

TUGAS AKHIR - TM 141585

**DESAIN *SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL*  
ROBOT DENGAN ORIENTASI TETAP BERDASARKAN  
*INTERFERENCE-FREE WORKSPACE***

VINCENTIUS ADIYANTO HANDOJO  
NRP 02111440000136

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 *SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL*  
*ROBOT* DENGAN ORIENTASI TETAP  
BERDASARKAN *INTERFERENCE-FREE*  
*WORKSPACE***

**VINCENTIUS ADIYANTO HANDOJO  
NRP 02111440000136**

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

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





FINAL PROJECT – TM141585

**DESIGN OF SUSPENDED CABLE DRIVEN  
PARALLEL ROBOT WITH CONSTANT  
ORIENTATION BASED ON THE INTERFERENCE-  
FREE WORKSPACE**

**VINCENTIUS ADIYANTO HANDOJO  
NRP. 02111440000136**

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

**BACHELOR DEGREE PROGRAM  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2018**



**DESAIN *SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL  
ROBOT DENGAN ORIENTASI TETAP  
BERDASARKAN INTERFERENCE-FREE  
WORKSPACE***

**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 :

**VINCENTIUS ADIYANTO HANDOJO**

NRP. 02111440000136

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 1986201712037
2. Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng. Ph.D. (Penguji I)  
NIP. 196912031994031001
3. Prof. Dr. Ing. Ir. I Made Londen Batan, M.Eng. (Penguji II)  
NIP. 195811061986011001
4. Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D. (Penguji III)  
NIP. 197511202002121002

**SURABAYA**

**JANUARI, 2018**



**DESAIN SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL  
ROBOT DENGAN ORIENTASI TETAP BERDASARKAN  
INTERFERENCE-FREE WORKSPACE**

**Nama** : Vincentius Adiyanto Handoyo  
**NRP** : 2114100136  
**Pembimbing** : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

**Abstrak**

*Proses evakuasi korban bencana alam sangatlah sulit, mengingat keterbatasan kemampuan para tim penyelamat dan alat bantu yang masih mempunyai cakupan daerah kerja yang relatif sempit. Cable driven parallel robot (CDPR) merupakan sebuah robot yang dapat membantu proses evakuasi dan memiliki jangkauan yang luas serta kecepatan mobilitas yang tinggi. Penelitian kali ini bertujuan untuk mendapatkan geometric model, static model, dan kinematic model dari Cable Driven Parallel berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan. Selain itu, tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan dimensi (panjang, lebar, tinggi) platform dan susunan kabel dari base ke platform agar mencapai interference-free workspace terbesar.*

*Robot ini membutuhkan analisa yang akurat agar memenuhi tujuannya. Analisa tersebut antara lain adalah wrench feasible workspace (WFW), twist feasible workspace (TFW), cable to cable interference, dan cable to platform interference. Wrench feasible workspace merupakan sebuah proses pengujian statik CDPR. Twist feasible workspace bertujuan untuk menguji robot dari segi kinematikanya. Cable-cable interference dan cable-platform interference secara berurutan bertujuan untuk menghindari suatu tabrakan antar kabel dengan kabel dan kabel dengan platform CDPR. Penelitian dibagi menjadi tiga studi kasus. Perbedaan setiap studi kasus berada pada wrench external (gaya dan momen) yang berkerja pada mobile platform.*

*Desain optimum telah didapatkan dari setiap studi kasus berdasarkan overall workspace terbesar. Pada studi kasus 1 didapatkan dua desain dengan workspace terbesar, yaitu mencapai 64,8% volume jangkauan robot. Pada studi kasus 2 menghasilkan tujuh desain dengan workspace terbesar, yaitu mencapai 19,6% dari volume jangkauan robot. Pada studi kasus 3 didapatkan empat desain dengan workspace terbesar, yaitu mencapai 10,6% dari volume jangkauan robot.*

**Kata kunci:** *Cabel Driven Parallel Robot, wrench feasible workspace, twist feasible workspace, cable-cable inteference, cable-platform inteference.*

# ***DESIGN OF SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL ROBOT WITH CONSTANT ORIENTATION BASED ON THE INTERFERENCE-FREE WORKSPACE***

**Name** : Vincentius Adiyanto Handojo  
**NRP** : 2114100136  
**Supervisor** : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

## **Abstract**

*The evacuation process of natural disaster would be a difficult job, seeing that there are limits to the abilities of rescue teams as human beings and tools that exist right now still have a narrow workspace. Cable driven parallel robot (CDPR) is a robot which are designed to help evacuations. It has a large workspace and high mobility. This research was conducted in order to obtain the geometric model, static model, dan kinematic model of Cable Driven Parallel Robot based on pre-determined design parameters. In addition, the purpose of this research is also to get dimensions (length, width, and height) of the mobile platform and cable arrangements of the robot from base to mobile platform in order to achieve the largest interference-free workspace.*

*The designing of this robot requires accurate analyses to achieve its objectives. The analyses include wrench feasible workspace (WFW), twist feasible workspace (TFW), cable to cable interference, and cable to platform interference. Wrench feasible workspace is a CDPR static testing. Twist feasible workspace aim to test kinematics of the robot. Cable to cable interference and cable to platform interference aim to avoid collision beetwen cables and between CDPR's platform and cables, respectively. This study will be divided into three case studies. The Difference between each case study is the external wrench (forces and moments) that are applied on the mobile platform.*

*The optimum design has been generated from each case study based on the largest overall workspace. In the first case*

*study, two designs with the largest workspace are generated, which reached 64,8% of the robot's range. In the second case study, seven designs with the largest workspace reaching 19,6% of the robot's range are produced. In the third case study, four designs with the largest workspace are generated, which reached 10,6% of the robot's range.*

**Keywords: Cabel Driven Parallel Robot, wrench feasible workspace, twist feasible workspace, cable-cable inteference, cable-platform inteference.**

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan YME karena atas rahmat-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul “**DESAIN *SUSPENDED CABLE DRIVEN PARALLEL ROBOT* DENGAN ORIENTASI TETAP BERDASARKAN *INTERFERENCE-FREE WORKSPACE***” telah diselesaikan. Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam bentuk apapun, baik secara langsung maupun tidak langsung, diantaranya kepada:

1. Papa Agus Handojo, Mama Tjhai Boen Nie, Kornelius Bandonu Handojo, Leonardus Ricky Handojo, Om Johan Handojo, Tante Shirly Kartika, Damir Handojo, Grace Handojo, Setiawan.
2. Ibu Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Pembimbing Tugas Akhir penulis.
3. Dr. Stephane Caro dari IRCCyN Ecole centrale de Nantes, France.
4. Seluruh dosen, staff tendik, angkatan 2014, Teman-teman Lab Mekanika Fluida, Lab Otomasi, Lab Metalurgi dan Lab Perpindahan Panas Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Keluarga besar KMK ITS.
6. Pecinan dengan anggota Leonard, Bernard, Kelvin, Edwin, dan Jeffrey.
7. Catherine yang selalu mendoakan dan mendukung.
8. Grup “keep moving on” dengan anggota Louis, Chalista, Andreas, Aless, Nico, dan Joshua.
9. 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, Januari 2018

Penulis

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI .....	i
DAFTAR GAMBAR .....	iii
DAFTAR TABEL .....	v
DAFTAR SIMBOL .....	vii
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Batasan Masalah Penelitian .....	4
1.3. Rumusan Masalah Penelitian .....	5
1.4. Tujuan Penelitian .....	5
1.5. Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Cable Driven Parallel Robot (CDPR)</i> .....	7
2.2. <i>Fully-constrained dan Suspended CDPR</i> .....	9
2.2.1. <i>Fully-constrained CDPR</i> .....	9
2.2.2. <i>Suspended CDPR</i> .....	10
2.3. <i>Geometric Model CDPR</i> .....	10
2.4. <i>Static Model CDPR</i> .....	12
2.5. <i>Wrench Feasible Workspace</i> .....	13
2.6. <i>Capacity Margin</i> .....	15
2.7. <i>Kinematic Model</i> .....	17
2.8. <i>Twist Feasible Workspace</i> .....	17
2.9. <i>Cable to Cable Interference</i> .....	18
2.10. <i>Cable to Platform Interference</i> .....	19
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>23</b>
3.1. <i>Flowchart Penelitian</i> .....	23
3.1.1. <i>Flowchart Pencarian Cable Arrangement dan Dimensi Platform dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak ...</i>	24
A. <i>Flowchart Wrench Feasible Workspace</i> .....	24
B. <i>Flowchart Twist Feasible Workspace</i> .....	25
C. <i>Flowchart Cable to Cable Interference dan Cable to Platform Interference</i> .....	26
3.2. <i>Proses Penelitian</i> .....	26
3.2.1. <i>Studi Literatur</i> .....	26

3.2.2.	Identifikasi dan Perumusan Masalah .....	26
3.2.3.	Parameter dan Variabel Desain CDPR .....	27
3.2.4.	Mencari <i>Cable Arrangement</i> dan Dimensi <i>Platform</i> dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak.....	27
	A. <i>Wrench Feasible Workspace</i> dan <i>Capacity</i> <i>Margin</i> .....	27
	B. <i>Twist Feasible Workspace</i> .....	28
	C. <i>Cable to Cable Interference</i> .....	28
	D. <i>Cable to Platform Interference</i> .....	28
3.2.5.	Studi Kasus.....	29
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>31</b>
4.1.	Penentuan Parameter Desain CDPR.....	31
4.1.1.	Parameter Desain CDPR .....	31
4.1.2.	Variabel Desain CDPR.....	32
4.2.	Output yang Diinginkan .....	34
4.3.	Hasil dan Analisa Studi Kasus.....	35
4.4.1.	Studi Kasus 1 .....	36
4.4.2.	Studi Kasus 2 .....	41
4.4.3.	Studi Kasus 3 .....	48
4.5.	Perbedaan Setiap Studi Kasus .....	52
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>55</b>
5.1.	Kesimpulan.....	55
5.2.	Saran.....	55
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>57</b>
	<b>LAMPIRAN 1 GAMBAR SELURUH CABLE ARRANGMENT</b> .....	<b>59</b>
	<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Jumlah bencana yang terjadi di Indonesia tahun 2016 ( <a href="http://dibi.bnppb.go.id/bnppb/">http://dibi.bnppb.go.id/bnppb/</a> ) .....	1
Gambar 1.2. Daerah <i>ring of fire</i> .....	2
Gambar 1.3. Proses pencarian korban secara manual .....	3
Gambar 1.4. Proses evakuasi bencana alam dibantu dengan alat berat.....	3
Gambar 2.1. <i>Cable Driven Parallel Robot</i> dengan empat kabel (Gosselin, <i>Cable-Driven Parallel Mechanisms: State of The Art and</i> , 2013).....	7
Gambar 2.2. <i>Skycam</i> (Caro & Martin, 2016).....	8
Gambar 2.3. Cable array robot for material handling (United State Patent No. US 6,826,452 B1, 2004) .....	9
Gambar 2.4. Bentuk fisik (a) <i>Fully-constrained</i> dan (b) <i>suspended</i> CDPR (Bosscher, 2004) .....	10
Gambar 2.5. <i>Geometric model</i> CDPR .....	11
Gambar 2.6. <i>Wrench feasible workspace</i> dari <i>planar</i> CDPR (a) dalam dimensi gaya (b) dimensi <i>wrench</i> (Nurahmi, Pramujati, Caro, & Jeffrey, 2017).....	15
Gambar 2.7. <i>Wrench Feasible Workspace</i> pada planar CDPR (Gouttefarde, Daney, & Merlet, 2011) .....	16
Gambar 2.8. <i>Isocontours</i> dari <i>index s</i> dalam Newtons sebagai fungsi dari pose (Guay, Cardou, Ruiz, & Caro, 2014) .....	16
Gambar 2.9. Skematik dari dua kabel .....	18
Gambar 2.10. Skematik <i>cable to platform interference</i> .....	20
Gambar 3.1. <i>Flowchart</i> penelitian.....	23
Gambar 3.2. <i>Flowchart wrench feasible workspace</i> .....	24
Gambar 3.3. <i>Flowchart twist feasible workspace</i> .....	25
Gambar 3.4. <i>Flowchart cable-cable interference</i> dan <i>cable-platform interference</i> .....	26
Gambar 4.1. Skematik <i>suspended</i> CDPR.....	31
Gambar 4.2. Dimensi <i>mobile platform</i> .....	32
Gambar 4.3. Contoh <i>suspended</i> CDPR pada <i>cable arrangement</i> ke-7.....	34

Gambar 4.4. (a) <i>Desired workspace</i> yang terbagi dalam titik-titik pose (b) <i>Boundary workspace</i> yang diinginkan .....	35
Gambar 4.5. Skematik <i>cable arrangement</i> (a) 11, (b) 17, dan (c) 1 .....	39
Gambar 4.6. <i>Overall workspace</i> dari <i>cable arrangement</i> (a) 11 dan (b) 17 .....	40
Gambar 4.7. <i>Tampak bawah twist feasible workspace</i> dari <i>cable arrangement</i> (a) 11 dan (b) 17.....	41
Gambar 4.8. Skematik gaya eksternal pada <i>mobile platform studi kasus 2</i> .....	42
Gambar 4.9. Skematik <i>cable arrangement 22</i> .....	43
Gambar 4.10. Skematik gaya eksternal pada <i>mobile platform studi kasus 3</i> .....	48
Gambar 4.11. Skematik <i>cable arrangement 24</i> .....	49

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Rancangan Desain dengan Workspace Terbesar.....	27
Tabel 3.1. Perincian Ketiga Studi Kasus.....	29
Tabel 4.1. Rincian Desain dengan <i>Workspace</i> Terbesar Studi Kasus 1 .....	37
<i>Tabel 4.2. Workspace dari Setiap Tahapan Pencarian Cable Arrangement dan Dimensi Platform dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 1 .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabel 4.3. Rincian Desain dengan Workspace Terbesar Studi Kasus 2 .....</i>	<i>42</i>
Tabel 4.4. <i>Workspace</i> dari Setiap Tahapan Pencarian <i>Cable Arrangement</i> dan <i>Dimensi Platform</i> dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 2 .....	44
Tabel 4.5. Rincian Desain dengan <i>Workspace</i> Terbesar Studi Kasus 3 .....	49
Tabel 4.6 <i>Workspace</i> dari Setiap Tahapan Pencarian <i>Cable Arrangement</i> dan <i>Dimensi Platform</i> dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 3 .....	50

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR SIMBOL

<b>CDPR</b>	= <i>Cable Driven Parallel Robot</i>
<b>A</b>	= <i>anchor point</i>
<b>B</b>	= <i>exit point</i>
<b><math>\mathcal{F}_b</math></b>	= <i>frame base</i>
<b><math>\mathcal{F}_p</math></b>	= <i>frame platform</i>
<b>CA</b>	= <i>cable arrangement</i>
<b>lp</b>	= <i>panjang platform</i>
<b>wp</b>	= <i>lebar platform</i>
<b>lb</b>	= <i>panjang base</i>
<b>wb</b>	= <i>lebar base</i>
<b>hb</b>	= <i>tinggi base</i>
<b>p</b>	= <i>test pose</i>
<b>W</b>	= <i>wrench</i>
<b><math>w_e</math></b>	= <i>wrench eksternal</i>
<b><math>\tau</math></b>	= <i>tegangan kabel</i>
<b>J</b>	= <i>jacobian matriks</i>
<b>t</b>	= <i>twist</i>
<b>i</b>	= <i>kecepatan kabel</i>
<b><math>l_x</math></b>	= <i>offset terhadap sumbu y</i>
<b><math>l_y</math></b>	= <i>offset terhadap sumbu x</i>
<b>n</b>	= <i>jumlah test pose</i>
<b><math>n_{WFW}</math></b>	= <i>jumlah test pose dari wrench feasible workspace</i>
<b><math>n_{TFW}</math></b>	= <i>jumlah test pose dari twist feasible workspace</i>
<b><math>n_{CCIFW}</math></b>	= <i>jumlah test pose dari cable to cable interference free workspace</i>
<b><math>n_{CPIFW}</math></b>	= <i>jumlah test pose dari cable to platform interference free workspace</i>

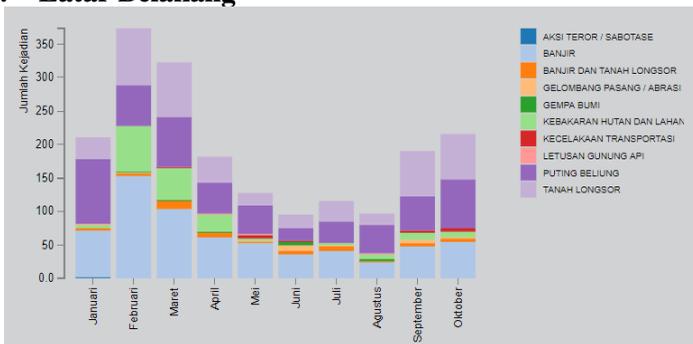
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB I

## PENDAHULUAN

Bab ini akan menjelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian. Penjelasan lebih lanjut akan dijelaskan pada subbab di bawah ini.

