

TUGAS AKHIR (MANUFAKTUR) TM184835

Vibrasi Kabel pada Kesetimbangan Dinamis Mobile Cable Driven Parallel Robot (M-CDPR)

SAMUEL ANGGI PEHULISA BARUS 02111640000100

Dosen Pembimbing:

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020

VIBRASI KABEL PADA KESETIMBANGAN DINAMIS *MOBILE CABLE DRIVEN PARALLEL ROBOT* (M-CDPR)

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memeperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Oleh:

SAMUEL ANGGI PEHULISA BARUS

NRP. 02111640000100

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- 1. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. NIP. 1986201712037
- 2. Bambang Pramujati, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. (Penguji I) NIP. 196912031994031001
- 4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. NIP. 198604012015041001

SURABAYA AGUSTUS, 2020 enguii III)

Vibrasi Kabel pada Kesetimbangan Dinamis Mobile Cable Driven Parallel Robot (M-CDPR)

Nama	: Samuel Anggi Pehulisa Barus
NRP	: 02111640000100
Pembimbing	: Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Indonesia merupakan negara kepulauan yang berada di ring of fire, daerah yang sering mengalami gempa bumi dan letusan gunung berapi, Hal ini membuat Indonesia rawan akan bencana alam. Perlu dilakukan tindakan cepat tanggap, penanggulangan pasca bencana untuk mengurangi jumlah korban akibat bencana. Salah satu faktor utamanya ialah waktu yang dibutuhkan untuk proses evakuasi secara menyeluruh pada area yang terkena dampak bencana. Oleh karena itu dibutuhkan alat yang memadai untuk membantu mempersingkat waktu proses evakuasi. Mobile cable driven parallel robot (M-CDPR) menjadi alternatif alat yang ditawarkan untuk mempercepat proses evakuasi dengan area yang besar. Pada penilitian ini, mengikuti penilitian sebelumnya, M-CDPR memiliki 3 mobile base dan 3 kabel dengan reconfigurable boom yang dihubungkan pada satu point mass. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk melihat pengaruh dinamis *reconfigurable* boom terhadap tipping dan rolling pada kesetimbangan mobile base M-CDPR dan pengaruh vibrasi kabel terhadap tipping dan rolling pada kesetimbangan mobile base M-CDPR

Penelitian dimulai dengan identifikasi masalah dan studi literatur. Selanjutnya parameter desain dan variabel penelitian ditentukan. Model geometri M-CDPR, kesetimbangan dinamis *platform*, kesetimbangan dinamis *reconfigurable boom* dan kesetimbangan statis tiap *mobile base* kemudian dapat dianalisa. Tahap terakhir penilitian ini adalah analisa *zero moment point* (ZMP) untuk tiap *mobile base* dan analisa vibrasi pada kabel.

Dari penilitian yang dilakukan, didapatkan hasil analisa vaitu untuk non-reconfigurable boom mengalami rolling pada *mobile base* ke 3 pada kisaran waktu 80 – 100 detik dengan beban pada platform sebesar 3600 kg mengikuti lintasan 1/36 horizontal helix, sedangkan reconfigurable boom tidak mengalami tipping ataupun rolling pada masing – masing mobile base. Reconfigurable boom dengan waktu durasi yang cepat mengakibatkan mobile base mengalami *tipping* dan *rolling* pada *mobile base*. Dari durasi waktu yang berbeda, durasi waktu yang kecil juga mengakibatkan vibrasi atau nilai aktual dibandingkan dengan nilai lintasan semakin besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *reconfigurable* lebih baik dalam melakukan penyelesaian trajektori dengan beban 3600 kg dan lintasan1/36 horizontal helix dibandingkan dengan nonreconfigurable. Pada reconfigurable, semakin cepat waktu durasi menyelesaikan lintasan akan menyebabkan semakin mudah terjadinya *tipping* dan *rolling* dan meningkatkan nilai vibrasi atau perbandingan antara nilai aktual dengan lintasan seharusnya semakin meningkat.

Kata Kunci: M-CDPR, *Platform*, Trajektori, *Mobile Base*, *Reconfigurable Boom*

Cable Vibration in Dynamic Equilibrium Mobile Cable Driven Parallel Robot (M-CDPR)

Name	: Samuel Anggi Pehulisa Barus
NRP	: 02111640000100
Supervisors	: Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Indonesia is an island nation that is in the ring of fire, an area that is often subjected to earthquakes and volcanic eruptions. This makes Indonesia vulnerable to natural disasters. Quick response actions need to be taken, post-disaster response to reduce the number of victims caused by disasters. One of the main factors is the time needed for the overall evacuation process in the area affected by the disaster. Therefore adequate tools are needed to help shorten the evacuation process. Mobile cable driven parallel robot (M-CDPR) is an alternative tool offered to speed up the evacuation process with a large area. In this research, following the previous research, M-CDPR has 3 mobile bases and 3 cables with reconfigurable boom connected to one point mass. The purpose of this study is to look at the dynamic effect of reconfigurable boom on tipping and rolling on the M-CDPR mobile base equilibrium and the effect of cable vibrations on tipping and rolling on the M-CDPR mobile base equilibrium

Research begins with problem identification and literature study. Then the design parameters and research variables are determined. The M-CDPR geometry model, platform dynamic equilibrium, reconfigurable dynamic equilibrium boom and static equilibrium for each mobile base can then be analyzed. The last stage of this research is the zero moment point analysis (ZMP) for each mobile base and vibration analysis on the cable. From the research carried out, the results of the analysis were that the non-reconfigurable boom experienced rolling on the 3rd mobile base with a load on the platform of 3600 kg at a range of time 80 - 100 seconds following the 1/36 horizontal helix trajectory, while the reconfigurable boom did not experience tipping or rolling on each mobile base. A reconfigurable boom with a fast duration resulting in the mobile base tipping or rolling on the mobile base. From different time durations, a small time duration also results in a larger vibration or actual value compared to the path value. The simulation results show that reconfigurable is better at completing trajectories with a load of 3600 kg and a 1/36 horizontal helix than non-reconfigurable ones. In reconfigurable, the faster the duration of completing the track will make it easier for tipping and rolling to occur and increase the vibration value or the ratio between the actual value and the track should increase.

