pada daerah *singularity*, maka gaya aktuasi dan daya yang dibutuhkan motor menjadi sangat besar secara tiba-tiba sehingga *moving platform* dapat mengalami *shaky motion.*

Kata kunci: 3D-printer bangunan, mode operasi, orientasi, *instantaneous kinematics*

**DYNAMIC ANALYSIS OF 4-CRU PARALLEL MANIPULATOR AS CONSTRUCTION 3D PRINTER WITH 3 DEGREES OF FREEDOM OPERATION MODE**

**Name** : **Ines Ayu Ambarwati**
**NRP** : **02111640000144**
**Supervisor** : **Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.**

**Abstract**

*For the past few decades, 3D printer technology was found and the engineering research team has been conducting experiments so the 3D printing technology can be applied in several industries in the world. And in the past few years, the 3D printer technology has been developed for construction purposes. A research by* Cesaretti et. al. *proves that 3D printer can operate even in complex geometrics object, however the mechanism used create a quite poor printability.* 4-*legged parallel robot is developed considering a larger workspace and less complicated design and control process compared to 6-DoF parallel robot which has relatively same stiffness, inertia, and payload capacity.Early research on 3D printer buildings has been carried out by Putrayudanto et al. to design a new robot mechanism. The robot mechanism is expected to provide advantages in terms of operating mode and type of movement compared to existing robot mechanisms. However, the study only discusses kinematics analysis so that it cannot explain the relationship between robot movements and actuators. The research the resumed ny Istito et al. by analyzing dinamics behavior of the robot on Schonflies operation modes. However, the research is yet to explain the robot behavior on the additional operation modes. Therefore, this study is aims to improve the design of the 4-CRU parallel robot by conducting the dynamics analysis on the additional operation mode.*

*The process begins with a position analysis to obtain a rotation matrix from the moving frame on each arm to the fixed frame. The rotation matrix is used to change the orientation of the forces acting on the arm. After that, instantaneous velocity and acceleration analysis is carried out to obtain the instantaneous speed and acceleration of the moving platform. The data is used to get the speed and acceleration of the moving platform and each arm. After the speed and acceleration of the moving platform and each arm has been obtained, a dynamic analysis of the arm and moving platform is carried out. The equation obtained from dynamic analysis on the moving platform and arm is used to determine the actuation force,constraint force, constraint momen, reaction force, and reaction moment acting on the parallel robot.*

*The dynamic equilibrium equation in each geometry is derived based on the Newton-Euler method. From this dynamic equilibrium the actuation force and power required by the actuator are obtained. Each geometry of a 4-CRU parallel robot has a different singularity area and when the moving platform approaches or is in a singularity area, the actuation forces and powers become large thus that the moving platform will exhibit shaky motion.*

Keywords: construction 3D-printer, operation mode, orientation, instantaneous kinematics

# DAFTAR ISI

**Abstrak** ..... **iv**

**Abstract** ..... **vi**

**DAFTAR ISI** ..... **viii**

**DAFTAR GAMBAR** ..... **xi**

**DAFTAR TABEL** ..... **xiv**

**DAFTAR SIMBOL** ..... **xv**

**BAB I** ..... **1**

**PENDAHULUAN** ..... **1**

**1.1. Latar Belakang** ..... **1**
**1.2. Rumusan Masalah Penelitian** ..... **3**
**1.3. Batasan Masalah Penelitian** ..... **3**
**1.4. Tujuan Penelitan** ..... **3**
**1.5. Manfaat Penelitian** ..... **4**

**BAB II** ..... **5**

**TINJAUAN PUSTAKA** ..... **5**

**2.1. Dasar Teori** ..... **5**
2.1.1. Manipulator Paralel 4 Degree of Freedom (DoF) ... 5
2.1.2. Euler Parameter ..... 6
**2.2. Transformasi Homogen** ..... **7**
2.2.1. Koordinat Homogen ..... 10
2.2.2. Matriks Transformasi Homogen ..... 11
**2.3. Kinematika Sesaat (Instantaneous Kinematics)** ..... **12**
**2.4. *Mass Moment of Inertia*** ..... **13**
2.4.1. Matriks Inersia ..... 14
2.4.2. Principal Moments of Inertia ..... 15
2.4.3. Transformasi dari Matriks Inersia ..... 16
**2.5. Kesetimbangan Dinamis Berdasarkan Hukum *Newton-Euler*** ..... **17**
**2.6. Analisa Dinamis Stewart-Gough Platform** ..... **18**
2.6.1. Analisa Posisi ..... 19
2.6.2. Analisa Kecepatan ..... 20
2.6.3. Analisa Percepatan ..... 20

2.6.4. Dinamika Lengan .....21
2.6.5. Dinamika Platform .....22
**BAB III.....23**
**METODOLOGI PENELITIAN .....23**
**3.1. *Flowchart* Penelitian .....23**
**3.2. Proses Penelitian .....24**
3.2.1. Perumusan Masalah.....24
3.2.2. Studi Literatur.....24
3.2.3. Analisa Posisi .....25
**3.3. Geometri Mekanisme .....26**
3.3.1. Mode Operasi dan Jenis Gerakan .....26
3.3.1.1. Geometri A ($AM_1$) ..... 26
3.3.1.2. Geometri B ($AM_2$) ..... 27
3.3.1.3. Geometri C ($AM_3$) ..... 28
3.3.1.4. Geometri D ($AM_4$) ..... 29
3.3.2. Parameter Desain .....30
**BAB IV .....32**
**HASIL DAN PEMBAHASAN .....32**
**4.1. Persamaan Kesetimbangan Dinamis .....32**
4.1.1. Kecepatan dan Percepatan Sesaat.....32
4.1.2. Analisa Kecepatan dan Percepatan.....33
4.1.2.1. Analisa Kecepatan ..... 33
4.1.2.2. Analisa Percepatan ..... 34
4.1.3. Analisa Dinamis pada Lengan.....34
4.1.4. Analisa Dinamis pada Platform.....35
**4.2. Robot Paralel 4-*CRU* .....36**
**4.3. Hasil dan Pembahasan .....38**
4.3.1. Analisa Dinamis pada Geometri A.....38
4.3.2. Analisa Dinamis pada Geometri B .....42
4.3.3. Analisa Dinamis pada Geometri C .....46
4.3.4. Analisa Dinamis pada Geometri D.....51
4.3.5. Perbandingan Kondisi Geometri Robot Paralel 4-*CRU* 54
**BAB V .....58**
**KESIMPULAN DAN SARAN .....58**

**5.1 Kesimpulan.....58**
**5.2 Saran.....58**
**DAFTAR PUSTAKA.....59**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Rumah hasil konstruksi teknologi 3D *Printer* di America *Autonomous Robotic Construction System,* 2020...1
Gambar 1.2. Robot Paralel 4-CRU .....2
Gambar 2.1. Manipulator dengan Empat *DoF* (Li, 2014) .....5
Gambar 2.2. Posisi Vektor dari Titik P terhadap *Frame* A (Tsai, 1999) .....8
Gambar 2.3. Orientasi *Moving Frame* B terhadap *Fixed Frame* A (Tsai,1999) .....8
Gambar 2.4. Perpindahan Spasial (Tsai, 1999).....10
Gambar 2.5 Mass Moment of Inertia dari Rigid Body (Hibbler,2013).....13
Gambar 2.8. Massa Momen terhadap Titik Referensi (Tsai, 1999) .....14
Gambar 2.9. Pelat Segi Empat (Tsai, 1999).....15
Gambar 2.10. Resultan Gaya dan Momen pada *Rigid Body B* (Tsai, 1999) .....17
Gambar 2.11. Diagram Skematik dari *Stewart-Gough Platform* (Tsai, 1999) .....18
Gambar 2.12. Sudut Euler dari Lengan (Tsai, 1999).....19
Gambar 2.13. *Free Body Diagram* (FBD) dari Lengan (Tsai, 1999) .....21
Gambar 3.1. Robot Paralel 4-CRU *(cylindrical, revolute, universal).*.....24
Gambar 3.2. Sudut *Euler* dari Lengan .....25
Gambar 3.3. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU .....27
Gambar 3.4. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU .....28
Geometri B ($AM_2$) .....28
Gambar 3.5. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU .....29
Geometri C ($AM_3$) .....29
Gambar 3.6. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU .....30
Geometri D ($AM_4$) .....30
Gambar 4.1. Percepatan dan Kecepatan Sesaat pada *Platform* ...32

Gambar 4.2. *Free Body Diagram* dari Lengan pada *Additional Mode* ..... 33
Gambar 4.3. Free Body Diagram pada *Platform* ..... 35
Gambar 4.4. Geometri Robot Pararel 4-CRU ..... 37
Gambar 4.5. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri A dan Lintasannya ..... 38
Gambar 4.6. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri A ..... 39
Gambar 4.7. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri A ..... 40
Gambar 4.8. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri A ..... 40
Gambar 4.9. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri A ..... 41
Gambar 4.10. Posisi *Moving Platform* di Daerah *Singularity* pada Kondisi Geometri A ..... 41
Gambar 4.11. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri B dan Lintasannya ..... 43
Gambar 4.12. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri B ..... 43
Gambar 4.13. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri B ..... 44
Gambar 4.14. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri B ..... 45
Gambar 4.15. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri B ..... 45
Gambar 4.16. Robot Paralel dengan Kondisi Geometri B pada saat singularity. ..... 46
Gambar 4.17. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri C dan Lintasannya ..... 47
Gambar 4.18. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri C ..... 48
Gambar 4.19. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri C ..... 48
Gambar 4.20. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri C ..... 49
Gambar 4.21. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri C ..... 49

Gambar 4.22. Robot Paralel dengan Kondisi Geometri C pada saat singularity. ..... 50
Gambar 4.23. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri C dan Lintasannya ..... 51
Gambar 4.24. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri D ..... 52
Gambar 4.25. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri D ..... 53
Gambar 4.26. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri D ..... 53
Gambar 4.27. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri D ..... 54
Gambar 4.28. Perbandingan Kondisi Geometeri pada Desain Robot Paralel 4-*CRU* ..... 55
Gambar 4.29. Perbandingan Gaya Aktuasi pada Setiap Kondisi Geometeri Mekanisme Robot Paralel 4-*CRU* ..... 56
Gambar 4.30. Perbandingan Daya pada Setiap Kondisi Geometeri Mekanisme Robot Paralel 4-*CRU* ..... 56

# DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Parameter Desain dari Robot Paralel 4-CRU .....30
Tabel 4.1. Parameter Desain Robot Paralel 4-CRU.....37

# DAFTAR SIMBOL

DOF = Degree of Freedom atau Derajat Kebebasan
CRU = *Cylindrical, revolute, dan universal joint*
$T$ = Matriks Transformasi
$R$ = Matriks Rotasi
$\Sigma_A$ = Sistem koordinat *fixed frame*
$\Sigma_i$ = Sistem koordinat lengan
$\Sigma_B$ = Sistem koordinat *moving platfrom*
$\mathbf{e}$ = *unit vector* sepanjang lengan
$\mathbf{f}_{bi}$ = Gaya reaksi pada titik $B_i$
$\mathbf{f}_{ai}$ = Gaya reaksi pada titik $A_i$
$\mathbf{n_i}$ = Momentum sudut lengan ke-i
$I_i$ = Matriks inersia lengan ke-i
$I_p$ = Matriks inersia *moving platform*
$\boldsymbol{\omega_i}$ = Kecepatan sudut lengan ke-i
$\propto_{\mathbf{i}}$ = Percepatan sudut lengan ke-i

# BAB I
# PENDAHULUAN

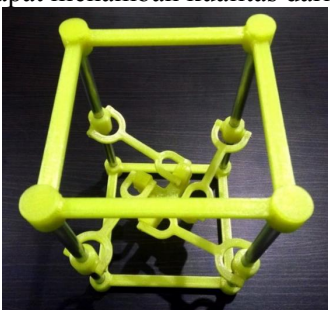
## 1.1. Latar Belakang

Beberapa dekade terakhir, teknologi 3D *printer* ditemukan dan tim riset teknik telah senantiasa melakukan eksperimen-eksperimen sehingga teknologi 3D *printer* dapat dimanfaatkan oleh banyak jenis industri. Pada beberapa tahun terakhir, teknologi 3D *printer* mulai dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan industri konstruksi. Proses konstruksi dilakukan dengan menggunakan alat yang dapat kita sebut *"super-sized printers"*. Salah satu contoh bangunan hasil teknologi 3D *printer* adalah sebuah rumah dengan luas 1900 $ft^2$ di America oleh *Autonomous Robotic Construction System* (ARCS). Rumah ini dapat berfungsi secara penuh dilengkapi dengan fitur elektrik dan air. Proyek tersebut dapat selesai dalam waktu 48 jam, dengan mengelimiasi 20 pekerja dan membutuh biaya kurang dari $6,000.

Gambar 1.1. Rumah hasil konstruksi teknologi 3D *Printer* di America *Autonomous Robotic Construction System,* 2020

Teknologi 3D-*printer* dirasa memiliki banyak kelebihan dibandingkan proses konstruksi konvensional. Selain dapat mengurangi waktu, biaya, dan limbah pembangunan, 3D *printer* dapat menghasilkan desain-desain yang kompleks. Sebuah projek oleh Cesaretti et. al., dengan menggunakan mekanisme *gantry, nozzle* dapat bergerak secara linear terhadap sumbu X,Y,Z. Namun,

mekanisme *gantry* dirasa kurang baik untuk menghasilkan benda dengan bentuk-bentuk kompleks, misalnya desain bangunan yang memerlukan kemiringan, karena ia membutuhkan support pada *workpiece* serta menghasilkan efek anak tangga pada permukaan *workpiece*. *Nozzle* yang bebas berorientasi pada daerah *tangent* dari *workpiece* dirasa dapat menambah kualitas dari hasil 3D *print.*



Gambar 1.2. Robot Paralel 4-CRU

Robot paralel 4 kaki dikembangkan dengan mempertimbangkan *workspace* yang lebih luas serta kemudahan proses desaindan kontrol dibandingkan dengan robot paralel 6-*DoF;* dengan kekakuan, momen inersia, dan kapasitas *payload* yang relatif sama. Riset awal mengenai mekanisme 3D printer baru telah dilakukan oleh Putrayudanto *et al.* dan dihasilkan mekanisme robot paralel 4-CRU seperti pada gambar 1.2. Mekanisme ini memiliki mode operasi berdasarkan relasi geometri dan ditemukan bahwa mekanisme ini mempunyai empat bentuk dasar. Seiap bentuk dasar memiliki 3 mode operasi yaitu mode operasi *Schoenflies* (4-DOF), *Reversed Schoenflies,* mode operasi tambahan 1 ($AM_1$), dan 3 hubungan parameter desain dan operasi tambahan lainnya ($AM_2$, $AM_3$, dan $AM_4$). Riset oleh Putraydanto *et al.* membahas mengenai analisa kinematika.

Riset 3D printer selanjutnya dikembangkan oleh Istito *et al.* dengan menganalisa perilaku dinamis pada mekanisme robot paralel 4-CRU. Dari riset ini diketahui perilaku dinamis mekanisme pada 4 geometri dan dihasilkan data berupa gaya

aktuasi dan daya motor yang diperlukan untuk melakukan mengerakan dengan lintasan yang telah disediakan. Pada riset yang dilakukan Istito *et al.* perilaku dinamis pada mekanisme robot hanya dianalisa pada mode operasi *Schoenflies* sehingga belum bisa menjelaskan apa yang terjadi pada mekanisme ketika beroperasi pada mode operasi tambahan. Oleh karena itu, tugas akhir ini bertujuan menyempurnakan desain robot paralel 4-CRU dengan melakukan analisa dinamis pada mekanisme ketika beroperasi pada mode operasi tambahan.

## 1.2. Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan masalah dalam penelitan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana persamaan kesetimbangan dinamis pada *platform* dan lengan untuk robot paralel 4-CRU?
2. Bagaimana gaya aktuasi untuk 4 mode operasi tambahan mekanisme?
3. Bagaimana daya yang dibutuhkan pada setiap motor untuk untuk 4 mode operasi tambahan mekanisme?