### 1.1. Latar Belakang



**Gambar 1.1.** Jumlah bencana yang terjadi di Indonesia tahun 2016 (<http://dibi.bnpb.go.id/bnpb/>)

Gambar 1.1 menunjukkan jumlah bencana yang terjadi di Indonesia pada Januari 2016 hingga Oktober 2016 (<http://dibi.bnpb.go.id/bnpb/>). Jumlah bencana yang terjadi di Indonesia berfluktuasi setiap bulannya dan juga menunjukkan angka yang cukup tinggi. Jumlah kejadian tertinggi pada gambar tersebut terjadi pada Februari 2016, yaitu melebihi 350 kejadian. Hal ini berarti ada sekitar 12 kejadian setiap harinya dalam bulan tersebut. Dampak dari bencana tersebut sangatlah banyak mulai dari harta, tempat tinggal, maupun nyawa.



**Gambar 1.2.** Daerah *ring of fire*

Gambar 1.2 memperlihatkan daerah *ring of fire* atau Circum-Pasifik yang ditandai dengan warna merah muda. Indonesia merupakan salah satu negara yang dilewati *ring of fire*. Hal ini merupakan sabuk gempa bumi terbesar dunia berdasarkan survey U.S. Geological Survey (USGS). Daerah yang dilewati oleh *ring of fire* tersebut akan memiliki banyak gunung berapi aktif sehingga akan sering mengalami gempa vulkanik akibat aktifitas gunung tersebut.

Indonesia secara geologi berada di antara dua benua dan juga dua samudra, yaitu benua Asia dan Australia, serta samudra Hindia dan Pasifik. Hal ini menyebabkan Indonesia berada di atas beberapa lempeng tektonik yang labil sehingga sering kali terjadi pergeseran lempeng yang menyebabkan terjadinya gempa bumi.

Salah satu gempa bumi yang cukup hebat akibat pergeseran lempeng tektonik di Indonesia dari surat kabar Kompas adalah gempa bumi yang terjadi di Yogyakarta dan Jawa tengah pada pukul 05.55 WIB tanggal 27 Mei 2006. Gempa berkekuatan 6,2 skala Richter dilaporkan oleh USGS. Total korban meninggal gempa DIY dan Jawa Tengah bagian selatan, seperti di Klaten, tercatat mencapai 5.782 orang lebih, 26.299 lebih luka berat dan ringan, 390.077 lebih rumah roboh akibat gempa tersebut.



**Gambar 1.3.** Proses pencarian korban secara manual

Evakuasi korban biasanya dilakukan manual seperti pada Gambar 1.3. Proses ini memiliki kelemahan seperti proses bergantung pada jumlah dari personel dari tim penyelamat tersebut, selain itu juga proses membutuhkan waktu yang panjang. Akibatnya, tidak sedikit korban yang tertimbun reruntuhan meninggal karena telatnya para tim penyelamat menemukan korban.



**Gambar 1.4.** Proses evakuasi bencana alam dibantu dengan alat berat

Proses evakuasi biasanya juga dibantu alat berat seperti Gambar 1.4. Penggunaan alat berat bertujuan untuk mencari korban yang tertimbun reruntuhan gedung akibat gempa bumi. Pada Gambar 1.4, proses evakuasi dibantu alat berat seperti *telescopic boom crane* dan *excavator*, namun penggunaan alat ini masih memiliki beberapa kelemahan seperti, jarak jangkauan *end effector crane* yang tidak terlalu luas dan juga membutuhkan

tempat yang cukup besar untuk menaruh benda tersebut. Bila tempat tersebut sulit dijangkau seperti pada daerah pegunungan, akan sangat membahayakan menggunakan alat tersebut karena bebannya yang besar dapat membahayakan operator dari alat tersebut.

Alternatif lain dibutuhkan untuk menggantikan penggunaan dari *telescopic boom crane*. Salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah *Suspended Cable Driven parallel robot* (CDPR). Hal ini dipilih karena CDPR memiliki daerah jangkauan yang besar dan juga kemudahan alat tersebut untuk dipasang pada daerah-daerah yang sulit dijangkau. Penggunaan robot tersebut akan membantu proses pencarian korban bencana alam sehingga proses evakuasi akan menjadi lebih efektif.

CDPR yang digunakan dalam penelitian ini adalah *suspended* CDPR. Hal ini dilakukan agar kabel-kabel dari robot tersebut tidak mengalami tabrakan dengan lingkungan sekitar. Penggunaan *fully-constrained* CDPR akan terdapat kabel yang terhubung dari bawah *base* ke *platform*. Hal ini akan memperbesar kemungkinan kabel akan bertabrakan dengan lingkungan sekitar.

## **1.2. Batasan Masalah Penelitian**

Batasan masalah yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembahasan tidak sampai penggunaan dari jenis detektor.
2. Batas maksimum dan minimum gaya tarik kabel adalah 1000 N dan 1 N.
3. Kecepatan maksimum dan minimum kabel adalah 1,7 m/s dan -1,7m/s
4. Pengaruh *hardware* (motor, kabel, katrol, dll) dalam penelitian ini tidak akan dibahas.

### 1.3. Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana *geometric model*, *static model*, dan *kinematic model* dari *Cable Driven Parallel Robot* berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan?
2. Berapakah dimensi (panjang, lebar, tinggi) *platform* agar mencapai *interference-free workspace* terbesar?
3. Bagaimanakah susunan kabel dari *base* ke *platform* agar mencapai *interference-free workspace* terbesar?

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan *geometric model*, *static model*, dan *kinematic model* dari *Cable Driven Parallel Robot* berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan.
2. Mendapatkan dimensi (panjang, lebar, tinggi) *platform* agar mencapai *interference-free workspace* terbesar.
3. Mendapatkan susunan kabel dari *base* ke *platform* agar mencapai *interference-free workspace* terbesar.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberikan wawasan baru tentang teknologi robot khususnya mengenai *Cable Driven Parallel Robot*.
2. Memberikan inovasi baru sebagai alat pendeteksi korban pada bencana alam.
3. *Cable Driven Parallel Robot* dapat diaplikasikan pada dunia industri untuk menggantikan fungsi dari *crane* sebagai mesin pemindah barang.

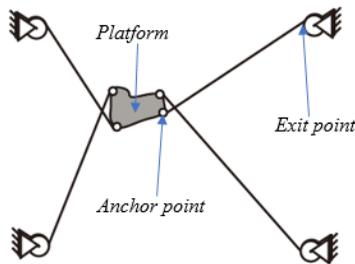
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menjelaskan literatur-literatur yang digunakan pada penelitian ini. Materi yang akan dibahas adalah *Cable Driven Parallel Robot (CDPR)*, *Fully-constrained* dan *cable-suspended CDPR*, *geometric model CDPR*, *static model CDPR*, *wrench fesible workspace (WFW)*, *capacity margin*, *kinematic model CDPR*, *twist feasible workspace (TFW)*, *cable-cable interference*, dan *cable-platform interference*. Subbab-subbab berikut akan menjelaskan materi-materi yang telah disebutkan.

### 2.1. *Cable Driven Parallel Robot (CDPR)*

*Cable driven parallel robot* adalah sebuah robot yang terdiri dari sejumlah kabel  $m$  dan terhubung dengan sebuah *platform* seperti pada Gambar 2.1. Setiap kabel akan menghubungkan *platform* di *anchor point* dengan *base* di *exit point*. Robot ini termasuk pada kategori *parallel robot*. Namun bedanya, robot ini tidak memiliki lengan *rigid* seperti pada robot-robot lain. Lengan CDPR tersusun oleh sejumlah kabel  $m$  dan lengan tersebut hanya bisa ditarik dan tidak bisa mendorong *platform*. *Platform* dapat dimodifikasi ataupun diubah sesuai dengan kebutuhan ataupun fungsi dari robot tersebut.



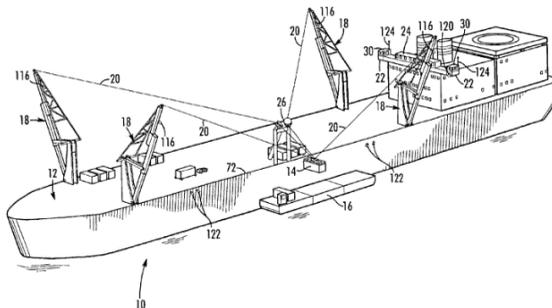
**Gambar 2.1.** *Cable Driven Parallel Robot* dengan empat kabel (Gosselin, *Cable-Driven Parallel Mechanisms: State of The Art and*, 2013)

Robot ini mampu mengangkut beban besar dan juga area cakupan yang besar. Beban tersebut akan ditahan oleh sejumlah kabel  $m$  seperti pada Gambar 2.1. Area yang dicakup dari robot tersebut bergantung pada posisi masing-masing dari *exit point* sehingga areanya bisa sangat fleksibel. Namun, perlu dilakukan analisa agar kabel tidak saling bertumbukkan dan kabel dengan *platform* tidak bertumbukkan dengan lingkungan (Caro & Martin, 2016).

Robot ini sudah banyak digunakan baik di bidang industri maupun di bidang lainnya. Kemampuan untuk mencakup area kerja yang luas dan juga beban yang besar menjadi salah satu latar belakang pemanfaatan CDPR ini. Pada Gambar 2.2, *skycam* adalah sebuah kamera yang dibawa oleh CDPR pada sebuah stadion yang areanya cukup luas. Dengan menggunakan sistem seperti pada Gambar 2.2, kamera memungkinkan untuk merekam berbagai tempat dari atas stadion. Selain itu, CDPR juga digunakan pada sebuah kapal untuk memindahkan peti kemas yang bermuatan seperti Gambar 2.3 (United State Patent No. US 6,826,452 B1, 2004).



**Gambar 2.2.** *Skycam* (Caro & Martin, 2016)



**Gambar 2.3.** Cable array robot for material handling (United State Patent No. US 6,826,452 B1, 2004)

## 2.2. Fully-constrained dan Suspended CDPR

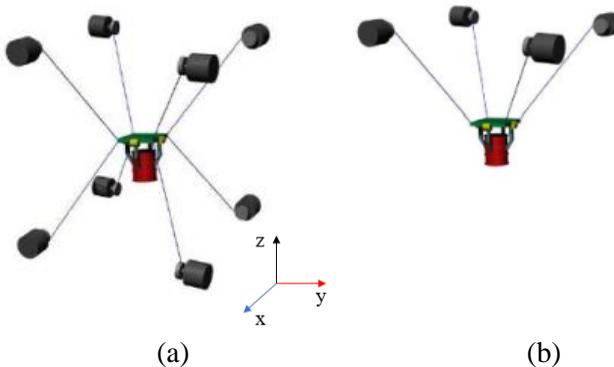
*Cable driven parallel robot* berdasarkan gaya yang dapat diaplikasikan oleh *actuator robot* pada sumbu-z negatif yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dikelompokkan menjadi dua, yaitu *fully-constrained* dan *cable-suspended*. Secara umum pada *cable robot*, gaya dapat diberikan ke *platform* dengan menarik kabel tersebut. Hasil dari gaya tersebut memungkinkan *platform* mampu bergerak dan menghasilkan *degree of freedom* (dof).

### 2.2.1. Fully-constrained CDPR

*Fully constrained* CDPR atau juga dikenal sebagai *completely-restrained* CDPR merupakan CDPR yang dapat mengaplikasikan gaya ke semua sumbu x, y, dan z. Gambar 2.4(a) menunjukkan bentuk fisik dari *fully-constrained* CDPR. Aktuator robot berada di ujung atas dan bawah *frame body* dihubungkan ke ujung-ujung *platform* oleh kabel. Hal ini memungkinkan untuk aktuator memberikan gaya dengan menarik kabel ke semua sumbu. Tegangan kabel yang dihasilkan merupakan hasil dari tarikan aktuator tersebut.

### 2.2.2. *Suspended* CDPR

*Suspended* CDPR merupakan salah satu macam CDPR dimana aktuator dari robot tidak memungkinkan memberikan gaya ke sumbu z negatif. Bentuk fisik dari robot ini terlihat pada Gambar 2.4(b). Terdapat perbedaan dengan *fully-constrained*, yaitu tidak terdapat aktuator yang berada di bagian bawah *platform*. Hal ini yang menyebabkan aktuator pada *suspended* CDPR hanya dapat menggerakkan *platform* ke sumbu x, y, dan z positif. Pada tipe CDPR ini, tegangan kabel yang dihasilkan dan pergerakan *platform* ke sumbu z negatif memanfaatkan gaya gravitasi dari *platform*. Tipe robot ini menjadi lebih tidak stabil dan DOF yang dihasilkan lebih sedikit dibanding dengan *fully-constrained* CDPR.