Keywords: M-CDPR, Platform, Trajectory, Mobile Base, Reconfigurable Boom

DAFTAR ISI

Halaman Depani
Lembar Pengesahanii
Abstrakiii
Abstractv
Daftar Isivii
Daftar Gambarx
Daftar Tabelxiii
BAB I1
PENDAHULUAN1
1.1 Latar Belakang1
1.2 Rumusan Masalah2
1.3 Batasan Masalah2
1.4 Tujuan Penelitian
1.5 Manfaat Penelitian
BAB II4
DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA4
2.1 Dasar Teori
2.1.1 Cable Driven Parallel Robot (CDPR) dan Mobile Cable Driven Parallel Robot (M-CDPR)4
2.1.2 Model Geometri M-CDPR
2.1.3 Kondisi Kesetimbangan Dinamis <i>Plaftorm</i> 9
2.1.4 Kondisi Kesetimbangan Statis M-CDPR11
2.1.5 Zero Moment Point (ZMP)15

2.1.	6 Vibrasi Kabel Terhadap Kesetimbangan Din 15	amis
2.1.	7 Analisa Trajektori	20
2.2	Penelitian Terdahulu	21
BAB III.		23
3.1	Flowchart Penelitian	23
3.2	Proses Penelitian	
3.2.	1 Perumusan Masalah	
3.2.	2 Studi Literatur	
3.2.	3 Penentuan Parameter Desain M-CDPR dan	•
Var	rabel Penelitian	26
3.3	Output Yang Diinginkan	
BAB IV		29
4.1	Penurunan Rumus	
4.1.	1 Analisa Model Geometri pada M-CDPR	
4.1.	2 Analisa Kesetimbangan Dinamis <i>Platform</i>	30
4.1.	3 Analisa Kesetimbangan Dinamis Kabel	32
4.1.	4 Analisa Kesetimbangan Mobile Base M-CD	PR 38
4.1.	5 Analisa ZMP pada M-CDPR	49
4.1.	6 Parameter Desain M-CDPR	50
4.2	Hasil Simulasi	52
4.2. Vib	1 Distribusi Gaya Tegangan Kabel, ZMP dan rasi Kabel M-CDPR	52
4.2.	2 Analisa Durasi Waktu untuk Reconfigurable	62
4.2.	3 Analisa Durasi Waktu untuk Vibrasi	65
BAB V.		68

5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran	68
Daftar Pu	ıstaka	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema CDPR (Gosselin, 2013)	4
Gambar 2.2 Skema komponen motor CDPR (Jin,2018)	5
Gambar 2.3. SkyCam (Steven, 2013)	6
Gambar 2.4. Skem M-CDPR (Bin,2015)	7
Gambar 2.5. Free Body Diagram M-CDPR (Rasheed, 2017).	8
Gambar 2.6. Elemen kabel linear (Du,2013)	16
Gambar 2.7. <i>Circular Trajectory</i> pada Bidang Horizontal dengan Tampak 3 Dimensi (Gosselin, 2013)	20
Gambar 2.8. Konsep M-CDPR dengan 3 Kabel dan 3 <i>Mobile Base</i> pada Trajektori <i>parametric oscillation</i>	20
Gambar 2.9 Distribusi Tegangan Kabel dan ZMP Trajektori parametric oscillation non-reconfigurable terhadap waktu	22
Gambar 3.1 Desain M-CDPR 3 mobile base, 3 kabel	28
Gambar 4.1 FBD Model Geometri M-CDPR	29
Gambar 4.2 Kesetimbangan Dinamis <i>Platform</i>	31
Gambar 4.3 Pembagian node pada kabel M-CDPR	32
Gambar 4.4 Penyederhanaan <i>Finite Element</i> dari Node "0" atau <i>Anchor Point</i> hingga Node "n" atau <i>Platform</i>	. 33

Gambar 4.5 Free Body Diagram Nodal "0" End Effector	33
Gambar 4.6 FBD Mobile Base,	39
Gambar 4.7 FBD Reconfigurable Boom	40
Gambar 4.8 FBD Mobile Base	46
Gambar 4. 9 Hasil Simulasi MATLAB Non-Reconfigurable M-CDPR dengan trajektori horizontal helix	52
Gambar 4.10 Grafik Distribusi Gaya Tegangan Kabel Non- Reconfigurable M-CDPR dengan Trajektori Horizontal Helix	53
Gambar 4.11 Grafik Distribusi ZMP Non-Reconfigurabel M-CDPR melewati Trajektori Horizontal Helix	54
Gambar 4.12 Grafik Vibrasi dengan Perbedaan Nilai antara Aktual dan Lintasan Trajekotri <i>Horizontal Helix</i> pada <i>End</i> <i>Effector</i>	55
Gambar 4.13 Grafik Distribusi Tegangan Kabel Reconfigurable M-CDPR dengan Trajektori Horizontal Helix	57
Gambar 4.14 Grafik Distribusi ZMP <i>Reconfigurable</i> M-CDPR dengan Trajektori <i>Horizontal Helix</i>	58
Gambar 4.15 Grafik Vibrasi dengan Perbedaan Nilai antara Aktual dan Lintasan Trajektori <i>Horizontal Helix</i> pada <i>End</i> <i>Effector</i>	60
Gambar 4.16 Grafik Distribusi Panjang dan Sudut Lengan Boom	60
Gambar 4.17 Grafik Distribusi ZMP <i>Tipping Reconfigurable</i> M-CDPR dengan Trajektori <i>Horizontal Helix</i>	63

Gambar 4.18 Grafik Distribusi ZMP <i>Rolling Reconfigurable</i> M-CDPR dengan Trajektori <i>Horizontal Helix</i>	64
Gambar 4.19 Grafik Distribusi Vibrasi Kabel End Effector dengan Trajektori Horizontal Helix	66

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Desain M-CDPR	50
Tabel 4.2 Parameter Boom pada Mobile Base	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wilayah Indonesia merupakan wilayah yang rawan akan bencana alam. Berada di daerah *ring of fire* membuat Indonesia sering mengalami gempa bumi, tsunami dan letusan gunung selama tahun 2019 kemarin. Berdasarkan data dari BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana), ada 3,721 bencana alam yang terjadi, tercatat sejak 1 Januari hingga 23 Desember 2019, dimana kejadian tersebut mengakibatkan sebanyak 477 jiwa meninggal dunia, 109 jiwa dinyatakan hilang, 3,415 jiwa luka – luka dan 6,1 juta jiwa terkena dampak bencana alam.

Pasca bencana merupakan kondisi yang memungkinkan untuk menekan jumlah korban akibat bencana. Perlu dilakukan tindakan cepat tanggap penanggulangan pasca bencana untuk mengurangi jumlah korban. Salah satu faktor utamanya ialah waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proses evakuasi secara menyeluruh pada area yang terkena dampak bencana. Saat ini kemampuan yang dimiliki untuk melakukan proses evakuasi sering mengalami kendala waktu dalam hal pembersihan puing – puing bangunan dengan wilayah kerja yang cukup luas. Akibatnya, kemungkinan untuk mengurangi angka korban bencana pun menurun.

Untuk proses evakuasi dan pembersihan puing – puing bangunan sering digunakan *excavator*. *Excavator* merupakan alat konstruksi berat yang digunakan pada penanggulangan bencana dengan mengeruk tanah dan sisa – sisa bangunan yang rusak. Tetapi kemampuan *excavator* minim dalam hal wilayah kerja yang luas, serta memakan cukup banyak waktu untuk membersihkan semua area yang terkena dampak bencana.