## 1.3. Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bentuk base dan moving platform terdiri dari 4 kondisi geometri.
2. Lengan pada robot paralel berbentuk silinder pejal.
3. Moving Platform pada robot paralel berbentuk pelat segi empat.
4. Joint yang diaktuasi adalah prismatic joint.
5. Jenis motor tidak dibahas.
6. Lintasan tidak menggunakan perubahan orientasi moving platform.

## 1.4. Tujuan Penelitan

Tujuan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Merumuskan persamaan kesetimbangan dinamis pada *platform* dan lengan untuk robot paralel 4-CRU.
2. Mendapatkan gaya aktuasi untuk 4 mode operasi tambahan mekanisme.
3. Mendapatkan daya yang dibutuhkan pada setiap aktuator untuk 4 mode operasi tambahan mekanisme.

## 1.5. Manfaat Penelitian

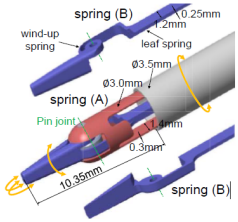
1. Memberikan wawasan baru mengenai mekanisme robot paralel 4-CRU.
2. Mendapatkan metode dalam memperoleh kesetimbangan dinamis yang dapat diaplikasikan pada robot paralel yang lain.

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

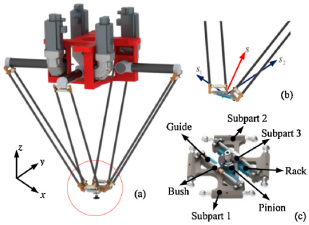
## 2.1. Dasar Teori

### 2.1.1. Manipulator Paralel 4 Degree of Freedom (DoF)

Manipulator paralel adalah sebuah mekanisme spasial multi-dof yang terdiri dari sebuah *moving platform* yang terhubung dengan *base* melalui lengan atau *limb*. Pengaplikasian paralel manipulator kini sudah banyak ditemukan pada sektor industri maupun riset akademis (Tsai, 1999). Saat ini, manipulator paralel dengan empat *DoF* adalah salah satu manipulator spasial yang sedang banyak dikembangkan. Hal tersebut telah mempertimbangkan bahwa manipulator parallel empat *DoF* memiliki proses manufaktur dan pengendalian yang lebih sederhana dibandingkan manipulator parallel enam *DoF*, namun memiliki fungsi aplikasi yang lebih luas dibandingkan manipulator parallel tiga *DoF*.




(a) Robot *Forcep* untuk Bedah Invasif Minimal (BIM)




(b) *Pick and Place SCARA Robot*

Gambar 2.1. Manipulator dengan Empat *DoF* (Li, 2014)

Gambar 2.1 menunjukkan dua jenis manipulator dengan empat *DoF*. Gambar (a) adalah robot *forcep* yang sedang dikembangkan di Universitas Kyushu, Jepang, untuk proses BIM. Pada proses tersebit di mana dokter bedah memasukkan robot tersebut ke tubuh pasien untuk melakukan manipulasi jaringan pada ruang yang sempit dan terbatas (Fujisawa, 2016). Gambar (b) adalah *scara parallel robot* yang banyak digunakan dalam bidang industri untuk proses *pick and place.* Robot yang sedang dikembangkan oleh Universitas Tianjin, Cina tersebut memiliki jenis gerakan *Schönflies* yaitu jenis gerakan yang memiliki tiga gerakan translasi dan satu gerakan rotasi. Jenis gerakan tersebut diperoleh dari tiga *revolute joint* dan satu *screw joint* (Li, 2014).

### 2.1.2. Euler Parameter

Euler Parameter merupakan suatu metode yang digunakan untuk menunjukan rotasi dari sebuah vektor dalam sistem koordinat tiga dimensi. Quaternion dari *Euler Parameter* dapat didefinisikan sebagai berikut (Kong, 2016):

$$\begin{aligned} q &= \mathrm{e}_0 \quad \mathrm{e}_1\mathbf{i} + \mathrm{e}_2\mathbf{j} + \mathrm{e}_3\mathbf{k} \\ &= \cos(\theta/2) + \mathbf{u}\sin(\theta/2). \end{aligned} \qquad 2.1$$

Variabel **u** dan $\theta$ merepresentasikan axis dan sumbu rotasi. Euler Parameter mempunyai satu syarat kondisi (*NE, Normalization Equation*), yaitu (Kong, 2016):

$$e_0{}^2 + e_1{}^2 + e_2{}^2 + e_3{}^2 = 1 \qquad 2.2$$

Produk dari dua Euler Parameter quarternion harus memenuhi persamaan, sebagai berikut (Kong, 2016):

$$\begin{aligned} \mathbf{i}^2 + \mathbf{j}^2 + \mathbf{k}^2 &= \mathbf{ijk} = -1 \\ \mathbf{ij} &= \mathbf{k} = -\mathbf{ji} \\ \mathbf{jk} &= \mathbf{i} = -\mathbf{kj} \\ \mathbf{ki} &= \mathbf{j} = -\mathbf{ik} \end{aligned} \qquad 2.3$$

Dengan menggunakan Euler Parameter, persamaan yang digunakan untuk menentukan suatu titik dalam sistem koordinat *moving frame* ( ${}^1\Sigma_B$ ) terhadap sistem koordinat *fixed frame* ( ${}^0\Sigma_B$ ), adalah (Nurahmi, 2016):

$$ {}^{0}\Sigma_B = \mathbf{M}\ {}^{1}\Sigma_B \qquad 2.4 $$

Dalam persamaan tersebut, **M** merepresentasikan transformasi matriks yang mengubah titik **B** terhadap *moving frame* menjadi titik B terhadap *fixed frame*. Matriks **M** terdiri dari *Euler Parameter*, matriks **d**, matriks **R** dan matriks perspektif $(\mathbf{0}_{3\times1})^T$. Matriks **d** merepresentasikan perpindahan vektor translasi dan matriks **R** adalah matriks orthogonal yang didapatkan dari *Euler Parametrization*. Quaternion pada *Euler Parameter* dapat dibentuk sesuai dengan variabel yang dikehendaki (Nurahmi, 2016).

$$ \mathrm{M} = \begin{bmatrix} {x_0}^2 + {x_1}^2 + {x_2}^2 + {x_3}^2 & \mathbf{0}_{3\times1}^{\boldsymbol{T}} \\ \boldsymbol{d} & \boldsymbol{R} \end{bmatrix} \qquad 2.5 $$

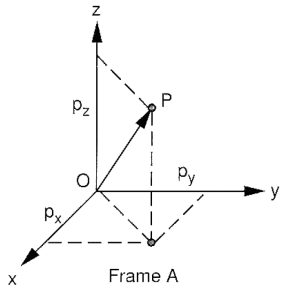
$$ \boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \alpha & 2(\mathrm{x}_1 x_2 - x_0 x_3) & 2(x_1 x_3 + x_0 x_2) \\ 2(x_1 x_2 + x_0 x_3) & \beta & 2(x_2 x_3 - x_0 x_1) \\ 2(x_1 x_3 - x_0 x_2) & 2(x_2 x_3 + x_0 x_1) & \gamma \end{bmatrix}. \qquad 2.6 $$

$$ \begin{aligned} \alpha &= {x_0}^2 + {x_1}^2 - {x_2}^2 - {x_3}^2 \\ \beta &= {x_0}^2 - {x_1}^2 + {x_2}^2 - {x_3}^2 \\ \gamma &= {x_0}^2 - {x_1}^2 - {x_2}^2 + {x_3}^2 \end{aligned} \qquad 2.7 $$

$$ \boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \qquad 2.8 $$

## 2.2. Transformasi Homogen

Pada studi kinematik manipulator robot, lokasi dari beberapa *rigid body* akan ditemukan pada suatu *space*. *Rigid body* benda yang dimaksud meliputi *link* pada manipulator, *end effector*, benda kerja, dan sebagainya. Untuk memahami transformasi homogen, terlebih dahulu perlu untuk mengetahui posisi, orientasi, dan lokasi dari sebuah benda, sehingga diperlukan sebuah sistem koordinat referensi. Sistem koordinat referensi inilah yang biasa disebut *fixed frame.*

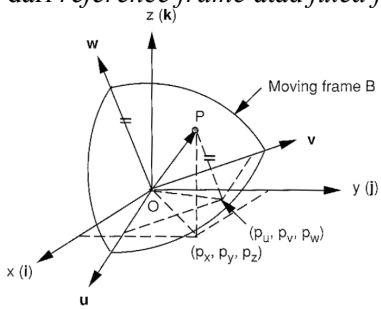



Gambar 2.2. Posisi Vektor dari Titik P terhadap *Frame* A (Tsai, 1999)

Posisi dari sebuah titik yang didasarkan pada *reference frame* dapat dideskripsikan dalam vektor posisi 3×1. Sebagai contoh, posisi dari titik P terhadap *reference frame* A seperti pada gambar 2.2 ditulis sebagai berikut:

$$^{A}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}. \qquad 2.9$$

Notasi A di sisi kiri atas variabel **P** mengindikasikan sistem koordinat dari sebuah posisi benda dalam hal ini *reference frame* A dan notasi x, y, dan z di sisi kanan bawah variable *p* merepresentasikan proyeksi dari vektor posisi OP terhadap ketiga sumbu koordinat dari *reference frame* atau *fixed frame* A.




Gambar 2.3. Orientasi *Moving Frame* B terhadap *Fixed Frame* A (Tsai,1999)

Orientasi dari sebuah benda terhadap *fixed frame* dapat ditentukan dengan beberapa metode yaitu *direction cosine representation, screw axis representation,* dan *Euler angle representation.* Untuk menjelaskan orientasi dari sebuah *rigid body,* mengacu pada gambar 2.3., *moving frame* B dianggap mengalami pergerakan relative terhadap *fixed frame* A, dan *origin* dari *moving frame* adalah *fixed* terhadap *fixed frame*. Metode yang paling sering digunakan adalah *Euler angle representation* di mana terdapat tiga matriks rotasi dasar. Apabila benda berputar sebesar $\theta$ pada sumbu-z maka diperoleh matriks rotasi sebagai berikut:

$$\mathbf{R}(z,\phi) = \begin{bmatrix} c\phi & -s\phi & 0 \\ s\phi & c\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \qquad 2.10$$

Apabila benda berputar sebesar $\psi$ terhadap sumbu-x maka diperoleh matriks rotasi sebagai berikut:

$$\mathbf{R}(x,\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix}. \qquad 2.11$$

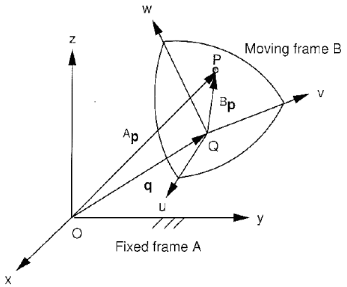
Apabila benda berputar sebesar $\phi$ terhadap sumbu-y maka diperoleh matriks rotasi sebagai berikut:

$$\mathbf{R}(y,\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}. \qquad 2.12$$

Apabila benda berputar terhadap semua sumbu pada *fixed frame,* maka matriks rotasi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{R}(\psi,\theta,\phi) = \mathbf{R}(z,\phi)\,\mathbf{R}(y,\theta)\,\mathbf{R}(x,\psi)$$

$$= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix}. \qquad 2.13$$




Gambar 2.4. Perpindahan Spasial (Tsai, 1999)

Lokasi dari sebuah benda dapat dideskripsikan dengan posisi dari *origin Q* dan orientasi dari *moving frame* terhadap *fixed frame.* Gambar 2.3 memperlihatkan posisi dari titik P dari *rigid body* terhadap *fixed frame A* yaitu ${}^{A}\mathbf{p} = \overrightarrow{OP}$. Apabila orientasi dari *moving frame B* terhadap *fixed frame A* didefinisikan dalam matriks rotasi ${}^{A}R_{B}$, maka lokasi dari titik P dapat diperoleh dari penjumlahan kedua vektor dan dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QP} \qquad 2.14$$

$${}^{A}\mathbf{p} = {}^{A}\mathbf{R}_{B}\,{}^{B}\mathbf{p} + {}^{A}\mathbf{q}. \qquad 2.15$$

Matriks rotasi 3×3 pada persamaan umum transformasi vektor posisi dari *moving frame* ke *fixed frame* 2.13 tidak mencakup gerakan translasi. Untuk memperoleh persamaan yang *compact* maka diperlukan konsep koordinat homogen dan matriks transformasi homogen (Tsai, 1999).

### 2.2.1. Koordinat Homogen

Apabila $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z]^T$ merupakan vektor posisi dari sebuah titik dengan mengacu pada *frame* A di ruang tiga dimensi, maka koordinat homogen dari **p** adalah:

$$\hat{\boldsymbol{p}} = [\rho p_x, \rho p_y, \rho p_z, \rho]^T. \qquad 2.16$$

Persamaan 2.16 di atas merupakan persamaan koordinat homogen untuk titik **p** di *frame* A yang direpresentasikan dengan

vektor $\hat{\boldsymbol{p}}$ di ruang empat dimensi. Koordinat keempat $\rho$ adalah faktor skala bukan nol. Secara general, vektor posisi N-dimensi menjadi vektor (N+1)-dimensi di sistem koordinat homogen. Konsep dari koordinat homogen digunakan untuk membuat matriks transformasi yang meliputi transformasi rotasi, translasi, skala, dan perspektif.

Dari definisi di atas, vektor tiga dimensi dapat ditemukan dari koordinat homogen empat dimensi dengan membagi tiga koordinat homogen pertama dengan faktor skala. Apabila faktor skala adalah satu, maka tiga koordinat homogen pertama merepresentasikan koordinat sebenarnya pada sistem koordinat tiga dimensi (Tsai, 1999).

$$p_x = \frac{\hat{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{x}}}{\rho}, \qquad p_y = \frac{\hat{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{y}}}{\rho}, \qquad p_z = \frac{\hat{\boldsymbol{p}}_{\boldsymbol{z}}}{\rho} \qquad 2.17$$

### 2.2.2. Matriks Transformasi Homogen

Matriks transformasi homogen adalah matriks 4 × 4 yang pemetaan vector posisi homogen dari satu sistem koordinat ke sistem koordinat yang lain. Matriks tersebut dapat dibagi mejadi empat submatriks sebagai berikut:

$$^{A}\mathbf{T}_{B} = \begin{bmatrix} ^{A}R_{B}(3\times3) & \vdots & ^{A}q(3\times1) \\ \cdots\cdots\cdots & \vdots & \cdots\cdots\cdots \\ \gamma\ (1\times3) & \vdots & \rho(1\times1) \end{bmatrix}. \qquad 2.18$$

Pada persamaan 2.18, submatriks $^{A}R_{B}(3\times3)$ menggambarkan orientasi dari *moving frame* B relatif terhadap *fixed frame* A, submatriks $^{A}q(3\times1)$ menggambarkan posisi dari *moving frame* relatif terhadap *fixed frame,* submatriks $\gamma\ (1\times3)$ menggambarkan transformasi perskpektif, dan submatriks $\rho(1\times1)$ adalah faktor skala. Untuk kinematika dari mekanisme dan manipulator robot, submatriks transformasi perspektif bernilai nol, sedangkan faktor skala adalah satu (Tsai, 1999).

## 2.3. Kinematika Sesaat (Instantaneous Kinematics)

Persamaan *Lagrange-energy,* persamaan *Newton-Euler,* dan *principle of virtual work* sering digunakan untuk menyelesaikan model dinamis pada manipulator paralel. Keakuratan dari model dinamis bergantung pada hasil dari analisa kinematika bersamaan dengan analisa posisi, kecepatan, dan percepatan. Sifat-sifat tersebut harus ditentukan pada setiap mode operasi yang mana tidak dapat dilakukan oleh *screw theory.* Permasalahan ini sangat penting untuk mekanisme paralel yang dapat berubah di mana kontrol gerakan harus memenuhi tipe mode operasi yang berbeda dengan sifat-sifat kinematik dan dinamis yang berbeda. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan *instantaneous kinematics.* (Nurahmi, 2019).