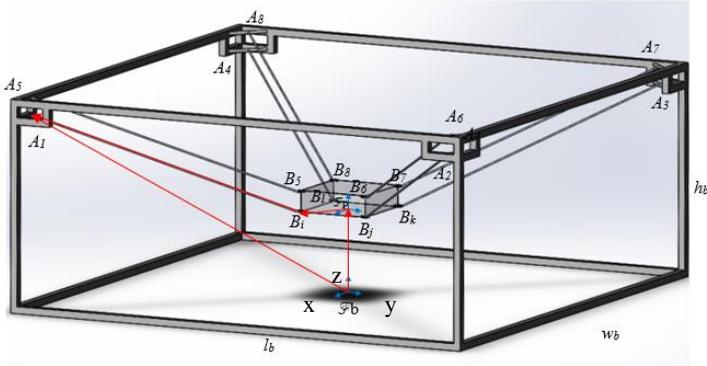


**Gambar 2.4.** Bentuk fisik (a) *Fully-constrained* dan (b) *suspended* CDPR (Bosscher, 2004)

### 2.3. *Geometric Model* CDPR

Analisa *geometric* merupakan analisa berdasarkan bentuk fisik dari CDPR. Platform CDPR yang dihubungkan dengan 8 kabel dari *body frame* terlihat pada Gambar 2.5. Pada *base* dan *platform* masing-masing memiliki orientasi sumbu kartesian yang diberi simbol  $F_b$  untuk *frame base* dan  $F_p$  untuk *platform*.  $F_b$  terletak pada bagian tengah bawah dari *body frame* sebagai origin

O yang bersifat tetap, sedangkan Fp terletak pada bagian tengah bawah dari *platform*.



**Gambar 2.5.** Geometric model CDPR

Orientasi Fp dari *platform* mengacu pada *fixed frame* Fb. Hal ini menggambarkan bahwa *fixed base* dari CDPR menjadi acuan dari pergerakan *platform*. Dari sebab itu diberikanlah matriks rotasi **R** pada orientasi *platform* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(\varnothing, \theta, \psi) &= \mathbf{R}_z(\varnothing) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\varphi) \\ &= \begin{bmatrix} c\varnothing c\theta & c\varnothing s\theta s\psi - s\varnothing c\psi & c\varnothing s\theta c\psi + s\varnothing s\psi \\ s\varnothing c\theta & s\varnothing s\theta s\psi - c\varnothing c\psi & s\varnothing s\theta c\psi - c\varnothing s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Posisi dari titik P terletak pada *platform* yang mengacu pada *fixed frame* Fb diberikan nama vektor p. Posisi dari *exit point*  $A_i$  untuk  $i = 1, \dots, 4$ , yang mengacu pada *fixed frame* Fb diketahui sebagai vektor posisi  $\mathbf{a}_i^b$ . Posisi dari *anchor point*  $B_j$  untuk  $j = 1, \dots, 8$  yang mengacu pada Fp dari *platform* digambarkan oleh vektor posisi dari  $\mathbf{b}_j^p$ . Kabel ke-j menghubungkan titik  $A_i$  dan  $B_j$  dengan tegangan tertentu dan dianggap sebuah bagian yang lurus ( $A_i B_j$ ).  $\mathbf{l}_j$  merupakan vektor panjang kabel ke-j yang mengarah dari  $B_j$  ke  $A_i$ . Berikut merupakan rumus untuk menghitung  $\mathbf{l}_j$ :

$$\mathbf{l}_j = \mathbf{a}_i^b - \mathbf{p} - \mathbf{R}\mathbf{b}_j^p, i = 1, \dots, 8 \quad (2.2)$$

Dimana  $\mathbf{l}_j$  = vektor panjang tali dari *anchor point*  $B_j$  ke *exit point*  $A_i$

$\mathbf{a}_i^b$  = vektor dari *exit point*  $i$  ( $A_i$ ) ke  $F_b$

$\mathbf{p}$  = vektor dari  $F_b$  ke  $F_p$

$\mathbf{b}_j^p$  = vektor dari  $F_p$  ke *anchor point*  $j$  ( $B_j$ )

$\mathbf{R}$  = matriks orientasi dari *platform*

Unit vektor dari kabel dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\hat{\mathbf{l}}_j = \frac{\mathbf{l}_j}{\|\mathbf{l}_j\|_2}, i = 1, \dots, m \quad (2.3)$$

Dimana  $\hat{\mathbf{l}}_j$  = unit vektor kabel  $j$

$\|\mathbf{l}_j\|_2$  = Euclidean Norm dari  $\mathbf{l}_j$ .

*Euclidean Norm* dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\|\mathbf{l}_j\|_2 = \sqrt{\mathbf{l}_1^2 + \mathbf{l}_2^2 + \dots + \mathbf{l}_j^2} \quad (2.4)$$

#### 2.4. *Static Model* CDPR

*Static model* dari CDPR merupakan analisa yang dilakukan pada *platform* pada saat posisi dan orientasi tidak berubah. Hal ini didasarkan pada hukum Newton yang pertama:

$$\sum \mathbf{F} = 0 \quad (2.5)$$

Dimana  $\mathbf{F}$  merupakan gaya yang terjadi pada *platform*. *Platform* diharapkan stabil pada saat diam, sehingga gaya eksternal yang terjadi harus sama besar dengan gaya internal yang tersedia. Orientasi *platform* juga harus dijaga agar tidak berubah dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\sum \mathbf{M} = 0 \quad (2.6)$$

dimana  $\mathbf{M}$  merupakan momen yang terjadi pada *platform*. Hal yang sama juga terjadi pada persamaan momen, agar orientasi dari *platform* tidak berubah, maka momen eksternal yang terjadi pada *platform* harus sama besar dengan momen internal yang tersedia.

Penggabungan dua persamaan di atas, yaitu (2.5) dan (2.6) menjadi sebuah persamaan baru yang disebut *wrench equation*. Persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}_e = 0 \quad (2.7)$$

$\mathbf{W}$  merupakan *wrench* matriks, yang berisi unit vektor dari gaya dan momen kabel yang terjadi. Matriks ini dinyatakan di dalam persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{l}}_1 & \hat{\mathbf{l}}_2 & \dots & \hat{\mathbf{l}}_j \\ \mathbf{Rb}_1^p \times \hat{\mathbf{l}}_1 & \mathbf{Rb}_2^p \times \hat{\mathbf{l}}_2 & \dots & \mathbf{Rb}_j^p \times \hat{\mathbf{l}}_j \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$\tau$  merupakan besar tegangan kabel yang terjadi dapat ditulis sebagai berikut:

$$\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_8]^T \quad (2.9)$$

$\mathbf{w}_e$  merupakan *wrench* eksternal yang terjadi pada *platform*. Hal ini terdiri atas gaya dan momen dari luar yang terjadi pada *platform* sehingga dapat ditulis persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{w}_e = [\mathbf{f} \ \mathbf{m}]^T = [f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z]^T \quad (2.10)$$

Komponen dari *wrench* eksternal yang terjadi dibatasi sesuai dengan kebutuhan desainer sebagai berikut:

$$f_{min} \leq f_x, f_y, f_z \leq f_{max} \quad (2.11)$$

$$m_{min} \leq m_x, m_y, m_z \leq m_{max} \quad (2.12)$$

Akibat jumlah kabel yang digunakan pada CDPR ini lebih besar dari pada 6, menyebabkan sistem dari persamaan (2.7) merupakan *underdetermined problem*. *Underdetermined problem* yang dimaksud terjadi karena terdapat delapan tegangan dari kabel yang tidak diketahui dan hanya memiliki enam persamaan untuk menyelesaikannya. Hal ini menyebabkan akan terdapat *infinite solution* pada variabel tersebut. Solusi untuk menyelesaikan persamaan tersebut sebagai berikut:

$$\tau = \tau_n + \tau_0 = \mathbf{W}^\dagger \mathbf{w}_e + \lambda \mathbf{n} \quad \tau_n \geq 0 \quad (2.13)$$

Dimana  $\mathbf{W}^\dagger$  adalah Moore-Penrose pseudoinverse dari  $\mathbf{W}$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$  dan  $\mathbf{n}$  adalah *null space* dari  $\mathbf{W}$  (Nurahmi, Pramujati, Caro, & Jeffrey, 2017).

## 2.5. Wrench Feasible Workspace

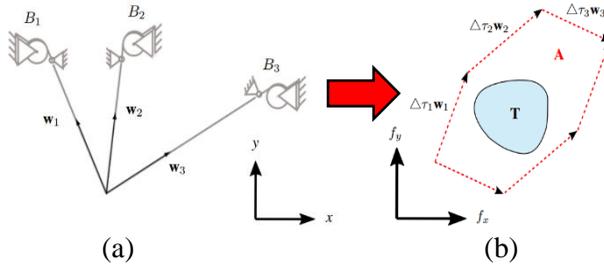
Kesetimbangan dari *mobile platform* didefinisikan dari persamaan (2.7) dan dapat terpenuhi jika dan hanya jika posisi dari

mobile platform itu masuk ke *wrench feasible*. Pose yang dimaksud itu ketika semua penugasan *wrench*  $\mathbf{T}$  dapat diseimbangkan oleh sekumpulan *wrench* yang tersedia  $\mathbf{A}$ . Sekumpulan *wrench*  $\mathbf{A}$  yang tersedia dari CDPR itu bergantung pada arsitektur robot dimana kabel dipasang pada *base* dan juga *mobile platform*. Hal ini juga bergantung pada batas tegangan maksimal dan minimal dari kabel. Sekumpulan penugasan *wrench*  $\mathbf{T}$  bergantung pada aplikasi dari CDPR (*external wrench*). Semua *wrench* dapat terpenuhi apabila memenuhi kondisi dibawah ini:

$$\mathbf{T} \subseteq \mathbf{A} \quad (2.14)$$

dimana *wrench set*  $\mathbf{A}$  yang tersedia didefinisikan sebagai sekumpulan *wrench* dari kabel  $\mathbf{W}_j \boldsymbol{\tau}_j$  dan *wrench set*  $\mathbf{T}$  adalah sekumpulan *external wrench*  $\mathbf{w}_e$ .

Gambar 2.6 menunjukkan contoh mekanisme planar dengan tiga kabel. Tegangan maksimum dan minimum  $\boldsymbol{\tau}_j$  dari setiap kabel didefinisikan awal pada dimensi gaya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6 (a).  $\mathbf{T}$  yang merupakan *wrench* eksternal tidak bisa langsung semata-mata dibandingkan dengan tegangan maksimum dan minimum kabel. Hal ini dikarenakan dimensi mereka berbeda. Oleh sebab itu, batas-batas maksimum dan minimum dari setiap kabel dikalikan dengan *wrench matrix*  $\mathbf{W}_j$  membentuk  $\mathbf{A}$  yang berdimensi *wrench* seperti yang ditunjukkan Gambar 2.6 (b). Pada gambar tersebut  $\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{\max} - \boldsymbol{\tau}_{\min}$  merepresentasikan batas maksimum dan minimum setiap kabel.  $\mathbf{T}$  yang berada di dalam  $\mathbf{A}$  menandakan bahwa persamaan (2.17) terpenuhi (Nurahmi, Pramujati, Caro, & Jeffrey, 2017).



**Gambar 2.6.** *Wrench feasible workspace* dari planar CDPR (a) dalam dimensi gaya (b) dimensi wrench (Nurahmi, Pramujati, Caro, & Jeffrey, 2017)

## 2.6. Capacity Margin

*Capacity margin* adalah sebuah index untuk membuktikan persamaan (2.14). Indikator terpenuhinya persamaan (2.14) dimana sekumpulan *task wrench*  $\mathbf{T}$  berada di dalam *available wrench*  $\mathbf{A}$  dapat disebut sebagai *minimum degree of constrain satisfaction*, berikut merupakan rumusannya:

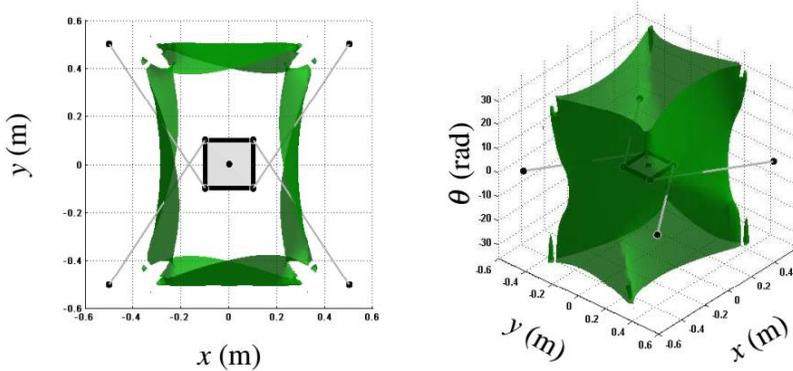
$$s = \min (\min s_{j,l}), j = 1, \dots, n \quad l = 1, \dots, p \quad (2.15)$$

dimana *degree of constraint satisfaction*  $s_{j,l}$  adalah jarak dari ujung-ujung sudut  $w_{e,j}$  dari  $\mathbf{T}$  menuju permukaan kabel  $l$  dari  $\mathbf{A}$ . Tanda positif pada  $s$  akan menandakan bahwa persamaan (2.14) terpenuhi dan negatif sebaliknya. Hal ini menandakan bahwa ketika  $s$  negatif berarti salah satu dari ujung sudut  $\mathbf{T}$  berada di luar  $\mathbf{A}$ , bernilai nol  $\mathbf{T} \subseteq \mathbf{A}$  dan ketika ujung sudut  $\mathbf{T}$  berada pada batas  $\mathbf{A}$ , dan bernilai positif ketika  $\mathbf{T}$  berada di dalam  $\mathbf{A}$  (Guay, 2014).

Sebagai contoh pada penelitian WFW dari CDPR (Goutterfarde, 2011), CDPR menggunakan empat buah kabel yang tersambung dengan *mobile platform* dan menghasilkan gerakan planar. Dimensi *mobile platform* adalah  $0.2 \times 0.2 \text{ m}^2$  dengan *external wrench*  $w_e = \{\mathbf{f}_e \in \mathbb{R}^2, n_e \in \mathbb{R} : \|\mathbf{f}_e\|_\infty \leq 10N, |n_e| \leq 0.5Nm\}$  dan *boundary* tegangan setiap kabel adalah  $\tau = \{\mathbf{f} \in \mathbb{R}^4 : \|\mathbf{f}\|_\infty \leq 50N\}$ .

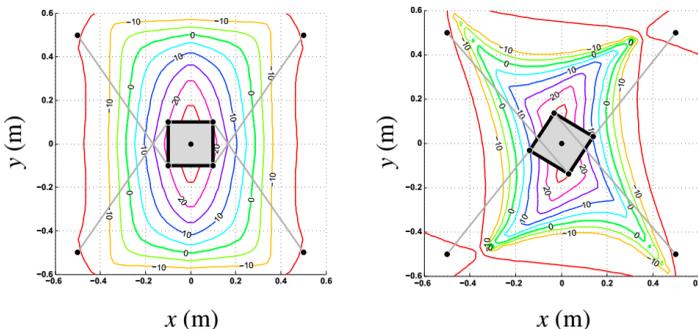
Dari data tersebut, *minimum degree of constrain satisfaction*  $s$  untuk setiap pose dihitung. Robot beregerak

sepanjang  $XY$  plane dan merotasi dengan jangkauan orientasi dari  $-36^\circ$  hingga  $36^\circ$ . Pandangan atas dan pandangan 3D dari hasil WFW dapat dilihat pada Gambar 2.7. Perhitungan permukaan mendefinisikan kestabilan *frontier*, maka *mobile platform* harus dijaga berada di dalam batas ini agar tetap stabil.



