



TUGAS AKHIR - TM141585

DESAIN DAN ANALISA KINEMATIKA PARALEL ROBOT 4-CRU SEBAGAI MEKANISME ALAT 3D-PRINTING BANGUNAN

PRADIKTIO PUTRAYUDANTO
NRP. 02111645000040

Dosen Pembimbing
LATIFAH NURAHMI, S.T., M.Sc., Ph.D

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR – TM141585

**DESAIN DAN ANALISA KINEMATIKA PARALEL
ROBOT 4-CRU SEBAGAI MEKANISME ALAT 3D-
PRINTING BANGUNAN**

**PRADIKTIO PUTRAYUDANTO
NRP. 02 111 645 0000 40**

PEMBIMBING:

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

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018

**DESAIN DAN ANALISA KINEMATIKA PARALEL
ROBOT 4-CRU SEBAGAI MEKANISME
ALAT 3D-PRINTING BANGUNAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Pradiktio Putravudanto
NRP. 02111645000040

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.,
Ph.D. (Pembimbing)
NIP. 1986201712037
2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono,
S.T., M.Eng.Sc. (Penguji 1)
NIP. 19780510 2001121 001
3. Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D. (Penguji 2)
NIP. 19751120 200212 1 002
4. Ari Kurniawan, S.T., M.T. (Penguji 3)
NIP. 19860401 201504 1 001

**SURABAYA
JULI, 2018**

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DESAIN DAN ANALISA KINEMATIKA PARALEL ROBOT 4-CRU SEBAGAI MEKANISME ALAT 3D- PRINTING BANGUNAN

Nama : Pradiktio Putrayudanto
NRP : 02111645000040
Pembimbing : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Teknologi 3D-printing merupakan proses pembuatan suatu objek dengan cara mendepositkan material secara berlapis sesuai dengan digital model yang dibentuk. Teknologi 3D-printing pertama kali dikembangkan di Jepang pada tahun 1984 dan menjadi titik awal dari proses additive manufacturing. Teknologi 3D-printing bangunan banyak memberikan manfaat dan kelebihan dibandingkan proses pembangunan konvensional, diantaranya adalah: dapat menghemat waktu pembangunan, mengurangi limbah pembangunan, efisiensi bahan baku pembangunan, dapat membentuk geometri yang rumit dan dapat menghemat biaya proses pembangunan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisa suatu mekanisme robot yang dapat diaplikasikan pada teknologi 3D-printing bangunan.

Proses penelitian diawali dengan membuat kriteria desain yang dibutuhkan berdasarkan data mekanisme robot yang telah dikembangkan terdahulu. Data tersebut digunakan untuk menentukan derajat kebebasan yang dibutuhkan, jenis gerakan moving platform dan jenis joint yang digunakan. Setelah model 4-CRU (cylindrical, revolute dan universal joint) dibuat, proses penelitian selanjutnya adalah analisa geometri. Analisa geometri merupakan proses identifikasi posisi dari setiap titik yang direpresentasikan oleh joint. Pada proses ini juga ditentukan titik pusat dari fixed frame dan moving frame. Hasil dari analisa geometri adalah vektor posisi dari titik-titik yang akan dianalisa, parameter desain, dan variabel desain. Proses penelitian selanjutnya adalah analisa kinematika. Analisa kinematika terdiri

dari penurunan constrain equations, dekomposisi primer, menentukan mode operasi dan interpretasi jenis gerakan, analisa mode transisi dan singularitas. Constraint equations digunakan untuk membatasi gerakan platform terhadap link yang menghubungkan moving frame dan fixed frame. Hasil constraint equations kemudian didekomposisi primer hingga mendapatkan parameter gerakan. Mode operasi didapatkan dengan cara substitusi parameter gerakan ke dalam matriks transformasi. Matriks tersebut kemudian diinterpretasi hingga mendapatkan jenis gerakan. Analisa mode transisi dilakukan untuk mengetahui konfigurasi perpindahan antar mode operasi. Analisa singularitas dilakukan untuk mengetahui terjadinya kondisi singularitas pada mekanisme paralel robot 4-CRU.

Mekanisme robot paralel 4-CRU menghasilkan tiga mode operasi, diantaranya: Schönflies mode (S_1), reversed Schönflies mode (S_2), dan additional mode (AM). Tiap mode operasi tambahan mempunyai jenis gerakan yang berbeda. Hal ini mengindikasikan bahwa ada kondisi spesifik antara hubungan parameter desain terhadap mode operasi tambahan yang dapat dihasilkan. Kondisi hubungan parameter desain 1 menghasilkan mode operasi tambahan 2 (AM_2) dengan 1-DOF rotasi pada sumbu-x dan 2-DOF translasi pada bidang-yz. Kondisi hubungan parameter desain 2 menghasilkan mode operasi tambahan 3 (AM_3) dengan 1-DOF rotasi pada sumbu-y dan 2-DOF translasi pada bidang-xz. Kondisi hubungan parameter desain 3 menghasilkan mode operasi tambahan 3 (AM_3) dengan 2-DOF rotasi dan 2-DOF translasi pada bidang-yz dengan gerakan sepanjang axis-y bergantung dengan axis-x. Konfigurasi singularitas transisi juga sudah didapatkan untuk tiap perubahan mode operasi.

Kata Kunci: *3D-Printing, 4-CRU, Schönflies, workspace, constraint, equation, mode, operasi, gerakan, singularitas*

DESIGN AND KINEMATIC ANALYSIS PARALLEL MANIPULATOR 4-CRU AS A MECHANISM FOR 3D- PRINTING BUILDING

Name : Pradiktio Putrayudanto
NRP : 02111645000040
Supervisors : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

3D-printing technology is the process of making an object by depositing the material in layers in accordance with the digital model formed. The development of 3D-printing technology is currently also developed in the construction building sector. This can be seen from the increasing number of buildings that was created by the 3D-Printing Building Technology, one of them is a 400 ft² house that was created in 24 hours by the Russian Robot Company, Apis Cor. A 3D-Printing Building Technology gives many benefit over conventional development process, among others are: lower costs than traditional construction methods, environmental friendly construction process, time savings and reduced number of injuries.

The research process begins by making the criteria of design requirement based on robot mechanism data that has been developed before. Those data is used to determine the degree of freedom, type of platform movement and type of joint that will be used. As that, next step of research is geometrical analysis. Geometrical analysis is an identification process of a position for each point represented by the joint. Determining the origin of moving frame and fixed frame is also done in this process. The outcome of geometrical analysis are design parameter, design variable and vector of position for every point which will be identified soon. After we have done with geometrical analysis, our next step is kinematic analysis. Kinematic analysis consists of generating constraint equations, generating motion parameter by primary decomposition, determining modes of operation and

interpreting type of movement, analysing transition mode and singularity condition. Constraint equations is used to limit the movement of platform to the which connects moving frame and fixed frame. Those constraint equations then decomposing into primary factor that we call motion parameter. Modes of operation is obtained by substituting the motion parameter into transformation matrix. Type of movement is obtained by interpreting those transformation matrix. Transition mode analysis is performed to determine the configuration of changing between modes of operation. Singularity analysis is performed to determine the occurrence of singularity condition in parallel manipulator (PM) 4-CRU.

According to this paper we got some conclusion points. The 4-CRU parallel manipulator has three operation modes. It consists of Schönflies mode (S_1), reversed Schönflies mode (S_2), and additional mode (AM). The type of movement for each operation modes performed by 4-CRU PM was identified. The first design parameter condition generates additional mode 2 (AM_2) with 1-DOF rotation about x-axis and 2-DOF translation on yz-plane. The second design parameter condition produces Additional Mode 3 (AM_3) with 1-DOF rotation about y-axis and 2-DOF translation on xz-plane. The third design parameter condition generates Additional Mode 4 (AM_4) which consists of 2-DOF rotation and 2-DOF translation on yz-plane with translation movement along y-axis depends on x-axis. Singularity transition configurations also has been identified between two operation modes.

Key words: *3D-Printing, 4-CRU, Schönflies, workspace, constraint, equation, modes, operation, movement singularity*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah S.W.T karena atas rahmat-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul **“DESAIN DAN ANALISA KINEMATIK PARALEL ROBOT 4-CRU SEBAGAI MEKANISME ALAT 3D-PRINTING BANGUNAN”**. Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam bentuk apapun, baik secara langsung maupun tidak langsung, diantaranya kepada:

1. Ayahanda Ir. Suhartanto, Ibunda Dwinita W. Utami dan Adik Annisa Ami W. serta keluarga besar yang tiada lelah memberi dukungan.
2. Ibu Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D selaku pembimbing Tugas Akhir penulis.
3. Teman-teman Lab Otomasi Industri Departemen Teknik Mesin ITS.
4. Seluruh tenaga pengajar, staff Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Teman-teman Lintas Jalur Angkatan 2016 Departemen Teknik Mesin ITS.
6. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan jika terdapat kritik dan saran pada Tugas Akhir ini. Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	3
1.3 Batasan Masalah Penelitian	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori	5
2.1.1 Klasifikasi Robot Berdasarkan Struktur Kinematik	5
2.1.2 Aplikasi Robot 4-DOF	6
2.1.3 3D- <i>Printing</i> Bangunan	8
2.1.4 Euler Parameter	13
2.2 Operasi Vektor	15
2.1.1 Basis Vektor dan Komponen	15
2.1.2 Norm Vektor	17
2.1.3 Perkalian Vektor <i>Dot</i> dan <i>Cross Product</i>	17
2.3 Posisi, Orientasi dan Lokasi	20
2.4 Transformasi Homogen	23
2.5 <i>Links</i> dan <i>Joints</i>	25
2.6 Analisa Singularitas	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	29
3.2 Proses Penelitian	30
3.2.1 Perumusan Masalah	30
3.2.2 Studi Literatur	30

3.2.3	Desain dan Analisa Geometri	30
3.2.4	<i>Constraint Equations</i>	30
3.2.5	Dekomposisi Primer	31
3.2.6	Mode Operasi 4-DOF dan Mode Tambahan	31
3.2.7	Analisa Singularitas Mode Transisi	31
3.3	Hasil Output yang Diinginkan	31
BAB IV PEMBAHASAN		33
4.1	Analisa Geometri	33
4.2	Analisa Kinematika	39
4.2.1	Transformasi Vektor Posisi	39
4.2.2	<i>Constraint Equations</i>	40
4.2.3	Dekomposisi Primer	44
4.2.4	Mode Operasi dan Jenis Gerakan	44
a)	Mode Operasi 1: Schönflies Mode (S_1)	44
b)	Mode Operasi 2: Reversed Schönflies Mode (S_2) ..	46
c)	Mode Operasi 3: Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1)	47
4.2.5	Hubungan Parameter Desain dan Mode Operasi Tambahan	51
a)	Hubungan Parameter Desain 1	51
b)	Hubungan Parameter Desain 2	53
c)	Hubungan Parameter Desain 3	55
4.2.6	Konfigurasi Singularitas Mode Transisi Mekanisme Paralel Robot 4-CRU	57
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		63
5.1	Kesimpulan	63
5.2	Saran	64
DAFTAR PUSTAKA		65
BIODATA		67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Komplek Perkantoran Komite Nasional Uni Emirat Arab.....	2
Gambar 1.2 Bangunan Kastil Hasil dari Teknologi 3D-Printing. 3	
Gambar 2.1 Robot Forceps Untuk Tindakan BIM.....	7
Gambar 2.2 Mekanisme Paralel Robot SCARA 4-DOF	8
Gambar 2.3 Proses 3D-Printing dengan Material Concrete.....	9
Gambar 2.4 Spesifikasi Teknis 3D-Printer Apis Cor.....	11
Gambar 2.5 Workspace KUKA Robot KR 30 L16-2.....	12
Gambar 2.6 Mekanisme 3D-Printer D-Shape.....	13
Gambar 2.7 Basis Vektor dalam Sistem Koordinat Kartesian... 16	
Gambar 2.8 Proyeksi Vektor b pada Vektor a	18
Gambar 2.9 Kaidah Tangan Kanan pada Perkalian <i>Cross Product</i>	19
Gambar 2.10 Posisi Vektor Titik P Terhadap <i>Fixed Frame A</i> .. 21	
Gambar 2.11 Lokasi Titik P Terhadap Sistem Koordinat.....	23
Gambar 2.12 Jenis Lower-pair Joint dan Jumlah DOF.....	26
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	29
Gambar 4.1 Model Mekanisme dan Bagian-Bagian dari 3D-Printing 4-CRU	35
Gambar 4.2 Analisa Geometri 4-CRU.....	36
Gambar 4.3 Posisi Titik A Terhadap Fixed Frame dan Titik B Terhadap Moving Frame	38
Gambar 4.4 Posisi Sumbu-s pada CR-Joint dan Sumbu-n pada U-Joint.....	38
Gambar 4.5 Constraint Equations yang Terbentuk dari Vektor s , N dan ab	41
Gambar 4.6 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Operasi Reversed Schönflies (S2)	45
Gambar 4.7 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Operasi Schönflies (S1).....	46

Gambar 4.8 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Operasi Tambahan 1 (AM1)	50
Gambar 4.9 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 2.....	52
Gambar 4.10 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 2.....	54
Gambar 4.11 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 3.....	56
Gambar 4.12 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi (S1 ↔ AM1)	60
Gambar 4.13 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi (AM1)	61
Gambar 4.14 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi (AM1 ↔ S2).....	62

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Karakteristik Utama Robot Serial dan Paralel.....	5
Tabel 2.2 Spesifikasi Serial Robot Apis-Cor.....	10
Tabel 2.3 Data Spesifikasi Teknis Robot KUKA KR 30 L16-2.	12
Tabel 2.4 Data Spesifikasi Teknis D-Shape	13
Tabel 4.1 Kriteria Desain Robot 3D-Printing yang Dibutuhkan	33
Tabel 4.2 Mode Transisi dari Tiap Perubahan Mode Operasi pada 4-CRU	58

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR SIMBOL

DOF	= Degrees Of Freedom atau Derajat Kebebasan
CRU	= <i>Cylindrical, revolute</i> dan <i>universal joint</i>
T	= Matriks transformasi
Σ_0	= Sistem koordinat <i>fixed frame</i>
Σ_1	= Sistem koordinat <i>moving frame</i>
${}^0\mathbf{B}_i$	= Titik B_i ($i=1,2,3,4$) berdasarkan sistem koordinat <i>fixed frame</i>
${}^1\mathbf{A}_i$	= Titik A_i ($i=1,2,3,4$) berdasarkan sistem koordinat <i>moving frame</i>
l_i	= Jarak vertikal dari dasar pada base dengan titik A_i
s	= Vektor arah sumbu vertikal pada <i>CR-joint</i> paralel terhadap sumbu-y
n	= Vektor arah sumbu vertikal pada <i>U-joint</i> paralel terhadap sumbu-w
R	= Matriks representasi gerakan rotasi
d	= Matriks representasi gerakan translasi
$\overrightarrow{\mathbf{ab}}$	= Vektor posisi <i>link</i> identik
f_i	= <i>Constraint equations</i>
F_i	= <i>Constraint equations</i> berdasarkan panjang <i>link</i> identik
N	= Vektor arah sumbu vertikal pada <i>U-joint</i> paralel berdasarkan sistem koordinat <i>fixed frame</i>
S_1	= Mode operasi <i>Schönflies</i>
S_2	= Mode operasi <i>reversed Schönflies</i>
AM_i	= Mode operasi tambahan-i ($i=1,2,3,4$)

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB I PENDAHULUAN

Bab 1 memuat beberapa sub-bab, diantaranya: latar belakang masalah, batasan penelitian, tujuan dan manfaat dari penelitian. Penjelasan lebih lanjut mengenai subbab tersebut dijelaskan dibawah ini:

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 1981, Hideo Kodama dari Institut Penelitian Industri Kota Nagoya (Nagoya, Japan) telah mempelajari dan mempublikasikan untuk pertama kali proses manufaktur pembuatan model solid menggunakan metode *printing*. Metode tersebut menjadi titik awal dari proses “*additive manufacturing*” atau “*rapid prototyping*” atau “*3D-printing technology*” (Pirjan, 2013). Saat ini, teknologi ini telah banyak dikembangkan oleh peneliti dan insinyur untuk memudahkan proses manufaktur dalam sektor industri, salah satunya sektor industri pembangunan rumah.

Sebuah perusahaan asal Rusia bernama Apis Cor telah membangun sebuah rumah seluas 400 ft² dalam waktu 24 jam di Kota Moscow menggunakan teknologi *3D-printing*. Biaya yang digunakan dalam pembuatan rumah tersebut sejumlah \$10.000 atau senilai kurang lebih Rp. 140.000.000 (Apis Cor, 2016). Rumah tersebut dibangun secara *on-site* dengan menggunakan *3D-mobile printer*. Semua tembok dan struktur pondasi dibangun menggunakan campuran *concrete*. Berdasarkan data tersebut, teknologi *3D-printing* mempunyai potensi besar dalam revolusi metode pembangunan rumah ke depan (Sakin, 2017).

Contoh pembangunan rumah hasil dari teknologi *3D-printing* juga dapat ditemukan di Uni Emirat Arab, seperti yang terdapat pada Gambar 1.1. Sebuah kompleks perkantoran Komite Nasional Uni Emirat Arab dibangun menggunakan teknologi *3D-printing*. Perkantoran tersebut nantinya digunakan sebagai kantor pusat untuk “Dubai Futures Foundation”. Kantor hasil dari teknologi *3D-printing* tersebut dapat berfungsi layaknya bangunan pada umumnya, dengan fitur elektrik, sambungan pipa,

telekomunikasi dan sistem pengkondisian udara. Bagian kantor tersebut dibangun di China kemudian setelah semua bagian bangunan sudah dibentuk, bagian-bagian tersebut dikirim ke Dubai untuk dirakit. Proyek pembangunan ini dapat menekan biaya pekerja sebesar 50% hingga 80% dan limbah pembangunan sebesar 30% hingga 60%. Hal ini dianggap sebagai alasan revolusi pembangunan konstruksi di Dubai menggunakan teknologi *3D-printing* (Sakin, 2017).