Saat ini, para peniliti melakukan pengembangan alat untuk menggantikan *excavator* dalam mengerjakan penanggulangan bencana. *Mobile cable driven parallel robot* (M-CDPR) menjadi alternatif yang ditawarkan untuk mempercepat proses evakuasi dengan area yang besar. Pada penilitian ini, mengikuti penilitian sebelumnya, M-CDPR memiliki 3 *mobile base* dan 3 kabel dengan lengan *reconfigurable telescopic* yang dihubungkan pada satu *point mass*. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk melihat pengaruh dinamis *reconfigurable boom* terhadap *tipping* dan *rolling* pada kesetimbangan *mobile base* M-CDPR dan pengaruh vibrasi kabel terhadap *tipping* dan *rolling* pada kesetimbangan *mobile base* M-CDPR dan kesetimbangan *mobile base* M-CDPR

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Bagaimana pengaruh kesetimabangan dinamis *reconfigurable boom* terhadap *tipping* dan *rolling* pada kesetimbangan *mobile base* M-CDPR?
- 2. Bagaimana pengaruh vibrasi kabel terhadap kesetimbangan *tipping* dan *rolling* pada *mobile base* M-CDPR?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penilitan ini adalah sebagai berikut:

- 1. *Mobile base Cable Driven Parallel Robot* memiliki dimensi $P \times L \times T = 6.42m \times 6.3m \times 3.3m$
- 2. Jumlah *mobile base* adalah 3 dan tersebar dalam bentuk segitiga sama sisi.
- 3. *Platform* berupa titik massa.
- 4. Jenis detektor, kontroler dan motor tidak dibahas.
- 5. Pengaruh angin dan motor tidak dibahas
- 6. Skid dan slip tidak dibahas.
- 7. Lengan dari *Mobile base Cable Driven Parallel Robot* berupa *telescopic arm* yang dapat memanjang dan memendek serta memiliki 1 *exit point*.
- 8. Lintasan trajektori *platform* telah ditentukan.
- 9. Jenis crane yang digunakan adalah hydraulic crane.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penilitan ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengetahui pengaruh dinamis *reconfigurable boom* terhadap *tipping* dan *rolling* pada kesetimbangan *mobile base* M-CDPR
- 2. Mengetahui pengaruh vibrasi kabel terhadap *tipping* dan *rolling* pada kesetimbangan *mobile base* M-CDPR

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penilitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mendapatkan pengetahuan terbarukan tentang dunia robotika terkhusus mengenai *Cable Driven Parallel Robot*
- 2. Memberikan inovasi dalam hal sistem pendeteksian korban bencana alam
- 3. *Cable Driven Parallel Robot* yang dikembangkan dalam penelitian ini juga dapat digunakan untuk *material handling* di industri

BAB II

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

2.1.1 Cable Driven Parallel Robot (CDPR) dan Mobile Cable Driven Parallel Robot (M-CDPR)

CDPR atau *cable driven parallel robot* merupakan salah satu jenis *parallel manipulator* atau sistem mekanikal yang menggunakan beberapa lengan robot berupa kabel yang terhubung dengan *base* untuk menggerakan sebuah *platform*. *Platform* dinamakan sebagai *platform* seperti yang digambarkan pada gambar 2.1. *Platform* dapat dimodifikasi berupa titik massa, terhubung dengan kabel melalui sambungan yang disebut *anchor point* dan sambungan kabel dengan *base* disebut sebagai *exit point*.



Gambar 2.1 Skema CDPR (Gosselin, 2013)

Platform yang bergerak mengikuti trajektori yang ditentukan, diggerakkan oleh kabel dengan memvariasikan gaya tegangan masing masing kabel. Variasi pada gaya tegangan kabel pada CDPR diatur menggunakan komponen seperti motor, katrol dan roda gigi dengan bentuk rangkaian seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema komponen motor CDPR (Jin,2018)

Saat ini, berbagai pengembangan CDPR dilakukan demi memperluas penggunaannya untuk memenuhi kebutuhan di berbagai industri. Salah satu penggunaan CDPR yang dapat kita temui pada industri olahraga adalah *SkyCam*, sebuah kamera yang digerakkan oleh tali yang terhubung pada sudut – sudut lapangan, digunakan untuk merekam pertandingan dari ketinggian dengan menghasilkan gambaran pertandingan yang lebih nyata.



Gambar 2.3 SkyCam (Keating, 2013)

CDPR dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *fully* constrained dan cable suspended. Fully constrained CDPR merupakan CDPR dengan keadaan jumlah kabel lebih banyak dari jumlah DOF, dilengkapi actuator tambahan untuk menjaga kondisi kabel dalam kondisi tegang. Cable suspendend CDPR merupakan CDPR yang menjaga kondisi tegangan kabel dengan menggunakan beban dari *platform*, memiliki keterbatasan akselerasi yaitu akselerasi vertikal yang hanya disebabkan oleh gravitasi dan tidak bisa dikontrol menggunakan real-time controllers.

Dibandingkan dengan *parallel manipulator* lainnya, CDPR memiliki kelebihan dalam hal berat, yaitu berat yang lebih ringan dibandingkan dengan *parallel manipulator* menggunakan rigid link. Walaupun ringan, CDPR tetap mampu membawa ukuran beban yang sama bahkan lebih berat serta bergerak lebih cepat sepanjang workspace. Namun CDPR memiliki kekurangan yaitu CDPR tidak mampu memberikan gaya bernilai negatif dan CDPR menggunakan fixed frame yang sulit dipindahkan. Dari kekurangan ini, maka dilakukan pengembangan lanjutan CDPR untuk memampukan CDPR memiliki fixed frame yang dapat bergerak atau berpindah tempat. CDPR ini diperkenalkan sebagai Mobile Cable Driven Parallel Robot atau M-CDPR. M-CDPR merupakan CDPR dengan fixed frame berupa mobile base yang dapat berpindah tempat dan memiliki lengan sebagai ujung exit point yang dapat bergerak ataupun diam seperti pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Skema M-CDPR (Zi2015)

2.1.2 Model Geometri M-CDPR

M-CDPR memiliki model geometri seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.5. Pada gambar 2.5 didapatkan *platform* (P) dalam bentuk *point mass* dengan dua *degree of*



freedom yaitu translasi pada sumbu X dan Y.

Gambar 2.5 *Free Body Diagram* M-CDPR (Rasheed,2017) Terdapat dua *mobile base* yang masing – masing memiliki dua kabel. Kemudian didapatkan juga persamaan:

$$\mathbf{l}_{ij}^b = \boldsymbol{p}_{ij}^b - \mathbf{a}_{ij}^b \tag{2.1}$$

Dimana:

i = nomor kabel yang digunakan ;1, 2, 3,...*n*. *j* = nomor mobile base ;1, 2, 3,...*m*. \mathbf{l}_{ij}^{b} = vektor panjang tali dari point mass ke mobile base *i*, anchor point *j*. \boldsymbol{p}_{ij}^{b} = vektor *point mass* terhadap *fixed coordinate*.