**Gambar 2.7.** *Wrench Feasible Workspace* pada planar CDPR (Gouttefarde, Daney, & Merlet, 2011)

Gambar 2.8 menunjukkan hasil *boundary* dari indeks  $s$  yang dibuat ketika orientasi  $0^\circ$  dan  $45^\circ$ . Perhitungan  $s$  dilakukan disetiap pose dan menghasilkan garis-garis *isocontour* dengan nilai gaya yang sama. Garis ketika  $s = 0$  merupakan kestabilan *frontier* (Guay, Cardou, Ruiz, & Caro, 2014).



**Gambar 2.8.** *Isocontours* dari *index s* dalam Newtons sebagai fungsi dari pose (Guay, Cardou, Ruiz, & Caro, 2014)

## 2.7. Kinematic Model

*Kinematic model* dari CDPR merupakan tahap menganalisa kecepatan dari proses penguluran ataupun penggulangan kabel yang didasari pada persamaan berikut:

$$\mathbf{J} \mathbf{t} = \dot{\mathbf{i}} \quad (2.16)$$

Dimana:  $\mathbf{J}$  = Jacobian matriks  
 $\dot{\mathbf{i}}$  = kecepatan kabel  
 $\mathbf{t}$  = twist (kecepatan *mobile platform*)

Jacobian matriks didapatkan dengan melakukan transpose pada wrench matriks,  $\mathbf{W}$ , seperti yang ditampilkan pada persamaan (2.17). Jacobian matriks digunakan untuk mengtransformasi kecepatan dari platform untuk menjadi kecepatan kabel.

$$\mathbf{J} = \mathbf{W}^{-1} \quad (2.17)$$

*Platform* akan memiliki 2 jenis kecepatan terhadap ketiga axis, yaitu kecepatan linear dan kecepatan angular. *Twist* yang merupakan kecepatan *platform* dapat ditulis seperti pada persamaan (2.18) (Hanafie, Nurahmi, Caro, & Pramujati, 2017).

$$\mathbf{t} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \quad (2.18)$$

## 2.8. Twist Feasible Workspace

Pada saat proses desain, pergerakan *mobile platform* harus batasi pada *range* tertentu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} v_{\min} &\leq v_x, v_y, v_z \leq v_{\max} \\ \omega_{\min} &\leq \omega_x, \omega_y, \omega_z \leq \omega_{\max} \end{aligned} \quad (2.19)$$

dimana  $v_{\min}$  dan  $v_{\max}$  adalah secara berurutan batas bawah dan atas dari kecepatan linier *mobile platform* dan  $\omega_{\min}$  dan  $\omega_{\max}$  adalah secara berurutan batas bawah dan atas dari kecepatan angular *mobile platform*. Kecepatan maksimum dari kabel didefinisikan sebagai  $\dot{l}_{\max}$  dan kecepatan minimum kabel diformulasikan sebagai  $\dot{l}_{\min} = -\dot{l}_{\max}$ .

Sekumpulan kecepatan mengulur dan menggulung kabel didefinisikan sebagai *Available Cable Velocity Set*, ditunjukkan sebagai berikut:

$$[\mathbf{i}]_a = \{\mathbf{i} \mid \dot{l}_{\min} \leq \dot{l}_i \leq \dot{l}_{\max}, i = 1, \dots, j\} \quad (2.20)$$

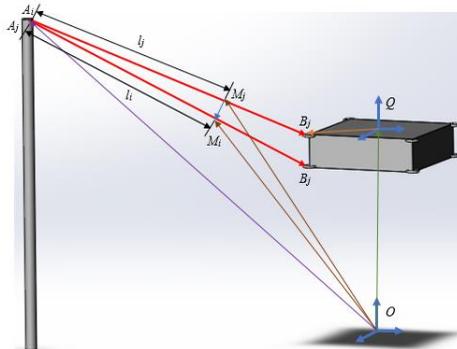
sebuah pose CDPR dikatakan *twist feasible* ketika kecepatan dari setiap kabel berada di dalam *available cable velocity set* (Nurahmi, Pramujati, Caro, & Jeffrey, 2017).

## 2.9. Cable to Cable Interference

*Cable to cable interference* terjadi ketika kabel dari CDPR bertabrakan di suatu posisi tertentu dengan kabel lainnya. Akibat dari fenomena tersebut, *mobile platform* menjadi tidak stabil lagi. Oleh sebab itu, jika salah satu kabel saja terjadi *cable interference* maka pose tersebut tidak dapat diterima.

Pendekatan untuk mengetahui *cable interference* adalah dengan cara mencari jarak terdekat antara kabel-kabel yang ada di CDPR. Kabel  $A_iB_i$  dan  $A_jB_j$  dianggap sebagai sebuah *line segment* dimana jarak terdekat antara kedua kabel tersebut adalah  $M_jM_i$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.

Dari parameterisasi Gambar 2.9, terlihat bahwa vektor  $OM = OA + lAB$ .  $OA_i$  berasal dari konfigurasi robot.  $\mathbf{R}.QB_i$  merupakan vektor *mobile platform* menuju ke *anchor point* yang bergantung pada *base frame* O dimana  $\mathbf{R}$  merupakan vektor rotasi.  $l$  merupakan fraksi dari panjang kabel keseluruhan yang nilainya antara 0 hingga 1.  $OQ$  merupakan vektor posisi dari *mobile platform* terhadap *base frame*.



**Gambar 2.9.** Skematik dari dua kabel

Dari Gambar 2.9 dengan metode *loop vector* didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} OM_i &= OA_i + A_i B_i l_i \\ OM_j &= OA_j + A_j B_j l_j \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} AB_i &= OQ + \mathbf{R}.QB_i - OA_i \\ AB_j &= OQ + \mathbf{R}.QB_j - OA_j \end{aligned} \quad (2.22)$$

dari kedua persamaan tersebut dilakukan substitusi dari persamaan (2.22) ke persamaan (2.21) untuk setiap kabel sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_i &= OA_i + OQ l_i + (\mathbf{R}.QB_i - OA_i) l_i \\ M_j &= OA_j + OQ l_j + (\mathbf{R}.QB_j - OA_j) l_j \end{aligned} \quad (2.23)$$

Penggabungan antara kabel  $i$  dan  $j$  menggunakan persamaan (2.23) mendapatkan vektor  $M_j M_i$  sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_j M_i &= A_j A_i + OQ(l_i - l_j) + (\mathbf{R}.QB_i - OA_i) l_i \\ &\quad - (\mathbf{R}.QB_j - OA_j) l_j \end{aligned} \quad (2.24)$$

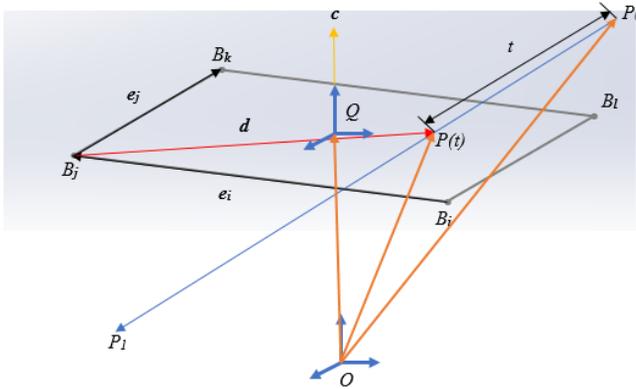
Jarak terdekat antara kabel  $i$  dan  $j$  tersebut adalah:

$$d_{i,j} = \|M_j M_i\|_2 \quad (2.25)$$

Pada penelitian ini, sebuah pose ditolak ketika  $d_{i,j} = 0$  karena kabel dianggap sebuah *line* yang belum memiliki radius tertentu (Blanchet & Merlet, 2014).

## 2.10. Cable to Platform Interference

*Cable to platform interference* terjadi ketika kabel dengan *mobile platform* bertabrakan. Pendekatan dilakukan dengan cara mengubah sisi-sisi *platform* menjadi sebuah *plane* dan mencari jarak terdekat garis yang memotong dengan *vertex* dari *mobile platform* pada *plane* tersebut. Pada penelitian kali ini, *vertex platform* dan *anchor point* berada pada posisi yang sama. Gambar 2.10 merupakan skematik ketika terjadinya *interference* antara kabel  $P_0 P_1$  dengan *mobile platform* sisi bagian atas.



**Gambar 2.10.** Skematik *cable to platform interference*

$P_0$  adalah *exit point* CDPR dan  $P_1$  adalah *anchor point*.  $P_0P_1$  memotong pada sisi *platform* pada titik  $P(t)$  dan vektor dari titik  $P(t)$  ke  $B_j$  adalah  $d$ .  $e_i$  dan  $e_j$  merupakan secara berurutan vektor dari titik  $B_i$  ke  $B_j$  dan  $B_j$  ke  $B_k$ .  $c$  didapatkan sebagai berikut:

$$c = e_i \times e_j \quad (2.26)$$

dimana  $e_i$  dan  $e_j$  adalah secara berurutan  $B_iB_j$  dan  $B_jB_k$ . Dengan menggunakan *geometric* dari CDPR, dimana  $\mathbf{R}$  adalah *rotation matrix*,  $B_i$ ,  $B_j$ , dan  $B_k$  diubah menjadi berikut:

$$\begin{aligned} B_i &= OQ + \mathbf{R}.B_iQ \\ B_j &= OQ + \mathbf{R}.B_jQ \\ B_k &= OQ + \mathbf{R}.B_kQ \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dari persamaan (2.27)  $e_i$  dan  $e_j$  menjadi persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned} e_i &= B_iB_j = \mathbf{R}.(B_jQ - B_iQ) \\ e_j &= B_jB_k = \mathbf{R}.(B_kQ - B_jQ) \end{aligned} \quad (2.28)$$

$P(t)$  didapatkan menggunakan *loop vector* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} OP(t) &= OP_0 + P_0P_1.t \\ OP(t) &= OQ + \mathbf{R}.QB_j + B_jP(t) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Persamaan (2.29) keduanya disubstitusikan dan didapatkan vektor  $d$  sebagai berikut:

$$d = B_jP(t) = OP_0 + P_0P_1.t - (OQ + \mathbf{R}.QB_j) \quad (2.30)$$

Persamaan (2.31) merupakan solusi untuk mendapatkan posisi  $P(t)$  sebagai berikut:

$$\mathbf{d}^T \cdot \mathbf{c} = 0$$

$$\left( OP_0 + P_0 P_1 \cdot t - (OQ + \mathbf{R} \cdot QB_j) \right)^T \cdot (\mathbf{e}_i \times \mathbf{e}_j) = 0 \quad (2.31)$$

Persamaan (2.28) disubstitusikan ke persamaan (2.31) dan didapatkan persamaan (2.27) seperti di bawah ini:

$$\left( OP_0 + P_0 P_1 \cdot t - (OQ + \mathbf{R} \cdot QB_j) \right)^T \cdot (\mathbf{R} \cdot (B_j Q - B_i Q) \times \mathbf{R} \cdot (B_k Q - B_j Q)) = 0 \quad (2.32)$$

Kabel akan bertabrakan dengan *mobile platform* ketika  $P(t)$  berada pada dalam jangkauan seperti di bawah ini:

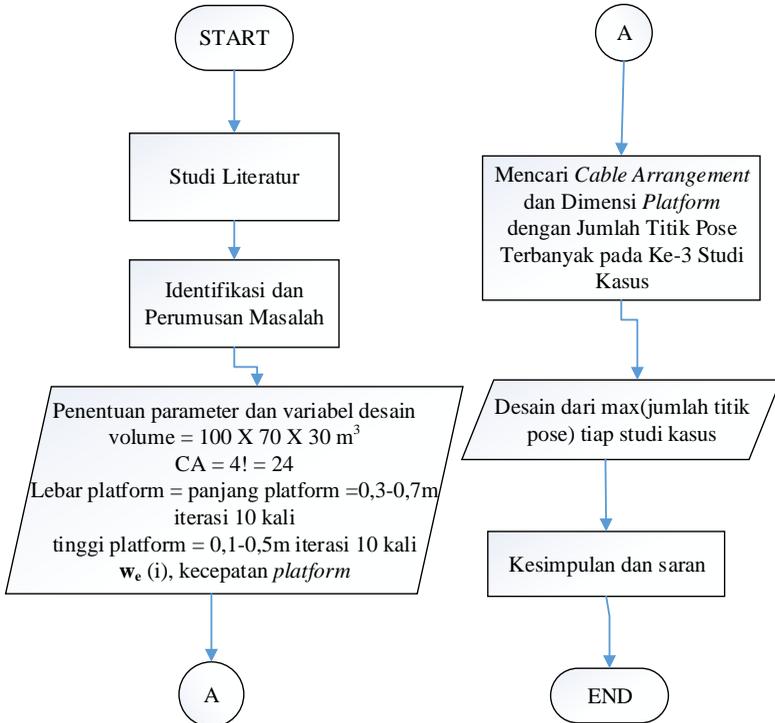
$$\begin{aligned} B_{k_x} &\leq P(t)_x \leq B_{i_x} \\ B_{k_y} &\leq P(t)_y \leq B_{i_y} \\ B_{k_z} &\leq P(t)_z \leq B_{i_z} \end{aligned} \quad (2.33)$$

dimana x,y, dan z merupakan orientasi sumbu (Cardou, Perreault, Gosselin, & Otis, 2010).