(a) (b)
Gambar 1.1 Komplek Perkantoran Komite Nasional
Uni Emirat Arab

(a) Tampak Samping, (b) Tampak Depan (Sakin, 2017)

Teknologi *3D-printing* juga memiliki kelebihan dalam membentuk sebuah geometri yang rumit (Hager, 2016). Hal ini dapat dilihat dari bangunan hasil Andy Rudenko, dapat dilihat pada Gambar 1.2. Andy Rudenko membuat sebuah bangunan kastil di halaman pekarangan. Bangunan tersebut dibuat menggunakan teknologi *3D-printing* dengan bantuan perangkat lunak RepRap 3D *Printing*. Material yang digunakan adalah campuran semen dan pasir. Semua bagian bangunan dapat dibuat dalam satu kali proses, kecuali bagian menara yang dicetak secara terpisah lalu dirangkai menjadi satu kesatuan.



Gambar 1.2 Bangunan Kastil Hasil dari Teknologi 3D-Printing
 (a) Tampak Depan, (b) Proses Deposit Material (Hager, 2016)

Melihat keuntungan yang didapat dari proses pembangunan bangunan menggunakan teknologi *3D-printing*, maka penelitian ini bertujuan untuk mendesain mekanisme robot yang dapat diterapkan pada teknologi *3D-printing*. Mekanisme tersebut diharapkan mempunyai kelebihan dari segi mode operasi dan jenis gerakan yang dapat dihasilkan dari mekanisme robot *3D-printing* yang sudah ada, sehingga pada akhirnya dapat menghemat biaya desain dan operasi dari robot tersebut.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU?
2. Bagaimanakah jenis gerakan dari setiap mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU?
3. Bagaimanakah hubungan parameter desain terhadap mode operasi tambahan yang dapat dihasilkan pada mekanisme paralel robot 4-CRU?
4. Bagaimanakah kondisi singularitas sehingga terjadi transisi antar mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU?

1.3 Batasan Masalah Penelitian

Rumusan penelitian ini adalah:

1. Mekanisme paralel robot 3D-*printing* yang dianalisa adalah paralel robot 4-CRU (*Cylindrical, Revolute* dan *Universal Joint*).
2. Massa tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.
3. Analisa kinematika dibatasi hanya pada mode operasi dan jenis gerakan yang dapat dihasilkan dari mekanisme paralel robot 4-CRU.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan jenis mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU.
2. Mendapatkan jenis gerakan dari setiap mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU.
3. Mendapatkan hubungan parameter desain (*base* dan *platform*) yang dapat menghasilkan mode operasi tambahan.
4. Mendapatkan kondisi singularitas sehingga terjadi transisi antar mode operasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan inovasi terbaru dalam mekanisme robot khususnya mekanismer robot yang dapat diaplikasikan pada teknologi 3D-*printing* bangunan.
2. Mendapatkan metode baru dalam proses pembangunan konstruksi rumah.
3. Mekanisme robot yang ditinjau dalam penelitian ini juga dapat diaplikasikan dalam sektor industri lainnya, seperti *material handling, pick and place* dan lainnya.

BAB II

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Klasifikasi Robot Berdasarkan Struktur Kinematik

Klasifikasi robot berdasarkan struktur kinematik terbagi menjadi dua bagian, yaitu: serial dan paralel robot. Suatu robot dapat dikatakan memiliki struktur kinematik serial apabila robot tersebut membentuk struktur *open-loop*, sedangkan suatu robot dapat dikatakan memiliki struktur kinematik paralel apabila robot tersebut membentuk struktur *closed-loop* (Pandilov, 2014).

Tabel 2.1 menunjukkan perbedaan karakteristik utama dari robot dengan struktur mekanik serial dan paralel, berikut selengkapnya:

Tabel 2.1 Perbedaan Karakteristik Utama Robot Serial dan Paralel (Pandilov, 2014)

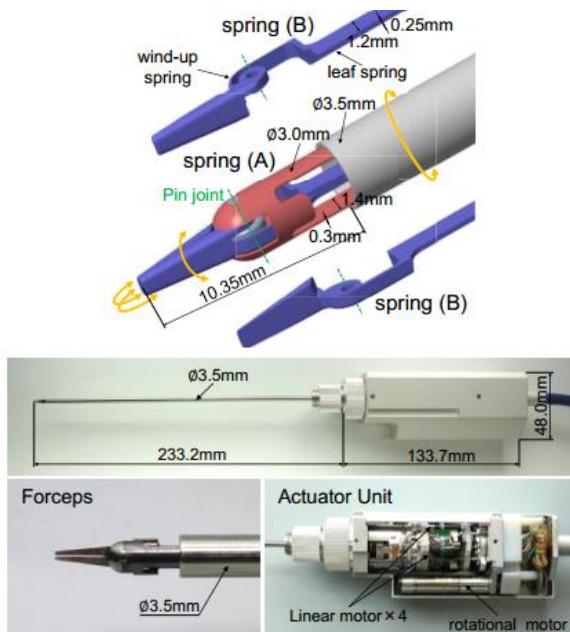
No.	Karakteristik	Robot Serial	Robot Paralel
1.	<i>Workspace</i>	Luas	Sempit dan Kompleks
2.	Penyelesaian <i>Direct Kinematics</i>	Mudah	Rumit
3.	Penyelesaian <i>Inverse Kinematics</i>	Rumit	Mudah
4.	Posisi Error	Terakumulasi	Rata-rata
5.	Gaya Error	Rata-rata	Terakumulasi
6.	Gaya Maksimum	Terbatas pada gaya minimum aktuator	Gabungan dari semua gaya aktuator
7.	Tingkat Kekakuan	Rendah	Tinggi
9.	Inersia	Besar	Kecil
10.	Payload/rasio berat	Rendah	Tinggi
11.	Kecepatan dan Akselerasi	Rendah	Tinggi
12.	Akurasi	Rendah	Tinggi

13.	Kalibrasi	Relatif Mudah	Relatif Sulit
14.	<i>Workspace/Robot Size Ratio</i>	Tinggi	Rendah

2.1.2 Aplikasi Robot 4-DOF

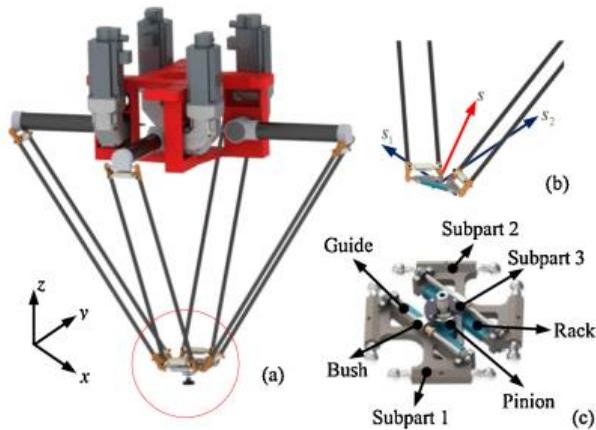
Robot paralel spasial dengan derajat kebebasan kurang dari enam sedang banyak dikembangkan baik sektor akademik maupun industri. Hal ini dikarenakan robot tersebut dapat mempunyai gerakan tambahan, memiliki desain struktur yang lebih sederhana dan mengurangi penggunaan aktuator. Faktor-faktor tersebut pada akhirnya berdampak juga pada pengurangan biaya. Pada umumnya, robot paralel spasial dengan derajat kebebasan kurang dari enam memiliki satu *base*, satu *moving platform*, dan tiga atau lebih *link* identik. Dalam bentuk dan kondisi geometri tertentu, *link* dalam robot paralel spasial tersebut dapat menghasilkan mekanisme *overconstrained* (Zhao, 2002). Salah satu robot paralel spasial yang sedang banyak dikembangkan saat ini adalah, robot dengan derajat kebebasan empat atau 4-DOF. Berikut akan dijelaskan lebih lanjut mengenai contoh aplikasi dari robot 4-DOF:

Gambar 2.1 menunjukkan Robot *forceps* yang digunakan dalam dunia medis, khususnya dalam tindakan penanganan saraf yang berfungsi dalam tindakan Bedah Minimal Invasif (BMI). Bedah Minimal Invasif merupakan bedah yang dilakukan melalui sayatan kecil. Robot *forceps* yang dikembangkan oleh Universitas Kyushu, Jepang, ini bertujuan untuk mengurangi rasa sakit yang diderita oleh pasien, waktu pemulihan luka dan biaya operasi. Robot ini memiliki desain kompak dengan mekanisme 4 DOF. Mekanisme robot tersebut terdiri dari dua buah jenis pegas, sambungan pin, dan aktuator motor (Fujisawa, 2016).



Gambar 2.1 Robot Forceps Untuk Tindakan BIM Dikembangkan Oleh Universitas Kyushu, Jepang (Fujisawa, 2016)

Gambar 2.2 merupakan robot yang dikembangkan oleh Universitas Tianjin, Cina. Robot ini berfungsi sebagai robot *pick and place* yang banyak digunakan dalam industri elektronik, farmasi, pengemasan dan lainnya. Jenis mekanisme robot yang paling banyak digunakan dalam robot *pick and place* adalah jenis robot SCARA dengan jenis gerakan *Schönflies*. SCARA paralel robot menggunakan tiga *revolute joint* dan satu *screw joint* sehingga memungkinkan untuk bergerak dengan empat derajat kebebasan. Kapabilitas dan efisiensi dari paralel robot *pick and place* tidak hanya terletak dalam struktur topologi dan dimensi geometri yang tepat namun juga terletak pada sifat elastik dinamis dan kualitas kontrol komputer (Li, 2014).



Gambar 2.2 Mekanisme Paralel Robot SCARA 4-DOF
(Li, 2014)

2.1.3 3D-Printing Bangunan

Teknologi *3D-printing* merupakan proses objek fisik dibuat dengan cara mendepositkan material secara per lapisan sesuai dengan model digital yang dibuat (Sakin, 2017). Dalam prosesnya, teknologi *3D-printing* membutuhkan perangkat lunak, perangkat keras, dan material pembentuk objek. Proses deposit material diatur menggunakan komputer sehingga hasil yang didapat akurat, presisi dan detail. Proses awal pencetakan dimulai dari pembuatan model 3D menggunakan perangkat lunak CAD. Model tersebut kemudian dibentuk menjadi lapisan-lapisan yang tersusun dalam format model *Stereolithography* (STL) sehingga dapat dibaca oleh *3D-printer*. Kemudian material diproses oleh *3D-printer* dan dicetak sesuai dengan lapisan yang dibuat. Jenis proses pencetakan objek dari material berbeda-beda tergantung dari teknologi *3D-printing* yang digunakan. Salah satu teknologi pencetakan *3D-printing* adalah *Selective Laser Sintering* (SLS) yang menggunakan laser untuk melelehkan bubuk partikel sehingga terbentuk objek 3 dimensi (Sakin, 2017).

Material 3D-*printing* terdiri dari beberapa jenis tergantung 3D *printer* yang digunakan. Material tersebut dapat berbentuk bubuk, filamen, pelet, granul, resin, dll. Material dalam bentuk bubuk menggunakan proses *sintering* dalam pencetakan dan umumnya terbentuk dari Nylon atau *Polyamide*. Untuk material berbentuk filamen, proses pencetakan yang digunakan adalah *Fused Deposition Modelling* (DPM) dan terbentuk dari plastik berjenis *Acrylonitrile Butadine Styrene* (ABS) atau *Polyactic Acid* (PLA). Material jenis ABS mempunyai sifat kuat dan tersedia dalam berbagai warna. Material jenis PLA merupakan material *bio-degradable* dan mempunyai sifat ketahanan dan fleksibilitas yang kurang dari material berjenis ABS (Hager, 2016). Gambar 2.3 menunjukkan langkah proses pembuatan struktur menggunakan teknologi 3D-*printing*.



Gambar 2.3 Proses 3D-*Printing* dengan *Material Concrete*

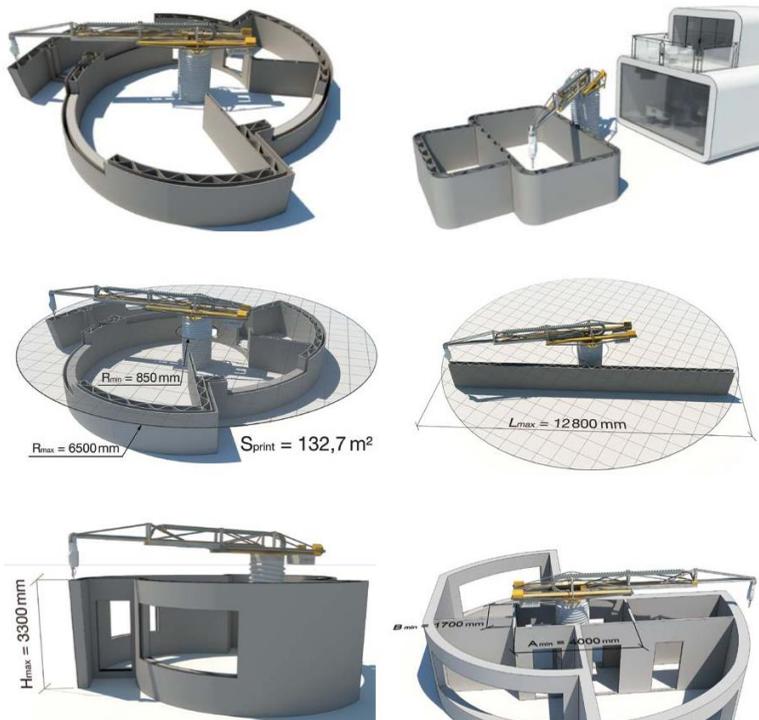
Berikut merupakan perkembangan mekanisme robot 3D-*printing* yang telah dikembangkan hingga saat ini, antara lain:

A. Apis Cor 3D-Printing

Mekanisme robot yang digunakan “Apis Cor”, seperti terlihat pada Gambar 2.4, merupakan robot serial dengan *end effector* berupa nozzle yang tersambung dengan *concrete mix and supply* unit (Apis Cor, 2016). 3D-*printer* dapat dipasang didalam maupun diluar bangunan yang akan dibangun. 3D-*printer* Apis Cor dapat bergerak translasi maupun rotasi dalam koordinat tiga dimensi, dan nozzle dapat bergerak mengikuti alur dan secara bertahap mendepositkan *concrete* sehingga menjadi bentuk bangunan. Tabel 2.2 menunjukkan spesifikasi dari Serial Robot Apis Cor.

Tabel 2.2 Spesifikasi Serial Robot Apis Cor (Apis Cor,2016)

No.	Spesifikasi Teknis Alat	Data
1.	Dimensi (panjang, lebar, tinggi)	4000 × 1600 × 1500 [mm]
2.	Berat alat	2000 [kg]
3.	Tinggi <i>lifting</i> maksimum – base ke ekstruder	3300 [mm]
4.	Panjang maksimum ekstensi <i>arm</i>	6500 [mm]
5.	Panjang minimum ekstensi ekstruder	850 [mm]
6.	Kecepatan pergerakan operasi (X/Y)	1-10 [m/min]
7.	Tingkat presisi posisi (X/Y)	0,5 [mm]
8.	Tingkat presisi posisi (Z)	0,1-0,2 [mm]
9.	Maksimum operasi area	132,7 [m ²]



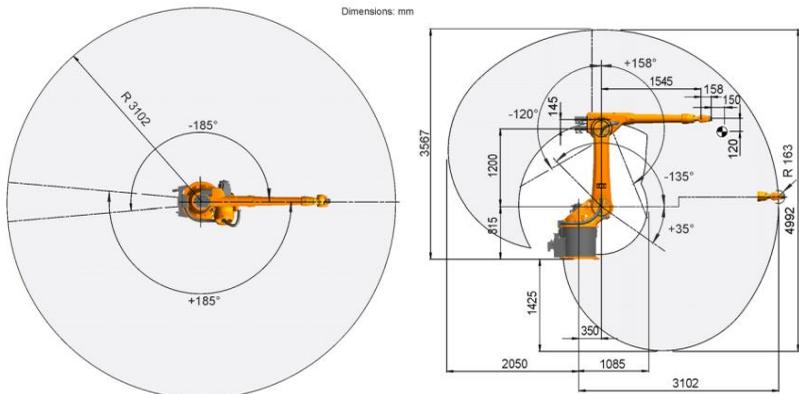
Gambar 2.4 Spesifikasi Teknis 3D-Printer Apis Cor (Apis Cor, 2016)

B. KUKA Robot KR30 L16-2

KUKA Robot KR30 L16-2, seperti terlihat pada Gambar 2.5, merupakan serial robot 6-axis yang biasa digunakan untuk proses pemindahan barang dan *handling tools* dan *fixture* dalam industri. Saat ini, robot KUKA KR30 L16-2 sudah melalui pengembangan sehingga dapat digunakan untuk 3D-printing bangunan (KUKA, 2016). Robot ini terdiri dari beberapa komponen, diantaranya: *arm*, *in-line wrist*, *rotating column*, *base frame*, *link arm* dan *electrical installations*. Tabel 2.3 menunjukkan spesifikasi dari Serial Robot KUKA KR 30 L16-2.