Pada persamaan general transformasi vektor posisi dari *moving frame* ke *fixed frame* terdapat matriks rotasi yang mencakup karakteristik dari perubahan orientasi *moving frame* terhadap *fixed frame* pada $t = 0$. Pendekatan yang berbeda perlu dilakukan untuk *instantaneous kinematics* dengan membatasi matriks rotasi menjadi bergantung terhadap waktu (Bottema, 1979). Persamaan general transformasi menjadi

$$ {}^{0}\mathbf{p} = \mathbf{T}(\mathrm{t})\ {}^{1}\mathbf{p}. \qquad 2.19 $$

Vektor kecepatan dari titik **P** dapat diperoleh dari turunan persamaan 2.10 sehingga diperoleh

$$ {}^{0}\dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{T}}(\mathrm{t})\ {}^{1}\mathbf{p}. \qquad 2.20 $$

Pada langkah berikutnya, vektor ${}^{1}\mathbf{p}$ disubtitusi dengan dengan persamaan $\boldsymbol{p} = \mathbf{T}^{-1}\ {}^{0}\mathbf{p}$ sehingga diperoleh persamaan

$$ {}^{0}\dot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{T}}\mathbf{T}^{-1}\ {}^{0}\mathbf{p}\ . \qquad 2.21 $$

Persamaan 2.11 dapat dipertimbangkan sebagai kecepatan yang dialami oleh pengamat yang berada pada *moving frame,* sedangkan persamaan 2.12 adalah kecepatan yang *moving frame* yang dilihat oleh pengamat yang berada pada *fixed frame.* Dua konsep tersebut di dalam *continuum mechanics* biasa disebut titik pengamatan *Lagrangian* dan *Eularian.* Matrix $\dot{\mathbf{T}}\mathbf{T}^{-1}$ direpresentasikan dengan $\boldsymbol{\Omega}$ sehingga persamaan 2.12 menjadi

$$ {}^{0}\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{\Omega}\ {}^{0}\mathbf{p} \qquad 2.22 $$

di mana $\mathbf{\Omega}$ didefinisikan dengan

$$ \mathbf{\Omega}(t) = \dot{\mathbf{T}}(t)\mathbf{T}^{-1}(t), \qquad 2.23 $$

Dengan menurunkan persamaan 2.14 maka diperoleh percepatan dari titik ${}^{0}\mathbf{p}$ ssebagai berikut:

$$ {}^{0}\ddot{\mathbf{p}} = \dot{\mathbf{\Omega}}\ {}^{0}\mathbf{p} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Omega}\ {}^{0}\mathbf{p}, \qquad 2.24 $$

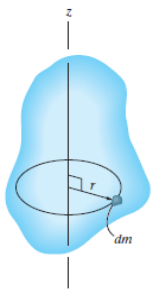
$$ {}^{0}\ddot{\mathbf{p}} = {}^{0}\mathbf{p}(\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Omega}). \qquad 2.25 $$

Matriks percepatan sesaat merupakan matriks **M** yang didefinisikan sebagai berikut:

$$ \mathbf{M} = \dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Omega}\mathbf{\Omega}. \qquad 2.26 $$

## 2.4. *Mass Moment of Inertia*

*Mass Moment of Inertia* dari sebuah *rigid body* merupakan suatu ukuran dari resistansi suatu *rigid body* terhadap percepatan angular. Sebagai contoh terdapat *rigid body seperti pada* gambar 2.5.




Gambar 2.5 Mass Moment of Inertia dari Rigid Body (Hibbler,2013)

Secara umum, kita dapat mendefinisikan persamaan *Mass Moment of Inertia* dari *rigid body* pada sumbu z sebagai berikut:

$$ \boldsymbol{I} = \int_{\boldsymbol{m}} \boldsymbol{r^2 dm} \qquad 2.27 $$

Dimana r merupakan jarak elemen dm yang tegak lurus dengan sumbu z. Karena formulasi persamaan melibatkan r, maka nilai I

khusus untuk sumbu acuan dimana persamaan ini dikalkulasi. Pada Umumnya, sumbu yang dipilih untuk dianalisa selalu melewati pusat massa dari *rigid body* dan tegak lurus terhadap bidang gerak. Selain itu, jika *rigid body* terbuat dari material dengan massa jenis $\boldsymbol{\rho}$ maka:

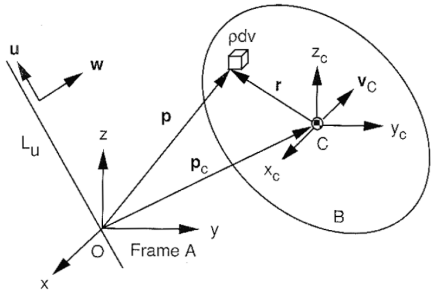
$$\boldsymbol{dm = \rho\, dV} \qquad 2.28$$

Sehingga:

$$\mathbf{I} = \boldsymbol{\rho} \int_{\boldsymbol{V}} \boldsymbol{r^2 dV} \qquad 2.29$$

### 2.4.1. Matriks Inersia

Matriks inersia digunakan dalam perhitungan momentum sebagai mass moment of inertia yang direpresentasikan dalam koordinat tiga dimensi.




Gambar 2.8. Massa Momen terhadap Titik Referensi (Tsai, 1999)

Matriks inersia *rigid body* B terhadap titik *origin O* seperti pada gambar 2.8 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{I_B^O} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}, \qquad 2.21$$

di mana

$$I_{xx} = \int_V (y^2 + z^2)\rho dV \qquad 2.22$$

$$I_{yy} = \int_V (z^2 + x^2)\rho dV, \qquad 2.23$$

$$I_{zz} = \int_V (x^2 + y^2)\rho dV, \qquad 2.24$$

$$I_{xy} = I_{yx} = -\int_V xy\,\rho dV, \qquad 2.25$$

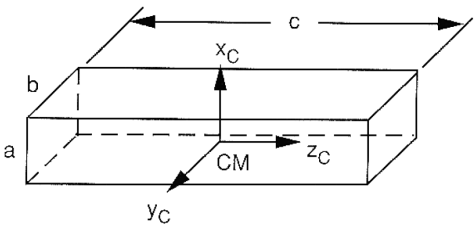
$$I_{yz} = I_{zy} = -\int_V yz\,\rho dV, \qquad 2.26$$

$$I_{xz} = I_{zx} = -\int_V xz\,\rho dV, \qquad 2.27$$

serta x, y, dan z merupakan koordinat dari turunan volume untuk massa $\rho dV$ terhadap *fixed frame* (Tsai, 1999).

### 2.4.2. Principal Moments of Inertia

Dalam orientasi tertentu pada *reference frame,* produk inersia dapat hilang. Sumbu koordinat ini disebut *principal axes* serta matriks inersianya disebut prinscipal moments of inertia (Tsai, 1999).




Gambar 2.9. Pelat Segi Empat (Tsai, 1999)

Sebagai contoh gambar 2.9 adalah sebuah pelat segi empat dengan panjang, lebar, tinggi, dan sumbu koordinat yang telah

ditentukan. Massa dari pelat tersebut adalah $\rho abc$. Dapat dilihat bahwa sumbu pusat gravitasi dari pelat selaras dengan *principal axes*. Maka semua produk inersia dari pelat tersebut adalah nol sehingga matriks inersianya adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{I}_{\mathbf{B}}^{\mathbf{C}} = \frac{\boldsymbol{m}}{\mathbf{12}}\begin{bmatrix} b^2+c^2 & 0 & 0 \\ 0 & c^2+a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a^2+b^2 \end{bmatrix}, \qquad 2.28$$

### 2.4.3. Transformasi dari Matriks Inersia

Untuk mendapatkan persamaan transformasi dari matriks inersia, diperlukan persamaan *angular momentum* dari *rigid body* B terhadap *fixed frame* A dan *moving frame* C sebagai berikut

$$^{\mathrm{A}}\mathbf{h} = {}^{\mathbf{A}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathrm{A}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}}, \qquad 2.29$$

dan

$$^{\mathrm{C}}\mathbf{h} = {}^{\mathbf{C}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}}, \qquad 2.30$$

di mana ${}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{\omega}_B$ merupakan kecepatan sudut dari benda B relatif terhadap *fixed frame* A dan diekspresikan di *frame* C. Maka, ${}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{\omega}_B = {}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{T}}\,{}^{\mathrm{A}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}}$, di mana ${}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}$ adalah matriks rotasi yang menggambarkan orientasi dari C relatif terhadap A.

Karena **h** adalah sebuah vektor, maka transformasi dari vektor **h** adalah:

$$^{\mathrm{A}}\mathbf{h} = {}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathrm{C}}\mathbf{h}\ , \qquad 2.31$$

dan dengan mensubtitusi persamaan 2.22 dan 2.23 ke 2.24 maka diperoleh

$$^{\mathbf{A}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathrm{A}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}} = {}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}\ {}^{\mathbf{C}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}}. \qquad 2.32$$

Substitusi ${}^{\mathrm{C}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}} = {}^{\mathrm{A}}\mathbf{R}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}}\,{}^{\mathrm{A}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{B}}$ ke persamaan 2.22 sehingga dihasilkan

$$^{\mathbf{A}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}} = {}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}\ {}^{\mathbf{C}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}\ {}^{\mathbf{A}}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}^{\mathbf{T}}. \qquad 2.33$$

Persamaan 2.29 mengubah sebuah matriks inersia dari satu *reference frame* ke *reference frame* yang lain. Kedua matriks inersia didapatkan dari pusat massa C. Elemen dari ${}^{\mathbf{C}}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}$ bersifat tetap dikarenakan matriks tersebut diekspresikan di sistem

koordinat C. Sedangkan elemen dari ${}^{A}\mathbf{I}_{\mathbf{B}}$ bergantung pada matriks rotasi ${}^{A}\mathbf{R}_{\mathbf{C}}$ (Tsai, 1999).

## 2.5. Kesetimbangan Dinamis Berdasarkan Hukum *Newton-Euler*

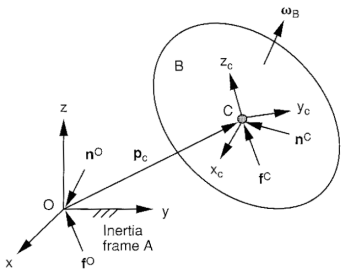
Kinetik adalah cabang dari dinamis yang berurusan dengan hubungan antara perubahan gerakan dari sebuah benda dan gaya-gaya yang mengakibatkan perubahan tersebut. Dasar dari kinetik adalah hukum Newton II, ketika gaya bekerja pada sebuah partikel, partikel akan berakselerasi ke arah gaya tersebut dengan nilai yang sama dengan gaya tersebut (Hibbeler,2013).

Hukum ini dapat dipastikan melalui eksperimen dengan memberkian gaya sebesar **F** pada sebuah partikel, dan kemudian mengukur percepatan **a**. Karena gaya dan percepatan selalu proporsional, maka **m** dapat ditentukan dengan perbandingan $\mathrm{m} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{a}}$, di mana m adalah massa dari partikel. Jika ditulis secara matematis maka persamaan hukum Newton II adalah

$$\mathbf{F} = \mathrm{m}\mathbf{a}\,. \qquad 2.34$$

Ketika ada lebih dari satu gaya yang bekerja pada partikel tersebut, maka resultan gaya ditentukan dengan jumlah dari semua vektor gaya. Untuk kasus yang umum, persamaan geraknya adalah:

$$\sum \mathbf{F} = \mathrm{m}\mathbf{a} \qquad 2.35$$




Gambar 2.10. Resultan Gaya dan Momen pada *Rigid Body B* (Tsai, 1999)

Pada gambar 2.10., A(x, y, z) merupakan inertia frame, $\mathbf{I}^{O}$ merupakan momentum linear dari rigid body B terhadap origin O dan diekspresikan di A, dan $\mathbf{h}^{O}$ merupakan momentum angular. Apabila $\mathbf{f}^{O}$ dan $\mathbf{n}^{O}$ merupakan resultan gaya dan momen yang diberikan ke rigid body B terhadap origin O, maka persamaan Newton-Euler dapat dinyatakan dengan

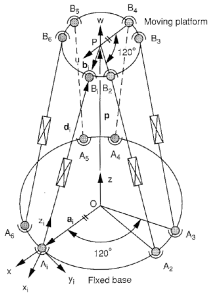
$$\mathbf{f}^{O} = \frac{d\mathbf{I}^{O}}{dt}, \qquad 2.36$$

$$\mathbf{n}^{O} = \frac{d\mathbf{h}^{O}}{dt}, \qquad 2.37$$

Persamaan 2.42 dan 2.43 adalah dua persamaan gerak dinamis yang fundamental. Perbedeaan utama dari persamaan dinamis dan kinematik adalah persamaan dinamis diterapkan hanya pada *inertia frame,* sedangkan persamaan kinematik valid untuk semua *frame.* Dalam aplikasi teknik, semua *frame* yang tetap di permukaan dapat disebut *inertia frame* (Tsai, 1999).

## 2.6. Analisa Dinamis Stewart-Gough Platform

Pada subbab ini akan dibahas penelitian terdahulu mengenai analisa dinamis pada maipulator paralel. Subbab ini mencakup analisa dinamis pada manipulator paralel *Stewart-Gough Platform* di mana keduanya dianalisa dengan Hukum *Newton-Euler* (Tsai, 1999).

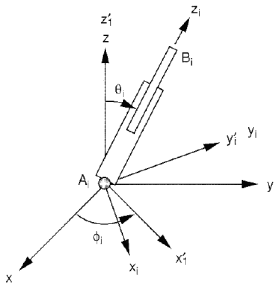



Gambar 2.11. Diagram Skematik dari *Stewart-Gough Platform* (Tsai, 1999)

Gambar 2.11. memperlihatkan diagram skematik dari *Stewart-Gough Platform.* Untuk menganalisa manipulator paralel tersebut, sumbu koordinat $A(x, y, z)$ diletakkan pada *fixed base,* sumbu koordinat $B(x, y, z)$ diletakkan pada *moving platform,* dan sumbu koordinat $C(x_i, y_i, z_i)$ pada setiap lengan.

### 2.6.1. Analisa Posisi

Setiap lengan diasumsikan tersambung dengan *fixed base* melalui *universal joint* sehingga *joint* tersebut tidak dapat berputar terhadap sumbu longitudinal. Orientasi dari lengan terhadap *fixed base* dapat dideskripsikan melalui dua sudut *Euler* yaitu rotasi sebesar $\phi_i$ terhadap sumbu $z_i$ dan rotasi sebesar $\theta_i$ terhadap sumbu $y_i$ seperti pada gambar 2.12.