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1. Flowchart Penelitian

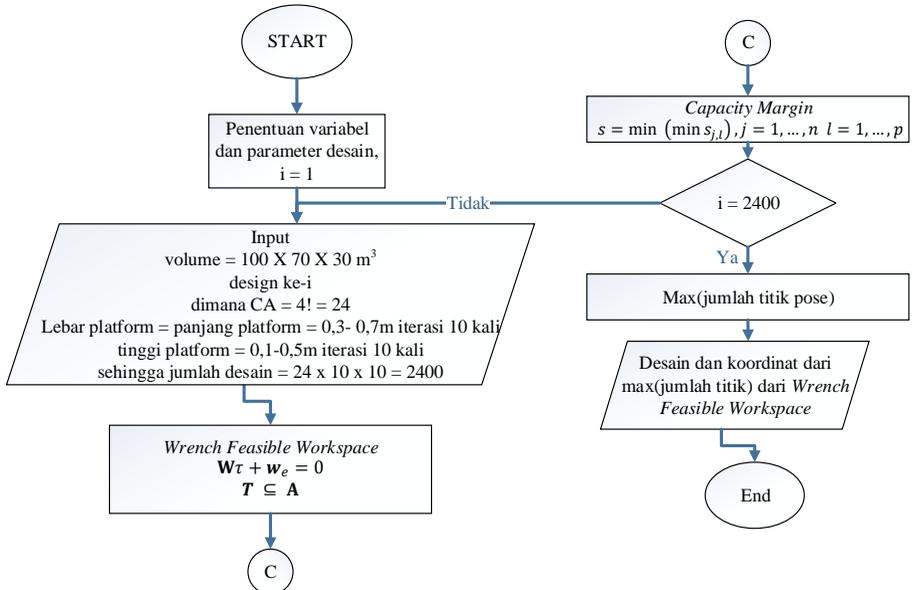


**Gambar 3.1.** Flowchart penelitian

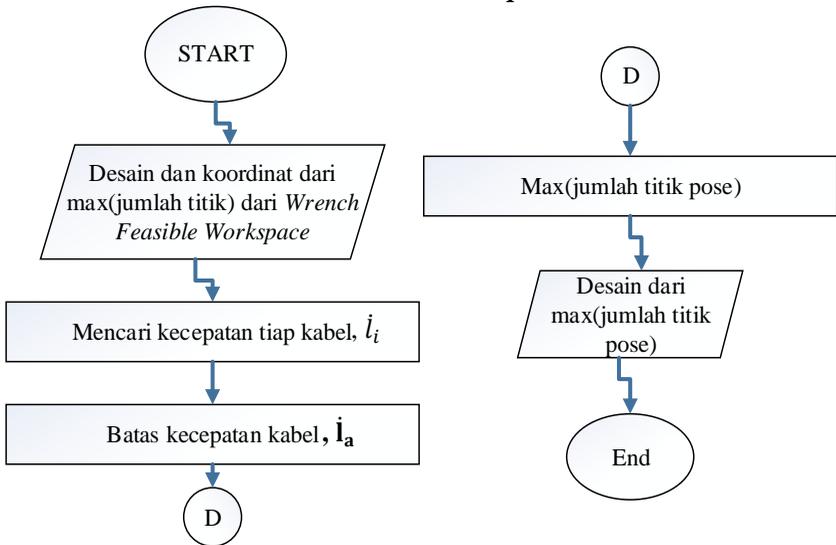
### 3.1.1. *Flowchart Pencarian Cable Arrangement dan Dimensi Platform dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak*

Proses akan terdiri dari tiga *flowchart* seperti berikut:

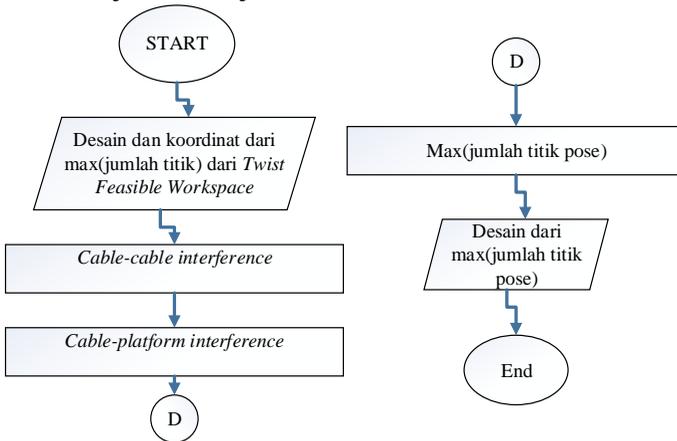
#### A. *Flowchart Wrench Feasible Workspace*



**Gambar 3.2.** Flowchart wrench feasible workspace

**B. Flowchart Twist Feasible Workspace****Gambar 3.3.** *Flowchart twist feasible workspace*

### C. *Flowchart Cable to Cable Interference dan Cable to Platform Interference*



**Gambar 3.4.** *Flowchart cable-cable interference dan cable-platform interference*

## 3.2. Proses Penelitian

Penelitian ini akan melewati beberapa proses. Setiap proses akan menghasilkan *output* dengan spesifikasi tertentu. Proses tersebut meliputi identifikasi masalah, studi literatur, dan penentuan dari parameter desain CDPR. Untuk lebih lengkap, setiap proses akan dijelaskan di bawah ini:

### 3.2.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari CDPR yang akan didesain. Hal ini dilakukan dengan cara membaca jurnal, buku, dan thesis yang berhubungan dengan CDPR. Hasil keluaran dari proses ini diharapkan penulis memiliki pengetahuan yang cukup untuk melanjutkan penelitian.

### 3.2.2. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Masalah-masalah diambil dari analisis alat bantu yang digunakan untuk mengevakuasi korban bencana alam. Dari banyak

masalah yang ada, masalah yang diinginkan dipilih dan dirumuskan oleh penulis. Hal ini dilakukan agar penulis mendapatkan spesifikasi khusus dari alat bantu tersebut. Hasil keluaran dari proses ini digunakan untuk bahan pertimbangan dalam penentuan parameter desain CDPR.

### 3.2.3. Parameter dan Variabel Desain CDPR

Parameter dan variabel desain CDPR ditentukan terlebih dahulu sebelum dilakukan proses penelitian lebih lanjut. Parameter yang dimaksud adalah volume kerja, jumlah derajat kebebasan, tegangan kabel yang diijinkan, beban eksternal yang akan mempengaruhi sistem, kecepatan kabel yang diizinkan, variasi *twist*, dan posisi *exit point*  $A_i$ . Variabel desain yang dimaksud adalah dimensi *platform* yang meliputi panjang, lebar, dan tinggi, posisi *anchor point*  $B_i$ , dan *cable arrangement*. Parameter dan variabel desain ditentukan berdasarkan dari proses sebelumnya yang telah dilakukan. Tabel 3.1 adalah tabel rancangan desain dengan *workspace* terbesar untuk menghitung jumlah pose sebagai variabel yang akan dipilih dalam desain:

**Tabel 3.1.** Rancangan Desain dengan Workspace Terbesar

No. Desain	Lebar Platform wp (m)	Panjang Platform lp (m)	Tinggi Platform hp (m)	Cable Arrangement	Jumlah Pose

### 3.2.4. Mencari Cable Arrangement dan Dimensi Platform dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak

Proses ini dilakukan melalui empat tahapan sebagai berikut:

#### A. Wrench Feasible Workspace dan Capacity Margin

Pada proses ini, setiap desain pada pose tertentu diuji menggunakan persamaan (2.14). *Capacity margin* dilakukan menggunakan persamaan (2.15) untuk mendapatkan indeks dari setiap pose dari desain dimana pose akan diterima apabila  $s \geq 0$ .

Hasil keluaran proses ini adalah mendapatkan desain dengan *cable arrangement* dan dimensi *mobile platform* yang menghasilkan jumlah titik *pose* terbanyak serta koordinat titik-titik pose dari masing-masing desain.

### **B. *Twist Feasible Workspace***

Dari desain dan koordinat yang dihasilkan oleh *Wrench Feasible Workspace* dan *Capacity Margin*, dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.16) untuk mencari kecepatan mengulur dan menggulung kabel dari CDPR. Sebuah pose pada desain dan koordinat tertentu dianggap *feasible* ketika kecepatan dari setiap kabel berada di dalam *available cable velocity set*. Hasil keluaran proses ini adalah mendapatkan desain dengan *cable arrangement* dan dimensi *mobile platform* yang menghasilkan jumlah titik *pose* terbanyak serta koordinat titik-titik pose dari masing-masing desain.

### **C. *Cable to Cable Interference***

Dari desain dan koordinat yang dihasilkan oleh *Wrench Feasible Workspace* dan *Capacity Margin*, dilakukan perhitungan menggunakan persamaan (2.25) untuk mencari yang terjadi tabrakan antar kabel CDPR. Kabel dianggap saling bertabrakan jika jarak  $d = 0$ . Hasil keluaran proses ini adalah mendapatkan desain dengan *cable arrangement* dan dimensi *mobile platform* yang menghasilkan jumlah titik *pose* terbanyak serta koordinat titik-titik pose dari masing-masing desain.

### **D. *Cable to Platform Interference***

Keluaran desain dan koordinat yang dihasilkan oleh *cable-cable interference* digunakan kembali untuk menghitung pada proses *cable-platform interference*. Persamaan (2.32) digunakan untuk menghitung jarak kabel ke *anchor point*  $B_i$  pada *plane* dari sisi *platform*. Persamaan (2.33) digunakan sebagai batasan bila terjadi tabrakan antara kabel dengan *mobile platform*. Hasil keluaran proses ini adalah desain dengan jumlah titik pose

terbanyak yang bebas dari *interference* baik kabel dengan kabel maupun kabel dengan *mobile platform*.

### 3.2.5. Studi Kasus

Penelitian ini terdapat 3 studi kasus yang akan dianalisa berkaitan perubahan pada *wrench external*  $\mathbf{w}_e$ . Tabel berikut menunjukkan perincian dari setiap studi kasus:

**Tabel 3.2.** Perincian Ketiga Studi Kasus

Studi Kasus	<i>Wrench External</i> $\mathbf{w}_e$	Keterangan
Studi Kasus 1	$\mathbf{w}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\mathbf{w}_e$ terdiri dari massa <i>platform</i> dan <i>payload</i> dan terletak di pusat massa <i>platform</i> .
Studi Kasus 2	$\mathbf{w}_e = \begin{bmatrix} 150 \\ 150 \\ -mg \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\mathbf{w}_e$ terdiri dari massa <i>platform</i> dan <i>payload</i> dan terkena gaya angin.
Studi Kasus 3	$\mathbf{w}_e = \begin{bmatrix} 150 \\ 150 \\ -mg \\ m_x \\ m_y \\ 0 \end{bmatrix}$	$\mathbf{w}_e$ terdiri dari massa <i>platform</i> dan <i>payload</i> , terkena gaya angin, dan posisi massa tidak di pusat massa.

Studi kasus 1 dilakukan ketika *wrench external*  $\mathbf{w}_e$  hanya sebuah massa *mobile platform* dan *payload* dengan posisi tepat di pusat massa *mobile platform*. Studi kasus 2 dilakukan dengan

menambah gaya dari lingkungan berupa angin. Studi kasus 3 dilakukan ketika terjadi angin dan massa *mobile platform* dan *payload* tidak tepat di pusat massa *mobile platform*.

## BAB IV

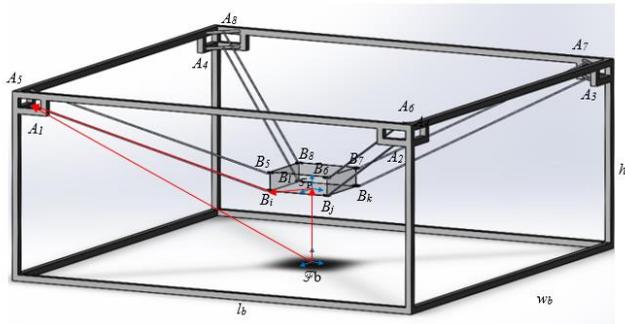
### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, hasil dari proses dan penelitian akan dibahas dan dianalisa. Penjelasan lebih lanjut akan disampaikan di subbab-subbab berikut:

#### 4.1. Penentuan Parameter Desain C DPR

##### 4.1.1. Parameter Desain C DPR

Parameter desain C DPR ditentukan terlebih dahulu sebelum dilakukan proses mencari *cable arrangement* dan dimensi *platform* dengan jumlah titik pose terbanyak. Parameter yang dimaksud adalah jarak jangkauan terbesar robot, jumlah derajat kebebasan, tegangan kabel yang diijinkan, beban eksternal yang akan mempengaruhi sistem, koordinat *exit point*  $A_i$ , *anchor point*  $B_i$ , *body frame*, *platform frame*, variasi *cable arrangement*, dan variasi dimensi *mobile platform*.

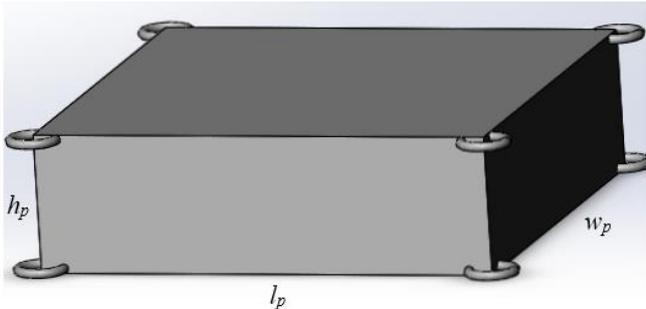


**Gambar 4.1.** Skematik *suspended* C DPR

Robot menggunakan delapan kabel dengan konfigurasi *suspended* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Tegangan dari kabel tersebut dibatasi dari 1N hingga 1000N. Kecepatan kabel yang diizinkan  $\dot{l}_a$  adalah  $-1,7\text{m/s} \leq \dot{l}_{kabel} \leq 1,7\text{m/s}$  dimana tanda positif dan negatif menandakan arah kecepatan kabel. Posisi *base frame* berada di tengah bawah dari *base*. Koordinat *platform frame* berada di tengah bawah dari *platform*. Total massa *platform*

dan *payload* adalah 100kg. Berikut merupakan perincian parameter desain yang ditentukan:

Volume kerja yang akan dianalisa	: 100m x 70m x 30m
Jumlah dof <i>platform</i>	: 3 dof translasi
Koordinat <i>body frame</i>	: $(0, 0, 0)^T$
Koordinat <i>exit point</i> ( $A_i$ )	: $(x_i^b, y_i^b, z_i^b)^T$
Koordinat $A_1$	: $(35, -50, 29,7)^T$
Koordinat $A_2$	: $(35, 50, 29,7)^T$
Koordinat $A_3$	: $(-35, 50, 29,7)^T$
Koordinat $A_4$	: $(-35, -50, 29,7)^T$
Koordinat $A_5$	: $(35, -50, 30)^T$
Koordinat $A_6$	: $(35, 50, 30)^T$
Koordinat $A_7$	: $(-35, 50, 30)^T$
Koordinat $A_8$	: $(-35, -50, 30)^T$
Variasi <i>twist</i>	: 8 kombinasi $\pm 1$ m/s untuk $\dot{x}$ , $\dot{y}$ , dan $\dot{z}$



**Gambar 4.2.** Dimensi *mobile platform*

#### 4.1.2. Variabel Desain CDR

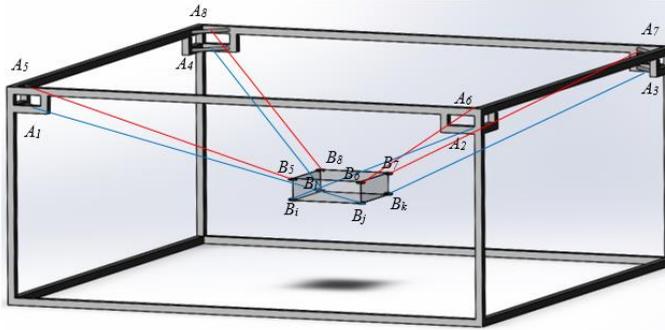
*Platform* berbentuk balok dengan panjang  $l_p$ , lebar  $w_p$ , dan tinggi  $h_p$  seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Panjang  $l_p$

sama dengan lebar  $w_p$  divariasikan dari 0,3m hingga 0,7m dengan jumlah iterasi sebanyak 10. Tinggi  $h_p$  divariasikan dari 0,1m hingga 0,5m dengan jumlah iterasi sebanyak 10. Berikut merupakan perincian variabel desain dari *platform*:

$$\begin{aligned}
 \text{Koordinat } platform \text{ frame} & : (0^p, 0^p, 0^p)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_i) & : (x_i^p, y_i^p, z_i^p)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_i) & : \left(\frac{wp_i^p}{2}, -\frac{lp_i^p}{2}, 0^p\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_j) & : \left(\frac{wp_j^p}{2}, \frac{lp_j^p}{2}, 0^p\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_k) & : \left(-\frac{wp_k^p}{2}, \frac{lp_k^p}{2}, 0^p\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_l) & : \left(-\frac{wp_l^p}{2}, -\frac{lp_l^p}{2}, 0^p\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_5) & : \left(\frac{wp_m^p}{2}, -\frac{lp_m^p}{2}, \frac{hp_m^p}{2}\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_6) & : \left(\frac{wp_n^p}{2}, \frac{lp_n^p}{2}, \frac{hp_n^p}{2}\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_7) & : \left(-\frac{wp_o^p}{2}, \frac{lp_o^p}{2}, \frac{hp_o^p}{2}\right)^T \\
 \text{Koordinat } anchor \text{ point } (B_8) & : \left(-\frac{wp_q^p}{2}, -\frac{lp_q^p}{2}, \frac{hp_q^p}{2}\right)^T
 \end{aligned}$$

dimana  $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ ;  $i \neq j \neq k \neq l$ .