 \mathbf{a}_{ij}^{b} = vektor dari *exit point* ke *i* pada *mobile base j* terhadap *fixed coordinate.*

Persamaan di atas didapatkan dengan menggambarkan polygon antara vektor panjang kabel, *exit point* dan *fixed coordinate*. Vektor Panjang kabel akan digunakan untuk mencari unit vector dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{u}_{ij}^b = \frac{\mathbf{l}_{ij}^b}{\left\|\mathbf{l}_{ij}^b\right\|} \tag{2.2}$$

Dimana:

 \mathbf{u}_{ii}^{b} = unit vektor kabel *i* pada *mobile base* ke *j*.

 $\|\mathbf{l}_{ij}^b\| = Euclidean Norm \, dari \, \mathbf{l}_{ij}^b.$

Euclidean Norm adalah *mangnitude* dari vector tanpa melihat kemana arahnya dan dapat dicari dengan persamaan (Rasheed,2017):

$$\left\|\mathbf{l}_{ij}^{b}\right\| = \sqrt{(\mathbf{l}_{ij}^{bx})^{2} + (\mathbf{l}_{ij}^{by})^{2} + (\mathbf{l}_{ij}^{bz})^{2}}$$
(2.3)

2.1.3 Kondisi Kesetimbangan Dinamis Plaftorm

Kondisi kesetimbangan dinamis *platform* didapatkan dengan menganalisa kesetimbangan gerak *platform*, dimana pada gambar 2.5 *platform* dinyatakan dalam bentuk *point mass*. Dasar dari analisa kesetimbangan dinamis adalah Hukum Newton 2 yaitu menjelaskan bahwa gaya total yang bekerja pada suatu benda berbanding lurus dengan massa dan percepatannya (Gosselin,2012). Maka dari penjelasan tersebut, analisa dinamis dari pergerakan *point mass* dapat dirumuskan sebagai:

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{w}_{\boldsymbol{e}} = m\ddot{\mathbf{p}} \tag{2.4}$$

Dimana:

W	= matriks wrench.
τ	= gaya tegangan kabel.
We	= gaya dari luar.
m	= massa point mass.

 $\ddot{\mathbf{p}}$ = matriks vektor percepatan *point mass*.

Matriks wrench sendiri merupakan sebuah matriks yang berisi kumpulan unit vektor dari kabel M-CDPR. Matriks wrench dituliskan dalam bentuk sebagai berikut:

$$\mathbf{W} = [u_{11}^P u_{21}^P u_{12}^{Px} u_{22}^{Px}] \tag{2.5}$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} u_{11}^{P_X} u_{21}^{P_X} u_{12}^{P_X} u_{22}^{P_X} \\ u_{11}^{P_y} u_{21}^{P_y} u_{12}^{P_y} u_{22}^{P_y} \\ u_{11}^{P_z} u_{21}^{P_z} u_{12}^{P_z} u_{22}^{P_z} \end{bmatrix}$$
(2.6)

 τ disimbolkan sebagai gaya tegangan kabel yang didalam matriks dituliskan sebagai berikut:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{21} \\ \tau_{12} \\ \tau_{22} \end{bmatrix}$$
(2.7)

Untuk gaya dari luar berdasarkan gambar 2.5 diasumsikan sebagai berat dari *point mass*. Disini kita bertujuan untuk mencari besar tegangan kabel yang dihasilkan. Berdasarkan persamaan 2.4 untuk mencari τ didapatkan dengan persamaan:

$$\tau = m. \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{\ddot{p}} - \mathbf{g}) \tag{2.8}$$

$$\tau_{ij} > 0 \tag{2.9}$$

Dari persamaan 2.8 dapat disimpulkan bahwa gaya tegangan kabel M-CDPR dapat dimanipulasi dengan melakukan variasi pada matriks wrench dan percepatan *platform*. Perubahan nilai wrench dipengaruhi oleh nilai unit vektor yang didapatkan dari lokasi *exit point* terhadap *fixed coordinate* dan panjang kabel. Persamaan 2.9 menunjukkan sifat dari kabel yang hanya bisa menarik, dengan τ harus selalu bernilai positif.

2.1.4 Kondisi Kesetimbangan Statis M-CDPR

Mobile base akan dianalisa kesetimbangan statisnya saat *platform* bergerak melalui trajektori. Analisa ini didasarkan pada hukum Newton pertama yang menyatakan bahwa jika jumlah vektor dari semua gaya yang bekerja bernilai nol, maka kecepatan benda tersebut konstan. Kecepatan awal *mobile base* adalah nol dan harus tetap bernilai nol untuk dikatakan dalam kondisi kesetimbangan statis (Rasheed,2017). Berdasarkan gambar 2.5 kita bisa melihat gaya – gaya yang berlaku pada *mobile base*. Kesetimbangan statis *mobile base* ke – j dapat dipenuhi dengan persamaan:

$$\Sigma \mathbf{f} = \mathbf{0} \Rightarrow m_j \mathbf{g} + \mathbf{f}_{1j} + \mathbf{f}_{2j} + \mathbf{f}_{r1j} + \mathbf{f}_{r2j} \qquad (2.10)$$

Dimana:

 m_j = massa *mobile base* ke *j*.

g = vektor gravitasi.

 \mathbf{f}_{1j} = vektor gaya dari kabel 1 pada *mobile base* ke *j*.

 \mathbf{f}_{2j} = vektor gaya dari kabel 2 pada *mobile base* ke *j*.

 $\mathbf{f}_{r_{1}j}$ = vektor gaya kontak roda 1 pada *mobile base j*.

 \mathbf{f}_{r1i} = vektor gaya kontak roda 2 pada *mobile base j*.