Gambar 2.12. Sudut Euler dari Lengan (Tsai, 1999)

Matriks rotasi dari lengan tersebut adalah:

$$ {}^{A}\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} c\phi_i c\theta_i & -s\phi_i & c\phi_i s\theta_i \\ s\phi_i c\theta_i & c\phi_i & s\phi_i s\theta_i \\ -s\theta_i & 0 & c\theta_i \end{bmatrix}. \qquad 2.38 $$

*Unit Vector* $\mathbf{s}_\mathrm{i}$ terhadap sumbu lengan ke-i adalah sebagai berikut:

$$ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \qquad 2.39 $$

Dengan mensubtitusi *unit vector* ${}^{i}\mathbf{s}_i$ ke persamaan $\mathbf{s}_i = {}^{A}\mathbf{R}_i \; {}^{i}\mathbf{s}_i$, maka didapatkan

$$\hat{\mathbf{s}}_i = \begin{bmatrix} c\phi_i c\theta_i \\ s\phi_i c\theta_i \\ c\theta_i \end{bmatrix}, \qquad 2.40$$

di mana

$$c\theta_i = \mathrm{s}_{iz}, \qquad 2.41$$

$$s\theta_i = \sqrt{\mathrm{s}_{ix}{}^2 + \mathrm{s}_{iy}{}^2}, \qquad 2.42$$

$$s\phi_i = \frac{\mathrm{s}_{iy}}{s\theta_i}, \qquad 2.43$$

$$c\phi_i = \frac{\mathrm{s}_{ix}}{s\theta_i}. \qquad 2.44$$

### 2.6.2. Analisa Kecepatan

Kecepatan dari titik $B_i$ terhadap sumbu koordinat lengan ditulis sebagai berikut:

$$^{i}\mathbf{v}_{bi} = d_i \; ^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times \; ^{i}\hat{\mathbf{s}} + \dot{d}_i \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i. \qquad 2.45$$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* $^{i}\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan kecepatan sudut dari lengan ke-i sebagai berikut:

$$^{i}\boldsymbol{\omega}_i = \frac{1}{d_i}\left( \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times \; ^{i}\mathbf{v}_{bi}\right). \qquad 2.46$$

$$^{i}\boldsymbol{\omega}_i = \frac{1}{d_i}\begin{bmatrix} -\; ^{i}\mathbf{v}_{biy} \\ ^{i}\mathbf{v}_{bix} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \qquad 2.47$$

### 2.6.3. Analisa Percepatan

Percepatan dari titik $B_i$ dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan 2.45 sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} ^{i}\dot{\mathbf{v}}_{bi} = \ddot{d}_i \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i + d_i \; ^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i + d_i \; ^{i}\boldsymbol{\omega}_i\left( \; ^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i\right) \\ + 2\dot{d}_i \; ^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times \; ^{i}\hat{\mathbf{s}}_i. \end{aligned} \qquad 2.48$$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* $^{i}\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan percepatan sudut dari lengan ke-i sebagai berikut:

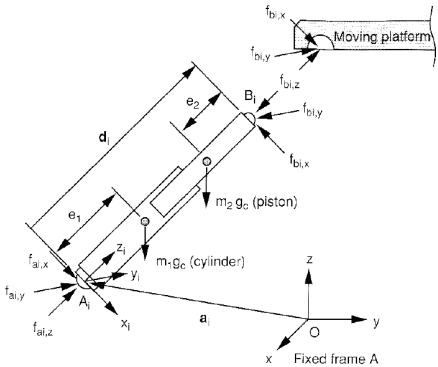
$$ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \frac{1}{d_i}\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\dot{\mathbf{v}}_{bi} - \frac{2\dot{d}_i}{d_i}\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i. \qquad 2.49 $$

### 2.6.4. Dinamika Lengan

Gambar 2.13 memperlihatkan *Free Body Diagram* (FBD) dari lengan. Persamaan gerak Euler dari lengan ke-i terhadap titik $A_i$ dapat ditulis sebagai berikut:

$$ {}^{i}\mathbf{n}_i^A = \frac{d}{dt}\left(\ {}^{i}\mathbf{h}_i^A\right), \qquad 2.50 $$

di mana ${}^{i}\mathbf{n}_i^A$ adalah resultan momen pada lengan ke-i terhadap titik $A_i$ dan ${}^{i}\mathbf{h}_i^A$ adalah momentum angular dari silinder dan piston ke-i terhadap titik $A_i$.




Gambar 2.13. *Free Body Diagram* (FBD) dari Lengan (Tsai, 1999)

Momentum angular dari silinder dan piston diperoleh dari persamaan berikut:

$$ {}^{i}\mathbf{h}_i^A = m_1 e_1\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\mathbf{v}_{1i}\right) + m_2(d_i - e_2)\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\mathbf{v}_{2i}\right) + \ {}^{i}\mathbf{I}_{1i}\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i + \ {}^{i}\mathbf{I}_{2i}\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i, \qquad 2.51 $$

dan dengan menurunkan persamaan 2.57 maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}\ {}^{i}\mathbf{h}_i^A = m_1 e_1\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\dot{\mathbf{v}}_{1i}\right) + m_2(d_i - e_2)\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\dot{\mathbf{v}}_{2i}\right) + \ {}^{i}\mathbf{I}_{1i}\ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times\left(\ {}^{i}\mathbf{I}_{1i}\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\right) + \ {}^{i}\mathbf{I}_{2i}\ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times\left(\ {}^{i}\mathbf{I}_{2i}\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\right). \quad 2.52$$

Resultan momen yang bekerja pada lengan $i$ terhadap $A_i$ adalah:

$${}^{i}\mathbf{n}_i^A = d_i\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\left(-\ {}^{i}\mathbf{f}_{bi}\right) + [m_1 e_1 + m_2(d_i - e_2)]\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{s}}_i \times\ {}^{i}\mathbf{R}_A\ {}^{A}\mathbf{g}\ \right). \quad 2.53$$

Persamaan dinamis diperoleh dari mensubtitusi persamaan 2.52 dan 2.53 sehingga diperoleh nilai ${}^{i}\mathrm{f}_{bix}$ dan ${}^{i}\mathrm{f}_{biy}$.

### 2.6.5. Dinamika Platform

Pada bagian ini akan diformulasikan persamaan dinamis dari *moving platform.* Persamaan ini diekspresikan pada *fixed frame* A dan *moving frame* B. Untuk memperoleh gaya reaksi titik B pada *fixed frame* A maka gaya reaksi ${}^{i}\mathbf{f}_{bi}$ harus ditransformasi melalui persamaan sebagai berikut:

$${}^{A}\mathbf{f}_{bi} = {}^{A}\mathbf{R}_i\ {}^{i}\mathbf{f}_{bi}. \quad 2.54$$

Persamaan dinamis diperoleh dari Hukum Newton II pada *moving platform* sebagai berikut:

$$\sum {}^{A}\mathbf{f}_{bi} + m_p\ {}^{A}\mathbf{g} = m_p\ {}^{A}\dot{\mathbf{v}}_p. \quad 2.55$$

Gaya pada titik B juga ditransformasi pada *moving frame* B dengan persamaan sebagai berikut:

$${}^{B}\mathbf{f}_{bi} = {}^{B}\mathbf{R}_A\ {}^{A}\mathbf{f}_{bi}. \quad 2.56$$

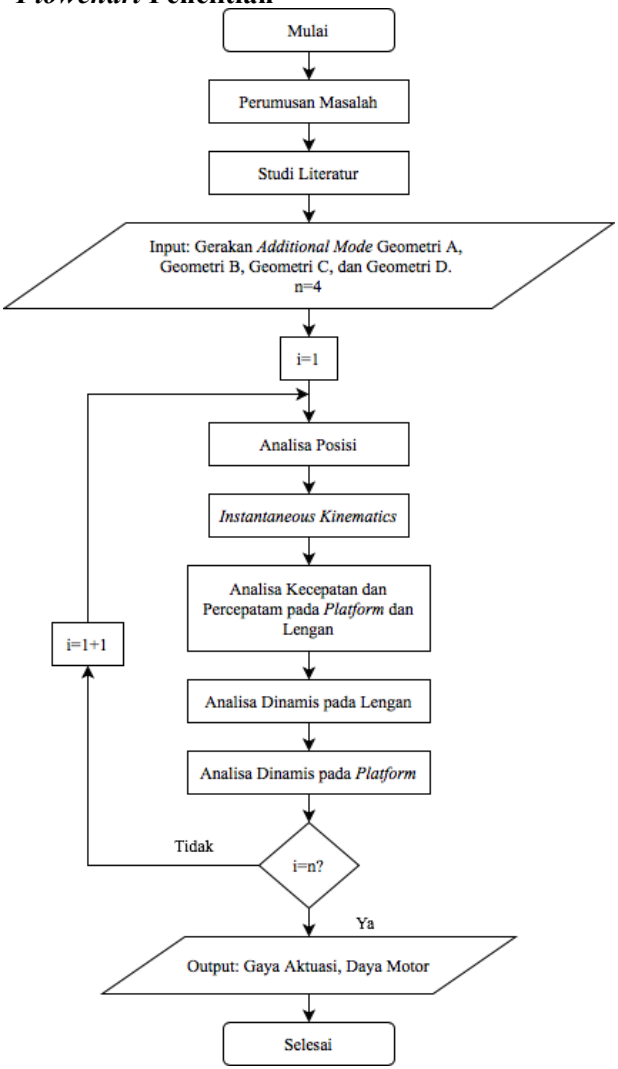
Untuk memperoleh persamaan dinamis, persamaan 2.51 disubtitusi pada persamaan *Euler* berikut:

$$\sum {}^{B}\mathbf{b}_i \times {}^{B}\mathbf{f}_{bi} = \ {}^{i}\mathbf{I}_p\ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_p + \ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_p \times\left(\ {}^{i}\mathbf{I}_p\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_p\right). \quad 2.57$$

Nilai dari ${}^{i}\mathrm{f}_{biz}$ untuk i = 1,2,...,6 dapat diperoleh dari persamaan 2.60 dan 2.62 melalui metode *Gauss Elimination* (Tsai, 1999).

# BAB III
# METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1. *Flowchart* Penelitian



## 3.2. Proses Penelitian

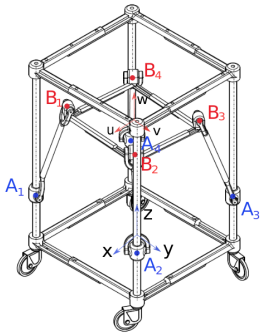
Proses penelitian dilakukan secara analitik dan mencakup analisa posisi, analisa *Instantaneous velocity* dan *acceleration*, analisa kecepatan dan percepatan pada *platform* dan lengan, analisa dinamis pada lengan, dan analisa dinamis pada *platform*. Berikut penjelasan lebih rinci pada tiap proses penelitian:

### 3.2.1. Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data mengenai mekanisme robot 3 DoF melalui penelitian yang telah dilakukan. Data tersebut digunakan sebagai parameter untuk analisa dinamis pada robot 3 DoF tersebut. Perumusan masalah dilakukan menggunakan data yang telah diperoleh dan dari rumusan masalah diperoleh batasan dan tujuan penelitian.

### 3.2.2. Studi Literatur

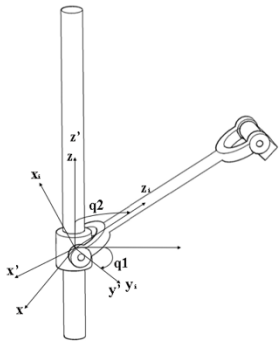
Pada tahap ini dilakukan studi literatur yang mencakup analisa dinamis, *instantaneous kinematics,* dan hukum *Newton Euler*. Studi literatur dilakukan dengan cara membaca jurnal, buku, dan *proceeding* dari penelitian terdahulu. Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Putrayudanto *et all.* diperoleh desain robot paralel 4-CRU *(cylindrical, revolute, universal)* seperti pada gambar 3.1.




Gambar 3.1. Robot Paralel 4-CRU *(cylindrical, revolute, universal).*

### 3.2.3. Analisa Posisi

Pada tahap ini dilakukan analisa posisi pada lengan yang terhubung pada *base* melalui *universal joint.* Dengan mengasumsikan bahwa universal joint berputar sebesar $q1$ terhadap sumbu $z$ dan berputar sebesar $q2$ terhadap sumbu $y$ seperti pada gambar 3.2.




Gambar 3.2. Sudut *Euler* dari Lengan

Maka diperoleh matriks rotasi sebagai berikut:

$$ {}^{A}\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} cq1_i cq2_i & -sq1_i & cq1_i sq2_i \\ sq1_i cq2_i & cq1_i & sq1_i sq2_i \\ -sq2_i & 0 & cq2_i \end{bmatrix}. \qquad 3.1 $$

*Unit Vector* $\hat{\mathbf{e}}_\mathrm{i}$ terhadap sumbu lengan ke-i adalah sebagai berikut:

$$ {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \qquad 3.2 $$

Dengan mensubtitusi *unit vector* ${}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i$ ke persamaan ${}^{A}\hat{\mathbf{e}}_i = {}^{A}\mathbf{R}_i \; {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i$, maka didapatkan

$$ {}^{A}\hat{\mathbf{e}}_i = \begin{bmatrix} cq1_i cq2_i \\ sq1_i cq2_i \\ cq2_i \end{bmatrix}, \qquad 3.3 $$

di mana

$$ cq2_i = \mathrm{e}_{iz}, \qquad 3.4 $$

$$sq2_i = \sqrt{e_{ix}{}^2 + e_{iy}{}^2}, \quad 3.5$$

$$sq1_i = \frac{e_{iy}}{sq2_i}, \quad 3.6$$

$$cq1_i = \frac{e_{ix}}{sq2_i}. \quad 3.7$$

Dengan mensubtitusi sudut yang diperoleh pada persamaan 3.3 pada persamaan 3.2 maka diperoleh matriks rotasi ${}^{A}\mathbf{R}_i$.

### 3.3. Geometri Mekanisme

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Putrayudanto *et all.* diperoleh konfigurasi pada kondisi *singularity* dari mekanisme robot paralel 4-CRU. Diantaranya adalah Geometri A ($AM_1$), Geometri B ($AM_2$), Geometri C ($AM_3$), dan Geometri D ($AM_4$). Keempatnya merupakan input dari penelitian ini.

#### 3.3.1. Mode Operasi dan Jenis Gerakan

Berikut adalah penjelasan mode operasi mekanisme parallel robot 4-CRU:

##### 3.3.1.1. Geometri A ($AM_1$)

Geometri A ($AM_1$) diidentifikasi dengan cara melakukan dekomposisi primer terhadap constraint equations dari vector-vektor lengan robot paralel 4-CRU. Sehingga diperoleh persamaan-persamaan dengan parameter *a,b,c,d* dan variable (*X,Y,* $x_0$, $x_1$, $x_2$, $x_3$) sebagai berikut:

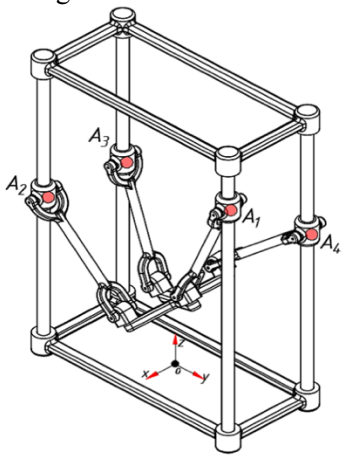
$$\boldsymbol{X = Y\sqrt{\frac{d^2(c-a)(a+c)}{c^2(b-d)(d+b)}}}, \quad 3.8$$

$$\boldsymbol{x_3 = x_0\sqrt{\frac{(c-a)(b-d)}{(a+c)(d+b)}}}, \quad 3.9$$

$$\boldsymbol{x_2 = x_1\sqrt{\frac{(c-a)(b+d)}{(a+c)(d+b)}}}. \quad 3.10$$

Persamaan 3.8 menunjukkan bahwa Geometri A ($AM_1$) memiliki gerakan translasi terhadap sumbu-x yang berhubungan dengan gerakan translasi terhadap sumbu-y. Persamaan 3.9 dan 3.10

menunjukkan gerakan rotasi terhadap sumbu-x. Variabel Z tidak muncul dalam persamaan mode operasi tambahan 1 mengindikasikan bahwa gerakan translasi terhadap sumbu z merupakan gerakan independen. Persamaan 3.8-3.10 akan memiliki hasil nilai real apabila $(c - a)\ (b - d) > 0$. Geometri A ($AM_1$) ditunjukkan dengan Gambar 3.3.




Gambar 3.3. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Geometri A ($AM_1$)

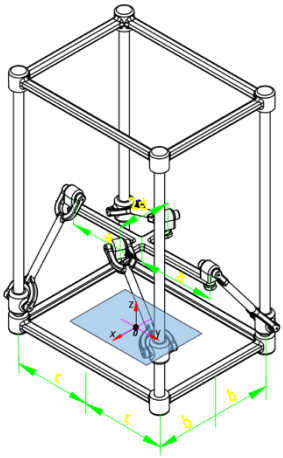
**3.3.1.2. Geometri B ($AM_2$)**

Geometri B ($AM_2$) diidentifikasi dengan menggunakan salah satu dari 3 kondisi hubungan parameter desain base dan platform yang dapat memenuhi persamaan $(c - a)\ (b - d) > 0$, yaitu $(c = a)\ (b \neq d)$. Transformasi matriks dari Geometri B ($AM_2$) adalah:

$$\boldsymbol{T_{AM2}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{Y} & \mathbf{0} & \frac{x_0{}^2 - x_1{}^2}{x_0{}^2 + x_1{}^2} & -\frac{2x_0x_1}{x_0{}^2 + x_1{}^2} \\ \boldsymbol{Z} & \mathbf{0} & \frac{2x_0x_1}{x_0{}^2 + x_1{}^2} & \frac{x_0{}^2 - x_1{}^2}{x_0{}^2 + x_1{}^2} \end{bmatrix}. \qquad 3.11$$

Persamaan 3.11 menunjukkan bahwa Mode Operasi Tambahan 2 (AM2) memiliki gerakan 2-DoF translasi terhadap sumbu-y dan

sumbu-z, dan 1-DoF rotasi terhadap sumbu-x. Geometri B ($AM_2$) ditunjukkan dengan Gambar 3.4.