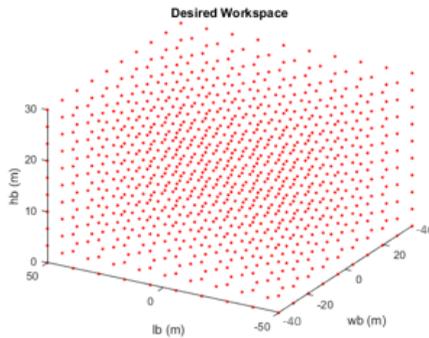
*Exit point*  $A_i$  akan dihubungkan oleh kabel ke *anchor point*  $B_i$  dengan batasan setiap *exit point* dan *anchor point* hanya boleh terdapat satu buah kabel. Variasi kabel dihubungkan dari *exit point* ke *anchor point* akan menghasilkan *cable arrangement* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. *Exit point*  $A_5, A_6, A_7$ , dan  $A_8$  akan dihubungkan ke *anchor point*  $B_5, B_6, B_7$ , dan  $B_8$ . Sisa empat *exit point* yang lain, yaitu  $A_1, A_2, A_3$ , dan  $A_4$  akan divariasikan ke empat sisa *anchor point*  $B_i, B_j, B_k$ , dan  $B_l$  yang belum memiliki pasangan. Jumlah seluruh *cable arrangement* adalah  $4! = 24$ . Desain ke- $i$  terdiri dari *cable arrangement*, lebar, panjang, dan tinggi *mobile platform*. Jumlah keseluruhan desain adalah 2.400 desain yang didapatkan dengan mengalikan jumlah *cable arrangement*, jumlah variasi panjang dan lebar *platform*, dan jumlah variasi tinggi *platform*.



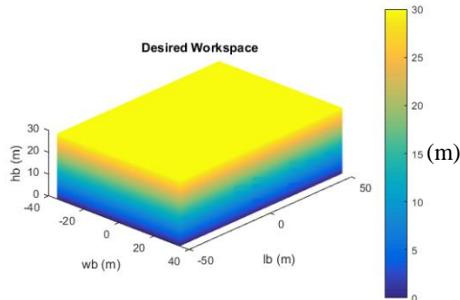
**Gambar 4.3.** Contoh *suspended* CDPR pada *cable arrangement* ke-7

#### 4.2. Output yang Diinginkan

Volume kerja CDPR akan dipecah menjadi  $n = 1000$  titik pose. Gambar 4.4 (a) memperlihatkan titik-titik pose secara keseluruhan dan Gambar 4.4 (b) memperlihatkan batas boundary dari *workspace* yang diinginkan. Desain dengan *cable arrangement* dan dimensi *platform* tertentu diharapkan dapat memenuhi keseluruhan titik pose. Perbedaan warna pada Gambar 4.4 (b) bertujuan untuk merepresentasikan ketinggian *base* dalam meter.



(a)



(b)

**Gambar 4.4.** (a) *Desired workspace* yang terbagi dalam titik-titik pose (b) *Boundary workspace* yang diinginkan

### 4.3. Hasil dan Analisa Studi Kasus

Pada penelitian kali ini, terdapat 3 studi kasus yang akan dianalisa. Penjelasan tentang setiap studi kasus seperti pada subbab 3.2.5. Masing-masing dari studi kasus akan terdapat empat *workspace* yang akan dihitung, yaitu:

#### 1. *Wrench Feasible Workspace* (WFW)

*Wrench feasible workspace* didapatkan untuk setiap desain setelah melewati proses perhitungan geometri (persamaan 2.2) dan statik (persamaan 2.13). Semua nilai tegangan kabel dari setiap *test pose* akan dibandingkan dengan batas maksimum dan minimum tegangan tali. Sebuah *test pose* dikatakan *feasible* apabila memenuhi persamaan 2.14.

#### 2. *Twist Feasible Workspace* (TFW)

*Twist feasible workspace* didapatkan setelah melalui proses perhitungan kinematik menggunakan persamaan 2.16. Kecepatan dari *platform* (*twist*) ditentukan terlebih dahulu, sehingga melalui proses perhitungan didapatkan kecepatan semua kabel dari setiap posisi. Kecepatan kabel tersebut dibandingkan dengan *available cable velocity set* atau kecepatan kabel yang diperbolehkan sesuai dengan parameter yang ada. Sebuah pose dikatakan *twist feasible* apabila berada di dalam batas dari *available cable velocity set*.

### 3. *Cable to Cable Interference Free Workspace (CCIFW)*

*Cable to cable interference* adalah sebuah metode untuk mencari jarak terdekat kabel dengan kabel lainnya dengan tujuan agar tidak terjadi tabrakan antar kabel. Jarak terdekat antar kabel didapatkan menggunakan persamaan (2.25). Pada penelitian kali ini, sebuah pose dapat ditolak dikarenakan kabelnya saling bertabrakan ketika jarak terdekat kabel = 0m karena kabel dianggap sebuah garis yang belum memiliki radius tertentu dan mengabaikan properti dari kabel yang digunakan.

### 4. *Cable to Platform Interference Free Workspace (PCIFW)*

*Cable to platform interference* adalah sebuah metode untuk memvalidasi terjadinya tabrakan antara kabel dengan *platform*. Pendekatan perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan (2.32) dan batas koordinat pada persamaan (2.33). Pada penelitian kali ini, sebuah *test pose* terjadi tabrakan antara kabel dengan *platform* apabila koordinat  $P(t)$  yang didapatkan pada persamaan (2.32) berada didalam batas koordinat (2.33).

Kemudian, *overall workspace* untuk setiap studi didapatkan dari perpotongan keempat workspace tersebut, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{overall workspace} = WFW \cap TFW \cap CCIFW \cap PCIFW \quad (4.1)$$

Berikut merupakan hasil dan analisa dari setiap studi kasus:

#### 4.4.1. Studi Kasus 1

Pada studi kasus 1, setiap desain akan diuji statis, kinematis, dan *interference* baik kabel dengan kabel dan kabel dengan *platform* sesuai dengan parameter dan variabel desain. *Wrench external* yang digunakan pada kasus 1 adalah beban *mobile platform* dan *payload* yang berjumlah 100 kg dan berada tepat di pusat massa *platform*. Semua desain yang dihasilkan akan dibandingkan dan dicari *workspace* terbesar. Hal ini dilakukan dengan cara mencari jumlah pose terbanyak yang dihasilkan tiap desain.

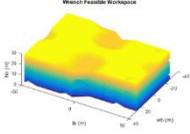
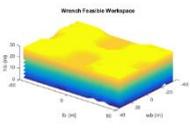
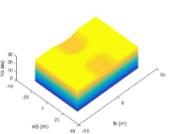
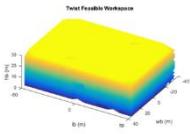
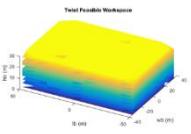
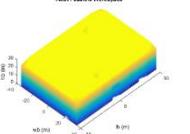
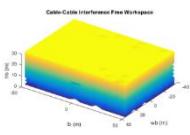
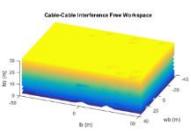
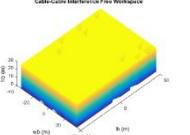
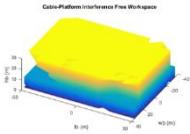
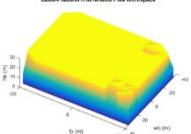
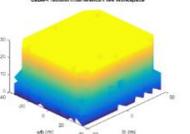
Pengujian dilakukan pada 2400 desain dan dua (2) desain yang menghasilkan *overall workspace* terbesar didapatkan. Kedua desain tersebut dengan jumlah titik pose adalah  $n = 648$  titik atau dapat dikatakan 64,8% dari volume kerja robot dapat dijangkau oleh robot tersebut. Berikut Tabel 4.1 rincian desain yang didapatkan:

**Tabel 4.1.** Rincian Desain dengan *Workspace* Terbesar Studi Kasus 1

No. Desain	Lebar Platform wp (m)	Panjang Platform lp (m)	Tinggi Platform hp (m)	Cable Arrangement	Jumlah Pose
1	0,34	0,34	0,23	11	648
2				17	

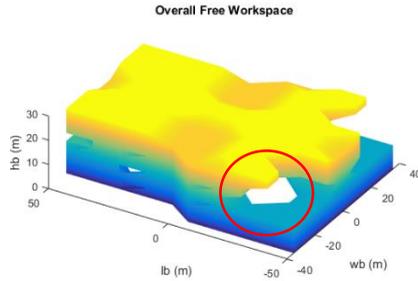
Hasil dari *overall workspace* didapatkan dengan cara saling memotongkan (*intersect*) hasil dari *wrench feasible workspace*, *twist feasible workspace*, *cable-cable interference free workspace*, dan *cable-platform interference workspace* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Sebagai pembandingan CDPR dengan *cable arrangement* paling sederhana juga ditampilkan, yaitu *cable arrangement* 1 dengan panjang dan lebar *platform* adalah 0,34m dan tinggi *platform* adalah 0,23m.

**Tabel 4.2.** *Workspace* dari Setiap Tahapan Pencarian *Cable Arrangement* dan Dimensi *Platform* dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 1

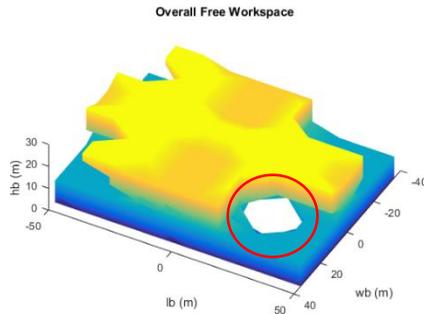
Keterangan	<i>Cable Arrangement</i> 11	<i>Cable Arrangement</i> 17	<i>Cable Arrangement</i> 1
<p><i>Wrench feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{WFW} = 790</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 876</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 576</math> titik</p>
<p><i>Twist feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{TFW} = 908</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 908</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 908</math> titik</p>
<p><i>Cable to cable interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>
<p><i>Cable to platform interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 902</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 836</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 976</math> titik</p>



$n_{WFW}$  dari *cable arrangement* 1 lebih kecil dibandingkan *cable arrangement* 11 dan 17, yaitu 576 titik.



(a)

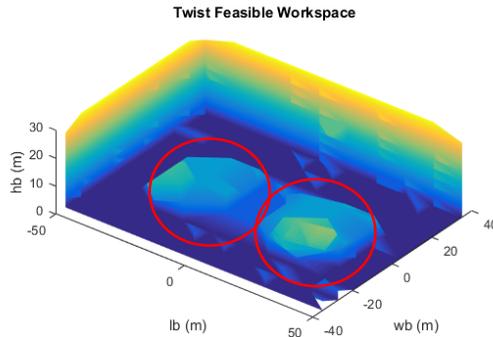


(b)

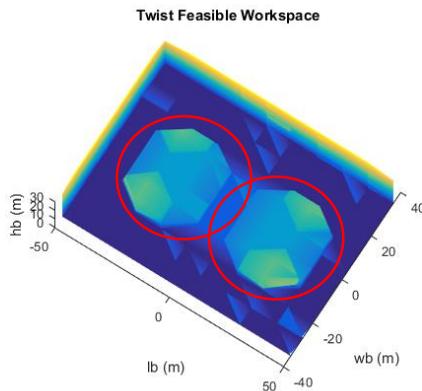
**Gambar 4.6.** Overall workspace dari *cable arrangement* (a) 11 dan (b) 17

Gambar 4.6 adalah *overall workspace* dari kedua *cable arrangement*. Daerah yang berwarna merupakan daerah yang dapat dijangkau oleh robot. Pada Gambar 4.6 terdapat lubang pada kedua gambar yang ditandai oleh lingkaran merah. Hal ini terjadi dikarenakan pada posisi tersebut *twist feasible workspace* tidak dapat terpenuhi dan ditunjukkan pada Gambar 4.7 (a) *cable arrangement* 11 dan (b) *cable arrangement* 17. Tanda merah pada Gambar 4.7 menunjukkan lubang yang mengindikasikan pada

posisi tersebut kecepatan salah satu kabel  $\dot{l}_i$  berada di luar kecepatan kabel yang diijinkan  $\dot{l}_a$ .



(a)



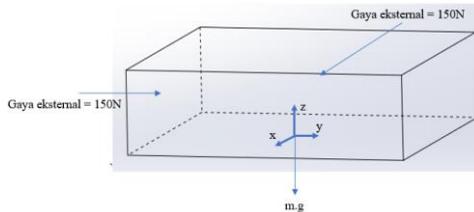
(b)

**Gambar 4.7.** Tampak bawah *twist feasible workspace* dari *cable arrangement* (a) 11 dan (b) 17

#### 4.4.2. Studi Kasus 2

Pada studi kasus 2, setiap desain akan diuji statis, kinematis, dan *interference* baik kabel dengan kabel dan kabel dengan *platform* sesuai dengan parameter dan variabel desain. *Wrench*

*external* yang digunakan pada kasus 2 adalah beban *mobile platform* dan *payload* yang berjumlah 100 kg dan berada tepat di pusat massa platform dan gaya akibat angin sebesar 150N ke arah sumbu x positif dan y positif seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8. Semua desain yang dihasilkan akan dibandingkan dan dicari *workspace* terbesar. Hal ini dilakukan dengan cara mencari jumlah pose terbanyak yang dihasilkan tiap desain.