Tabel 2.3 Data Spesifikasi Teknis Robot
KUKA KR 30 L16-2 (KUKA, 2016)

No.	Spesifikasi Teknis Alat	Data
1.	Jumlah axis/jumlah axis yang dapat dikontrol	6/6
2.	Volume <i>workspace</i>	104,5 m ³
3.	Berat alat	700 kg
4.	Panjang maksimum yang dapat dicapai	3102 mm
5.	Ukuran <i>footprint</i>	850×850 mm



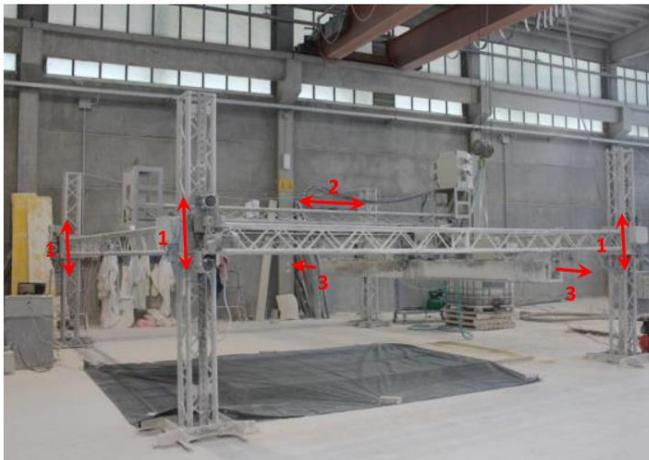
Gambar 2.5 Workspace KUKA Robot KR 30 L16-2 (KUKA, 2016)

C. D-Shape

D-Shape, seperti terlihat pada Gambar 2.6, merupakan perusahaan teknologi 3D-*printing* yang dikembangkan oleh Enrico Dini dan berbasis di Italia (Anes, 2016). Teknologi yang digunakan yaitu 3D-*printer* dengan mekanisme Kartesian Gantry dengan derajat kebebasan sebanyak 3. Metode deposit materialnya menggunakan dua komponen, yaitu perekat (*binder*) dan bubuk material (*powder*) (Jakupovic, 2016). Tabel 2.3 menunjukkan spesifikasi dari Paralel Robot D-Shape.

Tabel 2.4 Data Spesifikasi Teknis D-Shape (Jakupovic,2016)

No.	Spesifikasi Teknis Alat	Data
1.	Dimensi (panjang, lebar, tinggi)	6000 × 6000 × 3000 mm
2.	Berat alat	5000 kg
3.	Kecepatan <i>printing</i> teoritis	2,5 m ³ /layer
4.	Kecepatan <i>printing</i> aktual	1,2 m ³ /jam
5.	Akurasi	10-20 mm
6.	Aktuator	6 elektromotor
7.	Pekerja yang dibutuhkan	1-2 orang
8.	Jenis nozzle	Nozzle array (300 Nozzles)
9.	Maksimum operasi area	5000 × 5000 × 2500 mm

**Gambar 2.6** Mekanisme 3D-Printer D-Shape (Jakupovic, 2016)

2.1.4 Euler Parameter

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

$$\begin{aligned} q &= e_0 + e_1 \mathbf{i} + e_2 \mathbf{j} + e_3 \mathbf{k} \\ &= \cos(\theta/2) + \mathbf{u} \sin(\theta/2) \end{aligned} \quad (2.1)$$

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

$$e_0^2 + e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 = 1 \quad (2.2)$$

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

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

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):

$${}^0\Sigma_B = \mathbf{M} {}^1\Sigma_B \quad (2.4)$$

Dalam persamaan tersebut, \mathbf{M} merepresentasikan transformasi matriks yang digunakan untuk mengubah titik B terhadap sistem koordinat *moving frame* menjadi titik B terhadap sistem koordinat *fixed frame*. Matriks \mathbf{M} terdiri dari *Euler Parameter*, matriks \mathbf{d} , matriks \mathbf{R} dan matriks perspektif ($\mathbf{0}_{3 \times 1}$)^T. Matriks \mathbf{d} merepresentasikan perpindahan vektor translasi dan matriks \mathbf{R} adalah matriks orthogonal yang didapatkan dari *Euler Parametrization*. Quaternion pada *Euler Parameter* dapat dibentuk sesuai dengan variabel yang dikehendaki (Nurahmi, 2016).

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 & \mathbf{0}_{3 \times 1}^T \\ \mathbf{d} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \alpha & 2(x_1x_2 - x_0x_3) & 2(x_1x_3 + x_0x_2) \\ 2(x_1x_2 + x_0x_3) & \beta & 2(x_2x_3 - x_0x_1) \\ 2(x_1x_3 - x_0x_2) & 2(x_2x_3 + x_0x_1) & \gamma \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

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

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.2 Operasi Vektor

Vektor merupakan suatu kuantitas yang membutuhkan besaran (≥ 0) dan arah dalam ruang untuk dapat dijelaskan secara lengkap (Riley, 2006). Contoh besaran yang dapat dijelaskan dalam vektor. Berlainan dengan besaran vektor, besaran skalar merupakan besaran yang cukup dinyatakan oleh nilainya saja. Berikut akan dijelaskan beberapa operasi vektor yang digunakan dalam analisa kinematika mekanisme robot:

2.1.1 Basis Vektor dan Komponen

Apabila terdapat tiga vektor \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 , dan \mathbf{e}_3 terletak pada bidang yang berbeda atau tidak pada satu bidang, vektor tersebut dapat dituliskan dalam konteks vektor baru yang dikalikan dengan konstanta skalar:

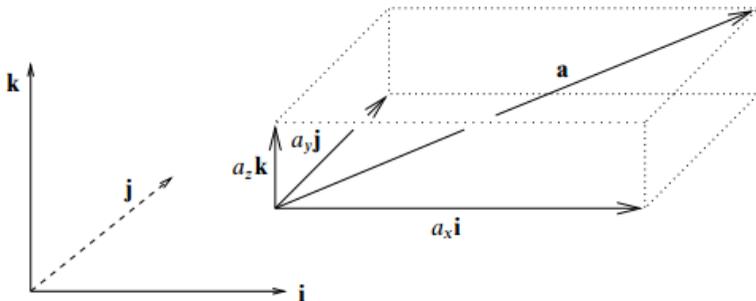
$$\mathbf{a} = a_1\mathbf{e}_1 + a_2\mathbf{e}_2 + a_3\mathbf{e}_3 \quad (2.9)$$

Tiga vektor \mathbf{e}_1 , \mathbf{e}_2 , dan \mathbf{e}_3 dalam persamaan tersebut merupakan basis vektor (tiga dimensi). Variabel a_1 , a_2 dan a_3 adalah konstanta skalar yang dapat bernilai positif, negatif atau nol. Dua komponen dari vektor \mathbf{a} tersebut merupakan komponen pembentuk

vektor \mathbf{a} terhadap suatu basis vektor. Sebuah basis vektor mempunyai beberapa karakteristik, diantaranya: jumlah basis vektor sebanding dengan jumlah dimensi vektor dan basis vektor bersifat independen linear, dalam hal ini basis vektor bukan hasil dari penjumlahan vektor (Riley, 2006).

Basis vektor berdasarkan sistem koordinat Kartesian (x,y,z) dapat dituliskan dalam bentuk \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} . Basis tersebut terletak pada titik pusat koordinat dan mempunyai arah paralel terhadap sumbu x , y dan z positif. Gambar 2.7 menunjukkan vektor (\mathbf{a}) dapat dituliskan dalam bentuk hasil dari penjumlahan tiga vektor ($\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$) dengan masing-masing vektor sejajar terhadap sumbu koordinat Kartesian (x,y,z). Hasil tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (2.10)$$



Gambar 2.7 Basis Vektor dalam Sistem Koordinat Kartesian (Riley, 2006)

Vektor dalam ruang tiga dimensi membutuhkan tiga komponen ($\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$) untuk menunjukkan arah dan besaran dari vektor tersebut. Perpindahan arah vektor dalam ruang tiga dimensi merupakan hasil dari penjumlahan vektor-vektor yang paralel terhadap sumbu axis koordinat, seperti yang dibentuk pada Gambar 2.3. Nilai besaran komponen vektor \mathbf{a} yang paralel terhadap axis sistem koordinat Kartesian dapat dituliskan dalam bentuk a_x , a_y dan

a_z . Basis vektor \mathbf{i} , \mathbf{j} dan \mathbf{k} apabila direpresentasikan dalam bentuk komponen vektor sesuai sistem koordinat Kartesian dapat dituliskan sebagai berikut: $(1,0,0)$, $(0,1,0)$ dan $(0,0,1)$.

2.1.2 Norm Vektor

Norm dari suatu vektor \mathbf{a} dapat dituliskan dengan $\|\mathbf{a}\|$. Menurut komponen vektor dalam tiga dimensi koordinat Kartesian, nilai itu dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$a = \|\mathbf{a}\| = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2} \quad (2.11)$$

Sebuah vektor yang mempunyai nilai sama dengan satu disebut dengan *unit vektor*. Unit vektor dengan arah \mathbf{a} biasa disimbolkan dengan notasi $\hat{\mathbf{a}}$. Unit vektor sangat berguna dalam menunjukkan besaran dan arah, apabila vektor dituliskan sebagai $\omega\hat{\mathbf{a}}$ hal ini menunjukkan bahwa vektor sebesar ω mempunyai arah $\hat{\mathbf{a}}$. Unit vektor dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\hat{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{a}}{\|\mathbf{a}\|} \quad (2.12)$$

2.1.3 Perkalian Vektor *Dot* dan *Cross Product*

Operasi perkalian antara sebuah vektor dengan vektor mempunyai dua jenis produk yang dihasilkan, yaitu: skalar dan vektor. Gambar 2.8 menunjukkan representasi produk skalar, atau biasa disebut dengan *dot product*. *Dot Product* merupakan hasil dari perkalian antara dua buah vektor yang dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (2.13)$$

Nilai θ merupakan sudut antara dua vektor dimana titik pangkal vektor satu sama dengan titik pangkal vektor yang lain.

Nilai produk skalar yang dihasilkan dari operasi $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ sama dengan besaran \mathbf{a} dikali dengan proyeksi besaran \mathbf{b} pada \mathbf{a} . Perkalian *dot product* memiliki beberapa sifat, antara lain:

1. Sifat Komutatif.

$$(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a})$$

2. Sifat Distributif.

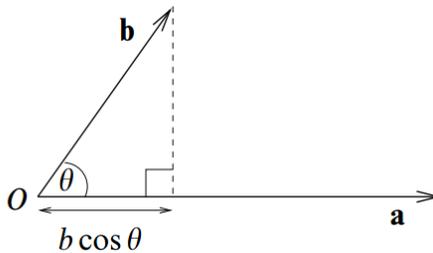
$$(\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c})$$

3. Jika vektor \mathbf{a} dan vektor \mathbf{b} saling tegak lurus dalam Koordinat Kartesian, maka menghasilkan nilai nol.

$$(\mathbf{i} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{k} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i} = 0)$$

4. Jika vektor \mathbf{a} dan vektor \mathbf{b} searah dalam Koordinat Kartesian, maka menghasilkan nilai satu.

$$(\mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{k} = 1)$$



Gambar 2.8 Proyeksi Vektor \mathbf{b} pada Vektor \mathbf{a} (Riley,2006)

Apabila komponen sebuah vektor dijabarkan sesuai dengan basis vektornya kemudian dilakukan operasi *dot product* dengan vektor lainnya, seperti vektor \mathbf{a} ($a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$) dan vektor \mathbf{b} ($b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k}$), maka produk skalarnya menjadi:

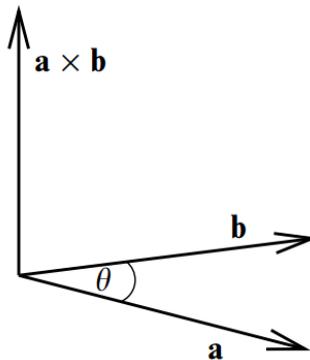
$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= (a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}) \cdot (b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k}) \quad (2.14) \\ &= a_xb_x + a_yb_y + a_zb_z \end{aligned}$$

Produk vektor, atau biasa disebut dengan *cross product*, merupakan perkalian antara dua buah vektor yang menghasilkan

vektor dengan arah tegak lurus terhadap kedua vektor tersebut. *Cross Product* biasa dituliskan dalam bentuk:

$$\|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\| = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \sin \theta \quad (2.15)$$

Arah dari hasil *cross product* ditentukan dengan menggunakan “Kaidah Tangan Kanan” berdasarkan vektor yang dikalikan. Kaidah Tangan Kanan menggunakan tiga buah jari, yaitu ibu jari, telunjuk dan jari tengah. Apabila jari telunjuk menunjukkan arah vektor \mathbf{a} dan jari tengah menunjukkan arah vektor \mathbf{b} , maka ibu jari menunjukkan arah hasil dari *cross product* vektor \mathbf{a} dan \mathbf{b} . Sudut θ merupakan sudut yang dibentuk antara dua vektor dengan titik ujung yang saling berhimpit. Gambar 2.9 menunjukkan Kaidah Tangan Kanan pada Perkalian *Cross Product*.



Gambar 2.9 Kaidah Tangan Kanan pada Perkalian *Cross Product* (Riley, 2006)

Perkalian *cross product* mempunyai beberapa sifat, antara lain sifat distributif, anti-komutatif dan non-asosiatif. Sifat-sifat tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Sifat distributif

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b}) \times \mathbf{c} = (\mathbf{a} \times \mathbf{c}) + (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$$

2. Sifat anti-komutatif

$$\mathbf{b} \times \mathbf{a} = -(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

3. Sifat non-asosiatif

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{c} \neq \mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c})$$

4. Jika vektor \mathbf{a} dan vektor \mathbf{b} saling tegak lurus dalam Koordinat Kartesian maka akan menghasilkan vektor dengan arah sesuai kaidah tangan kanan.

$$\mathbf{i} \times \mathbf{j} = -\mathbf{j} \times \mathbf{i} = \mathbf{k}$$

$$\mathbf{j} \times \mathbf{k} = -\mathbf{k} \times \mathbf{j} = \mathbf{i}$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{i} = -\mathbf{i} \times \mathbf{k} = \mathbf{j}$$

5. Jika vektor \mathbf{a} dan vektor \mathbf{b} searah dalam Koordinat Kartesian maka akan menghasilkan nilai 0.

$$\mathbf{i} \times \mathbf{i} = \mathbf{j} \times \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{k} = \mathbf{0}$$

Apabila komponen sebuah vektor dijabarkan sesuai dengan basis vektornya kemudian dilakukan operasi *cross product* dengan vektor lainnya, seperti vektor \mathbf{a} ($a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$) dan vektor \mathbf{b} ($b_x\mathbf{i} + b_y\mathbf{j} + b_z\mathbf{k}$), maka hasil vektornya menjadi:

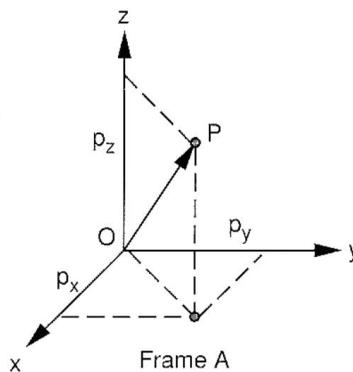
$$\begin{aligned} \mathbf{a} \times \mathbf{b} = & (a_y b_z - a_z b_y)\mathbf{i} + (a_z b_x - a_x b_z)\mathbf{j} \quad (2.16) \\ & + (a_x b_y - a_y b_x)\mathbf{k} \end{aligned}$$

2.3 Posisi, Orientasi dan Lokasi

Studi kinematika dalam mekanisme robot memerlukan tiga komponen, diantaranya adalah: posisi, orientasi dan lokasi dari suatu objek. Objek tersebut dapat berupa sebuah *link*, *platform* maupun *tool* sebagai *end effector*. Lokasi objek dapat ditentukan apabila sistem koordinat referensi (*fixed frame*) dan sistem koordinat objek (*moving frame*) tersebut diketahui (Tsai, 1999). Sistem koordinat yang digunakan dalam penentuan lokasi umumnya menggunakan Sistem Koordinat Kartesian. Parameter yang dibutuhkan dalam penentuan lokasi berjumlah 6, diantaranya sistem koordinat *fixed frame* (x , y dan z) dan sistem koordinat *moving frame* (u , v dan w). Posisi dari titik-titik suatu objek dapat

dianalisa apabila lokasi objek terhadap sistem koordinat referensi dapat diketahui.

Posisi dari titik suatu objek terhadap sistem referensi koordinat dapat dituliskan dalam bentuk vektor 3×1 (*position vector*). Sebagai contoh seperti pada Gambar 2.10, posisi titik P dalam referensi koordinat A. Subskrip x, y dan z merepresentasikan proyeksi vektor posisi dalam axis sistem koordinat referensi. Vektor posisi dapat ditulis sebagai berikut:



Gambar 2.10 Posisi Vektor Titik P Terhadap Fixed Frame A (Tsai, 1999)

$${}^A\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Orientasi objek dapat ditentukan dengan berbagai cara, diantaranya adalah: *direction cosine representation*, *screw axis representation* dan *Euler angle representation*. Dalam metode Euler, digunakan tiga axis rotasi baik dalam *fixed frame* maupun *moving frame* untuk menentukan orientasi dari suatu objek.