Dalam bentuk matriks, persamaan 2.4 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_j^x \\ m_j^y \\ m_j^z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{g} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1j}^x \\ \mathbf{f}_{1j}^y \\ \mathbf{f}_{1j}^z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{2j}^x \\ \mathbf{f}_{2j}^y \\ \mathbf{f}_{2j}^z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{r1j}^x \\ \mathbf{f}_{r1j}^y \\ \mathbf{f}_{r1j}^z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{r2j}^x \\ \mathbf{f}_{r2j}^y \\ \mathbf{f}_{r2j}^z \end{bmatrix} = 0$$
(2.11)

Dimana:

 $\begin{aligned} \mathbf{f}_{1j}^{x} &= \text{vektor gaya kabel 1 mobile base ke } j \text{ pada sumbu x.} \\ \mathbf{f}_{1j}^{y} &= \text{vektor gaya kabel 1 mobile base ke } j \text{ pada sumbu y.} \\ \mathbf{f}_{1j}^{z} &= \text{vektor gaya kabel 1 mobile base ke } j \text{ pada sumbu z.} \\ \mathbf{f}_{r1j}^{x} &= \text{vektor gaya kontak roda 1 mobile base } j \text{ pada sumbu x.} \\ \mathbf{f}_{r1j}^{y} &= \text{vektor gaya kontak roda 1 mobile base } j \text{ pada sumbu y.} \\ \mathbf{f}_{r1j}^{z} &= \text{vektor gaya kontak roda 1 mobile base } j \text{ pada sumbu y.} \\ \mathbf{f}_{r1j}^{z} &= \text{vektor gaya kontak roda 1 mobile base } j \text{ pada sumbu y.} \\ \end{aligned}$

Kesetimbangan statis juga berlaku untuk momen pada titik *fixed coordinate* (O) di sumbu Z *mobile base*. Kondisi ini dapat dirumuskan melalui persamaan:

$$\Sigma M_0 = 0 \Longrightarrow (\mathbf{g}_j \times m_j \mathbf{g}) + (\mathbf{a}_{1j} \times \mathbf{f}_{1j}) + (\mathbf{a}_{2j} \times \mathbf{f}_{2j}) + (\mathbf{c}_{1j} \times \mathbf{f}_{r1j}) + (\mathbf{c}_{2j} \times \mathbf{f}_{r2j}) = 0$$
(2.12)

Dimana:

 \mathbf{c}_{1i} = koordinat vektor kartesian dari titik kontak C_{1i} .

 \mathbf{c}_{2i} = koordinat vektor kartesian dari titik kontak C_{2i} .

Dalam bentuk matriks, persamaan 2.6 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{j}^{x} \\ \mathbf{g}_{j}^{y} \\ \mathbf{g}_{j}^{z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_{j} \mathbf{g}^{x} \\ m_{j} \mathbf{g}^{y} \\ m_{j} \mathbf{g}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{1j}^{x} \\ \mathbf{a}_{1j}^{y} \\ \mathbf{a}_{1j}^{z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1j}^{y} \\ \mathbf{f}_{1j}^{y} \\ \mathbf{f}_{1j}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{2j}^{x} \\ \mathbf{a}_{2j}^{y} \\ \mathbf{a}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{2j}^{x} \\ \mathbf{f}_{2j}^{y} \\ \mathbf{f}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{1j}^{x} \\ \mathbf{c}_{1j}^{y} \\ \mathbf{c}_{1j}^{z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1j}^{x} \\ \mathbf{f}_{1j}^{y} \\ \mathbf{f}_{1j}^{z} \\ \mathbf{c}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{2j}^{x} \\ \mathbf{c}_{2j}^{z} \\ \mathbf{f}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} (2.13) + \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{2j}^{y} \\ \mathbf{c}_{2j}^{z} \\ \mathbf{c}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{2j}^{x} \\ \mathbf{f}_{2j}^{y} \\ \mathbf{f}_{2j}^{z} \\ \mathbf{f}_{2j}^{z} \end{bmatrix} \end{pmatrix} = 0$$

Dimana:

 \mathbf{g}_{i}^{x} = koordinat vektor titik pusat gravitasi pada sumbu x.

 \mathbf{g}^x = percepatan gravitasi pada sumbu x.

 $\mathbf{a}_{1j}^x = \text{koordinat vektor dari } exit point A_{1j} \text{ pada sumbu x.}$

 \mathbf{c}_{1j}^{x} = koordinat vektor dari titik kontak C_{1j} pada sumbu *x*.

Dengan melakukan substitusi antara persamaan 2.11 dan persmaan 2.13 didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{f}_{r1j}^{y} = m_{j}\mathbf{g}(\mathbf{c}_{2j}^{x} - \mathbf{g}_{j}^{x}) + \mathbf{f}_{1j}^{y}(\mathbf{a}_{1j}^{x} - \mathbf{c}_{2j}^{x}) + \mathbf{f}_{2j}^{y}(\mathbf{a}_{2j}^{x} - \mathbf{c}_{2j}^{x}) - \mathbf{f}_{1j}^{x}\mathbf{a}_{1j}^{y} - \mathbf{f}_{2j}^{x}\mathbf{a}_{2j}^{y}$$

$$\frac{-\mathbf{f}_{1j}^{x}\mathbf{a}_{1j}^{y} - \mathbf{f}_{2j}^{x}\mathbf{a}_{2j}^{y}}{\mathbf{c}_{2j}^{x} - \mathbf{c}_{1j}^{x}}$$

$$\mathbf{f}_{r2j}^{y} = m_{j}\mathbf{g} - \mathbf{f}_{1j}^{y} - \mathbf{f}_{2j}^{y} - \mathbf{f}_{r1j}^{y}$$

$$(2.14)$$

Persamaan 2.14 dan 2.15 mengilustrasikan efek dari peningkatan gaya eksternal (gaya tegangan kabel) ke *mobile base*. Hal ini menunjukkan semakin tinggi gaya tegangan kabel maka semakin tinggi juga gaya reaksi pada sumbu vertikal f_{r1j}^{y} dan semakin rendah gaya reaksi f_{r2j}^{y} yang dapat menyebabkan *mobile base* mengalami *tipping* ke depan. Terdapat keadaan dimana kombinasi gaya tegangan kabel menghasilkan $f_{r1j}^{y} = 0$. Pada keadaan ini, roda depan dari *mobile base* ke - j tidak lagi berkontak dengan tanah pada titik C_{2j} atau *tipping* kearah belakang dan pada saat itu juga menghasilkan momen M_{C1j} pada sumbu z, di titik C_{1j} (Rasheed, 2017):

$$\mathbf{M}_{C1j} = (\mathbf{g}_j - \mathbf{c}_{1j}) \times m_j \mathbf{g} + (\mathbf{a}_{1j} - \mathbf{c}_{1j}) \times \mathbf{f}_{1j} + (\mathbf{a}_{2j} - \mathbf{c}_{1j}) \times \mathbf{f}_{2j}$$
(2.16)

Dan juga berlaku saat $\mathbf{f}_{r1j}^{y} = 0$ atau mengalami *tipping* ke depan menunjukkan *mobile base* ke – j hilang kontak dengan tanah pada C_{1j} dan akan menghasilkan momen M_{C2j} pada sumbu z, di titik C_{2j} :

$$\mathbf{M}_{C2j} = (\mathbf{g}_j - \mathbf{c}_{2j}) \times m_j \mathbf{g} + (\mathbf{a}_{1j} - \mathbf{c}_{2j}) \times \mathbf{f}_{1j} + (\mathbf{a}_{2j} - \mathbf{c}_{2j}) \times \mathbf{f}_{2j}$$
(2.17)