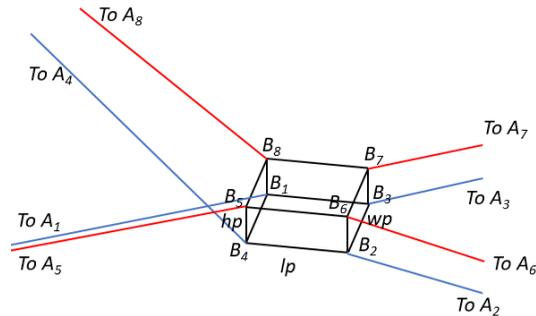


**Gambar 4.8.** Skematik gaya eksternal pada *mobile platform* studi kasus 2

Pengujian dilakukan pada 2400 desain yang ada dan didapatkan enam (6) desain yang menghasilkan *overall workspace* terbesar dengan jumlah titik pose adalah 196 titik atau dapat dikatakan 19,6% dari volume kerja robot dapat dijangkau oleh robot tersebut. Tabel 4.3 berikut rincian desain yang didapatkan:

**Tabel 4.3.** Rincian Desain dengan *Workspace* Terbesar Studi Kasus 2

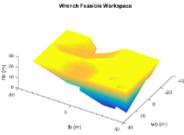
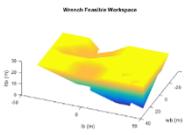
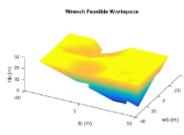
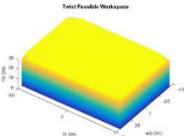
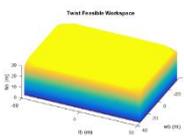
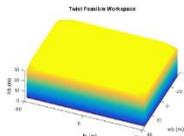
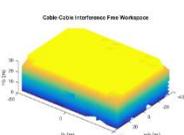
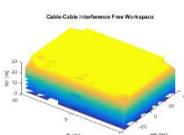
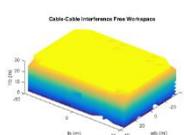
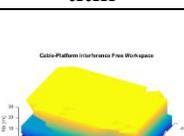
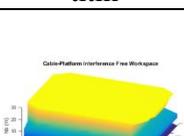
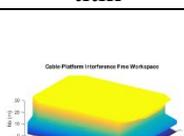
No. Desain	Panjang Platform lp (m)	Lebar Platform wp (m)	Tinggi Platform hp (m)	Cable Arrangement	Jumlah Pose
1	0,48	0,48	0,10	22	196
2	0,52	0,52	0,10		
3	0,57	0,57	0,10		
4	0,66	0,66	0,10		
5	0,70	0,70	0,10		
6	0,66	0,66	0,14		
7	0,70	0,70	0,14		

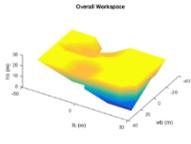
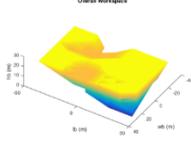
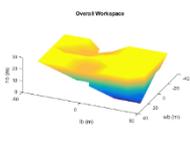


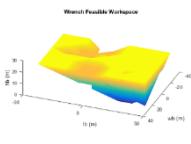
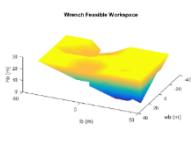
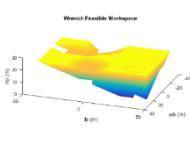
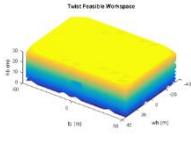
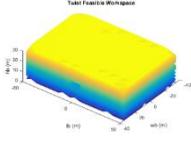
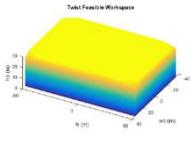
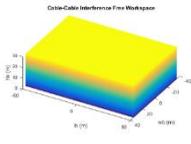
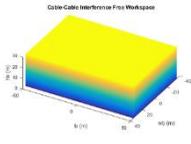
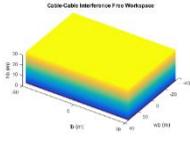
**Gambar 4.9.** Skematik *cable arrangement* 22

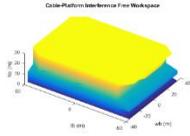
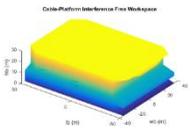
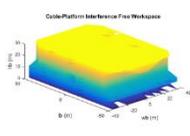
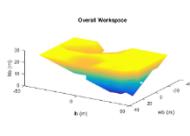
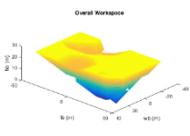
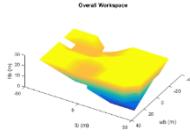
Gambar 4.9 menunjukkan skematik *cable arrangement* ke-22. *Overall workspace* didapatkan dengan cara saling memotongkan (*intersect*) hasil dari *wrench feasible workspace*, *twist feasible workspace*, *cable-cable interference free workspace*, dan *cable-platform interference workspace* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Sebagai pembandingan CDPR dengan *cable arrangement* paling sederhana juga ditampilkan, yaitu *cable arrangement* 1 dengan panjang dan lebar *platform* adalah 0,7m dan tinggi *platform* adalah 0,14m.

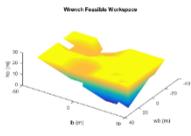
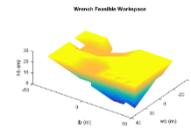
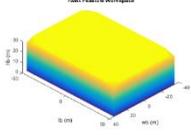
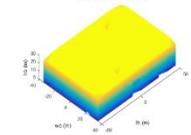
**Tabel 4.4.** *Workspace* dari Setiap Tahapan Pencarian *Cable Arrangement* dan *Dimensi Platform* dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 2

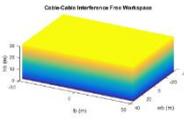
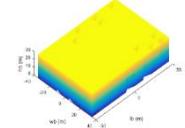
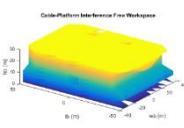
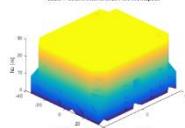
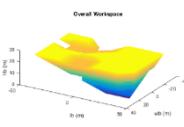
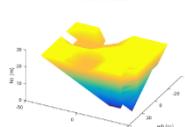
Keterangan	Desain 1	Desain 2	Desain 3
<i>Wrench feasible workspace</i>	 <p><math>n_{WFW} = 205</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 205</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 205</math> titik</p>
<i>Twist feasible workspace</i>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>
<i>Cable to cable interference free workspace</i>	 <p><math>n_{CCIFW} = 992</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 992</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 992</math> titik</p>
<i>Cable to platform interference free workspace</i>	 <p><math>n_{CPIFW} = 930</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 928</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 928</math> titik</p>

<p><i>Overall workspace</i></p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>
---------------------------------	---	---	---

Keterangan	Desain 4	Desain 5	Desain 6
<p><i>Wrench feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{WFW} = 206</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 206</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 205</math> titik</p>
<p><i>Twist feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{TFW} = 902</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 902</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 902</math> titik</p>
<p><i>Cable-cable interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 998</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 998</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 998</math> titik</p>

<p><i>Cable-platform interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 928</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 928</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 930</math> titik</p>
<p><i>Overall workspace</i></p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>

Keterangan	Desain 7	Cable Arrangement 1
<p><i>Wrench feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{WFW} = 205</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 203</math> titik</p>
<p><i>Twist feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>

<p><i>Cable-cable interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 998</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>
<p><i>Cable-platform interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 930</math> titik</p>	 <p><math>n_{CPIFW} = 976</math> titik</p>
<p><i>Overall workspace</i></p>	 <p><math>n_{Total} = 196</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 194</math> titik</p>

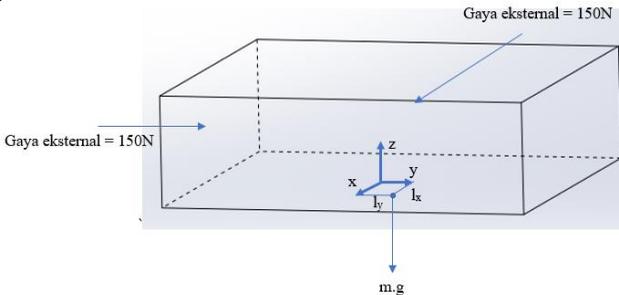
*Overall workspace* dari setiap desain yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Hal ini menunjukkan bahwa *platform* hanya dapat bergerak di dalam ruangan yang berwarna. Pergerakan Berdasarkan persentase volume yang dapat dijangkau robot, terdapat penurunan yang cukup signifikan antara studi kasus 1 dengan studi kasus 2, yaitu sebesar 45,2% dari 64,8% menjadi 19,6%. Hal ini mengindikasikan bahwa robot harus digunakan pada kondisi lingkungan yang kecepatan anginnya rendah atau dapat mengganti kabel yang akan berpengaruh ke tegangan maksimum dari kabel tersebut agar *workspace* yang dihasilkan lebih besar.

Pemilihan desain dengan *workspace* terbesar didasarkan dari ukuran *platform* yang dibutuhkan. Hal ini dikarenakan *overall workspace* dari setiap desain yang ditunjukkan pada Tabel 4.4

memiliki volume cakupan yang sama dan bentuk yang mirip satu dengan yang lain. Ketika ukuran platform yang dibutuhkan besar, maka desain ke-7 dapat dipilih. Sebaliknya, ketika ukuran platform yang dibutuhkan kecil, maka desain pertama yang dipilih.

#### 4.4.3. Studi Kasus 3

Pada studi kasus 3, setiap desain akan diuji statis, kinematis, dan interference baik kabel dengan kabel dan kabel dengan platform sesuai dengan parameter dan variabel desain. *Wrench external* yang digunakan pada kasus 3 adalah beban *mobile platform* dan *payload* yang berjumlah 100 kg dan gaya akibat angin sebesar 150N ke arah sumbu x positif dan y positif. Posisi dari beban *payload* tidak tepat berada di pusat massa platform sehingga terdapat *offset* sebesar  $l_y$  terhadap sumbu x dan  $l_x$  terhadap sumbu y dari platform frame seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10. Hal ini mengakibatkan momen terhadap sumbu x dan y tercipta yaitu dengan mengalikan beban *payload* dengan  $l_y$  untuk  $m_y$  dan  $l_x$  untuk  $m_x$ . Besar  $l_x$  dan  $l_y$  adalah 5mm sehingga menghasilkan momen  $m_x$  dan  $m_y$  sebesar 5 Nm.



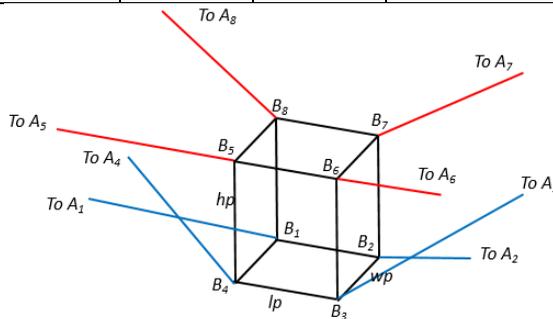
**Gambar 4.10.** Skematik gaya eksternal pada *mobile platform* studi kasus 3

Semua desain yang dihasilkan akan dibandingkan dan dicari *workspace* terbesar. Hal ini dilakukan dengan cara mencari jumlah pose terbanyak yang dihasilkan tiap desain. Pengujian dilakukan pada 2400 desain yang ada dan didapatkan empat (4) desain yang menghasilkan *overall workspace* terbesar dengan jumlah titik pose

adalah 106 titik atau dapat dikatakan 10,6% dari volume kerja robot dapat dijangkau oleh robot tersebut. Tabel 4.5 berikut rincian desain yang didapatkan:

**Tabel 4.5.** Rincian Desain dengan *Workspace* Terbesar Studi Kasus 3

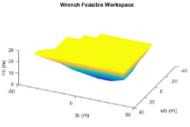
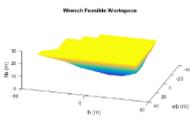
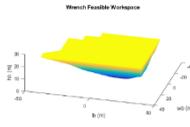
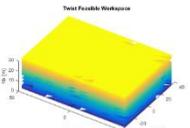
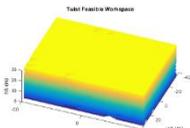
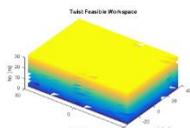
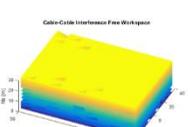
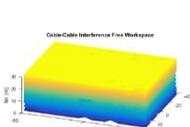
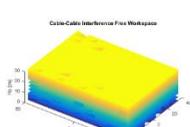
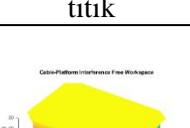
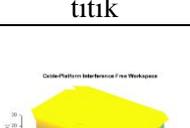
No.	Panjang Platform $lp$ (m)	Lebar Platform $wp$ (m)	Tinggi Platform $hp$ (m)	Cable arrangement	Jumlah Pose
1	0,30	0,30	0,46	24	106
2	0,30	0,30	0,5		
3	0,34	0,34	0,5		
4	0,43	0,43	0,5		

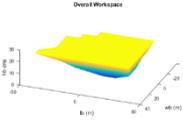
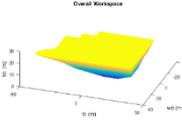
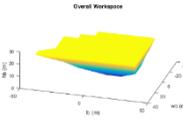


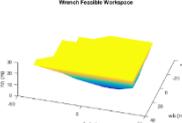
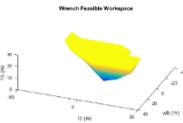
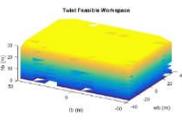
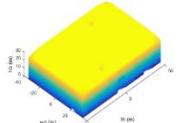
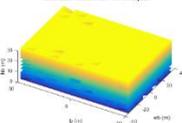
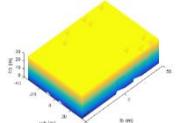
**Gambar 4.11.** Skematik *cable arrangement* 24

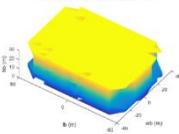
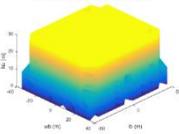
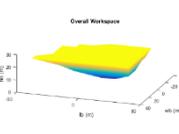
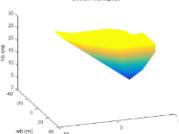
Gambar 4.11 menunjukkan skematik *cable arrangement* ke-24. Hasil ini didapatkan dengan cara saling memotongkan (*intersect*) hasil dari *wrench feasible workspace*, *twist feasible workspace*, *cable-cable interference free workspace*, dan *cable-platform interference workspace* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6. Sebagai pembandingan CDPR dengan *cable arrangement* paling sederhana juga ditampilkan, yaitu *cable arrangement* 1 dengan panjang dan lebar platform adalah 0,3m dan tinggi platform adalah 0,46m.

**Tabel 4.6** *Workspace* dari Setiap Tahapan Pencarian Cable Arrangement dan Dimensi Platform dengan Jumlah Titik Pose Terbanyak pada Studi Kasus 3

Keterangan	Desain 1	Desain 2	Desain 3
<i>Wrench feasible workspace</i>	 $n_{WFW} = 107$ titik	 $n_{WFW} = 107$ titik	 $n_{WFW} = 107$ titik
<i>Twist feasible workspace</i>	 $n_{TFW} = 912$ titik	 $n_{TFW} = 912$ titik	 $n_{TFW} = 912$ titik
<i>Cable to cable interference free workspace</i>	 $n_{CCIFW} = 996$ titik	 $n_{CCIFW} = 996$ titik	 $n_{CCIFW} = 996$ titik
<i>Cable to platform interference free workspace</i>	 $n_{CPIFW} = 900$ titik	 $n_{CPIFW} = 896$ titik	 $n_{CPIFW} = 912$ titik

<p><i>Overall workspace</i></p>	 <p><math>n_{Total} = 106</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 106</math> titik</p>	 <p><math>n_{Total} = 106</math> titik</p>
---------------------------------	---	---	---

Keterangan	Desain 4	Cable Arrangement 1
<p><i>Wrench feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{WFW} = 107</math> titik</p>	 <p><math>n_{WFW} = 61</math> titik</p>
<p><i>Twist feasible workspace</i></p>	 <p><math>n_{TFW} = 904</math> titik</p>	 <p><math>n_{TFW} = 906</math> titik</p>
<p><i>Cable to cable interference free workspace</i></p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>	 <p><math>n_{CCIFW} = 996</math> titik</p>

<p><i>Cable to platform interference free workspace</i></p>	<p>Cable-Platform Interference Free Workspace</p>  <p><math>n_{\text{CPIFW}} = 900</math> titik</p>	<p>Cable-Platform Interference Free Workspace</p>  <p><math>n_{\text{CPIFW}} = 976</math> titik</p>
<p><i>Overall workspace</i></p>	<p>Overall Workspace</p>  <p><math>n_{\text{Total}} = 106</math> titik</p>	<p>Overall Workspace</p>  <p><math>n_{\text{Total}} = 61</math> titik</p>

*Overall workspace* dari setiap desain studi kasus 3 terdapat pada Tabel 4.6. Daerah yang berwarna merupakan daerah yang dapat dijangkau oleh robot. Dari persentase volume yang dapat dijangkau robot, terdapat penurunan yang cukup signifikan antara studi kasus 2 dengan studi kasus 3, yaitu sebesar 9% dari 19,6% menjadi 10,6%. Hal ini mengindikasikan bahwa pemosisian beban *payload* harus diperhatikan agar tidak terdapat *offset* yang akan menurunkan *workspace* dari CDPR.