Apabila objek berotasi terhadap sumbu-z (θ), biasa disebut dengan rotasi *yaw*, maka matriks rotasi yang digunakan adalah:

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Apabila objek berotasi terhadap axis-x (ψ), biasa disebut dengan rotasi *roll*, maka matriks rotasi yang digunakan:

$$R(x, \psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Apabila objek berotasi terhadap axis-y (ϕ), biasa disebut dengan rotasi *roll*, maka matriks rotasi yang digunakan:

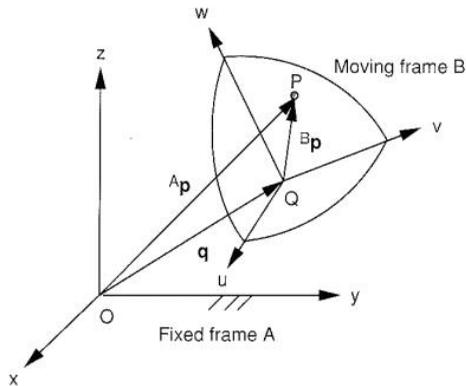
$$R(y, \phi) = \begin{bmatrix} c\phi & 0 & s\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\phi & 0 & c\phi \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Saat objek diputar dengan axis rotasi berupa x, y dan z pada koordinat referensi, maka akan menghasilkan orientasi yang berbeda pada tiap putaran rotasi. Sehingga didapatkan matriks rotasi untuk tiga rotasi axis x, y dan z sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R(\psi, \theta, \phi) &= R(z, \theta) R(y, \phi) R(x, \psi) \\ &= \begin{bmatrix} c\phi c\theta & c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & s\phi \theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Lokasi objek yang ditinjau dapat ditentukan dari posisi koordinat dan orientasi *moving* terhadap sistem koordinat referensi *fixed frame*. Titik O merupakan titik pusat dari *fixed frame* A, sedangkan titik Q merupakan titik pusat *moving frame* B. Sebagai contoh pada Gambar (2.11), posisi dari titik P dapat dituliskan dalam bentuk vektor \mathbf{p} terhadap *fixed frame* A menjadi ${}^A\mathbf{p} = \overline{OP}$. Hal ini juga berlaku untuk sistem koordinat *moving frame* B dalam

bentuk vektor \mathbf{p} menjadi ${}^B\mathbf{p} = \overrightarrow{QB}$. Untuk menurunkan persamaan antara vektor ${}^A\mathbf{p}$ dan ${}^B\mathbf{p}$, maka dibentuk vektor \overrightarrow{OP} dari penjumlahan dua vektor tersebut:



Gambar 2.11 Lokasi Titik P Terhadap Sistem Koordinat *Fixed Frame* dan *Moving Frame* (Tsai, 1999)

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OP} &= \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QP} \\ {}^A\mathbf{p} &= {}^A R_B {}^B\mathbf{p} + {}^A\mathbf{q}\end{aligned}\quad (2.22)$$

Orientasi *moving frame* B terhadap *fixed frame* A dapat didefinisikan dalam bentuk rotasi matriks ${}^A R_B$. Persamaan diatas dapat digunakan untuk menentukan posisi dari suatu titik pada *platform* terhadap posisi dari referensi titik koordinat O dan orientasi *moving frame* B terhadap *fixed frame* A.

2.4 Transformasi Homogen

Dalam persamaan lokasi suatu titik, matriks rotasi ${}^A R_B$ merepresentasikan perpindahan yang disebabkan oleh gerakan rotasi sedangkan ${}^B\mathbf{p}$ dan ${}^A\mathbf{q}$ merepresentasikan gerakan translasi. Hal ini tidak ditulis dalam bentuk yang *compact* dikarenakan matriks rotasi 3×3 tidak mencakup gerakan translasi, untuk itu

digunakan konsep koordinat homogen dan transformasi homogen (Tsai, 1999).

Koordinat homogen merupakan matriks empat dimensi yang berisi vektor suatu titik dalam sistem koordinat tiga dimensi (p_x, p_y, p_z) dan *scaling factor* (ρ). Untuk n-dimensi posisi vektor akan dituliskan dalam bentuk n+1 dimensi vektor dalam sistem koordinat homogen. Konsep dari koordinat homogen digunakan untuk membentuk matriks transformasi yang memuat gerakan rotasi translasi, *scaling* dan transformasi perspektif. Sebagai contoh, koordinat homogen \mathbf{p} adalah:

$$P = [\rho, \rho p_x, \rho p_y, \rho p_z]^T \quad (2.23)$$

Dari definisi diatas, dapat disimpulkan bahwa vektor sistem koordinat tiga dimensi dapat dicari dari sistem koordinat homogen dengan membagi ketiga terakhir suku koordinat homogen dengan *scaling factor*. Apabila nilai *scaling factor* adalah satu, maka suku tiga pertama dari sistem koordinat *homogenous* merepresentasikan vektor aktual sistem koordinat tiga dimensi.

$$p_x = \frac{\hat{p}_x}{\rho}, \quad p_y = \frac{\hat{p}_y}{\rho}, \quad \text{dan} \quad p_z = \frac{\hat{p}_z}{\rho} \quad (2.24)$$

Matriks transformasi homogen merupakan matriks 4×4 yang digunakan untuk menentukan posisi vektor koordinat homogen dari satu sistem koordinat ke sistem koordinat yang lain. Matriks tersebut dapat dipartisi menjadi empat submatriks, berikut contohnya:

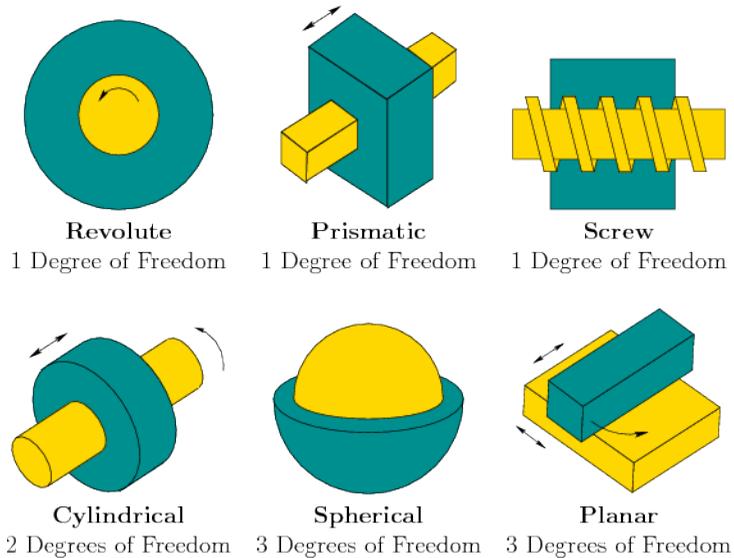
$${}^A T_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B (3 \times 3) & : & {}^A \mathbf{q} (3 \times 1) \\ \dots \dots \dots & : & \dots \dots \dots \\ \Psi (1 \times 3) & : & \rho (1 \times 1) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Pada submatriks atas bagian kiri, ${}^A R_B(3 \times 3)$, submatriks tersebut merepresentasikan orientasi dari *moving frame* terhadap *fixed frame* A. Submatriks kanan atas, ${}^A \mathbf{q}(3 \times 1)$, merepresentasikan posisi titik pusat *moving frame* relatif terhadap *fixed frame*. Submatriks kiri bawah, $\psi(1 \times 3)$, merepresentasikan transformasi perspektif, dan submatriks kanan bawah, $\rho(1 \times 1)$, merepresentasikan *scaling factor*. Untuk kinematik manipulator robot, nilai *scaling factor* dan transformasi perspektif bernilai nol (Tsai, 1999).

2.5 Links dan Joints

Sebuah mekanisme terdiri dari beberapa susunan *link* yang terhubung dengan *joint*. *Link* merupakan satuan bodi yang digunakan untuk membentuk suatu mekanisme, dan *joint* merupakan koneksi yang digunakan untuk menghubungkan *link*. Banyaknya derajat kebebasan, atau biasa disebut dengan *degree of freedom* (DOF), dari sebuah mekanisme tergantung dari banyaknya *link* dan tipe dari *joint* yang digunakan untuk membuat konstruksi mekanisme tersebut (Tsai, 1999).

Gambar 2.12 menunjukkan jenis gerakan relatif yang dibentuk dari suatu *joint* ditentukan berdasarkan kontak permukaan antar bagian bodi yang terhubung dengan *joint*. Permukaan kontak *link* biasa disebut dengan *pair element*. Dua *pair element* membentuk pasangan kinematik dan hal itu dapat dibagi kembali menjadi dua jenis, yaitu *lower pair* dan *higher pair*, yang bergantung dari jenis kontak permukaan. Pada umumnya, jenis dari elemen pasangan dua *lower pair* mempunyai bentuk yang identik, salah satu berbentuk solid dan yang lain berbentuk *hollow*. Sebuah pasangan kinematik dikatakan *higher pair* apabila elemen pasangan tersebut kontak dalam satu titik atau sepanjang sumbu (Tsai, 1999). Terdapat enam jenis *lower pair* dan dua *higher pair* yang umum digunakan dalam mekanisme robot, diantaranya adalah:



Gambar 2.12 Jenis *Lower-pair Joint* dan Jumlah DOF (Riley, 2004)

1. *Revolute Joint* (R)
Revolute joint dibentuk dari dua elemen yang berputar terhadap sumbu elemen lain. *Revolute joint* terdiri dari lima *constraint* dan mempunyai satu DOF. Koneksi biasa disebut dengan sambungan engsel atau pin.
2. *Prismatic Joint* (P)
Prismatic joint terdiri dari dua elemen pasangan yang dapat meluncur satu sama lain sepanjang sebuah axis. *Prismatic joint* terdiri dari lima *constraint* dan satu DOF. Koneksi ini biasa disebut dengan sambungan luncur.
3. *Cylindrical Joint* (C)
Cylindrical joint merupakan sambungan yang mempunyai gerakan rotasi dan juga translasi pada satu sumbu elemen. *Cylindrical joint* terdiri dari empat *constraint* dan memiliki 2 DOF.

4. *Helical Joint (H)*
Helical joint merupakan sambungan yang mempunyai gerakan rotasi dan translasi yang bergantung dengan rotasi dari *pitch*. Sambungan ini terdiri dari lima *constraint* dan memiliki satu DOF. *Helical joint* biasa disebut juga dengan sambungan ulir.
5. *Spherical Joint (S)*
Spherical joint dibentuk dari satu elemen yang dapat berputar secara bebas dengan acuan berupa titik pusat dari elemen lain sehingga memungkinkan untuk bergerak ke semua arah. Sambungan ini tidak memiliki gerakan translasi. Sambungan ini terdiri dari tiga *constraint* dan memiliki tiga DOF.
6. *Plane Pair (P)*
Plane pair merupakan sambungan yang terdiri dari dua gerakan translasi sepanjang kontak bidang dan satu gerakan rotasi terhadap garis sumbu kontak bidang. Sambungan ini terdiri dari tiga *constraint* dan memiliki tiga DOF.
7. *Gear Pair*
Gear pair merupakan sambungan yang terdiri dari satu gir yang berputar dan meluncur terhadap titik kontak gir lainnya. Sambungan ini terdiri dari empat *constraint* dan memiliki dua DOF.
8. *Cam Pair*
Cam pair merupakan sambungan yang terdiri dari cam dan pasangannya. Sambungan ini memiliki dua DOF.

2.6 Analisa Singularitas

Robot paralel terdiri dari sebuah *moving platform* dan *fixed base* yang terhubung dengan beberapa *link*. *Moving platform* bekerja sebagai *end effector*. Dikarenakan struktur paralel robot merupakan *closed loop*, tidak semua *joint* dapat dikontrol secara independen. Sehingga terdapat beberapa *joint* yang dapat diaktuatori dan *joint* yang tidak dapat diaktuatori (*passive*) (Tsai, 1999).

Aktuasi *joint* dapat dinotasikan sebagai sebuah vektor \mathbf{q} dan lokasi dari *moving platform* dapat dideskripsikan sebagai vektor \mathbf{x} . Sehingga, *constraint* kinematik yang dikenakan pada link dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (2.26)$$

Dimana \mathbf{f} merupakan fungsi implisit dari \mathbf{q} dan \mathbf{x} dan $\mathbf{0}$ adalah sebuah bilangan n -dimensional vektor. Untuk mendapatkan hubungan antara *input joint* dengan kecepatan output *end effector* maka persamaan () diturunkan terhadap waktu, sehingga:

$$J_x \dot{\mathbf{x}} = J_q \dot{\mathbf{q}} \quad (2.27)$$

$$J_x = \frac{\delta \mathbf{f}}{\delta \mathbf{x}} \quad J_q = \frac{\delta \mathbf{f}}{\delta \mathbf{q}} \quad (2.28)$$

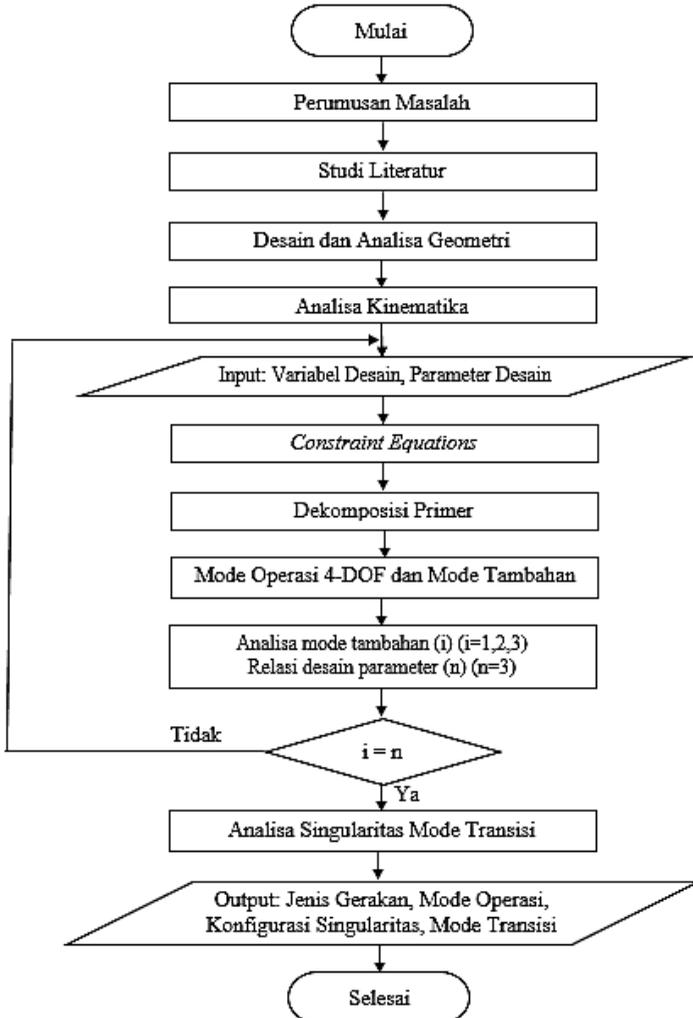
Penurunan fungsi tersebut menghasilkan dua Matriks Jacobian. Matrik Jacobian keseluruhan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$J_x \dot{\mathbf{x}} = J_q \dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{f}} \quad (2.29)$$

Kondisi singularitas terjadi saat $\det(J_x) = 0$ dan $\det(J_q) = 0$.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Flowchart Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

3.2 Proses Penelitian

Proses penelitian ini meliputi identifikasi masalah, studi literatur, desain dan analisa geometri dan analisa kinematika. Analisa kinematika terdiri dari identifikasi *constraint equations*, proses dekomposisi primer, interpretasi mode operasi dan jenis gerakan, analisa mode transisi dan singularitas. Berikut penjelasan lebih rinci dari tiap proses penelitian:

3.2.1 Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data mengenai mekanisme robot yang digunakan dalam sektor konstruksi perumahan. Data tersebut akan digunakan untuk membuat parameter mekanisme sehingga pemodelan mekanisme dapat dilakukan.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan meliputi konsep analisa geometri, analisa kinematika, penurunan *constraint equations*, proses dekomposisi primer, aplikasi robot 4-DOF yang telah dikembangkan saat ini dan perkembangan 3D-*printing* bangunan. Studi literatur dilakukan dengan cara membaca jurnal, buku dan *proceeding* dari penelitian terdahulu. Output yang diharapkan dari proses ini adalah pengetahuan yang cukup untuk melanjutkan penelitian.

3.2.3 Desain dan Analisa Geometri

Analisa geometri terdiri dari pembuatan kriteria desain yang dibutuhkan, pembuatan desain dan penentuan vektor posisi dari titik yang akan ditinjau. Kriteria desain dibuat berdasarkan mekanisme robot 3D-*printing* terdahulu. Output dari proses ini adalah parameter desain, variabel desain dan vektor posisi dari titik yang akan ditinjau.

3.2.4 Constraint Equations

Tahapan ini merupakan bagian dari analisa kinematika. Penurunan *constraint equations* didapatkan dari vektor posisi *joint* dan *link* yang menghubungkan *base* dengan *platform*. Posisi titik

pada *moving frame* (Σ_1) sebelumnya ditransformasi menjadi posisi titik pada *fixed frame* (Σ_1). Metode *Euler Parameter* dan Quaternion digunakan dalam penurunan *constraint equations* dan menggunakan bantuan perangkat lunak perhitungan “Maple”

3.2.5 Dekomposisi Primer

Tahapan ini termasuk kedalam analisa kinematika. *Constraint equations* yang sudah didapatkan dari proses sebelumnya kemudian didekomposisi kedalam faktor-faktor primer. Faktor primer tersebut merupakan *motion parameter* yang digunakan dalam analisa mode operasi dan interpretasi jenis gerakan. Perhitungan dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak perhitungan “CYGWYN Singular”.