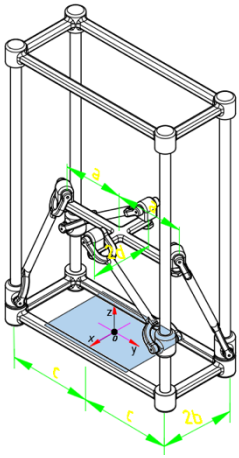
Gambar 3.4. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Geometri B ($AM_2$)

### 3.3.1.3. Geometri C ($AM_3$)

Geometri C ($AM_3$) diidentifikasi dengan menggunakan salah satu dari 3 kondisi hubungan parameter desain base dan platform yang dapat memenuhi persamaan $(c - a)\ (b - d) > 0$, yaitu $(c \neq a)\ (b = d)$. Transformasi matriks dari Geometri C ($AM_3$) adalah:

$$\boldsymbol{T_{AM3}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{X} & \frac{{x_0}^2 - {x_2}^2}{{x_0}^2 + {x_2}^2} & \mathbf{0} & \frac{2x_0x_2}{{x_0}^2 + {x_2}^2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \boldsymbol{Z} & \mathbf{0} & -\frac{2x_0x_2}{{x_0}^2 + {x_2}^2} & \frac{{x_0}^2 - {x_2}^2}{{x_0}^2 + {x_2}^2} \end{bmatrix}. \qquad 3.12$$

Persamaan 3.12 menunjukkan bahwa Geometri C ($AM_3$) memiliki gerakan 2-DoF translasi terhadap sumbu-x dan sumbu-z, dan 1-DoF rotasi terhadap sumbu-y. Geometri C ($AM_3$) ditunjukkan dengan Gambar 3.5.



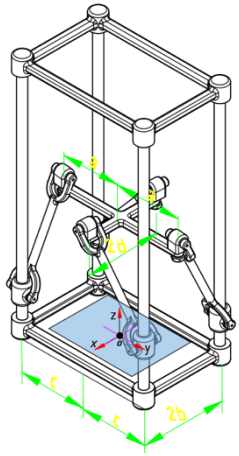

Gambar 3.5. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Geometri C ($AM_3$)

### 3.3.1.4. Geometri D ($AM_4$)

Geometri D ($AM_4$) diidentifikasi dengan menggunakan salah satu dari 3 kondisi hubungan parameter desain base dan platform yang dapat memenuhi persamaan $(c-a)\ (b-d) > 0$, yaitu $(c = a)\ (b = d)$. Transformasi matriks dari Geometri D ($AM_4$) adalah:

$$\boldsymbol{T}_{AM4} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \frac{-Yx_2}{x_1} & \frac{x_0{}^2+x_1{}^2-x_2{}^2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & \frac{2x_1x_2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & \frac{2x_0x_2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} \\ Y & -\frac{2x_1x_2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & \frac{x_0{}^2-x_1{}^2+x_2{}^2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & \frac{2x_0x_1}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} \\ Z & -\frac{2x_0x_2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & -\frac{2x_0x_1}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} & \frac{x_0{}^2-x_1{}^2-x_2{}^2}{x_0{}^2+x_1{}^2+x_2{}^2} \end{bmatrix}. \quad 3.13$$

Persamaan 3.13 menunjukkan bahwa Geometri D ($AM_4$) memiliki gerakan 3-DoF translasi terhadap sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z; dan 1-DoF rotasi terhadap sumbu-x. Geometri D ($AM_4$) ditunjukkan dengan Gambar 3.6.




Gambar 3.6. Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Geometri D ($AM_4$)

### 3.3.2. Parameter Desain

Parameter-parameter desain dan gerakan yang akan digunakan pada penelitian dapat dideskripsikan setelah mendapatkan matriks transformasi, sehingga dapat ditabulasikan seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parameter Desain dari Robot Paralel 4-CRU

| No. | Mode Operasi | Parameter Desain | Parameter Motion |
|---|---|---|---|
| 1. | Geometri A ($AM_1$) | $a \neq b \neq c \neq d$<br>$(c-a)(b-d) > 0$ | $X = Y\sqrt{\frac{d^2(c-a)(a+c)}{c^2(b-d)(d+b)}}$<br>$x_3 = x_0\sqrt{\frac{(c-a)(b-d)}{(a+c)(d+b)}}$<br>$x_2 = x_1\sqrt{\frac{(c-a)(b+d)}{(a+c)(d+b)}}$ |
| 2. | Geometri B ($AM_2$) | $a = c; b \neq d$ | $x_2 = x_3 = X = 0$ |

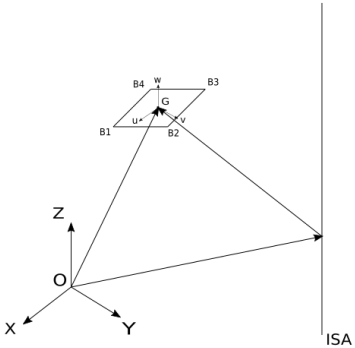
| | | | |
|---|---|---|---|
| 3. | Geometri C ($AM_3$) | $a \neq c; b = d$ | $x_1 = x_3 = Y = 0$ |
| 4. | Geometri D ($AM_4$) | $a = c; b = d$ | $x_3 = 0$<br>$Xx_1 + Yx_2 = 0$ |

# BAB IV
# HASIL DAN PEMBAHASAN

## 4.1. Persamaan Kesetimbangan Dinamis

### 4.1.1. Kecepatan dan Percepatan Sesaat

Pada tahap ini dilakukan analisa kecepatan dan percepatan sesaat pada titik pusat masa *G* dan titik *B* pada *platform* seperti pada gambar 4.1.




Gambar 4.1. Percepatan dan Kecepatan Sesaat pada *Platform*

Kecepatan dan percepatan sesaat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{\Omega}(t) = \dot{\mathbf{T}}(t)\mathbf{T}^{-1}(t), \qquad 4.1$$

$$\mathbf{M}(t) = \ddot{\mathbf{\Omega}}(t) + \dot{\mathbf{\Omega}}(t)\dot{\mathbf{\Omega}}(t). \qquad 4.2$$

Dari persamaan 3.8 maka diperoleh matriks sebagai berikut:

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_{px} & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_{py} & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ v_{pz} & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}, \qquad 4.3$$

Kecepatan linear dan angular sesaat dari *rigid body* terhadap *ISA* dapat diekstrak dari matriks $\mathbf{\Omega}$ dan $\boldsymbol{M}$ pada persamaan 2.8 dan 2.9. Maka kecepatan pada titik *G* dan *B* terhadap *fixed coordinate A* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{v_G} = \mathbf{\Omega}\,\overrightarrow{\mathbf{OP}}, \qquad 4.4$$

$$\mathbf{v_{Bi}} = \mathbf{\Omega}\ \overrightarrow{\mathbf{OB}}, \qquad 4.5$$

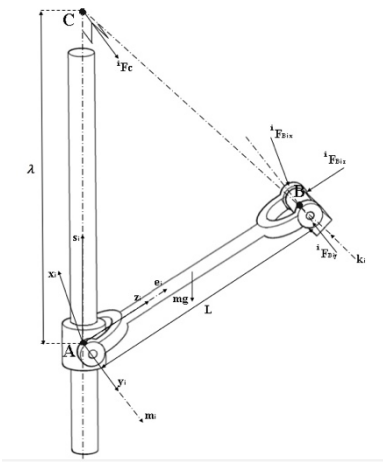
dan dengan menurunkan persamaan 2.11 dan 2.12 maka diperoleh persamaan percepatan titik *G* dan *B* terhadap *fixed coordinate O* sebagai berikut:

$$\boldsymbol{a_G} = \mathbf{M}\ \overrightarrow{\mathbf{OP}}, \qquad 4.6$$

$$\boldsymbol{a_B} = \mathbf{M}\ \overrightarrow{\mathbf{OB}}. \qquad 4.7$$

### 4.1.2. Analisa Kecepatan dan Percepatan

Pada tahap ini dilakukan analisa kecepatan dan percepatan dengan menganalisa kecepatan dan percepatan linear dan angular pada lengan seperti pada gambar 4.2. sebagai berikut:




Gambar 4.2. *Free Body Diagram* dari Lengan pada *Additional Mode*

#### 4.1.2.1. Analisa Kecepatan

Kecepatan dari titik $B_i$ terhadap sumbu koordinat lengan ditulis sebagai berikut:

$$^{i}\mathbf{v}_{bi} = L_i\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times\ {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i + \dot{\boldsymbol{L}}_{\boldsymbol{i}}. \qquad 4.8$$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* ${}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan kecepatan sudut dari lengan ke-i sebagai berikut:

$$ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{L}_i}\left( {}^{i}\hat{\boldsymbol{e}}_i \times \left( {}^{i}\boldsymbol{v}_{bi} - \dot{\boldsymbol{L}}_i \right)\right). \qquad 4.9 $$

#### 4.1.2.2. Analisa Percepatan

Percepatan dari titik $B_i$ dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan 4.8 sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$ {}^{i}\dot{\boldsymbol{v}}_{bi} = \left(\boldsymbol{L}_i \; {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^{i}\hat{\boldsymbol{e}}_i\right) + \left(\boldsymbol{L}_i \; {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times \left( {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times {}^{i}\hat{\boldsymbol{e}}_i \right)\right) + \ddot{\boldsymbol{L}}_i. \qquad 4.10 $$

Dengan mengalikan *cross* dengan *unit vector* ${}^{i}\mathbf{s}_i$ pada kedua sisi maka diperoleh persamaan percepatan sudut dari lengan ke-i sebagai berikut:

$$ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{L}_i}\left( {}^{i}\hat{\boldsymbol{e}}_i \times \left( {}^{i}\dot{\boldsymbol{v}}_{bi} - \ddot{\boldsymbol{L}}_i \right)\right). \qquad 4.11 $$

### 4.1.3. Analisa Dinamis pada Lengan

Pada tahap ini dilakukan analisa dinamis pada lengan sehingga diperoleh persamaan dinamis pada lengan. Gambar 4.2 memperlihatkan *Free Body Diagram* (FBD) dari lengan. Persamaan gerak Euler dari lengan tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$ {}^{i}\mathbf{n}_i^A = \frac{d}{dt}\left( {}^{i}\mathbf{h}_i^A \right), \qquad 4.12 $$

di mana ${}^{i}\mathbf{e}_i^A$ adalah resultan momen pada lengan ke-i terhadap titik $A_i$ dan ${}^{i}\mathbf{h}_i^A$ adalah momentum angular dari silinder ke-i terhadap titik $A_i$. Momentum angular dari silinder diperoleh dari persamaan berikut:

$$ {}^{i}\mathbf{h}_i^A = m\frac{L}{2}\left( {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i \times {}^{i}\mathbf{v}_{ei} \right) + {}^{i}\mathbf{I}_i \; {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i, \qquad 4.13 $$

Dimana ${}^{i}\mathbf{v}_{ei}$ adalah kecepatan dari pusat masa lengan terhadap koordinat lengan. Dan dengan menurunkan persamaan 4.13 maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt}\ {}^{i}\mathbf{h}_i^A = m\frac{L}{2}\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i \times\ {}^{i}\dot{\mathbf{v}}_{ei}\right) +\ {}^{i}\mathbf{I}_i\ {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i \times \left(\ {}^{i}\mathbf{I}_i\ {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\right). \quad 4.14$$

Resultan momen yang bekerja pada lengan $i$ terhadap $A_i$ adalah:

$$ {}^{i}\mathbf{n}_i^A = L_i\ {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i \times \left(-\ {}^{i}\mathbf{f}_{bi}\right) + m\frac{L}{2}\left(\ {}^{i}\hat{\mathbf{e}}_i \times\ {}^{i}\mathbf{R}_A\ {}^{A}\mathbf{g}\ \right) + \overrightarrow{\boldsymbol{CA}} \times\ {}^{i}\mathbf{f}_{ci}. \quad 4.15$$

dengan gaya *constraint* yang dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

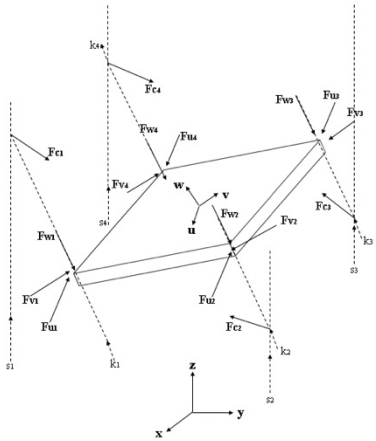
$$ {}^{A}\mathbf{f}_{ci} = \boldsymbol{f}_i\ (\hat{\mathbf{s}}_i \times \hat{\mathbf{e}}_i) = \boldsymbol{f}_i\ .\ \widehat{\mathbf{m}}_i \quad 4.16$$

$$ {}^{i}\mathbf{f}_{ci} =\ {}^{A}\mathbf{R}_i^{-1}\ {}^{A}\mathbf{f}_{ci}. \quad 4.17$$

Persamaan dinamis diperoleh dari mensubtitusi persamaan 4.14 dan 4.15 sehingga diperoleh nilai ${}^{i}\mathrm{f}_{bix}$ dan ${}^{i}\mathrm{f}_{biy}$.

### 4.1.4. Analisa Dinamis pada Platform

Pada tahap ini akan diformulasikan persamaan dinamis dari *moving platform.* Persamaan ini diekspresikan pada *fixed frame*. Gambar 4.3. memperlihatkan FBD dari *moving platform.*




Gambar 4.3. Free Body Diagram pada *Platform*

Untuk memperoleh gaya reaksi titik B pada *fixed frame,* maka gaya reaksi ${}^{i}\mathbf{f}_{bi}$ harus ditransformasi melalui persamaan sebagai berikut:

$$ {}^{A}\mathbf{f}_{bi} = {}^{A}\mathbf{R}_{i}\ {}^{i}\mathbf{f}_{bi}. \qquad 4.18 $$

Persamaan dinamis diperoleh dari persamaan *Newton-Euler* pada *moving platform* sebagai berikut:

$$ \sum {}^{A}\mathbf{f}_{bi} + \sum {}^{A}\mathbf{f}_{ci} + m_p\ {}^{A}\mathbf{g} \quad = m_p\ {}^{A}\dot{\mathbf{v}}_p. \qquad 4.19 $$

Untuk memperoleh momen *constraint* platform, perlu diketahui vector posisi titik C pada *fixed frame* seperti yang terlihat pada gambar 4.4 melalui persamaan sebagai berikut:

$$ \left(\boldsymbol{\lambda}_i.\hat{\mathbf{s}}_i + \overrightarrow{\boldsymbol{AB}_i}\right).\left(\hat{\mathbf{k}}_i \times \hat{\mathbf{s}}_i\right) = \mathbf{0} \qquad 4.20 $$

$$ {}^{A}\mathbf{c}_i = {}^{A}\mathbf{a}_i + \boldsymbol{\lambda}_i.\hat{\mathbf{s}}_i. \qquad 4.21 $$

Persamaan dinamis momen platform adalah sebagai berikut:

$$ \sum {}^{A}\mathbf{b}_i \times {}^{A}\mathbf{f}_{bi} + \sum {}^{A}\mathbf{c}_i \times {}^{A}\mathbf{f}_{ci} = {}^{A}\mathbf{I}_p\ {}^{A}\dot{\boldsymbol{\omega}}_p + {}^{A}\boldsymbol{\omega}_p \times \left({}^{A}\mathbf{I}_p\ {}^{A}\boldsymbol{\omega}_p\right), \qquad 4.22 $$

dengan menggunakan persamaan 4.19 dan 4.22, ${}^{i}f_{biz}$ dapat diperoleh. Setelah semua nilai dari variabel diperoleh, maka gaya aktuasi dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$ f_{act} = {}^{i}f_{biz} + m_l g_c \cos q2\ . \qquad 4.23 $$

Gaya reaksi pada titik A dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$ {}^{i}\mathbf{f}_{ai} + {}^{i}\mathbf{f}_{bi} + m_l\ {}^{i}\mathbf{R}_A\ {}^{A}\mathbf{g} \quad = m_l\ {}^{i}\dot{\mathbf{v}}_l\ . \qquad 4.24 $$

Daya pada motor dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$ \mathbf{P} = {}^{A}f_{aiz}\ {}^{A}v_z \qquad 4.25 $$

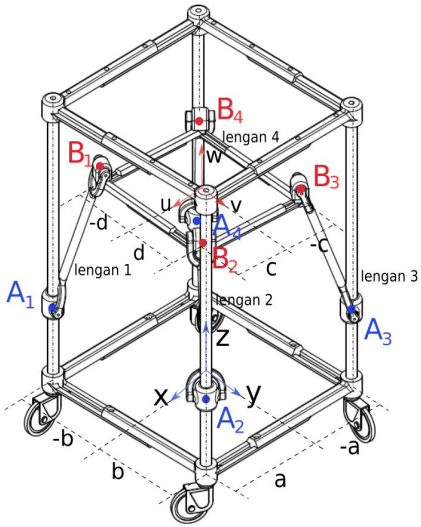
## 4.2. Robot Paralel 4-*CRU*

Desain robot paralel 4-CRU pada penelitian ini memiliki variabel desain a, b, c, dan d seperti pada gambar 4.4. Keempat variabel desain ini membentuk empat kondisi geometri sebagai berikut:

$$ \text{geometri A:} \qquad c \neq a, b \neq d, \qquad 4.26 $$

geometri B: $c = a, b \neq d,$
geometri C: $c \neq a, b = d,$
geometri D: $c = a, b = d.$

Geometri A memiliki parameter gerak yaitu mode operasi tambahan 1($AM_1$), Geometri B menggunakan mode operasi tambahan 2 ($AM_2$) , Geometri C menggunakan mode operasi tambahan 3 ($AM_3$), dan Geometri D menggunakan mode operasi 4 ($AM_4$). Setiap kondisi geometri memiliki lintasan yang digunakan masing-masing.