Melihat pada geometri *mobile base* pertama, *mobile base* pertama dikatakan stabil bila momen pada titik C_{11} yang dihasilkan dari gaya eksternal bergerak berlawanan arah jarum jam dan momen pada titik C_{21} yang dihasilkan dari gaya eksternal bergerak searah jarum jam. Kondisi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mathbf{M}_{C11} \ge 0 \tag{2.18}$$

$$\mathbf{M}_{C21} \le 0 \tag{2.19}$$

Begitu juga dengan *mobile base* kedua, dikatakan stabil bila momen – momen pada titik C_{12} dan C_{22} memenuhi keadaan:

$$\mathbf{M}_{c12} \le 0 \tag{2.20}$$

$$\mathbf{M}_{c22} \ge 0 \tag{2.21}$$

2.1.5 Zero Moment Point (ZMP)

Untuk menunjukkan kesetimbangan dari *mobile base*, perlu digunakan *zero moment point* atau ZMP. ZMP merupakan sebuah posisi dari titik di *mobile base* yang mengalami pengurangan nilai momen oleh gaya kontak sehingga menyebabkan momen oleh gaya gesek berputar pada sumbu normal ke permukaan kontak (Rasheed,2017). Pada M-CDPR, titik ZMP terjadi bila jumlah momen di roda depan dan belakang bernilai nol. ZMP dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mathbf{d}_{j} = \frac{\mathbf{M}_{o}}{\mathbf{f}_{rj}^{\mathcal{Y}}} = \frac{(\mathbf{g}_{j} \times m_{j}\mathbf{g}) + (\mathbf{a}_{1j} \times \mathbf{f}_{1j}) + (\mathbf{a}_{2j} \times \mathbf{f}_{2j})}{\mathbf{f}_{rj}^{\mathcal{Y}}}$$
(2.22)

ZMP harus bernilai diantara titik kontak roda terhadap permukaan $(\mathbf{C}_{1j} \text{ dan } \mathbf{C}_{2j})$ untuk setiap *mobile base* ditunjukan dengan persamaan berikut:

$$\begin{array}{ll} \mathbf{C}_{21}^{\chi} \leq \mathbf{d}_{1} \leq \mathbf{C}_{11}^{\chi} & (2.23) \\ \mathbf{C}_{12}^{\chi} \leq \mathbf{d}_{2} \leq \mathbf{C}_{22}^{\chi} & (2.24) \end{array}$$

2.1.6 Vibrasi Kabel Terhadap Kesetimbangan Dinamis

Seperti yang diketahui, *platform* akan bergerak sepanjang trajektori yang sudah ditentukan sehingga akan menyebabkan perubahan posisi *platform* dan *anchor point* dimana keduanya terhubung oleh kabel. Saat mengalami perubahan posisi, pada kabel akan mengalami perubahan gaya tegangan kabel. Perubahan gaya tegangan kabel ini menyebabkan efek getaran kabel yang mempengaruhi kepresisian posisi *platform* (Du, 2013). Efek

getaran kabel tersebut dapat ditemukan melalui analisa vibrasi pada kabel.



Gambar 2.6 Elemen kabel linear (Du, 2013)

Dalam banyak aplikasi, kabel dianggap sebagai elemen linear yang hanya dapat mengalami tegangan tetapi tidak dapat Pada umumnya, mengalami tekanan. elemen linear ini dimodifikasi dengan menyatakan panjang elemen sebagai variabel vang mempengaruhi variasi panjang kabel. Pada gambar 2.6 menunjukkan elemen linear yang mengalami tegangan dengan modulus elastisitas E, luas penampang A dan panjang kabel l, yang merupakan elemen satu dimensi. Local frame $O^{c}x^{c}y^{c}z^{c}$ terletak pada elemen dengan sumbu x^c sejajar dengan panjang elemen. Elemen dikenai gaya tegangan kabel T pada titik 1 dan titik 2 searah dengan sumbu x^c . Titik 1 dan 2 terletak pada \mathbf{x}_1^c dan \mathbf{x}_2^c di sumbu elemen *local frame* x^c secara berurutan.

Hubungan antara gaya tegangan kabel dengan posisi titik serta panjang kabel dapat dirumuskan sebagai berikut (Du, 2017):

$$\mathbf{T} = \frac{EA}{\mathbf{l}} (\mathbf{x}_2^c - \mathbf{x}_1^c - \mathbf{l})$$
(2.25)

Maka gaya tegangan kabel pada tiap titik dapat dirumuskan sebagai:

$$\mathbf{f}_{1x}^c = -\mathbf{T} = \frac{EA}{\mathbf{l}} (\mathbf{x}_1^c - \mathbf{x}_2^c - \mathbf{l})$$
(2.26)

$$\mathbf{f}_{2x}^{c} = \mathbf{T} = \frac{EA}{\mathbf{l}} (\mathbf{x}_{2}^{c} - \mathbf{x}_{1}^{c} - \mathbf{l})$$
(2.27)

Kemudian persamaan 2.26 dan 2.27 dapat dituliskan kedalam bentuk persamaan matriks sebagai berikut:

$$\mathbf{f}^{c} = \mathbf{k}_{c}^{c} \mathbf{x}^{c} + \mathbf{k}_{s}^{c} \mathbf{l}$$
(2.28)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1x}^c \\ \mathbf{f}_{2x}^c \end{bmatrix} = \frac{EAc}{\mathbf{l}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^c \\ \mathbf{x}_2^c \end{bmatrix} + \frac{EAc}{\mathbf{l}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \mathbf{l}$$
(2.29)

Dimana:

 \mathbf{f}_{1x}^c = vektor gaya pada titik 1.

 \mathbf{f}_{2x}^c = vektor gaya pada titik 2.

$$c \qquad = \begin{cases} 1 & \text{untuk } x_2^c - x_1^c > l \\ 0 & \text{untuk nilai lain} \end{cases}$$

Persamaan "c" menunjukkan bahwa kabel hanya dapat mengalami tegangan namun tidak dapat mengalami tekanan. *EA/l* merupakan koefisien kekakuan elemen kabel yang dipengaruhi panjang elemen. Disini kita mengasumsikan bahwa semua elemen pada kabel memiliki panjang dan koefisien kekakuan yang sama.

Untuk mendapatkan persamaan dinamis M-CDPR, persamaan 2.29 harus diubah kedalam *global frame*. Titik 1 dan 2 ditunjukkan dengan bentuk $x_1 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \end{bmatrix}^T$ dan $x_2 = \begin{bmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \end{bmatrix}^T$ dalam *global frame* dan dengan transformasi matriks sebagai berikut:

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_{x} & \boldsymbol{c}_{y} & \boldsymbol{c}_{z} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{c}_{x} & \boldsymbol{c}_{y} & \boldsymbol{c}_{z} \end{bmatrix}$$
(2.30)

Dimana:

 $\mathbf{c}_x = (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)/d$ $\mathbf{c}_y = (\mathbf{y}_2 - \mathbf{y}_1)/d$ $\mathbf{c}_z = (\mathbf{z}_2 - \mathbf{z}_1)/d$

 $d = \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\|$, merupakan panjang elemen saat diberi tegangan.