3.2.6 Mode Operasi 4-DOF dan Mode Tambahan

Tahapan ini merupakan bagian dari analisa kinematika. *Motion parameter* yang didapatkan kemudian disubstitusi kedalam persamaan *Euler Parameter* kemudian diinterpretasi hingga mendapatkan jenis gerakan. Transformasi matriks tiap mode operasi didapatkan dengan cara substitusi *motion parameter* kedalam matriks transformasi. Mode operasi terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu Mode Operasi 4-DOF dan Mode Tambahan.

3.2.7 Analisa Singularitas Mode Transisi

Analisa singularitas mode transisi atau *constraint singularity* dilakukan untuk mengetahui bagaimana konfigurasi mekanisme paralel robot 4-CRU dapat berpindah dari satu mode operasi ke mode operasi lain sesuai dengan parameter desain dan motion parameter yang berlaku.

3.3 Hasil Output yang Diinginkan

Output yang diinginkan dari penelitian ini adalah didapatkan mode operasi beserta jenis gerakan yang dapat dihasilkan dari mekanisme paralel robot 4-CRU dan konfigurasi singularitas mode transisi yang terjadi pada mekanisme paralel robot 4-CRU.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Analisa Geometri

Analisa geometri merupakan tahapan penelitian yang berisi pembuatan desain berdasarkan kriteria desain yang dibutuhkan dan penentuan vektor posisi dari titik-titik yang dianalisa. Tabel 4.1 berisi kriteria desain mekanisme yang dibutuhkan dalam aplikasi 3D-printing bangunan.

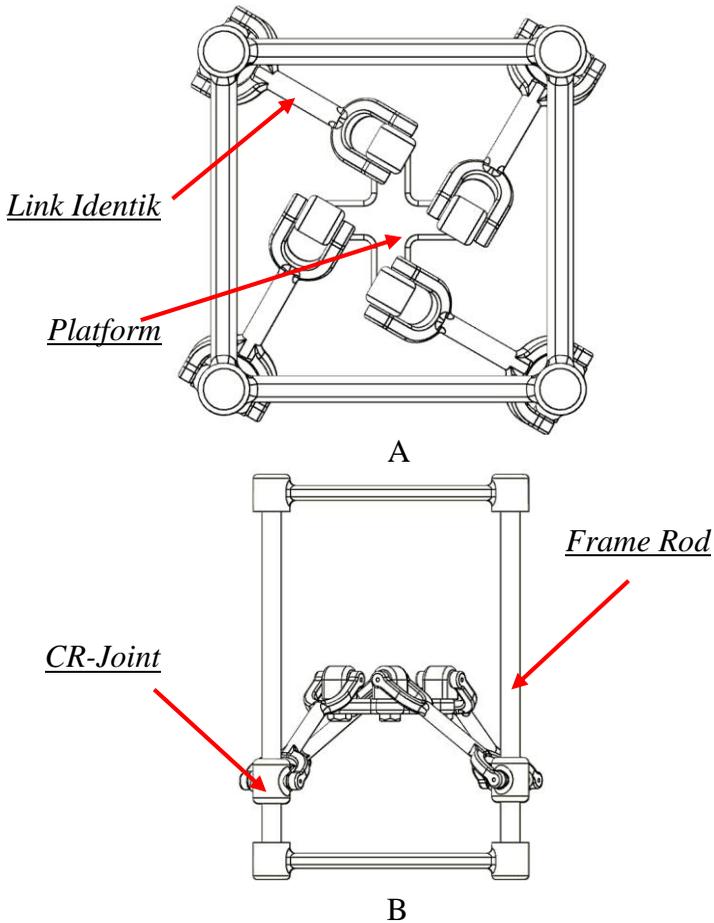
Kriteria desain dibuat berdasarkan data dari mekanisme robot 3D-printing terdahulu. Kriteria tersebut antara lain: jenis gerakan, derajat kebebasan, *moving platform* dan aktuator. Jenis gerakan yang dibutuhkan dalam proses 3D-printing antara lain gerakan translasi pada tiga bidang (xy , yz , zx) dan rotasi pada satu sumbu koordinat (sumbu- z). Struktur kinematika robot yang akan didesain adalah paralel robot dikarenakan *end effector* berupa array *nozzle*.

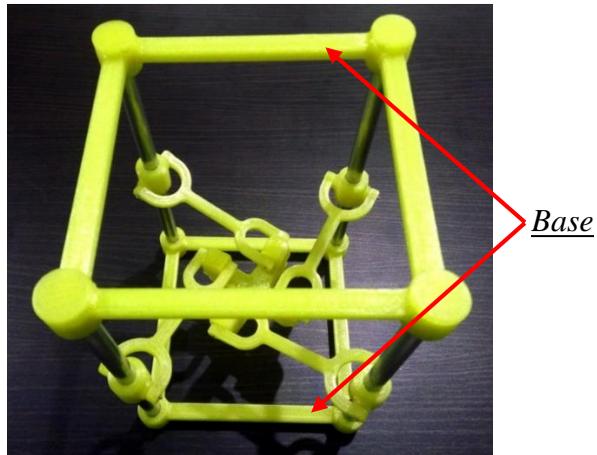
Tabel 4.1 Kriteria Desain Mekanisme Robot 3D-Printing yang Dibutuhkan

No.	Kriteria Desain
1.	Derajat kebebasan yang diperlukan adalah 4-DOF
2.	Jenis gerakan yang dibutuhkan adalah 3-DOF gerakan translasi dan 1-DOF gerakan rotasi
3.	Mendapatkan konfigurasi robot dengan jumlah jenis gerakan melebihi jumlah aktuator
4.	<i>Tipe nozzle</i> pada <i>moving platform</i> adalah <i>array type nozzle</i> .

Berdasarkan kriteria desain tersebut, maka didapatkan mekanisme paralel robot 4-CRU (*Cylindrical, Revolute* dan *Universal Joint*), seperti yang terlihat pada Gambar 4.1. Mekanisme paralel robot 4-CRU terdiri dari: dua buah *base* dan *moving platform* berbentuk segi empat dan empat buah *link* identik yang menghubungkan *base* dengan *moving platform*. Titik O adalah titik pusat pada *fixed frame* (Σ_0) yang terletak di tengah *base*

dan terdiri dari sumbu- x , y , z . Titik P merupakan titik pusat pada *moving frame* (Σ_1) yang terletak di tengah *platform* dan terdiri dari sumbu- u, v, w . Dua buah *base* dihubungkan dengan menggunakan empat *frame rod*. Setiap *link* terhubung dengan satu buah *CR-Joint* yang terletak pada *frame rod*. *CR-Joint* mempunyai dua garis sumbu yang saling berpotongan dan tegak lurus. Pada bagian ujung *link* identik yang lain terdapat satu buah *U-Joint* yang terhubung dengan *platform*.

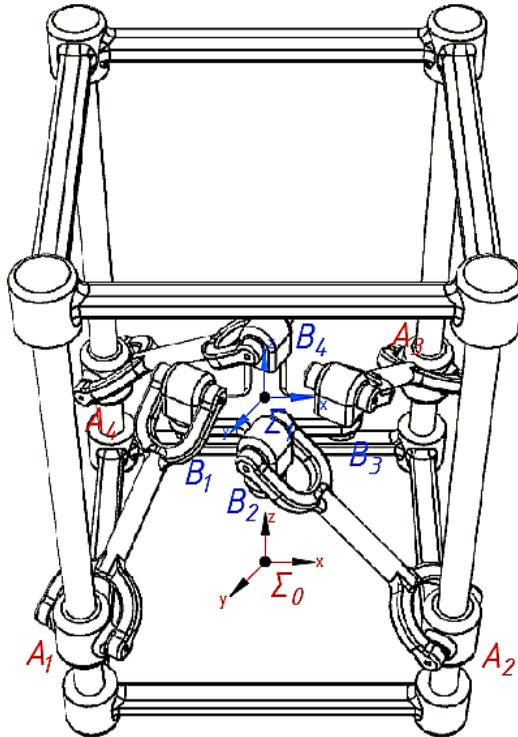




(C)

Gambar 4.1 Model Mekanisme dan Bagian-Bagian dari 4-CRU
 (A). *Top View*, (B). *Fron Viewt*, (C). *3D-Printed Mock-up*

Base pada mekanisme paralel robot 4-CRU terdiri dari empat titik, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Tiap titik merepresentasikan posisi dari *CR-Joint*. Titik pada *base* disimbolkan dengan notasi A_i ($i = 1, \dots, 4$). Gerakan vertikal pada *CR-Joint* merupakan gerakan yang diaktuali pada mekanisme 4-CRU. Perpindahan posisi pada gerakan vertikal tersebut didefinisikan dalam bentuk l_i ($i = 1, \dots, 4$). *Platform* pada mekanisme paralel robot 4-CRU juga terdiri dari empat titik. Titik tersebut mendefinisikan posisi dari *U-Joint*. Titik pada *platform* dinotasikan dalam bentuk B_i ($i = 1, \dots, 4$).



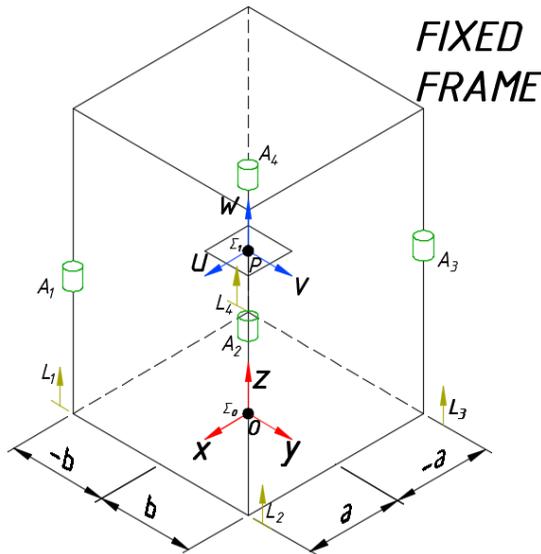
Gambar 4.2 Posisi Titik A_i dan B_i pada 4-CRU

Panjang dan lebar *base* dari titik pusat O *fixed frame* (Σ_0) terhadap titik A_i didefinisikan dengan a dan b . Kemudian, panjang dan lebar *platform* dari titik pusat P *moving frame* (Σ_1) terhadap titik B_i dinotasikan dengan c dan d . Notasi positif dan negatif mengikuti arah sumbu ordinat pada masing-masing referensi sistem koordinat. Posisi titik A_i dan B_i berdasarkan sistem koordinat masing-masing ditunjukkan pada Gambar 4.3. Sehingga, vektor posisi dari tiap titik A_i dan B_i dapat dituliskan sebagai berikut:

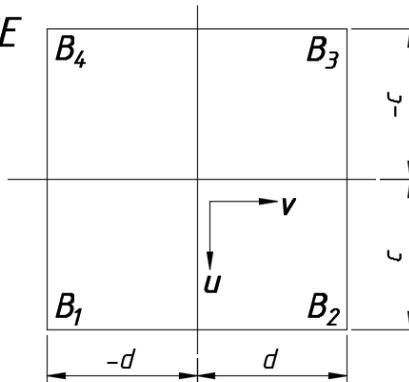
$$\begin{aligned}
 {}^0\mathbf{A}_1 &= [1, a, -b, l_1]^T & {}^1\mathbf{B}_1 &= [1, c, -d, 0]^T \\
 {}^0\mathbf{A}_2 &= [1, a, b, l_1]^T & {}^1\mathbf{B}_2 &= [1, c, d, 0]^T \\
 {}^0\mathbf{A}_3 &= [1, -a, b, l_1]^T & {}^1\mathbf{B}_3 &= [1, -c, d, 0]^T \\
 {}^0\mathbf{A}_4 &= [1, -a, -b, l_1]^T & {}^1\mathbf{B}_4 &= [1, -c, -d, 0]^T
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

CR-Joint mempunyai garis sumbu vertikal paralel terhadap ordinat sumbu- y . Sumbu tersebut dinotasikan sebagai \mathbf{s}_i ($i = 1, \dots, 4$). *U-Joint* mempunyai garis sumbu vertikal paralel terhadap ordinat sumbu- w . Sumbu tersebut didefinisikan sebagai \mathbf{n}_i ($i = 1, \dots, 4$). Arah sumbu- s dan sumbu- n sama untuk tiap *link* karena posisi sumbu tersebut hanya terletak pada satu sumbu ordinat. Arah sumbu- s dan sumbu- n ditunjukkan oleh Gambar 4.3. Vektor arah sumbu- s dan sumbu- n dapat dituliskan sebagai berikut:

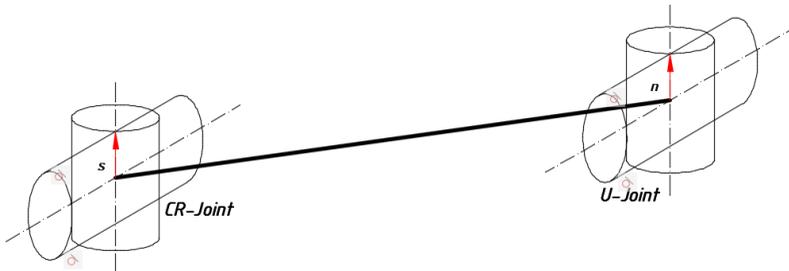
$${}^0\mathbf{s}_i = [0,0,0,1]^T \qquad {}^1\mathbf{n}_i = [0,0,0,1]^T \tag{4.2}$$



**MOVING
FRAME**



Gambar 4.3 Posisi Titik A_i terhadap Σ_0 dan Titik B_i terhadap Σ_1



Gambar 4.4 Arah Sumbu- s pada *CR-Joint* dan Sumbu- n pada *U-Joint*

Sehingga, analisa geometri pada mekanisme paralel robot 4-CRU menghasilkan parameter desain dan variabel desain. *Base* 4-CRU mempunyai dimensi a dan b , sedangkan *moving platform* mempunyai dimensi sebesar b dan d . Jarak antara dasar *base* dengan titik A pada *cylindrical joint* adalah l_i ($i = 1, \dots, 4$). Sehingga, terdapat empat parameter desain, yaitu: a, b, c, d dan empat variabel desain l_1, l_2, l_3, l_4 .

4.2 Analisa Kinematika

Analisa kinematika bertujuan untuk mengetahui mode operasi beserta jenis gerakan yang dihasilkan dari mekanisme paralel robot 4-CRU. *Constraint equations* digunakan untuk membatasi gerakan *moving platform* berdasarkan *link* identik yang menghubungkan *CR-Joint* dengan *moving platform*. Analisa kinematika terdiri dari proses penurunan *constraint equations*, dekomposisi primer, interpretasi mode operasi beserta jenis gerakan dan analisa singularitas mode transisi. Berikut tahapan dari analisa kinematika mekanisme paralel robot 4-CRU:

4.2.1 Transformasi Vektor Posisi

Lokasi titik pada *platform* dapat diketahui berdasarkan posisi titik dan orientasi *platform* terhadap sistem koordinat Σ_0 . Vektor posisi titik B_i dan n pada persamaan 4.1 dan 4.2 ditulis berdasarkan sistem koordinat Σ_1 . Transformasi matriks *Euler Parameter* digunakan untuk mendapatkan vektor posisi titik B_i dan arah sumbu- n berdasarkan sistem koordinat Σ_0 . Transformasi matriks *Euler Parameter* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 & \mathbf{0}_{3 \times 1}^T \\ \mathbf{d} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Komponen matriks \mathbf{d} dan \mathbf{R} merupakan bagian dari transformasi matriks \mathbf{T} yang merepresentasikan gerakan translasi dan rotasi. Komponen \mathbf{d} dan \mathbf{R} dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \alpha & 2(x_1x_2 - x_0x_3) & 2(x_1x_3 + x_0x_2) \\ 2(x_1x_2 + x_0x_3) & \beta & 2(x_2x_3 - x_0x_1) \\ 2(x_1x_3 - x_0x_2) & 2(x_2x_3 + x_0x_1) & \gamma \end{bmatrix}$$

$$\alpha = x_0^2 + x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$$

$$\beta = x_0^2 + x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$$

$$\alpha = x_0^2 + x_1^2 - x_2^2 - x_3^2$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 2(-x_0y_1 + x_1y_0 - x_2y_3 + x_3y_2) \\ 2(-x_0y_2 + x_1y_3 + x_2y_0 - x_3y_1) \\ 2(-x_0y_3 - x_1y_2 + x_2y_1 + x_3y_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Komponen dari matriks \mathbf{T} dibagi dengan $x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$ (Nurahmi, 2016)) sehingga transformasi matriks *Euler Parameter* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ X & \frac{x_0^2 + x_1^2 - x_2^2 - x_3^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{-2x_0x_3 + 2x_1x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{2x_0x_2 + 2x_1x_3}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \\ Y & \frac{2x_0x_3 + 2x_1x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{x_0^2 - x_1^2 + x_2^2 - x_3^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{-2x_0x_1 + 2x_2x_3}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \\ Z & \frac{-2x_0x_2 + 2x_1x_3}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{2x_0x_1 + 2x_2x_3}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} & \frac{x_0^2 - x_1^2 - x_2^2 + x_3^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Parameter x_0, x_1, x_2, x_3 dalam transformasi matriks diatas merepresentasikan gerakan rotasi dari *rigid body* (Kong, 2016). Parameter tersebut digunakan untuk proyeksi orientasi dengan syarat memenuhi persamaan 4.5 atau yang biasa disebut *Normalization Equation* (Kong, 2016).

$$\begin{aligned} x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 \\ = 1 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Sehingga, lokasi dari titik B_i dan arah sumbu- \mathbf{n} terhadap sistem koordinat *fixed frame* dapat ditulis sesuai dengan persamaan 4.6.