Gambar 4.4. Geometri Robot Pararel 4-CRU

Desain robot paralel 4-CRU ini juga memiliki parameter desain yang dijelaskan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Parameter Desain Robot Paralel 4-CRU

| No. | Spesifikasi | Data |
|---|---|---|
| 1 | Panjang Lengan | 4 m |
| 2 | Tebal *Moving Platform* | 0.05 m |
| 3 | Bahan | Alumunium |
| 4 | Payload | 10 kg |

## 4.3. Hasil dan Pembahasan

### 4.3.1. Analisa Dinamis pada Geometri A

Desain robot paralel 4-CRU pada kondisi geometri A adalah $c \neq a, b \neq d$. Untuk memenuhi persamaan tersebut, maka digunakan parameter desain sebagai berikut:

$$a = \frac{7}{4}, b = 2, c = 2, \text{dan } d = 1, \qquad 4.27$$

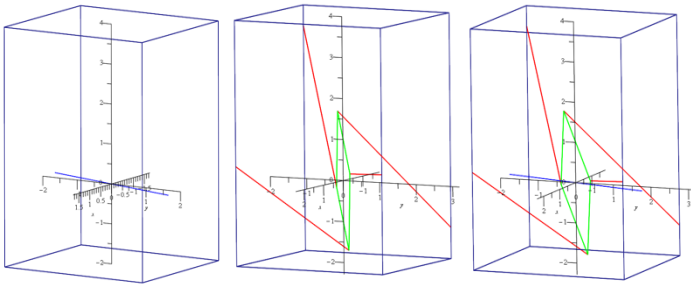
dimana *payload* yang digunakan sebesar 10 kg. Sedangkan parameter gerak yang digunakan pada geometri A adalah sebagai berikut:

$$x_0 = \frac{3\sqrt{230}\sqrt{2}}{92}, x_1 = \frac{\sqrt{30}\sqrt{2}}{12}, x_2 = \frac{\sqrt{5}\sqrt{30}\sqrt{2}}{60}, \text{ dan } x_3 = \frac{\sqrt{5}\sqrt{230}\sqrt{2}}{460}, \qquad 4.28$$

Selanjutnya, lintasan yang digunakan pada kondisi geometri ini adalah sebagai berikut:

$$X(t) = t\sqrt{\frac{d^2(c-a)(a+c)}{c^2(d-b)(d+b)}}, Y(t) = t, \text{ dan } Z(t) = 0,$$
$$\dot{X}(t) = 1, \dot{Y}(t) = 1, \text{ dan } \dot{Z}(t) = 0, \qquad 4.29$$
$$\ddot{X}(t) = 0, \ddot{Y}(t) = 0, \text{ dan } \ddot{Z}(t) = 0.$$

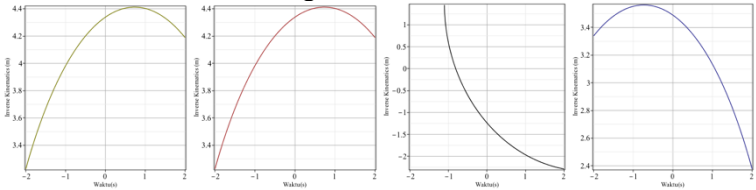
Dengan menggunakan parameter-parameter diatas, ilustrasi dari lintasan, *platform*, dan mekanisme gerak dari robot paralel pada kondisi geometri A dapat ditunjukkan sebagai berikut:



(a) Lintasan (b) Desain Platform (c) Robot dan Lintasan

Gambar 4.5. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri A dan Lintasannya

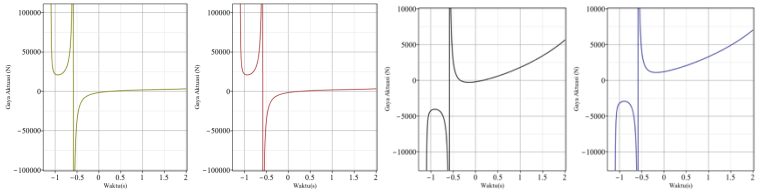
Pada kondisi Geometri A, desain robot parallel 4-CRU dapat dilihat pada gambar 4.5. Lintasan yang akan dilalui oleh platform membentuk suatu garis linear pada bidang XY yang ditunjukkan gambar 4.5(a). Pada kondisi geometri ini, platform berada pada posisi tilt seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5(b). Dan gambar 4.5(c) menunjukkan mekanisme akan bergerak dalam sumbu X dan Y sesuai dengan lintasan 4.29.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.6. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri A

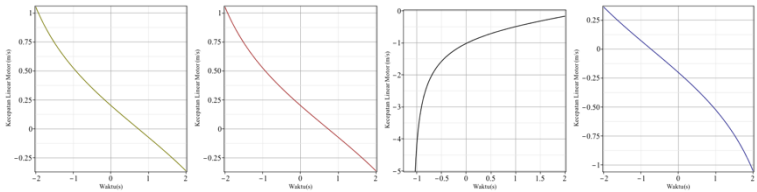
Dengan menggunakan lintasan 4.29. diperoleh 4 jenis grafik, yaitu *inverse kinematic*, gaya aktuasi, kecepatan linear motor, dan daya yang diperlihatkan pada grafik 4.6 hingga 4.9. Lengan 1 dan lengan 2 memiliki grafik *inverse kinematic,* gaya aktuasi, kecepatan linear motor, dan daya yang sama. Pada kondisi geometri ini mekanisme hanya beroperasi dengan 3 derajat kebebasan sehingga dapat diketahui bahwa lengan 1 atau lengan 2 merupakan lengan *redundant* dari mekanisme. Gambar 4.6. merupakan grafik *inverse kinematic* untuk mengetahui posisi titik A masing-masing lengan yang merupakan *cylindrical joint* yang diaktuasi pada mekanisme ini, terhadap *base. Cylindrical joint* pada lengan 1 dan 2 selalu bergerak naik pada detik -2 hingga 1, lalu perlahan turun. Lengan 3 memiliki gerak actuator yang terus menurun, sedangkan actuator pada lengan 4 bergerak naik pada detik ke -2 hingga -1, lalu bergerak turun. Pergerakan turun dari lengan 3 dan 4 ini dapat mendorong sisi *moving platform* terkait untuk bergerak kearah sumbu y positif.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

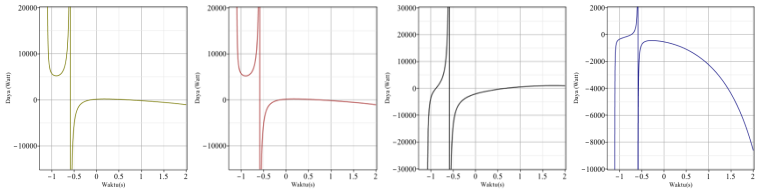
Gambar 4.7. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri A

Gambar 4.7. menunjukkan kebutuhan gaya aktuasi dari masing-masing lengan robot, dimana keempat kaki terlihat mengalami perubahan nilai kebutuhan gaya aktuasi yang besar dan tiba-tiba pada $t \approx -1.1$ hingga $t \approx -0.58$. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh motor menunjukkan bahwa robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity*. Perubahan nilai gaya tersebut berakhir pada $t \approx 0$ pada setiap lengan. Setelah melalui $t \approx 0$, lengan 1 dan lengan 2 terlihat tidak membutuhkan gaya aktuasi yang signifikan namun naik secara perlahan, sedangkan lengan 3 dan lengan 4 terlihat memiliki kenaikan nilai gaya aktuasi yang perlahan. Gaya yang dibutuhkan oleh lengan 3 dan 4 setelah $t \approx 0$ memiliki nilai yang lebih besar dibanding lengan 1 dan 2 diakibatkan oleh lebih besarnya gerak yang dilakukan oleh aktuator.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

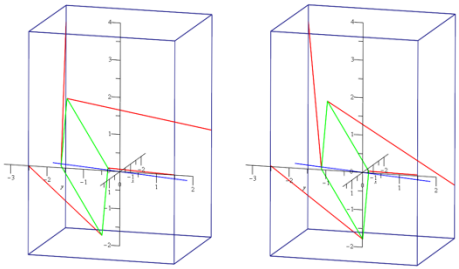
Gambar 4.8. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri A




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.9. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri A

Gambar 4.8. dan 4.9 menunjukkan kecepatan linear motor dan daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan robot parallel. Semua lengan terlihat memiliki perubahan nilai kebutuhan daya yang tiba-tiba pada $t \approx -1.1$ hingga $t \approx -0.58$ dan berakhir pada $t \approx 0$. Setelah melewati $t \approx 0$, kebutuhan daya dari keempat lengan kembali memiliki nilai *finite* secara perlahan. Lengan 1, 2, dan 3 terlihat memiliki nilai yang membesar secara perlahan dengan nilai yang tidak mencapai 5000 Watt. Sedangkan lengan 4 memiliki nilai kebutuhan daya yang meningkat hingga mencapai 9000 Watt pada detik ke 2. Lengan 4 memiliki kebutuhan daya yang lebih besar dibanding lengan 1,2, dan 3 karena pengaruh besarnya gaya reaksi yang dimiliki dan gaya aktuasi yang dibutuhkan. Selain itu, kecepatan linear motor dari lengan 4 memiliki nilai yang meningkat seiring bertambahnya waktu, sedangan lengan 1,2, dan 3 memiliki penurunan nilai kecepatan linear motor.



Gambar 4.10. Posisi *Moving Platform* di Daerah *Singularity* pada Kondisi Geometri A

Posisi *moving platform* saat mengalami *singularity* dapat dilihat pada gambar 4.10. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi dan daya yang dibutuhkan oleh motor pada $t \approx -1.1$ hingga $t \approx -0.58$ menunjukkan bahwa pada kurun waktu tersebut, robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity.* Apabila motor tidak dapat mentransfer daya atau gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh *moving platform* untuk bekerja, maka *moving platform* dapat mengalami *shaky motion* yang disebabkan oleh payload, gaya berat, dan inersia. Dengan mengetahui posisi dari daerah-daerah singularity dari mekanisme, diharapkan dapat dilakukan analisa lebih lanjut sehingga daerah tersebut dapat dihindari dan *workspace* dari mekanisme menjadi lebih luas.

### 4.3.2. Analisa Dinamis pada Geometri B

Desain robot paralel 4-CRU pada kondisi geometri B adalah $c = a, b \neq d$. Untuk memenuhi persamaan tersebut, maka digunakan parameter desain sebagai berikut:

$$a = \frac{7}{4}, b = 2, c = \frac{7}{4}, \text{ dan } d = \frac{3}{2}, \qquad 4.30$$

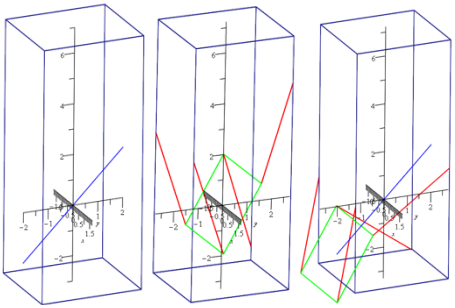
dimana *payload* yang digunakan sebesar 10 kg. Sedangkan parameter gerak yang digunakan pada geometri B adalah sebagai berikut:

$$x_0 = \frac{\sqrt{3}}{2}, x_1 = \frac{1}{2}, x_2 = 0, \text{ dan } x_3 = 0, \qquad 4.31$$

Selanjutnya, lintasan yang digunakan pada kondisi geometri ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &X(t) = 0, Y(t) = \text{t}, \text{ dan } Z(t) = t, \\ &\dot{X}(t) = 0, \dot{Y}(t) = 1, \text{ dan } \dot{Z}(t) = 1, \\ &\ddot{X}(t) = 0, \ddot{Y}(t) = 0, \text{ dan } \ddot{Z}(t) = 0. \end{aligned} \qquad 4.32$$

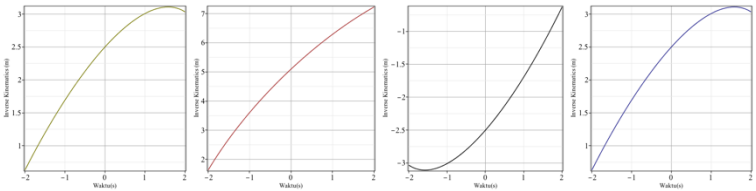
Dengan menggunakan parameter-parameter diatas, ilustrasi dari lintasan, *platform*, dan mekanisme gerak dari robot paralel pada kondisi geometri B dengan lintasan 4.32 dapat ditunjukkan sebagai berikut:



(a) Lintasan (b) Desain Platform (c) Robot dan Lintasan

Gambar 4.11. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri B dan Lintasannya

Pada kondisi Geometri B, desain robot parallel 4-CRU dapat dilihat pada gambar 4.11. Lintasan yang akan dilalui oleh *platform* merupakan garis linear yang berada pada bidang YZ atau seperti pada gambar 4.11(a). Pada kondisi geometri ini, *platform* berada pada posisi *tilt* atau *tangent* terhadap sumbu y seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11(b). Dan gambar 4.11(c) menunjukkan mekanisme akan bergerak dalam sumbu Y dan Z selama 4 detik sesuai dengan lintasan 4.32.