Kemudian matriks global frame untuk k_c^c dan k_s^c diperoleh sebagai berikut:

$$\mathbf{k}_c = \mathbf{T}^{\mathrm{T}} \mathbf{k}_c^c \mathbf{T} \tag{2.31}$$

$$\mathbf{k}_s = \mathbf{T}^{\mathrm{T}} \mathbf{k}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{c}} \tag{2.32}$$

Jadi, persamaan 2.28 dan 2.29 diubah kedalam *global frame* menjadi persamaan matriks sebagai berikut:

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{k}_{c}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{k}_{s}\boldsymbol{l} \tag{2.33}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1x} \\ \mathbf{f}_{2x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{x} & 0 \\ \mathbf{c}_{y} & 0 \\ \mathbf{c}_{z} & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_{x} \\ 0 & \mathbf{c}_{y} \\ 0 & \mathbf{c}_{z} \end{bmatrix} \frac{EAc}{\mathbf{l}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{x} & \mathbf{c}_{y} & \mathbf{c}_{z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{c}_{x} & \mathbf{c}_{y} & \mathbf{c}_{z} \end{bmatrix}$$
(2.34)
$$\cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{1} \\ \mathbf{x}_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{x} & 0 \\ \mathbf{c}_{y} & 0 \\ \mathbf{c}_{z} & 0 \\ 0 & \mathbf{c}_{x} \\ 0 & \mathbf{c}_{y} \\ 0 & \mathbf{c}_{z} \end{bmatrix} \frac{EAc}{\mathbf{l}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \mathbf{l}$$

Untuk penyederhanaan, semua kabel akan dibagi sebanyak "n" – elemen dengan jumlah yang sama seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Pada setiap kabel, titik 0 terletak pada *anchor point* dan titik "n" terletak pada *platform* dan semua elemen memiliki panjang tanpa tegangan yang sama, $l(t) = L_c(t)/n$ dimana $L_c(t)$ adalah perubahan panjang kabel keseluruhan terhadap waktu. Maka untuk gaya kabel secara keseluruhan diperoleh dengan menggunakan prosedur penyusunan standar metode *finite element* dimana persamaan kekakuan elemen pada persamaan 2.30:

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{k}_{c} \mathbf{x} + \sum \mathbf{k}_{s} \mathbf{l} = \mathbf{K}_{c} \mathbf{X} + \mathbf{K}_{s}$$
(2.35)

Dimana:

 \mathbf{K}_{c} = matriks kekakuan kabel terhadap *node*

 \mathbf{X} = posisi nodal

 \mathbf{K}_{s} = matriks kekakuan kabel terhadap panjang kabel

L = panjang kabel

Kita mengganggap bahwa kabel tidak memiliki massa sehingga tidak memiliki beban kabel oleh gravitasi. Jadi persamaan dinamis kabel dapat dituliskan kedalam persamaan berikut:

$$\mathbf{M}_{c}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_{c}\mathbf{X} + \mathbf{K}_{s}\mathbf{L} = \mathbf{Q}$$
(2.36)

Dimana:

 $\mathbf{M}_{\mathbf{c}}$ = matriks massa kabel

 $\ddot{\mathbf{X}}$ = percepatan *node*

Q = beban dari luar (dari *anchor* hingga *platform*)

2.1.7 Analisa Trajektori

Platform akan berjalan sepanjang trajektori yang ditetapkan. Selama melewati trajektori yang ditentukan, M-CDPR harus tetap dalam kondisi seimbang. Saat *platform* mengalami perubahan posisi, gaya tegangan pada kabel akan mengalami perubahan. Berdasarkan gambar 2.5, M-CDPR memiliki jenis *cable suspended* yang menyebabkan setiap gaya tegangan kabel harus bernilai lebih besar dari nol. Oleh karena itu untuk setiap perubahan posisi *platform* sepanjang trajektori, perubahan gaya tegangan kabel harus memenuhi syarat *cable suspended*. Kondisi seimbang M-CDPR juga dapat dilihat melalui perubahan nilai ZMP akibat perubahan *platform* sepanjang trajektori, yaitu nilai ZMP harus memenuhi persamaan 2.22 dan 2.23.

Berdasarkan persamaan 2.16, percepatan *platform* mempengaruhi kesetimbangan dinamis *platform*. Percepatan *platform* didapatkan melalui bentuk dan persamaan gerak sepanjang trajektori. Bentuk trajektori bisa berbentuk persegi panjang, *vertical oscillation* dan *horizontal oscillation*.



Gambar 2.7 *Circular Trajectory* pada Bidang Horizontal dengan Tampak 3 Dimensi (Gosselin, 2013)

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang menjadi dasar atas penilitian ini adalah studi pada M-CDPR 3 *Mobile Base*, 3 kabel yang dilakukan pada M-CDPR tahun 2019.



Gambar 2.8 Konsep M-CDPR dengan 3 Kabel dan 3 *Mobile Base* pada trajektori *parametric oscillation* (Marvel, 2019)

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari dan menguji desain dari M-CDPR terkait kestabilan dan kesetimbangan saat *platform* bergerak sepanjang trajektori yang ditentukan. Serta penilitian ini bertujuan untuk menemukan konfigurasi *telescopic boom* yang memenuhi kondisi kesetimbangan statis untuk setiap *mobile base* M-CDPR. Desain M-CDPR yang digunakan adalah 3 *mobile base* yang masing – masing memiliki 1 *exit point*. Tiga kabel dari masing – masing *mobile base* tersambung pada satu *platform* berupa titik poin massa dan memiliki lengan yang *reconfigurable* seperti pada gambar 2.8.

Desain ini menyebabkan *platform* dapat melakukan 3 DOF. Analisa yang dilakukan pada penilitian ini mengenai model geometri M-CDPR, kesetimbangan statis *mobile base*, ZMP serta perbandingan antara *non-reconfigurable* dan *reconfigurable arm*. Hasil penilitian menampilkan grafik perbandingan distribusi gaya tegangan kabel dan ZMP pada saat *non-reconfigurable* dan *reconfigurable* pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Distribusi tegangan kabel dan ZMP trajektori parametric oscillation non-reconfigurable terhadap waktu

BAB III

METODOLOGI PENILITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian






3.2 Proses Penelitian

Proses dari penelitian dibagi menjadi 9 bagian meliputi perumusan masalah, studi literatur, penentuan parameter desain M-CDPR dan Variabel Penelitian, analisa model geometri pada M-CDPR, analisa kondisi kesetimbangan dinamis pada *Platform*, analisa kondisi kesetimbangan dinamis pada kabel, analisa kondisi kesetimbangan dinamis pada *reconfigurable boom* M-CDPR, analisa kondisi kesetimbangan statis pada *mobile base* M-CDPR, analisa ZMP pada M-CDPR.