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{B}_i &= \mathbf{T} \ {}^1\mathbf{B}_i \quad (i = 1,2,3,4) \\ \mathbf{N} &= \mathbf{T} \ {}^1\mathbf{n}_i \quad (i = 1,2,3,4) \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.2.2 Constraint Equations

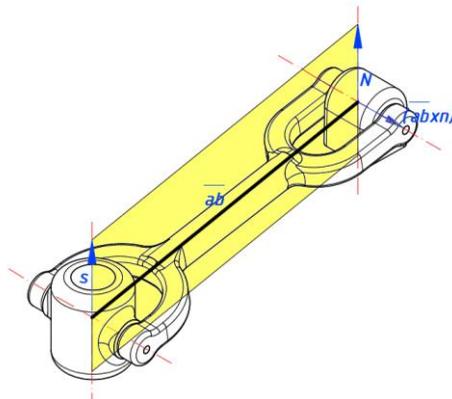
Constraint equations merupakan persamaan yang digunakan untuk membatasi gerakan *platform* berdasarkan *link* identik yang

menghubungkan *CR-joint* dengan *moving platform*. *Constraint equations* diturunkan berdasarkan vektor posisi dari *CR-Joint*, *U-Joint* dan panjang *link* identik. Vektor posisi *link* identik (\overrightarrow{ab}) dapat diketahui dengan cara vektor ${}^0\mathbf{B}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) pada *platform* dikurangi dengan vektor ${}^0\mathbf{A}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) pada *CR-Joint* seperti yang terlihat pada persamaan 4.7.

$$\overrightarrow{ab}_i = {}^0\mathbf{B}_i - {}^0\mathbf{A}_i \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (4.7)$$

Constraint equations didapatkan dengan cara eliminasi denominator hasil dari perkalian *scalar triple product* antara vektor arah sumbu-s, vektor \overrightarrow{ab}_i , dan vektor arah sumbu-N (Nurahmi, 2017). *Scalar triple product* merupakan hasil skalar yang didapat dari perkalian *dot product* dan *cross product*. Hasil yang diinginkan berupa bidang yang merepresentasikan vektor \mathbf{s} , \mathbf{N} dan \overrightarrow{ab} , seperti yang terlihat pada Gambar 4.5. Persamaan *scalar triple product* yang digunakan dapat dilihat pada persamaan 4.8.

$$f_i = \mathbf{s}_i \cdot (\overrightarrow{ab}_i \times \mathbf{N}); \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (4.8)$$



Gambar 4.5 Representasi *Constraint Equations*

Constraint equations (f_i), terlihat pada persamaan 4.9 – 4.12, yang didapatkan berjumlah empat sesuai dengan jumlah *link* identik.

$$f_1 = Xx_0x_1 - Xx_2x_3 + Yx_0x_2 + Yx_1x_3 - ax_0x_1 + ax_2x_3 + bx_0x_2 + bx_1x_3 + cx_0x_1 + cx_2x_3 - dx_0x_2 + dx_1x_3 \quad (4.9)$$

$$f_2 = Xx_0x_1 - Xx_2x_3 + Yx_0x_2 + Yx_1x_3 - ax_0x_1 + ax_2x_3 - bx_0x_2 - bx_1x_3 + cx_0x_1 + cx_2x_3 + dx_0x_2 - dx_1x_3 \quad (4.10)$$

$$f_3 = Xx_0x_1 - Xx_2x_3 + Yx_0x_2 + Yx_1x_3 + ax_0x_1 - ax_2x_3 - bx_0x_2 - bx_1x_3 - cx_0x_1 - cx_2x_3 + dx_0x_2 - dx_1x_3 \quad (4.11)$$

$$f_4 = Xx_0x_1 - Xx_2x_3 + Yx_0x_2 + Yx_1x_3 + ax_0x_1 - ax_2x_3 + bx_0x_2 + bx_1x_3 - cx_0x_1 - cx_2x_3 - dx_0x_2 + dx_1x_3 \quad (4.12)$$

Constraint equations pada persamaan 4.10-4.12 belum memperhitungkan nilai panjang link identik. Untuk dapat menurunkan persamaan *constraint equations* terhadap besaran panjang *link* identik, maka persamaan jarak dibuat berdasarkan $(\overline{ab})^2 - r^2 = 0$. Sehingga, *constraint equations* berdasarkan persamaan jarak (F_i) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_1 = X^2 - 2Xa + (2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 - 2x_3^2)Xc + (4x_0x_3 - 4x_1x_2)Xd + Y^2 + 2Yb + (4x_0x_3 + 4x_1x_2)Yc + (-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)dY + Z^2 + (-4x_0x_2 + 4x_1x_3)Zc + (-4x_0x_1 - 4x_2x_3)Zd - 2l_1Z + a^2 + (-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)ac \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned}
& +(-4x_0x_3 + 4x_1x_2)da + b^2 + (4x_0x_3 + 4x_1x_2)cb \\
& +(-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)bd + c^2 \\
& +4l_1(x_0x_2 - x_1x_3)c + d^2 + 4l_1(x_0x_1 + x_2x_3)d \\
& -r^2 + l_1^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_2 = & X^2 - 2Xa + (2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 - 2x_3^2)Xc \\
& +(-4x_0x_3 + 4x_1x_2)Xd + Y^2 - 2Yb \\
& +(4x_0x_3 + 4x_1x_2)Yc + (2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 - 2x_3^2)dY \\
& +Z^2 + (-4x_0x_2 + 4x_1x_3)Zc + (4x_0x_1 + 4x_2x_3)Zd \\
& -2l_2Z + a^2 + (-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)ac \\
& +(4x_0x_3 - 4x_1x_2)da + b^2 + (-4x_0x_3 - 4x_1x_2)cb \\
& +(-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)bd + c^2 \\
& +4l_2(x_0x_2 - x_1x_3)c + d^2 - 4l_2(x_0x_1 + x_2x_3)d \\
& -r^2 + l_2^2
\end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
F_3 = & X^2 + 2Xa + (-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)Xc \\
& +(-4x_0x_3 + 4x_1x_2)Xd + Y^2 - 2Yb \\
& +(-4x_0x_3 - 4x_1x_2)Yc \\
& +(2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 - 2x_3^2)dY + Z^2 \\
& +(4x_0x_2 - 4x_1x_3)Zc + (4x_0x_1 + 4x_2x_3)Zd - 2l_3Z \\
& +a^2 + (-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)ac \\
& +(-4x_0x_3 + 4x_1x_2)da + b^2 + (4x_0x_3 + 4x_1x_2)cb \\
& +(-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)bd + c^2 \\
& -4l_3(x_0x_2 - x_1x_3)c + d^2 \\
& -4l_3(x_0x_1 + x_2x_3)d - r^2 + l_3^2
\end{aligned} \tag{4.15}$$

$$\begin{aligned}
F_4 = & X^2 + 2a + (-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)cX \\
& +(4x_0x_3 - 4x_1x_2)dX + Y^2 + (2b \\
& +(-4x_0x_3 - 4x_1x_2)c \\
& +(-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)d)Y + Z^2 \\
& +((4x_0x_2 - 4x_1x_3)c + (-4x_0x_1 - 4x_2x_3)d - 2l_4)Z \\
& -r^2 + a^2 \\
& +((-2x_0^2 - 2x_1^2 + 2x_2^2 + 2x_3^2)c \\
& +(4x_0x_3 - 4x_1x_2)d)a + b^2
\end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
& +((-4x_0x_3 - 4x_1x_2)c \\
& +(-2x_0^2 + 2x_1^2 - 2x_2^2 + 2x_3^2)d)b + c^2 \\
& +4l_4(x_0x_2 - x_1x_3)c + d^2 - 4l_4(x_0x_1 + x_2x_3)d + l_4^2
\end{aligned}$$

4.2.3 Dekomposisi Primer

Constraint equations seperti yang tertulis pada persamaan 4.10-4.12 dapat dijadikan sebagai *polynomial ideal* dalam ring $(x_0, x_1, x_2, x_3, X, Y, Z)$ dengan koefisien parameter desain (a, b, c, d) . Mode operasi selanjutnya diidentifikasi dengan cara dekomposisi primer (dengan bantuan Maple dan Singular) (Coste, 2015). Proses tersebut menghasilkan tigas sub-ideal, sebagai berikut:

$$S_1 = \langle x_1, x_2 \rangle \quad (4.17)$$

$$S_2 = \langle x_0, x_3 \rangle \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned}
S_3 = & \langle (b^2c^2 - c^2d^2)X^2 + (a^2d^2 - c^2d^2)Y^2, \\
& (ab - ad - bc + cd)x_0^2 + (ab + ad + bc + cd)x_3^2, \dots \rangle \quad (4.19)
\end{aligned}$$

Kondisi sub-ideal pada persamaan 4.17–4.19 merepresentasikan mode operasi mekanisme paralel robot 4-CRU. Jenis gerakan dari tiap mode operasi tersebut dapat diketahui dengan cara substitusi persamaan 4.17–4.19 kedalam persamaan 4.4 (Kong, 2016).

4.2.4 Mode Operasi dan Jenis Gerakan

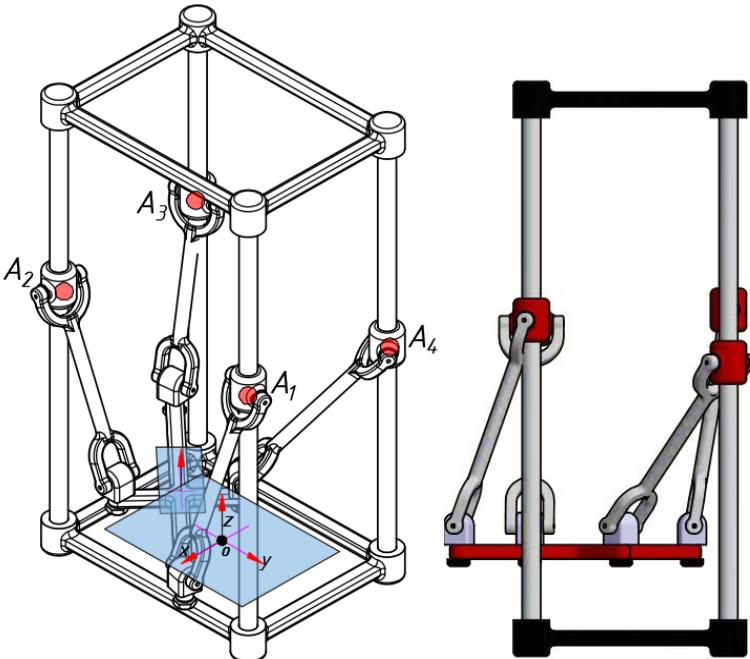
Berikut penjelasan mode operasi mekanisme paralel robot 4-CRU berdasarkan kondisi sub-ideal sesuai pada persamaan 4.17–4.19:

a) Mode Operasi 1: *Schönflies Mode* (S_1)

Mode operasi 1 (S_1), atau bisa disebut sebagai *Schönflies mode*, dikarakterisasikan oleh persamaan 4.17. Mode operasi 1 (S_1) mempunyai gerakan 4-DOF yang terdiri dari gerakan translasi 3-DOF dan gerakan rotasi 1-DOF pada sumbu-z. *Moving platform* mempunyai orientasi yang terbalik (*half-turn*) terhadap axis yang

paralel pada bidang- xy sebesar 180° dari kondisi identitas. Kondisi identitas merupakan kondisi dimana Σ_1 dan Σ_0 berada pada satu titik ($\Sigma_0 \equiv \Sigma_1$) dan menghasilkan transformasi matriks identitas (Nurahmi, 2016). Transformasi matriks dari mode operasi 1 ditunjukkan oleh matriks pada persamaan 4.20 dan Gambar 4.6.

$$\mathbf{T}_{S_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ X & \frac{x_0^2 - x_3^2}{x_0^2 + x_3^2} & \frac{-2x_0x_3}{x_0^2 + x_3^2} & 0 \\ Y & \frac{2x_0x_3}{x_0^2 + x_3^2} & \frac{x_0^2 - x_3^2}{x_0^2 + x_3^2} & 0 \\ Z & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

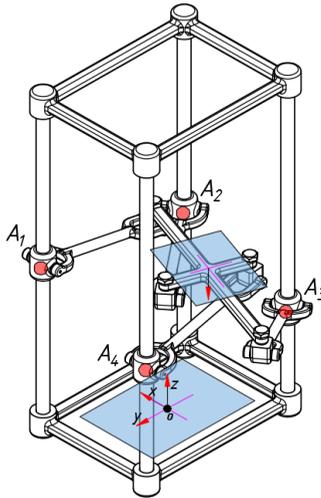


Gambar 4.6 Mode Operasi 1 atau *Schönflies Mode* (S_1)

b) Mode Operasi 2: Reversed Schönflies Mode (S_2)

Mode operasi 2 (S_2), atau bisa disebut sebagai *reversed Schönflies mode*, dikarakterisasikan oleh persamaan 4.18. Mode operasi 2 (S_2) mempunyai gerakan 4-DOF yang terdiri dari gerakan translasi 3-DOF dan gerakan rotasi 1-DOF pada sumbu-z. Perbedaan dengan mode operasi 1 (S_1) terletak pada orientasi *moving platform*. Mode operasi 2 memiliki orientasi *moving platform* yang paralel terhadap *base*. Berdasarkan gerakan tersebut, maka mode operasi 2 merupakan mode operasi *Schönflies*. Transformasi matriks dari mode operasi 2 (S_2) ditunjukkan oleh matriks pada persamaan 4.21 dan Gambar 4.7

$$\mathbf{T}_{S_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ X & \frac{x_1^2 - x_2^2}{x_1^2 + x_2^2} & \frac{2x_1x_2}{x_1^2 + x_2^2} & 0 \\ Y & \frac{2x_1x_2}{x_1^2 + x_2^2} & \frac{-x_1^2 + x_2^2}{x_1^2 + x_2^2} & 0 \\ Z & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$



Gambar 4.7 Mode Operasi 2 atau *Reversed Schönflies Mode* (S_2)

c) Mode Operasi 3: Mode Operasi Tambahan 1 (AM₁)

Mode operasi 3 atau mode operasi tambahan 1 (AM₁) dideskripsikan oleh persamaan 4.22–4.30. Sebuah mode operasi dengan jenis gerakan selain 4-DOF dapat terjadi apabila persamaan 4.22–4.30 dapat terpenuhi. Persamaan tersebut terdiri dari parameter a, b, c, d dan variabel $(X, Y, x_0, x_1, x_2, x_3)$. Variabel Z tidak muncul dalam persamaan mode operasi 3, hal ini mengindikasikan bahwa gerakan translasi terhadap sumbu- z merupakan gerakan independen.

$$< (b^2c^2 - c^2d^2)X^2 + (a^2d^2 - c^2d^2)Y^2, \quad (4.22)$$

$$(ab - ad - bc + cd)x_0^2 + (ab + ad + bc + cd)x_3^2, \quad (4.23)$$

$$(ab + ad - bc - cd)x_1^2 + (ab - ad + bc - cd)x_2^2, \quad (4.24)$$

$$(a - c)x_0x_1 + (-a - c)x_2x_3, \quad (4.25)$$

$$(b - d)x_0x_2 + (-a - c)x_1x_3, \quad (4.26)$$

$$(-ad + cd)Yx_1 + (bc - cd)Xx_2, \quad (4.27)$$

$$(ad - cd)Yx_0 + (bc + cd)Xx_3, \quad (4.28)$$

$$(bc - cd)Xx_0 + (-ad - cd)Yx_3, \quad (4.29)$$

$$(bc + cd)Xx_1 + (ad + cd)Yx_2 > \quad (4.30)$$

Jenis gerakan pada mode operasi tambahan dapat diketahui dengan cara mengidentifikasi persamaan 4.22-4.30 dan menginterpretasi persamaan tersebut menjadi sebuah gerakan (Kong, 2017). Satu persamaan dalam persamaan 4.22-4.30 mempunyai dua atau lebih variabel dalam satu persamaan. Hal ini mengindikasikan persamaan tersebut memiliki jenis gerakan yang dependen. Untuk memudahkan identifikasi, maka persamaan 4.22–4.30 diubah menjadi bentuk persamaan yang lebih sederhana sebagai berikut:

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{-d^2(a-c)(a+c)}{c^2(b-d)(d+b)}} \quad (4.31)$$

$$\frac{x_3}{x_0} = \sqrt{\frac{(c-a)(b-d)}{(a+c)(d+b)}} \quad (4.32)$$

$$\frac{x_2}{x_1} = \sqrt{\frac{(c-a)(d+b)}{(b-d)(a+c)}} \quad (4.33)$$

$$\frac{x_3}{x_0} \frac{x_2}{x_1} = \frac{(a-c)}{(a+c)} \quad (4.34)$$

$$\frac{x_3}{x_0} \frac{x_1}{x_2} = \frac{(b-d)}{(-d-b)} \quad (4.35)$$

$$\frac{X}{Y} \frac{x_2}{x_1} = \frac{(-ad+cd)}{-(bc-cd)} \quad (4.36)$$

$$\frac{X}{Y} \frac{x_1}{x_2} = \frac{-(ad+cd)}{(bc+cd)} \quad (4.37)$$

$$\frac{X}{Y} \frac{x_0}{x_3} = \frac{-(ad-cd)}{(bd+cd)} \quad (4.38)$$

$$\frac{X}{Y} \frac{x_3}{x_0} = \frac{(ad-cd)}{-(bd+cd)} \quad (4.39)$$

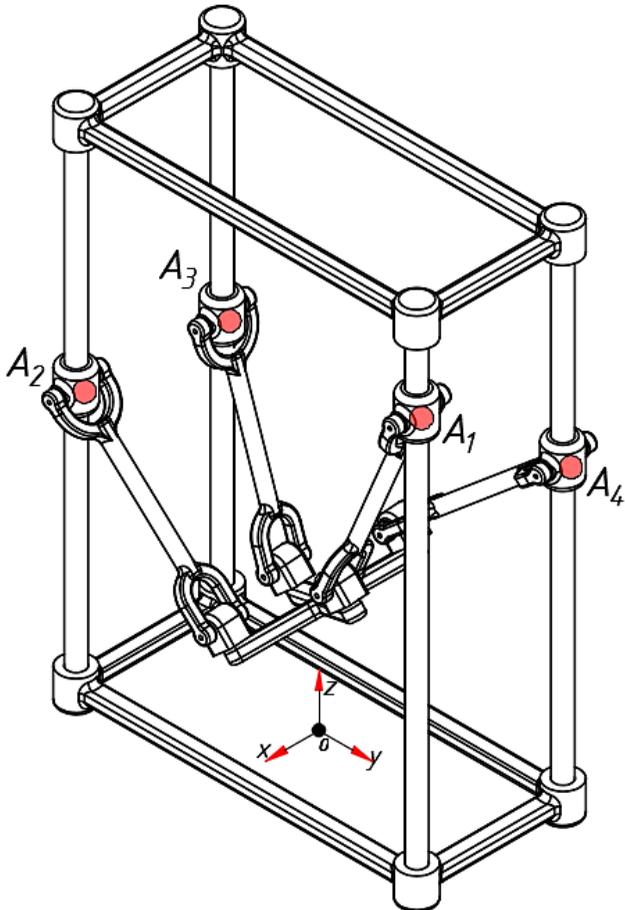
Persamaan 4.34–4.39 menunjukkan bentuk berbeda dari operasi perkalian antara persamaan 4.31–4.33, sehingga identifikasi jenis gerakan hanya dilakukan pada persamaan 4.31–4.33. Persamaan 4.31 menunjukkan gerakan translasi 1-DOF terhadap sumbu- x yang berkaitan dengan gerakan translasi terhadap sumbu- y . Persamaan 4.32 dan 4.33 menunjukkan gerakan rotasi 1-DOF dengan cara substitusi persamaan tersebut kedalam persamaan $x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$, sehingga didapatkan persamaan baru sebagai berikut:

$$X = Y \sqrt{\frac{d^2(c-a)(a+c)}{c^2(b-d)(d+b)}} \quad (4.40)$$

$$x_3 = x_0 \sqrt{\frac{(c-a)(b-d)}{(a+c)(d+b)}} = x_0 \alpha \quad (4.41)$$

$$x_2 = x_1 \sqrt{\frac{(c-a)(b+d)}{(a+c)(d+b)}} = x_1 \beta \quad (4.42)$$

Persamaan 4.40–4.45 menunjukkan bahwa Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1) mempunyai gerakan 3-DOF yang terdiri dari 1-DOF rotasi terhadap axis- x dan 2-DOF translasi pada bidang- xy . Jenis gerakan 3-DOF tersebut dapat terjadi apabila memenuhi syarat berupa nominator pada persamaan 4.40–4.42 bernilai lebih besar sama dengan 0 sehingga menghasilkan nilai real. Persamaan 4.40 tidak memiliki hasil nilai real apabila $(c-a)(a+c)d^2 \leq 0$, persamaan 4.41 tidak memiliki hasil nilai real apabila $(c-a)(b-d) \leq 0$ dan persamaan 4.42 tidak memiliki hasil nilai real apabila $(c-a)(b+d) \leq 0$. Berdasarkan nominator pada persamaan 4.40-4.42 dapat disimpulkan apabila syarat nominator pada persamaan 4.41 terpenuhi maka syarat nominator pada persamaan 4.40, 4.42 juga akan terpenuhi. Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1) ditunjukkan dengan Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU
Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1)

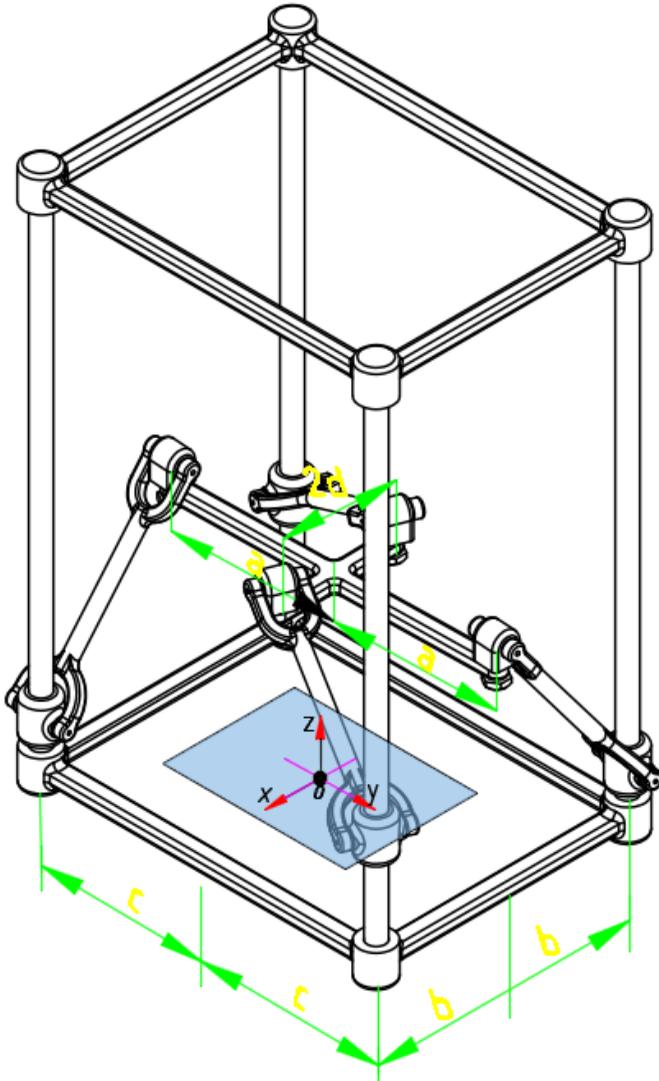
4.2.5 Hubungan Parameter Desain dan Mode Operasi Tambahan

Mode operasi tambahan dapat terjadi apabila parameter desain memenuhi persamaan $(c - a)(b - d) = 0$. Dari persamaan tersebut, terdapat tiga kondisi hubungan parameter desain *base* dan *platform* yang dapat memenuhi persamaan $(c - a)(b - d) = 0$. Kondisi tersebut antara lain: $(c = a)(b \neq d)$, $(c \neq a)(b = d)$, dan $(c = a)(b = d)$. Kondisi parameter desain dapat menghasilkan jenis gerakan tertentu dengan cara melakukan rekomputasi kembali.

a) Hubungan Parameter Desain 1

Kondisi hubungan parameter desain 1 adalah $(c = a)(b \neq d)$. Kondisi tersebut dapat menghasilkan tiga jenis mode operasi, yaitu: *Schönflies mode* (S_1), *reversed Schönflies mode* (S_2) dan Mode Operasi Tambahan 2 (AM_2). Mode Operasi Tambahan 2 (AM_2) memiliki gerakan 3-DOF berupa: 2-DOF translasi pada bidang- yz dan 1-DOF rotasi pada sumbu- x . Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat transformasi matriks Mode Operasi Tambahan 2 pada persamaan 4.46. Gambar 4.9 menunjukkan konfigurasi paralel robot 4-CRU yang dapat menghasilkan Mode Operasi Tambahan 2 (AM_2).

$$\mathbf{T}_{AM_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ Y & 0 & \frac{x_0^2 - x_1^2}{x_0^2 + x_1^2} & -\frac{2x_0x_1}{x_0^2 + x_1^2} \\ Z & 0 & \frac{2x_0x_1}{x_0^2 + x_1^2} & \frac{x_0^2 - x_1^2}{x_0^2 + x_1^2} \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

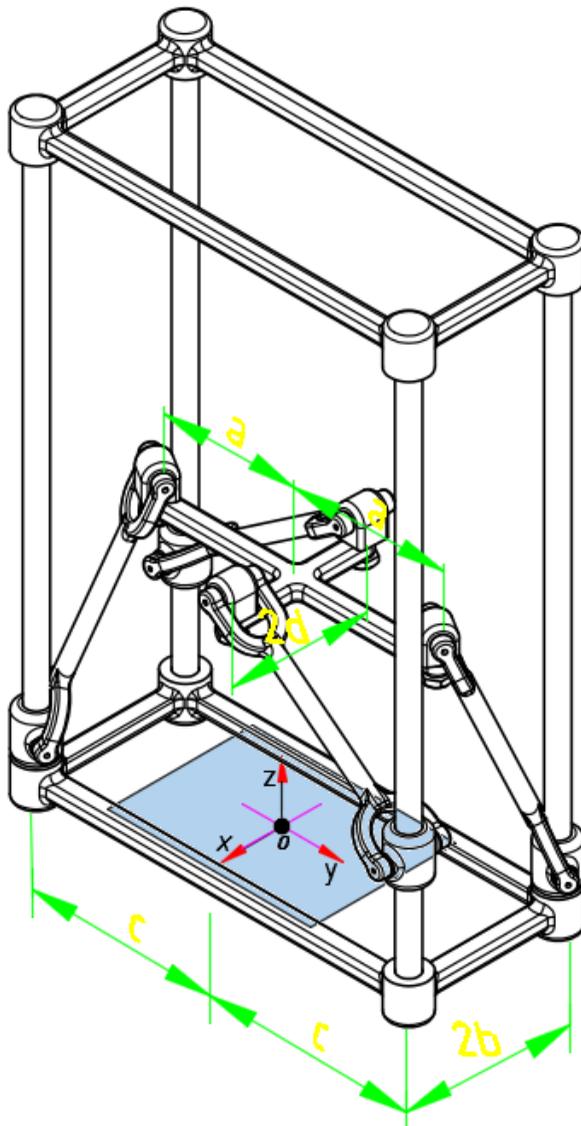


Gambar 4.9 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 1

b) Hubungan Parameter Desain 2

Kondisi hubungan parameter desain 2 yaitu $(c \neq a)(b = d)$. Kondisi tersebut menghasilkan tiga jenis mode operasi, yaitu: *Schönflies mode* (S_1), *reversed Schönflies mode* (S_2) dan Mode Operasi Tambahan 3 (AM_3). Mode operasi tambahan ini memiliki gerakan 3-DOF yang terdiri dari 2-DOF translasi pada bidang- xz dan 1-DOF rotasi pada sumbu- y . Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat transformasi matriks Mode Operasi Tambahan 3 pada persamaan 4.47. Gambar 4.10 menunjukkan konfigurasi paralel robot 4-CRU yang dapat menghasilkan Mode Operasi Tambahan 3 (AM_3).

$$\mathbf{T}_{AM_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ X & \frac{x_0^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_2^2} & 0 & \frac{2x_0x_2}{x_0^2 + x_2^2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ Z & -\frac{2x_0x_2}{x_0^2 + x_1^2} & 0 & \frac{x_0^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_2^2} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

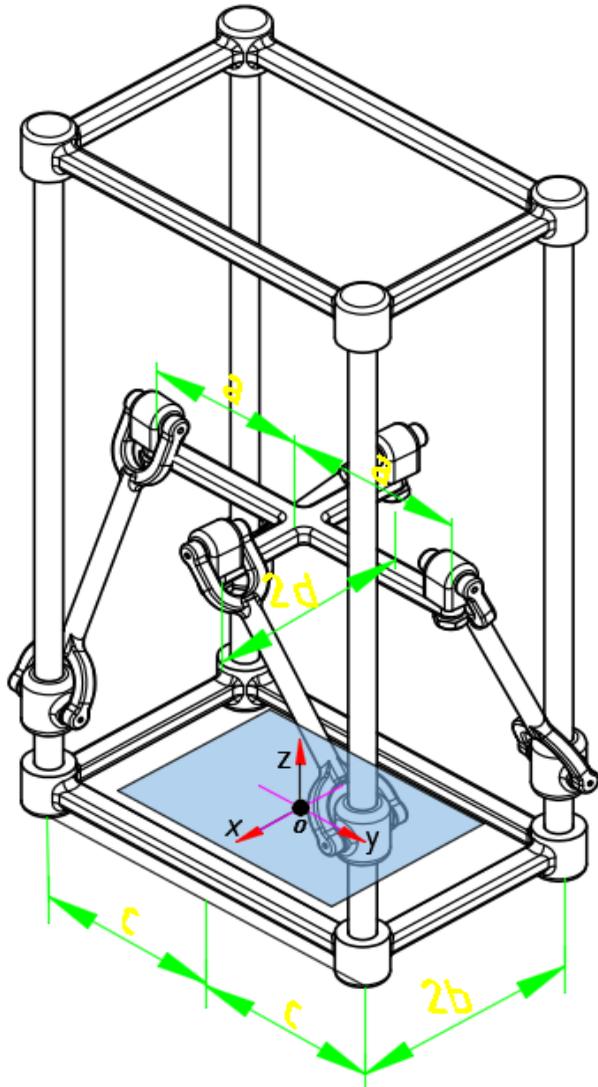


Gambar 4.10 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 2

c) Hubungan Parameter Desain 3

Kondisi hubungan parameter desain 3 adalah $(c = a)(b = d)$. Kondisi ini menghasilkan tiga jenis mode operasi, yaitu *Schönflies mode* (S_1), *reversed Schönflies mode* (S_2) dan Mode Operasi Tambahan 4 (AM_4). Mode operasi tambahan ini memiliki gerakan 4-DOF yang terdiri dari 3-DOF translasi dan 1-DOF rotasi. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat transformasi matriks Mode Operasi Tambahan 3 pada persamaan 4.48. Gambar 4.11 menunjukkan konfigurasi paralel robot 4-CRU yang dapat menghasilkan Mode Operasi Tambahan 4 (AM_4).

$$\mathbf{T}_{AM_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -Yx_2 & \frac{x_0^2 + x_1^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{2x_1x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{2x_0x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} \\ x_1 & \frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2}{2x_1x_2} & \frac{x_0^2 - x_1^2 + x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{2x_0x_1}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} \\ Y & \frac{2x_1x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & -\frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} \\ Z & -\frac{2x_0x_2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{2x_0x_1}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} & \frac{x_0^2 - x_1^2 - x_2^2}{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$



Gambar 4.11 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU dalam Hubungan Parameter Desain 3

4.2.6 Konfigurasi Singularitas Mode Transisi Mekanisme Paralel Robot 4-CRU

Konfigurasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU telah dijelaskan sebelumnya memiliki beberapa mode operasi. Suatu mode operasi dapat berubah ke dalam mode operasi lain dengan cara melewati mode transisi (Nurahmi, 2016). Mode transisi atau biasa disebut sebagai *constraint singularity* (Kong, 2017). Terdapat dua metode untuk menentukan mode transisi, diantaranya: menggunakan matriks *Jacobian* dan menggunakan parameter desain dan gerakan (*design parameter* dan *motion parameter*) (Kong, 2017). Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah substitusi parameter desain dan gerakan ke dalam persamaan *constraint* (2.2).

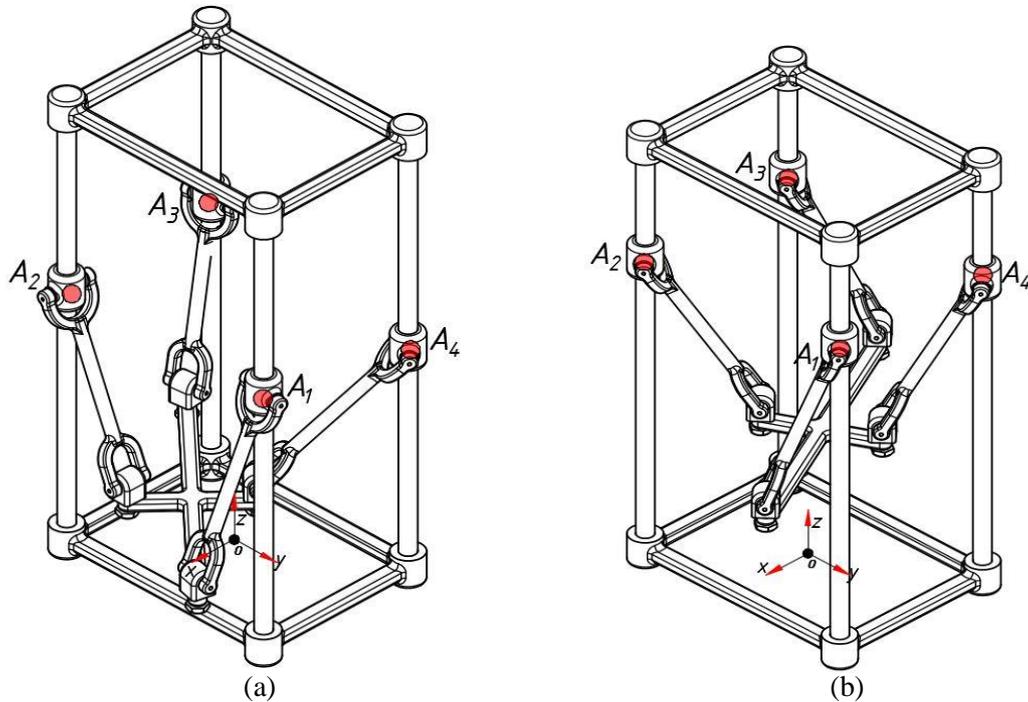
Tiap parameter desain menghasilkan beberapa mode operasi, diantaranya: Mode Operasi *Schönflies* (S_1), Mode Operasi *reversed Schönflies mode* (S_2) dan Mode Operasi Tambahan (AM_i ; $i =$ jenis parameter desain). Mode Operasi *Schönflies mode* (S_1) tidak dapat berubah secara langsung ke dalam Mode Operasi *reversed Schönflies mode* (S_2) dikarenakan parameter gerakan yang dihasilkan dari kedua mode tidak dapat menyelesaikan persamaan *Normalization Equation*, $x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - 1 = 0$. Mode Operasi *Schönflies mode* (S_1) dapat berpindah ke dalam Mode Operasi *Reversed Schönflies* (S_2) dengan cara melewati Mode Operasi Tambahan (AM_i) ($i = 1, 2, 3, 4$) terlebih dahulu. Terdapat beberapa konfigurasi singularitas mode transisi yang terjadi dimana paralel robot 4-CRU dapat berpindah dari Mode Operasi *Schönflies mode* (S_1) menjadi Mode Operasi Tambahan (AM_i), begitu juga sebaliknya, yang dinamakan sebagai Mode Transisi.