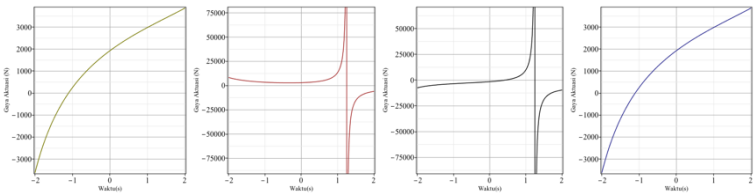


(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.12. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri B

Gambar 4.12.-4.15. menunjukkan 4 macam grafik yaitu, *inverse kinematic*, gaya aktuasi, kecepatan linear motor, dan daya menggunakan lintasan 4.32. Pada gambar 4.12.-4.15. terlihat bahwa lengan 1 dan lengan 4 memiliki grafik *inverse kinematic,*

kecepatan linear motor, gaya aktuasi, dan daya yang sama. Pada kondisi geometri ini mekanisme hanya beroperasi dengan 3 derajat kebebasan sehingga dapat diketahui bahwa lengan 1 atau lengan 4 merupakan lengan *redundant* dari mekanisme robot. Gambar 4.12. merupakan grafik *inverse kinematic* untuk mengetahui posisi titik A masing-masing lengan, yang merupakan *cylindrical joint* yang diaktuasi pada mekanisme ini terhadap *base. Cylindrical joint* pada lengan 1 dan 4 selalu bergerak naik hingga $t \approx 1.5$, lalu perlahan turun. Lengan 2 memiliki gerak actuator yang terus naik, sedangkan actuator pada lengan 4 sedikit bergerak turun hingga $t \approx -1.5$, lalu terus naik. Pergerakan naik dari lengan 2 dan 3 pada mekanisme ini berperan besar akan bergeraknya *moving platform* menuju arah sumbu y positif.

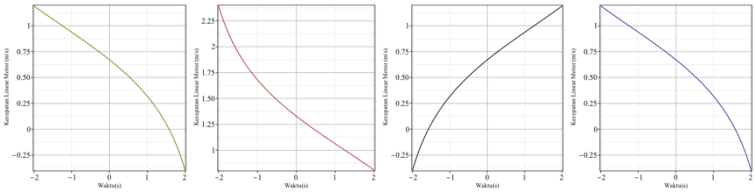



(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.13. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri B

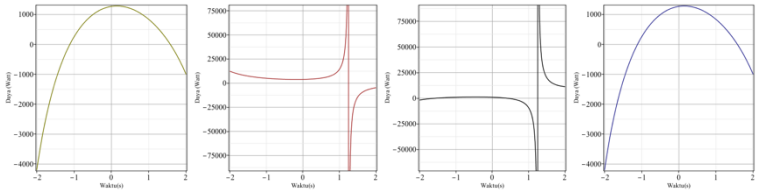
Gambar 4.13. menunjukkan kebutuhan gaya aktuasi robot, dimana lengan 1 dan 4 memiliki kebutuhan gaya yang membesar seiring *moving platform* menjauh dari titik pusat base. Sedangkan lengan 2 dan 3 terlihat mengalami perubahan nilai kebutuhan gaya aktuasi yang besar dan tiba-tiba pada $t \approx 1.1$ hingga $t \approx 1.3$. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh motor menunjukkan bahwa robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity.* Perubahan nilai gaya tersebut berakhir pada $t \approx 1.5$. Setelah melalui $t \approx 1.5$, lengan 2 dan lengan 3 terlihat kembali memiliki kebutuhan gaya dengan nilai *finite.* Sebelum melewati daerah *singularity,* kebutuhan gaya

aktuasi dari lengan 2 mencapai 9000 N, dan lengan 3 mencapai 8000 N. Kebutuhan gaya tersebut masih lebih besar dibandingkan kebutuhan lengan 1 dan 4. Hal tersebut diakibatkan lebih besarnya gerak yang dilakukan oleh aktuator lengan 2 dan 3.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.14. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri B

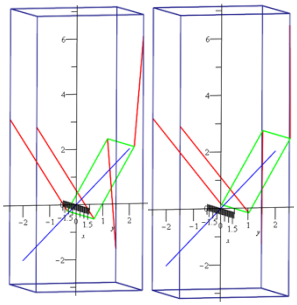



(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.15. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri B

Pada gambar 4.15., lengan 1 dan 4 terlihat membutuhkan daya yang cukup besar pada detik ke 0, saat lengan 1 dan 4 berada dalam posisi yang hampir parallel dengan base. Sedangkan lengan 2 dan 3 terlihat mengalami perubahan nilai kebutuhan daya yang besar dan tiba-tiba pada $t \approx 1.1$ hingga $t \approx 1.3$. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh motor menunjukkan bahwa robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity*. Perubahan nilai gaya tersebut berakhir pada $t \approx 1.5$, hingga selanjutnya lengan 2 dan lengan 3 kembali membutuhkan gaya aktuasi dengan nilai *finite*. Sebelum melewati daerah *singularity,* kebutuhan daya dari lengan 2 mencapai 13.000 Watt, sedangkan lengan 3 mencapai 2500 Watt. Lengan 1 dan 4

membutuhkan daya motor yang mencapai 4.000 Watt. Besar dari daya yang dibutuhkan oleh lengan 2 dan 3 dipengaruhi oleh besarnya gaya reaksi yang dimiliki dan gaya aktuasi yang dibutuhkan. Kedua lengan memiliki arah gaya dan daya yang berlawanan, hal tersebut disebabkan oleh arah gerak dari actuator yang berlawanan, sehingga kecepatan linear dari actuator pada lengan 2 terus menurun, dan lengan 3 terus bertambah.



Gambar 4.16. Robot Paralel dengan Kondisi Geometri B pada saat singularity.

Gambar 4.16. menunjukkan posisi *moving platform* saat *singularity* terjadi. Lengan 2 dan 3 sedang mencapai posisi dimana ia memiliki posisi parallel dengan base sedangkan platform dan base memiliki dimensi yang sama dimana a=c, yaitu $\frac{7}{4}$ m. Apabila motor tidak dapat mentransfer daya atau gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh *moving platform* untuk bekerja, maka *moving platform* dapat mengalami *shaky motion.*

### 4.3.3. Analisa Dinamis pada Geometri C

Desain robot paralel 4-CRU pada kondisi geometri C adalah $c \neq a, b = d$. Untuk memenuhi persamaan tersebut, maka digunakan parameter desain sebagai berikut:

$$a = 2, b = \frac{7}{4}, c = \frac{3}{2}, d = \frac{7}{4}, \qquad 4.33$$

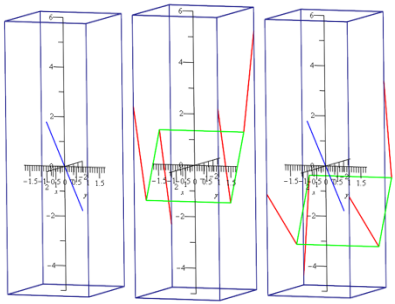
dimana *payload* yang digunakan sebesar 10 kg. Sedangkan parameter gerak yang digunakan pada geometri C adalah sebagai berikut:

$$x_0 = \frac{\sqrt{3}}{2}, x_1 = 0, x_2 = \frac{1}{2}, \text{dan } x_3 = 0, \qquad 4.34$$

Selanjutnya, lintasan yang digunakan pada kondisi geometri ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &X(t) = \mathrm{t}\,, Y(t) = 0, \text{dan } Z(t) = t, \\ &\dot{X}(t) = 1, \dot{Y}(t) = 0, \text{dan } \dot{Z}(t) = 1, \\ &\ddot{X}(t) = 0, \ddot{Y}(t) = 0, \text{dan } \ddot{Z}(t) = 0. \end{aligned} \qquad 4.35$$

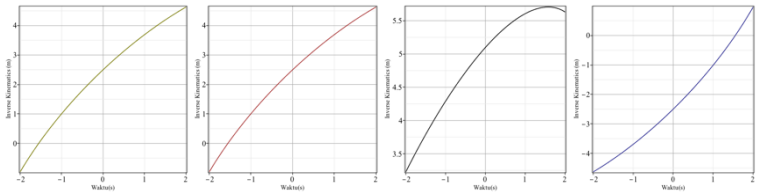
Dengan menggunakan parameter-parameter diatas, ilustrasi dari lintasan, *platform*, dan mekanisme gerak dari robot paralel pada kondisi geometri C dapat ditunjukkan sebagai berikut:



(a) Lintasan (b) Desain Platform (c) Robot dan Lintasan

Gambar 4.17. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri C dan Lintasannya

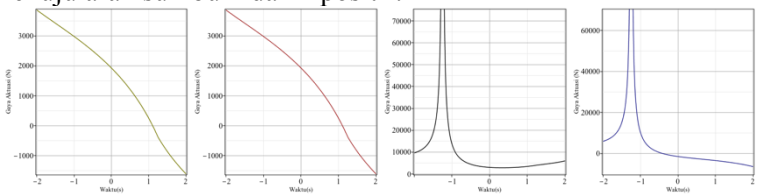
Pada kondisi Geometri C, desain robot parallel 4-CRU dapat dilihat pada gambar 4.17. Lintasan yang akan dilalui oleh platform merupakan garis linear yang berada pada bidang XZ atau seperti pada gambar 4.17(a). Pada kondisi geometri ini, platform berada pada posisi tilt atau tangent terhadap sumbu X seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17(b). Dan gambar 4.17(c) menunjukkan mekanisme akan bergerak dalam sumbu X dan Z selama 4 detik sesuai dengan lintasan 4.35.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.18. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri C

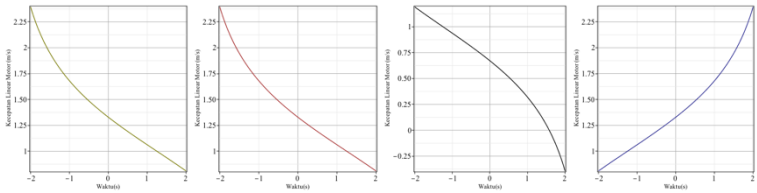
Dengan menggunakan lintasan 4.35 diperoleh 4 jenis grafik, yaitu *inverse kinematic,* kecepatan linear motor, gaya aktuasi, dan daya yang diperlihatkan pada grafik 4.18 hingga 4.21. Pada gambar 4.18.-4.21. terlihat bahwa lengan 1 dan lengan 2 memiliki grafik *inverse kinematic,* kecepatan linear motor, gaya aktuasi, dan daya yang sama. Pada kondisi geometri ini mekanisme hanya beroperasi dengan 3 derajat kebebasan sehingga dapat diketahui bahwa lengan 1 atau lengan 2 merupakan lengan *redundant* dari mekanisme. Gambar 4.18. merupakan grafik *inverse kinematic* untuk mengetahui posisi titik A masing-masing lengan, yang merupakan *cylindrical joint* yang diaktuasi pada mekanisme ini terhadap *base. Cylindrical joint* pada lengan 1 dan 2 selalu bergerak naik. Lengan 3 memiliki gerak actuator yang terus naik lalu turun pada $t \approx 1.5$, sedangkan actuator pada lengan 4 selalu bergerak naik. Pergerakan naik dari lengan 3 dan 4 pada mekanisme ini berperan besar akan bergeraknya *moving platform* menuju arah sumbu x dan z positif.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

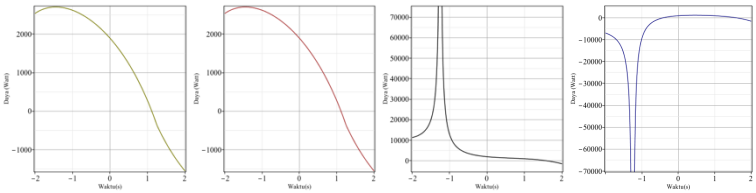
Gambar 4.19. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri C

Gambar 4.19. menunjukkan kebutuhan gaya aktuasi robot, dimana lengan 1 dan 2 memiliki kebutuhan gaya yang membesar seiring *moving platform* menjauh dari titik pusat base. Sedangkan lengan 3 dan 4 terlihat mengalami perubahan nilai kebutuhan gaya aktuasi yang besar dan tiba-tiba pada $t \approx -2$ hingga $t \approx -1$. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh motor menunjukkan bahwa robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity.* Perubahan nilai gaya tersebut berakhir pada $t \approx -0.5$, hingga selanjutnya lengan 3 dan lengan 4 kembali membutuhkan gaya aktuasi dengan nilai *finite.* Setelah melewati daerah *singularity,* kebutuhan gaya aktuasi dari lengan 3 mencapai 5000 N dan lengan 4 mencapai 6000 N. Kebutuhan gaya tersebut masih lebih besar dibandingkan kebutuhan lengan 1 dan 2 yang memiliki nilai mencapai 4000 N.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.20. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri C

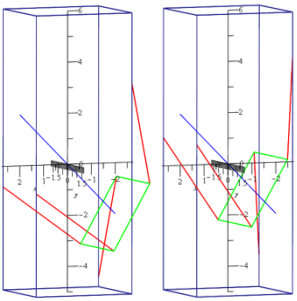



(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.21. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri C

Pada gambar 4.21., lengan 1 dan 2 terlihat membutuhkan daya yang cukup besar pada detik ke -2, yaitu saat lengan 1 dan 2 memiliki sudut q2 terbesarnya. Sedangkan lengan 3 dan 4 terlihat mengalami perubahan nilai kebutuhan daya yang besar dan tiba-

tiba pada $t \approx -2$ hingga $t \approx -1$. Perubahan yang besar dan tiba-tiba pada gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh motor menunjukkan bahwa robot paralel bergerak melintasi daerah *singularity*. Perubahan nilai gaya tersebut berakhir pada $t \approx 0,$ hingga selanjutnya lengan 3 dan lengan 4 kembali membutuhkan gaya aktuasi dengan nilai *finite.* Setelah melewati daerah *singularity,* kebutuhan daya dari lengan 3 tidak melebihi 2.500 Watt, sedangkan lengan 4 tidak melibihi 2.750 Watt, lengan 1 dan 2 memiliki kebutuhan daya yang kurang dari 2.800 Watt. Lengan 1, 2, dan 4 membutuhkan daya motor yang lebih besar, karena kecepatan gerak linear yang sama walaupun terdapat perbedaan arah, sehingga arah gaya dan daya yang dibutuhkan pun berlawanan. Gerak yang dilakukan oleh actuator lengan 1,2, dan 4 juga memiliki nilai yang relative sama dengan perbedaan arah.



Gambar 4.22. Robot Paralel dengan Kondisi Geometri C pada saat singularity.

Gambar 4.22. menunjukkan posisi *moving platform* dengan pandangan *isometric* dari bidang XZ mekanisme saat *singularity* terjadi. Lengan 3 dan 4 sedang mencapai posisi dimana ia memiliki posisi hampir parallel dengan base, sedangkan pada geometri C ini *base* dan *moving platform* memiliki dimensi yang sama dimana b=d, yaitu $\frac{7}{4}$ m. Apabila motor tidak dapat mentransfer daya atau gaya aktuasi yang dibutuhkan oleh *moving*

*platform* untuk bekerja, maka *moving platform* dapat mengalami *shaky motion.*

### 4.3.4. Analisa Dinamis pada Geometri D

Desain robot paralel 4-CRU pada kondisi geometri D adalah $c = a, b = d$. Untuk memenuhi persamaan tersebut, maka digunakan parameter desain sebagai berikut:

$$a = \frac{7}{4}, b = 2, c = \frac{7}{4}, d = 2, \qquad 4.36$$

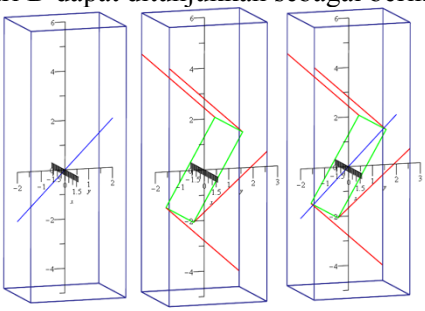
dimana *payload* yang digunakan sebesar 10 kg. Sedangkan parameter gerak yang digunakan pada geometri D adalah sebagai berikut:

$$x_0 = \frac{1}{2}, x_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}, x_2 = 0, \text{dan } x_3 = 0, \qquad 4.37$$

Selanjutnya, lintasan yang digunakan pada kondisi geometri ini adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X(t) &= -t.\frac{x2}{x1},\ Y(t) = \mathrm{t}, \text{dan } Z(t) = t, \\ \dot{X}(t) &= 1, Y(t) = 1, \text{dan } Z(t) = 1\ , \\ \ddot{X}(t) &= 0,\ Y(t) = 0, \text{dan } Z(t) = 0. \end{aligned} \qquad 4.38$$

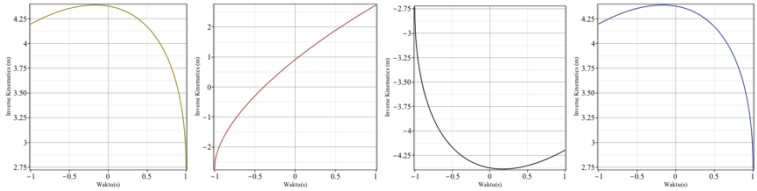
Dengan menggunakan parameter-parameter diatas, ilustrasi dari lintasan, *platform*, dan mekanisme gerak dari robot paralel pada kondisi geometri D dapat ditunjukkan sebagai berikut:



(a) Lintasan (b) Desain Platform (c) Robot dan Lintasan

Gambar 4.23. Desain Robot Paralel pada Kondisi Geometri D dan Lintasannya

Pada kondisi Geometri D, desain robot parallel 4-CRU dapat dilihat pada gambar 4.23. Lintasan yang akan dilalui oleh *platform* merupakan garis linear yang berada pada bidang YZ atau seperti pada gambar 4.23(a). Pada kondisi geometri ini, *platform* berada pada posisi *tilt* atau *tangent* terhadap sumbu y seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.23(b). Dan gambar 4.23(c) menunjukkan mekanisme akan bergerak dalam sumbu Y dan Z selama 4 detik sesuai dengan lintasan 4.38.