#### 4.5. Perbedaan Setiap Studi Kasus

Dari ketiga studi kasus masing-masing menghasilkan desain berbeda-beda dengan *workspace* terbesar. Perbedaan juga terjadi pada volume jangkauan robot. Urutan volume jangkauan robot dari terbesar hingga terkecil yang dihasilkan adalah studi kasus 1, studi kasus 2, dan studi kasus 3 yang secara berturut-turut volumenya adalah 64,8%, 19,6%, dan 10,6% dari total volume yang diinginkan.

Perbedaan ini terjadi karena pengaruh wrench eksternal  $w_e$  yang bekerja pada *platform*. Pada parameter dan variabel desain yang tetap, penambahan komponen penyusun *wrench* eksternal

akan menghasilkan desain yang berbeda dan volume jangkauan yang semakin mengecil.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini akan disampaikan kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari penelitan ini dapat diambil beberapa kesimpulan:

1. Dimensi dari desain optimum pada studi kasus 1 adalah pada *cable arrangement* 11 dan 17 dengan panjang, lebar, dan tinggi *platform* yang sama, yaitu secara berurutan 0,34m, 0,34m, dan 0,23m. Kedua desain tersebut dapat mencapai *overall workspace* 64,8% dari volume kerja total. Dari setiap *workspace* (WFW, TFW, CCIFW, dan CPIFW), volume paling kecil dihasilkan oleh *wrench feasible workspace* (WFW)
2. Dimensi dari desain optimum pada studi kasus 2 adalah pada *cable arrangement* 22 dengan panjang dan lebar *platform* yang sama, yaitu 0,48m, 0,52m, 0,57m, 0,66m, 0,7m, 0,66m dan 0,7m. Setiap panjang dan lebar *platform* berpasangan panjang dan lebar *platform* berpasangan secara berurutan dengan tinggi *platform*, yaitu 0,1m, 0,1m, 0,1m, 0,1m, 0,14m, dan 0,14m. Jangkaua dari ketujuh desain tersebut dapat mencapai 19,6% dari volume total.
3. Dimensi dari desain optimum pada studi kasus 4 adalah pada *cable arrangement* 24 dengan panjang dan lebar *platform* yang sama, yaitu 0,3m, 0,3m, 0,34m, dan 0,43m. Setiap panjang dan lebar *platform* berpasangan secara berurutan dengan tinggi *platform*, yaitu 0,46m, 0,5m, 0,5m, dan 0,5m. Jangkauan dari keempat desain tersebut dapat mencapai 19,6% dari volume total.

#### **5.2. Saran**

Dari penelitian yang sudah dilakukan, saran yang bermanfaat dalam penelitian ini:

1. Perlu dilakukan penelitian pengaruh perubahan batas maksimum-minimum tegangan dari kabel yang digunakan terhadap besar *workspace* yang dihasilkan.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh *properties* dari kabel yang digunakan terhadap *interference* yang terjadi di CDPR.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh posisi *exit point* yang dapat berubah-ubah posisinya terhadap besar *workspace* yang dihasilkan.
4. Penelitian tentang proses kalibrasi pada lingkungan sebenarnya perlu dilakukan, agar posisi tiang-tiang tempat *exit point* berada dapat mengikuti kondisi lingkungan yang sebenarnya

## DAFTAR PUSTAKA

- Blanchet, L., & Merlet, J.-P. (2014). "Interference Detection for Cable-Driven Parallel Robots (CDPRs)". **International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)**. Besancon: IEEE.
- Bosscher, P. M. (2004). "Disturbance Robustness Measures and Wrench-Feasible Workspace Generation Techniques for Cable-Driven Robots". Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- Cardou, P., Perreault, S., Gosselin, C. M., & Otis, M. J.-D. (2010). "Geometric Determination of The Interference-Free Constant-Orientation Workspace of Parallel Cable-Driven Mechanisms". **Journal of Mechanisms and Robotics**, 1-9.
- Cark S. Holland, D. J. (2004). *United State Patent No. US 6,826,452 B1*.
- Caro, S., & Martin, A. (2016). "Design and Modeling of Cable-driven Parallel Robots: State of the Art and Open Issues".
- Gagliardini, L., Caro, S., & Gouttefarde, M. (2015). "Dimensioning of Cable-Driven Parallel Robot Actuators, Gearboxes And Winches According To The Twist Feasible Workspace". **International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. Gothenburg: IEEE.
- Gosselin, C. (2013). "Cable-Driven Parallel Mechanisms: State of The Art". **Bulletin of the JSME**, 1-17.
- Gouttefarde, M., Daney, D., & Merlet, J.-P. (2011). "Interval-Analysis-Based Determination of The Wrench Feasible Workspace of Parallel Cable-Driven Robots". **IEEE Transactions on Robotics**, 1-13.
- Guay, F., Cardou, P., Ruiz, A. L., & Caro, S. (2014). "Measuring How Well a Structure Supports Varying External

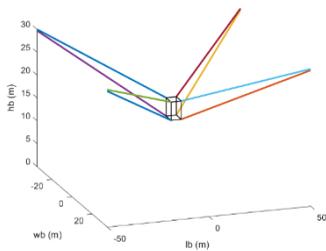
Wrenches". **New Advances in Mechanisms, Transmissions and Applications**, 385-392.

Hanafie, J., Nurahmi, L., Caro, S., & Pramujati, B. (2017). "Design Optimization Of Spatial Four Cables Suspended Cable Driven Parallel Robot For Rapid Life-Scan". **ICAMIMIA**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

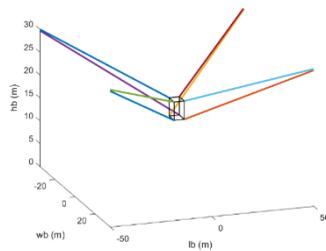
Nurahmi, L., Pramujati, B., Caro, S., & Jeffrey. (2017). "Dimension Syntesis of Suspended Eight Cables-Driven Parallel Robot for Search-and-Rescue Operation". **ICAMIMIA**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

# LAMPIRAN 1

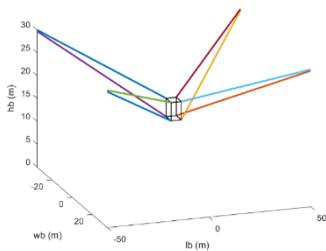
## GAMBAR SELURUH CABLE ARRANGMENT



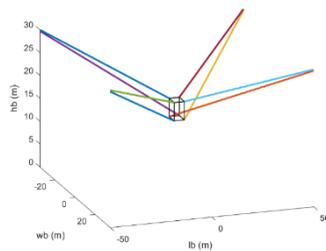
(a) Cable arrangement 1



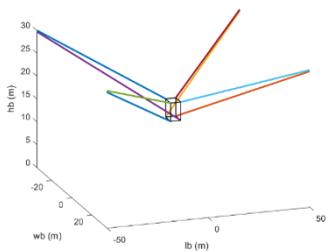
(b) Cable arrangement 2



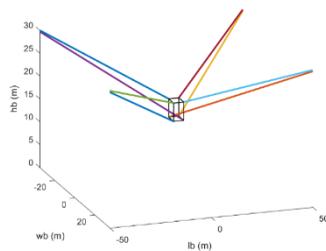
(c) Cable arrangement 3



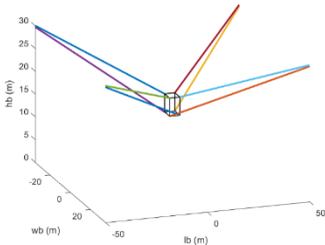
(d) Cable arrangement 4



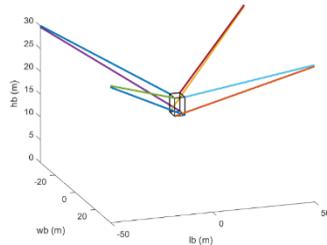
(e.) Cable arrangement 5



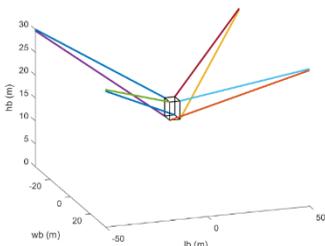
(f.) Cable arrangement 6



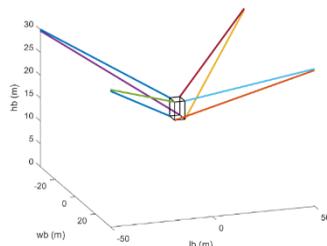
(g.) Cable arrangement 7



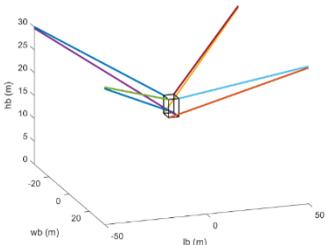
(h.) Cable arrangement 8



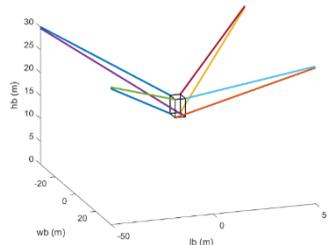
(i.) Cable arrangement 9



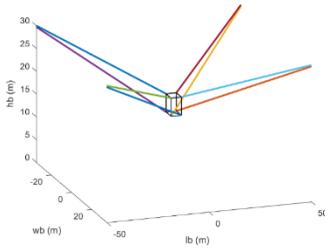
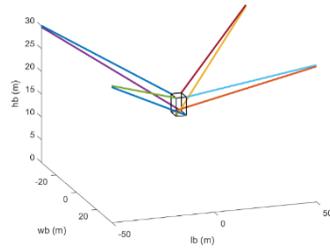
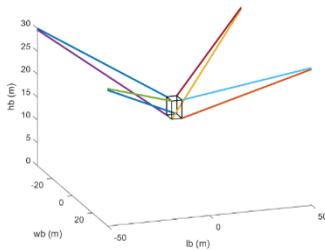
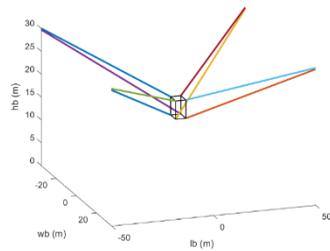
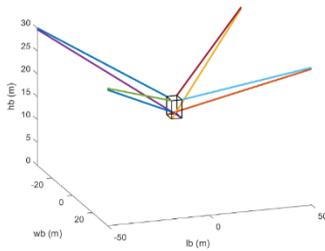
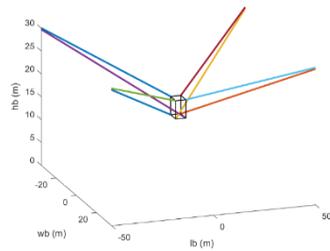
(j.) Cable arrangement 10

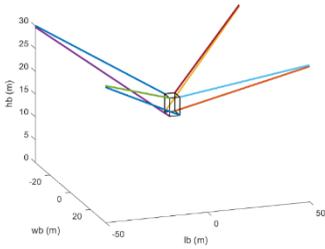


(k.) Cable arrangement 11

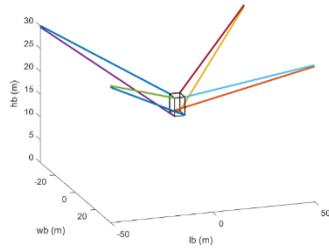


(l.) Cable arrangement 12

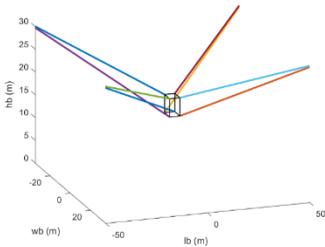
(m.) *Cable arrangement 13*(n.) *Cable arrangement 14*(o.) *Cable arrangement 15*(p.) *Cable arrangement 16*(q.) *Cable arrangement 17*(r.) *Cable arrangement 18*



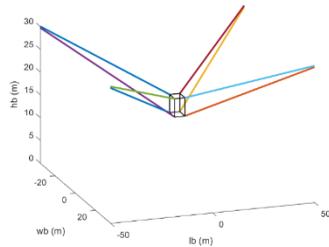
(s.) Cable arrangement 19



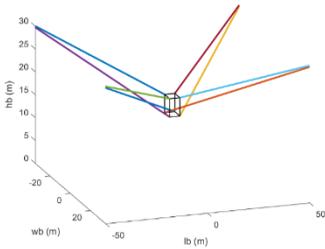
(t.) Cable arrangement 20



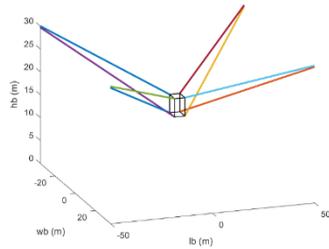
(u.) Cable arrangement 21



(v.) Cable arrangement 22



(w.) Cable arrangement 23



(x.) Cable arrangement 24

## BIODATA PENULIS



**Vincentius Adiyanto Handoyo** merupakan anak bungsu dari tiga bersaudara dari keluarga bapak Agus Handoyo. Penulis lahir di Tangerang, 24 Mei 1996. Penulis memulai pendidikan di TK Budi Luhur Karang Tengah. Penulis melanjutkan pendidikan dasar di SDK Sang Timur Ciledug, pendidikan menengah di SMPK Sang Timur Ciledug, dan pendidikan menengah keatas di SMA Terpadu Pahoia Gading Serpong. Penulis lalu melanjutkan pendidikan tinggi sarjana pada tahun 2014 di

Insitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Departemen Teknik Mesin.

Semasa kuliah, penulis aktif di beberapa kegiatan. Pertama, penulis merupakan bagian dari KMK ITS sebagai staff eksternal periode 2015/2016. Kedua, penulis juga tergabung di Himpunan Mahasiswa Mesin sebagai staff ahli akademik Departemen Kesejahteraan Mahasiswa pada periode 2016/2017. Penulis juga banyak mengikuti kepanitiaan untuk beberapa *event* seperti Mechanical City 2015, Mechanical City 2016, Mechanical Competition 2017, Kemah Rohani XIX

Untuk informasi dan saran yang dibutuhkan dari dan kepada penulis dapat menghubungi penulis melalui email sebagai berikut: [vincentius.adiyanto.handoyo@gmail.com](mailto:vincentius.adiyanto.handoyo@gmail.com).