Tabel 4.2 menunjukkan syarat kondisi yang dibutuhkan untuk mekanisme paralel robot 4-CRU dapat berpindah dari satu mode operasi ke mode operasi lainnya. Gambar 4.12-4.13 menunjukkan representasi perubahan mode operasi dari *Schönflies mode* (S_1) menjadi *reversed Schönflies mode* (S_2) melewati Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1).

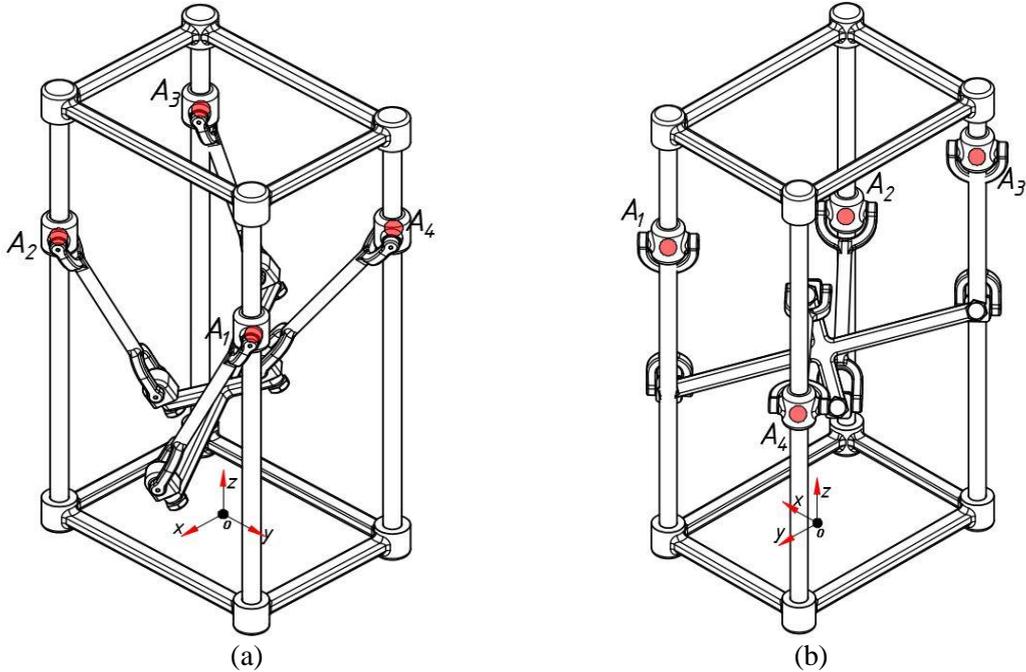
Tabel 4.2 Konfigurasi Singularitas Mode Transisi dari Tiap Perubahan Mode Operasi pada 4-CRU

No.	Mode Transisi	Syarat Kondisi	Deskripsi
1.	$S_1 \leftrightarrow S_2$	-	Tidak ada konfigurasi
2.	$S_1 \leftrightarrow AM_1$	<ul style="list-style-type: none"> • $a \neq b \neq c \neq d$ • $(c - a)(b - d) > 0$ • $x_1 = x_2 = 0$ • $X = Y \sqrt{\frac{d^2(c-a)(a+c)}{c^2(b-d)(d+b)}}$ • $x_3 = x_0 \sqrt{\frac{(c-a)(b-d)}{(a+c)(d+b)}}$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan rotasi pada sumbuZ, gerakan translasi dependen 3-DOF pada bidang-XYZ, dan persamaan $(c - a)(b - d) = 0$ terpenuhi.
3.	$S_1 \leftrightarrow AM_2$	<ul style="list-style-type: none"> • $a = c; b \neq d$ • $x_1 = x_2 = x_3 = X = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi 2-DOF pada bidang-YZ.
4.	$S_1 \leftrightarrow AM_3$	<ul style="list-style-type: none"> • $a \neq c; b = d$ • $x_1 = x_2 = x_3 = Y = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi 2-DOF pada bidang-XZ.
5.	$S_1 \leftrightarrow AM_4$	<ul style="list-style-type: none"> • $a = c; b = d$ • $x_1 = x_2 = x_3 = 0$ • $Xx_1 + Yx_2 = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi dependen di bidang-XY

6.	$AM_1 \leftrightarrow S_2$	<ul style="list-style-type: none"> • $a \neq b \neq c \neq d$ • $(c - a)(b - d) > 0$ • $x_0 = x_3 = 0$ • $X =$ $Y \frac{\sqrt{d^2(c-a)(a+c)}}{\sqrt{c^2(b-d)(d+b)}}$ • $x_2 =$ $x_1 \sqrt{\frac{(c-a)(b+d)}{(a+c)(d+b)}}$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan rotasi pada sumbu-Z dengan orientasi <i>platform</i> berputar sebesar 180° (<i>half-turn</i>), gerakan translasi dependen 3-DOF pada bidang-XYZ, dan persamaan $(c - a)(b - d) = 0$ terpenuhi
7.	$AM_2 \leftrightarrow S_2$	<ul style="list-style-type: none"> • $a = c; b \neq d$ • $x_0 = x_2 = x_3 =$ $X = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi 2-DOF pada bidang-YZ.
8.	$AM_3 \leftrightarrow S_2$	<ul style="list-style-type: none"> • $a \neq c; b = d$ • $x_0 = x_1 = x_3 =$ $Y = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi 2-DOF pada bidang-XZ.
9.	$AM_4 \leftrightarrow S_2$	<ul style="list-style-type: none"> • $a = c; b = d$ • $x_0 = x_3 = 0$ • $Xx_1 + Yx_2 = 0$ 	Konfigurasi didapatkan dengan cara gerakan translasi dependen bidang-XY dan gerakan rotasi pada sumbu-Z dengan orientasi <i>platform</i> berputar sebesar 180° .

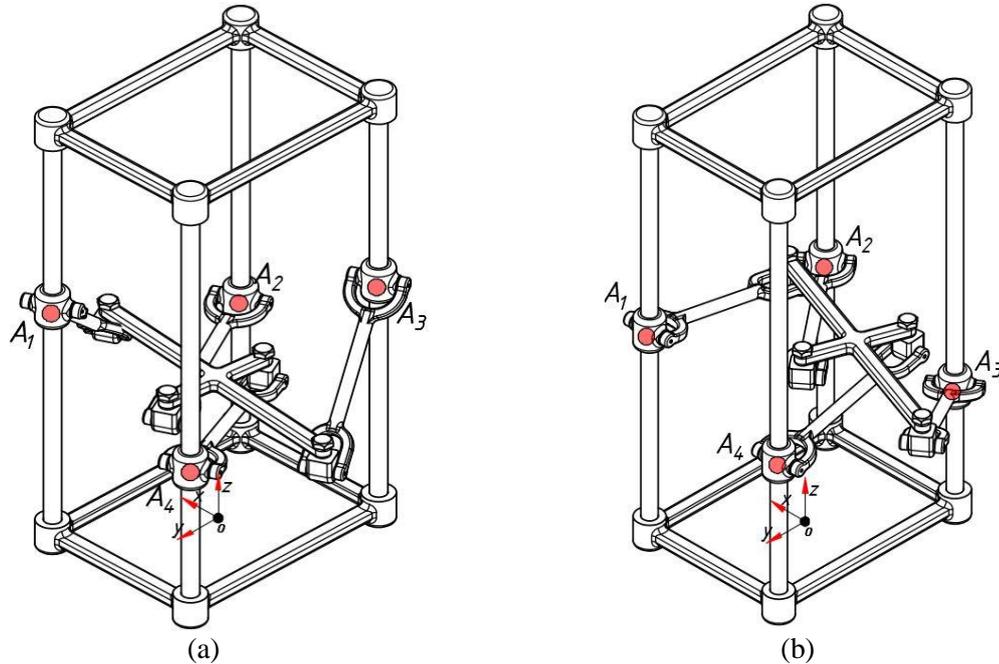


Gambar 4.12 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi ($S_1 \leftrightarrow AM_1$)
 (A) Konfigurasi Mode Operasi *Schönflies* (S_1), (B) Konfigurasi Mode Transisi ($S_1 \leftrightarrow AM_1$)



Gambar 4.13 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi (AM_1)

(A) Konfigurasi Mode Operasi Tambahan 1 *Tilt* 30° (AM_1), (B) Konfigurasi Mode Operasi Tambahan 1 *Tilt* 150° (AM_1)



Gambar 4.14 Konfigurasi Paralel Robot 4-CRU Mode Transisi ($AM_1 \leftrightarrow S_2$)
 (A) Konfigurasi Mode Operasi Transisi ($AM_1 \leftrightarrow S_2$), (B) Konfigurasi Mode Operasi *Reversed Schönflies* (S_2)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini berupa beberapa poin, diantaranya:

1. Mekanisme paralel robot 4-CRU dapat menghasilkan beberapa mode operasi sesuai dengan parameter desain dan parameter gerakan, mode operasi tersebut antara lain: Mode Operasi *Schönflies* (S_1), Mode Operasi *Reversed Schönflies* (S_2), Mode Operasi Tambahan ($AM_i; i = 1 \dots 4$) dan Mode Operasi Transisi.
2. Mode operasi pada mekanisme paralel robot 4-CRU mempunyai jenis gerakan masing masing. Mode Operasi *Schönflies* (S_1) mempunyai jenis gerakan berupa 3-DOF gerakan translasi pada bidang-XY, YZ, XZ dan 1-DOF gerakan rotasi pada sumbu-Z. Mode Operasi *Reversed Schönflies* (S_2) mempunyai jenis gerakan berupa 3-DOF gerakan translasi pada bidang-XY, YZ, ZX dan 1-DOF gerakan rotasi pada sumbu-Z dengan orientasi platform terbalik 180° terhadap bidang XY. Mode Operasi Tambahan 1 (AM_1) memiliki jenis gerakan berupa 1-DOF gerakan rotasi dan 2-DOF gerakan translasi. Mode Operasi Tambahan 2 (AM_2) memiliki jenis gerakan berupa 2-DOF gerakan translasi pada bidang-YZ dan 1-DOF gerakan rotasi pada sumbu-X. Mode Operasi Tambahan 3 AM_3 memiliki jenis gerakan berupa 2-DOF gerakan translasi pada bidang-XY dan 1-DOF rotasi pada sumbu-Y. Mode operasi Tambahan 4 (AM_4) memiliki jenis gerakan berupa 3-DOF gerakan translasi pada bidang-XY, YZ, ZX dan 1-DOF gerakan rotasi.
3. Parameter desain yang memenuhi persamaan $(c - a)(b - d) = 0$ dapat menghasilkan satu mode operasi tambahan. Berdasarkan persamaan tersebut, terdapat tiga kondisi yang memenuhi persamaan $(c - a)(b - d) = 0$. Kondisi parameter desain pertama $(c = a)(b \neq d)$ menghasilkan

Mode Operasi Tambahan 2 (AM_2). Kondisi parameter desain kedua ($c \neq a$)($b = d$) menghasilkan Mode Operasi Tambahan 3 (AM_3). Kondisi parameter desain ketiga ($c = a$)($b = d$) menghasilkan Mode Operasi Tambahan 4 (AM_4).

4. Mekanisme paralel robot 4-CRU memiliki kondisi singularitas berdasarkan parameter desain dan parameter gerakan untuk setiap perubahan mode operasi yang berjumlah delapan kondisi, yaitu saat perubahan mode operasi: $S_1 \leftrightarrow AM_1$, $S_1 \leftrightarrow AM_2$, $S_1 \leftrightarrow AM_3$, $S_1 \leftrightarrow AM_4$, $AM_1 \leftrightarrow S_2$, $AM_2 \leftrightarrow S_2$, $AM_3 \leftrightarrow S_2$, dan $AM_4 \leftrightarrow S_2$.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah menyelesaikan penelitian ini, antara lain:

1. Diperlukannya penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi desain mekanisme 4-CRU pada alat *3D-printing* bangunan.
2. Diperlukannya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh massa terhadap dinamika mekanisme paralel robot-4 CRU.
3. Diperlukannya penelitian lebih lanjut mengenai kondisi *constraint singularity* pada mekanisme paralel robot-4 CRU

DAFTAR PUSTAKA

- Cor, A. (2016). **Catalog of Apis Cor Robot**. Rusia: Apis Cor.
- Coste, M., & Demdah, K. M. 2015. "Extra Modes of Operation and Self-Motions in Manipulators Designed for Schoenflies Motion". **Journal of Mechanism and Robotics**, 7:97-113.
- 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 Syntethic Elastic Structure". **Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS)**, 1-3.
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. 2016. "3D Printing of Buildings and Building Components as The Future of Sustainable Construction?". **Procedia Engineering**, 151:292-299.
- Jakupovic, A. 2016. **D-Shape - Visit Report**. Denmark: 3D Printhuset.
- Kong, X. 2016. "Reconfiguration Analysis of a 4-DOF 3-RER Parallel Manipulator with Equilateral Triangular Base and Moving Platform". **Mechanism and Machine Theory**, 98:180-189.
- KUKA. 2017. **Catalog Robots KR 30, 60-3; KR 30 L16-2**. Augsburg: KUKA Roboter GMBH.
- Li, Y. H., Ma, Y., Liu, S. T., Luo, Z. J., Mei, J. P., Huang, T., & Chetwynd, D. G. 2014. "Integrated Design of 4-DOF High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot". **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 63:185-188.
- Nurahmi, L., Caro, S., Wenger, P., Schadlbauer, J., & Husty, M. 2016. "Reconfiguration Analysis of a 4-RUU Parallel Manipulator". **Mechanism and Machine Theory**, 96:269-289.

- Nurahmi, L., Solichin, M., Harnany, D., & Kurniawan, A. 2017. "Motion type of 3-rps parallel manipulator for ankle rehabilitation device". **International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation**. 74-79.
- Pandilov, Z., & Dukovski, V. 2014. "Comparison of The Characteristics Between Serial and Parallel Robots". **Acta Technica Corviniensis**, 8:143-160.
- Pirjan, A., & Petrosanu, D.-m. 2013. "The Impact of 3D Printing Technology on The Society and Economy". **Journal of Information Systems and Operations Management**, 7:163-173.
- Riley, K. F., Hobson, M. P., & Bence, S. J. 2006. **Mathematical Methods for Physics and Engineering**. Edinburgh: Cambridge University Press.
- Sakin, M., & Kiroglu, Y. C. 2017. "3D Printings of Buildings: Construction of The Sustainable Houses of The Future by BIM". **Energy Procedia**, 10:702-711.
- Tsai, L. W. (1999). **Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators**. United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC.
- 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 Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing**, 45:730-740.

BIODATA



Pradiktio Putrayudanto

merupakan anak sulung dari dua bersaudara dan putra dari keluarga Bapak Ir. Suhartanto dan Dr. Dwinita W. Utami. Penulis lahir Bogor, 27-Maret-1995. Penulis memulai pendidikan di TK Tri Bhakti, Kota Bogor. Penulis melanjutkan jenjang pendidikan dasar di SDN Sukadamai 3, Kota Bogor, pendidikan menengah di SMPN 5, Kota Bogor, pendidikan menengah atas di SMAN 5, Kota

Bogor dan pendidikan vokasi di Politeknik Negeri Jakarta. (PNJ) Penulis lalu melanjutkan pendidikan tinggi sarjana sebagai mahasiswa angkatan terakhir Lintas Jalur pada tahun 2016 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Departemen Teknik Mesin.

Semasa kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis aktif di beberapa kegiatan. Pertama, penulis merupakan anggota *Board of Committee, Society of Petroleum Engineers*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember *Student Chapter*. Kedua, penulis juga tergabung dalam tim Lomba Nasional Tahunan Rancang Bangun Mesin 2017 mewakili Departemen Teknik Mesin, ITS dan berhasil menjuarai Juara 1 dalam lomba tersebut. Terakhir, penulis aktif sebagai anggota laboratorium di Laboratorium Otomasi Industri, Departemen Teknik Mesin, ITS.

Untuk informasi dan saran yang dibutuhkan dari dan kepada penulis dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut: tio.yudanto@gmail.com