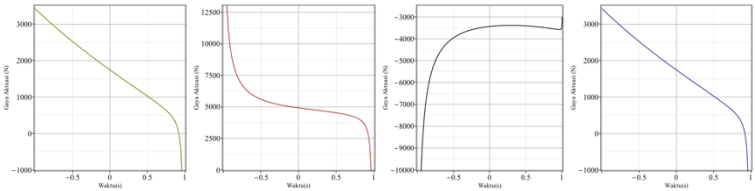



(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.24. Inverse Kinematic Robot Paralel pada Kondisi Geometri D

Dengan menggunakan lintasan 4.38 diperoleh 4 jenis grafik, yaitu *inverse kinematic,* kecepatan linear motor, gaya aktuasi, dan daya yang diperlihatkan pada grafik 4.24 hingga 4.27. Pada gambar 4.24.-4.27. terlihat bahwa lengan 1 dan lengan 4 memiliki grafik *inverse kinematic,* kecepatan linear motor, gaya aktuasi, dan daya yang sama. Pada kondisi geometri ini mekanisme hanya beroperasi dengan 3 derajat kebebasan sehingga dapat diketahui bahwa lengan 1 atau lengan 4 merupakan lengan *redundant* dari mekanisme. Gambar 4.24 merupakan grafik *inverse kinematic* untuk mengetahui posisi titik A masing-masing lengan, yang merupakan *cylindrical joint* yang diaktuasi pada mekanisme ini terhadap *base. Cylindrical joint* pada lengan 1 dan 4 bergerak naik hingga $t \approx -0.8$ lalu turun. Lengan 2 memiliki gerak actuator yang terus naik, sedangkan actuator pada lengan 3 terus menurun hingga $t \approx 0.8$ lalu perlahan naik. Pergerakan turunnya actuator

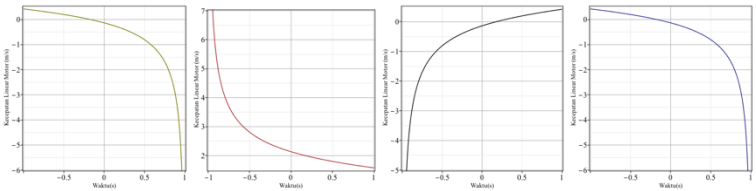
lengan 1 dan 4 membuat *moving platform* bergerak menuju arah sumbu y dan z negatif dan sebaliknya.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

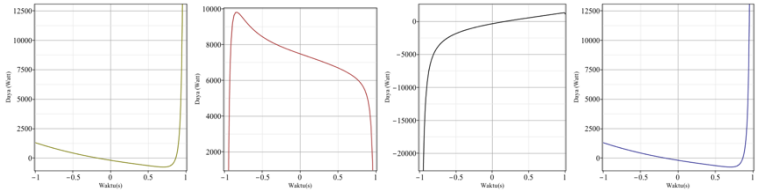
Gambar 4.25. Gaya Aktuasi Robot Paralel pada Kondisi Geometri D

Gambar 4.25. menunjukkan kebutuhan gaya aktuasi robot, dimana semua lengan terbesar pada $t \approx -1$. Lengan 1 dan 4 terlihat selalu mengalami penurunan kebutuhan gaya aktuasi dan terdapat penurunan secara tiba-tiba pada $t \approx 0.8$ - 1. Hal tersebut terjadi karena gerak actuator pada lengan 1 dan 4 yang terjadi secara cepat dan tiba-tiba seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.24. Lengan 2 dan 3 selalu mengalami penurunan, namun dengan arah gaya yang berlawanan. Hal tersebut diakibatkan oleh gerak actuator pada lengan 2 selalu naik, dan lengan 3 menurun.




(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.26. Kecepatan Linear Motor Robot Paralel pada Kondisi Geometri D



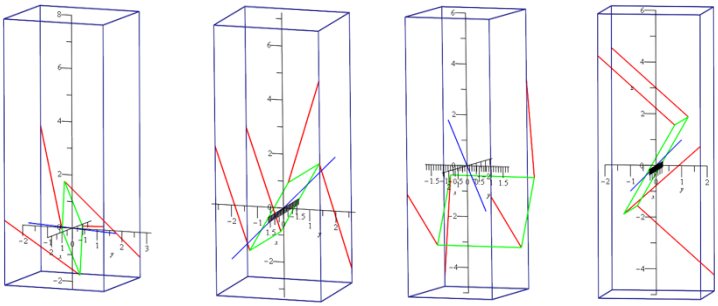

(a) Lengan 1 (b) Lengan 2 (c) Lengan 3 (d) Lengan 4

Gambar 4.27. Daya Robot Paralel pada Kondisi Geometri D

Semua lengan terlihat mengalami kenaikan kebutuhan daya yang besar dan secara tiba-tiba, yang juga diengaruhi oleh adanya kenaikan kecepatan linear motor secara tiba-tiba pada detik ke -1 dan 1. Lengan 1 dan 4 mengalami kenaikan kebutuhan daya secara tiba-tiba pada $t \approx 0.5$ hingga $t \approx 1$. Sedangkan lengan 2 mengalami kenaikan kebutuhan daya secara tiba-tiba pada $t \approx -1$ dan $t \approx 1$. Lengan 3 mengalami kenaikan kebutuhan daya secara tiba-tiba pada $t \approx 1$. Keempat lengan menunjukkan bahwa dengan lintasan 4.38, platform akan selalu melewati daerah singularity pada detik ke 1 dan -1, atau ujung trajectory. Hal tersebut dikarenakan geometri dari moving platform yang berdimensi sama dengan base yaitu a=c, yaitu $\frac{7}{4}$ m dan b=d yaitu 2 m. Selain itu, posisi dari lengan 2 dan 3 ketika moving platform berada pada $t \approx -1$ akan berada hampir sejajar dengan moving platform. Sehingga memungkinkan *moving platform* untuk kehilangan *DoF* atau *lock.*

### 4.3.5. Perbandingan Kondisi Geometri Robot Paralel 4-*CRU*

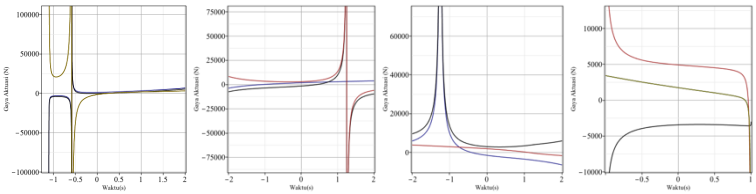
Keempat kondisi geometri pada mekanisme robot paralel 4-*CRU* memiliki posisi *moving platform* dan bidang kerja yang berbeda-beda, sehingga fungsinya dalam proses *printing* berbeda-beda. Keempat kondisi geometri robot dapat dilihat pada gambar 4.28.



(a) Geometri A (b) Geometri B (c) Geometri C (d) Geometri D

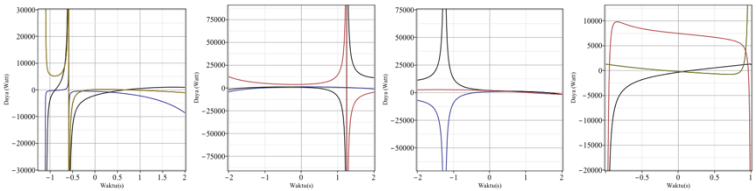
Gambar 4.28. Perbandingan Kondisi Geometeri pada Desain Robot Paralel 4-*CRU*

Robot Paralel dengan kondisi geometri A memiliki bidang kerja pada *plane* XY dengan posisi *moving platform* yang tegak lurus dengan sumbu X dan Y. Penggunaannya kondisi geometri ini dapat mempermudah pencetakan desain bangunan dalam *plane* XY tanpa menggunakan *support* karena posisi moving frame yang tegak lurus terhadap bidang kerja. Robot Paralel dengan kondisi geometri B dan D memiliki bidang kerja pada *plane* YZ dengan posisi *moving platform tangent* terhadap sumbu Y. Kedua kondisi geometri dapat digunakan untuk mencetak desain bangunan yang memiliki kontur dan kemiringan pada *plane* YZ. Dengan memperhatikan kemiringan dari kaki-kaki pada geometri B dan D, geometri D membutuhkan desain *printer* yang lebih tinggi dari geometri B dengan fungsi yang sama. Sedangkan kondisi geometri C memiliki bidang kerja pada *plane* XZ dengan posisi *moving platform tangent* terhadap sumbu X. Kondisi geometri dapat digunakan untuk mencetak desain bangunan yang memiliki kontur dan kemiringan pada *plane* XZ tanpa membutuhkan *support.*




(a) Geometri A (b) Geometri B (c) Geometri C (d) Geometri D

Gambar 4.29. Perbandingan Gaya Aktuasi pada Setiap Kondisi Geometeri Mekanisme Robot Paralel 4-*CRU*




(a) Geometri A (b) Geometri B (c) Geometri C (d) Geometri D

Gambar 4.30. Perbandingan Daya pada Setiap Kondisi Geometri Mekanisme Robot Paralel 4-*CRU*

Gambar 4.29 dan 4.30 menunjukkan perbandingan gaya aktuasi dan daya yang dibutuhkan pada setiap kondisi geometri mekanisme dengan menggunakan masing-masing parameter geraknya. Robot paralel dengan geometri A membutuhkan gaya aktuasi yang sangat besar yaitu mencapai 100.000 N dan daya yang mencapai 30.000 Watt. Hal tersebut dipengaruhi oleh adanya singularity pada detik ke -1.1 hingga -0.58 dengan nilai kembali turun setelahnya. *Trajectory planning* diharapkan dapat membuat *moving platform* menghindari daerah singularity sehingga mekanisme dapat dimanfaatkan dengan optimal.

Robot paralel dengan kondisi geometri B membutuhkan gaya aktuasi yang mencapai 75.000 N dan daya yang mencapai 75.000 Watt. Sedangkan robot paralel dengan geometri D membutuhkan gaya aktuasi mencapai 20.000 N dan daya mencapai 20.000 Watt. Dengan fungsi yang relatif sama, geometri B memiliki keuntungan yaitu workspace yang lebih besar

dibandingkan geometri D. Sehingga dapat disimpulkan bahwa robot dengan geometri D akan lebih baik digunakan untuk benda-benda yang memiliki dimensi lebih kecil, dan sebaliknya. Robot paralel dengan kondisi geometri C membutuhkan gaya aktuasi yang mencapai 60.000 N dan daya yang mencapai 75.000 Watt. Secara keseluruhan semua geometri memili nilai yang *finite* setelah melampaui daerah *singularity*. Kebutuhan daya dari robot dengan semua kondisi geometeri menjadi kurang dari 10.000 Watt. Sehingga perlu dilakukan *trajectory planning* agar daerah *singularity* dapat dihindari dan *workspace* menjadi lebih luas.

# BAB V
# KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Persamaan kesetimbangan dinamis diturunkan berdasarkan metode *Newton-Euler* pada masing-masing kondisi geometri yang memiliki 2 gerakan translasi dan 1 gerakan rotasi.
2. Gaya aktuasi dan daya dari keempat geometri telah diperoleh dengan memberikan lintasan sesuai dengan masing-masing parameter gerak mode operasi.
3. Keempat geometri memiliki daerah *singularity* yang berbeda dan apabila *moving platform* mendekati atau berada pada daerah *singularity,* maka gaya aktuasi dan daya yang dibutuhkan motor menjadi sangat besar secara tiba-tiba sehingga *moving platform* dapat mengalami *shaky motion.*

## 5.2 Saran

Saran yang dapat disampaikan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik dinamis pada robot paralel
   4-*CRU* di daerah *singularity.*
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai lintasan robot paralel 4-*CRU* untuk melewati daerah *singularity.*
3. Dilakukan perancangan pengendalian dari mekanisme robot paralel 4-*CRU.*

## DAFTAR PUSTAKA


Tsai, L. W. (1999). *Robot Analysis : The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators.* Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Hibbeler, R. C. (2010). *Engineering Mechanics Dynamics Twelfth Edition.* New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Bottema, O., & Roth, B. (1979). *Theoritical Kinematics.* Amsterdam: North-Holland Publishing Company.

Zhao, T. S., Dai, J. S., & Huang, Z. (2002). Geometric Analysis of Overconstrained Parallel Manipulators with Three and Four Degrees of Freedom. *JSME International Journal*, 730-740.

Y.H.Li, Y.Ma, S.T.Liu, Z.J.Luo, J.P.Mei, T.Huang, & D.G.Chetwynd. (2014). Integrated Design of a 4-DOF High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 185-188.

Fujisawa, Y., Kiguchi, K., Harada, K., Mitsuishi, M., Hashizume, M., & Arata, J. (2017). Compact 4DOF Robotic Forceps with 3.5 mm in diameter for Neurosurgery based on a Synthetic Elastic Structure. *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)* (pp. 1-3). Nagoya: IEEE.

Nurahmi, L., & Gan, D. (2019). Dynamic Analysis of The 3-RRPS Metamorphic Parallel Mechanism Based on Instantaneous Screw Axis. *International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conferences* (pp. 1-10). California: ASME.

Gosselin, C. (2009). Compact Dynamic Models for The Tripteron and Quadrupteron Parallel Manipulators. *Institution of Mechanical Engineers* (pp. 1-10). Quebec: Sage Publications.

Cor, A. (2016). *Catalog of Apis Cor Robot.* Moscow: Apis Cor.

Jakupovic, A. (2016). *D-shape - Visit Report.* Denmark: 3D Printhuset.

## BIODATA

Ines Ayu Ambarwati lahir di Jombang, 16 Juli 2000, merupakan merupakan anak sulung dari dua bersaudara dan putra dari Bapak Agus S dan Ibu Untari Dwi I. Penulis menempuh pendidikan menengah di SMPN 1 Jombang dengan program Akselerasi, dan pendidikan menengah atas di SMAN 3 Jombang, Kabupaten Jombang. Setelah lulus dari SMAN 3 Jombang dengan program Akselerasi, penulis lalu mengikuti SBMPTN dan melanjutkan pendidikan tinggi sarjana sebagai mahasiswa Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016 dan terdaftar dengan NRP 02111640000144.

Semasa kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis aktif dalam beberapa kegiatan. Pertama penulis merupakan pengurus inti dari Mesin *Music Club* di Departemen Teknik Mesin. Kedua, penulis juga tergabung dalam pengurus organisasi jaring aspirasi Fakultas Teknologi Industri yaitu Dewan Perwakilan Mahasiswa FTI ITS. Penulis juga aktif sebagai anggota ITS *Jazz* Surabaya. Terakhir, penulis aktif sebagai anggota di Laboraturium Otomasi Industri, Departemen Teknik Mesin ITS.

Untuk informasi dan saran yang dibutuhkan dari dan kepada penulis dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut: inesambar@outlook.com