3.2.1 Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan analisa dan pengumpulan data serta statistik terkait bencana alam. Dari data dan statistik tersebut akan diambil permasalahan yang ingin diselesaikan. Permasalahan tersebut akan menjadi dasar dalam penentuan ilmu yang harus dicari dan dipelajari dalam studi literatur.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk menggali ilmu – ilmu yang tersedia, untuk menambah pengetahuan yang dibutuhkan pada penelitian yang berlangsung. Studi literatur dilakukan dengan membaca sumber – sumber tertulis seperti buku, jurnal dan hasil penelitian terdahulu. Setelah dilakukan studi literatur, program MATLAB digunakan untuk perhitungan dan simulasi pada penilitan ini.

3.2.3 Penentuan Parameter Desain M-CDPR dan Variabel Penelitian

Parameter desain M-CDPR seperti jumlah *mobile base*, jumlah kabel, dimensi *mobile base* dan jarak *mobile base* dari titik *fixed coordinate* ditentukan berdasarkan hasil studi literatur. Kemudian variabel dalam penelitian ditentukan seperti trajektori *platform*, batasan derajat kemiringan dan batasan panjang *telescopic arm*. Pada penilitian ini, digunakan trajektori *parametric oscilation, vertical helix* dan *horizontal helix*. Persamaan yang digunakan pada trajektori *parametric oscilation* adalah:

$$\begin{array}{lll} \boldsymbol{x} = 0; \ \boldsymbol{y} = 0; \ \boldsymbol{z} = (r_{os} \times sin(\omega t)) + \boldsymbol{z_0} & t < 1.75 & (3.1) \\ \dot{\boldsymbol{x}} = 0; \ \dot{\boldsymbol{y}} = 0; \ \dot{\boldsymbol{z}} = r_{os} \times \omega \times \boldsymbol{cos}(\omega t) & t < 1.75 & (3.2) \\ \ddot{\boldsymbol{x}} = 0; \ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{0}; \ \ddot{\boldsymbol{z}} = -r_{os} \times \omega^2 \times sin(\omega t); & t < 1.75 & (3.3) \\ \boldsymbol{x} = (r_{os} \times sin(\omega t)); \ \boldsymbol{y} = 0; \ \boldsymbol{z} = + \boldsymbol{z}_{1.75} & t \ge 1.75 & (3.4) \\ \dot{\boldsymbol{x}} = r_{os} \times \omega^2 \times sin(\omega t); \quad \boldsymbol{y} = 0; \ \dot{\boldsymbol{z}} = 0 & t \ge 1.75 & (3.5) \\ \ddot{\boldsymbol{x}} = -r_{os} \times \omega^2 \times sin(\omega t); \ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{0}; \ \ddot{\boldsymbol{z}} = 0; & t \ge 1.75 & (3.6) \end{array}$$

Persamaan yang digunakan pada trajektori horizontal helix adalah:

$$z = (r_z \times time) + z_0$$

$$x = r_c cos(\omega t) + x_0$$
(3.7)

$$\mathbf{y} = r_c \sin(\omega t) + \mathbf{y_0} \quad \mathbf{z_0} > 0$$

$$\dot{\mathbf{z}} = 1, \quad \dot{\mathbf{x}} = -r_c \,\omega \sin(\omega t), \quad \dot{\mathbf{y}} = r_c \,\omega \cos(\omega t)$$
(3.8)

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{0}, \qquad \ddot{\mathbf{x}} = -r_c \,\omega^2 \cos(\omega t), \quad \mathbf{y} = -r_c \,\omega^2 \sin(\omega t)$$
(3.9)

Persamaan yang digunakan pada trajektori vertical helix adalah:

$$\mathbf{z} = r_c \cos(\omega t) + \mathbf{z_0} \tag{3.10}$$
$$\mathbf{x} = (\mathbf{r_x} \times time) + \mathbf{x_0}$$

$$\mathbf{y} = r_c \sin(\omega t) + \mathbf{y_0} \quad \mathbf{z_0} > 0$$

$$\dot{\mathbf{z}} = -r_c \,\omega \,\sin(\omega t), \qquad \dot{\mathbf{x}} = 1, \quad \dot{\mathbf{y}} = r_c \,\omega \cos(\omega t)$$
(3.11)

$$\ddot{\mathbf{z}} = -r_c \,\omega^2 \cos(\omega t), \qquad \ddot{\mathbf{x}} = 0, \ \mathbf{y} = -r_c \,\omega^2 \sin(\omega t) \qquad (3.12)$$

Dimana:

 \mathbf{x} = vektor posisi *end effector* di sumbu .

- $\dot{\mathbf{x}}$ = vektor kecepatan *end effector* di sumbu *x*.
- $\ddot{\mathbf{x}}$ = vektor percepatan *end effector* di sumbu *x*.
- $\mathbf{x_0}$ = vektor posisi *end effector* saat t=0 di sumbu *x*.
- $\mathbf{y_0}$ = vektor posisi *end effector* saat t=0 di sumbu y.
- $\mathbf{z_0}$ = vektor posisi *end effector* saat t=0 di sumbu *z*.

 $\begin{array}{ll} \mathbf{r}_{os} &= one \ half \ range \ of \ motion. \\ \mathbf{r}_{c} &= \mathrm{jari-jari} \ \mathrm{lingkaran.} \\ \mathbf{r}_{x} &= \mathrm{konstanta} \ \mathrm{kenaikan} \ \mathrm{sumbu} \ x. \\ \mathbf{r}_{z} &= \mathrm{konstanta} \ \mathrm{kenaikan} \ \mathrm{sumbu} \ z. \\ \boldsymbol{\omega} &= \mathrm{frekuensi} \ \mathrm{getaran} \ . \\ \mathbf{t} &= \mathrm{waktu.} \end{array}$

Pada penelitian ini, \mathbf{z}_0 , $\mathbf{r}_c \, dan \, \omega$ telah ditetapkan nilainya dan waktu akan dijadikan variabel penelitian. Desain M-CDPR yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Desain M-CDPR 3 mobile base, 3 kabel

3.3 *Output* Yang Diinginkan

Dari tahapan – tahapan diatas didapatkan *output* berupa distribusi gaya tegangan kabel pada tiap – tiap kabel M-CDPR, vibrasi pada *platform* dan konfigurasi *boom* saat *platform* bergerak sepanjang trajektori *parametric oscillation*, *vertical helix* dan *horizontal helix* dengan *payload* yang berbeda.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penurunan Rumus

4.1.1 Analisa Model Geometri pada M-CDPR

Analisa model geometri dapat dilakukan dari konsep desain M-CDPR yang telah ditentukan. Didapatkan vektor – vektor yang terdapat pada M-CDPR. *Output* dari bagian ini adalah mendapatkan unit vektor panjang kabel dari masing – masing kabel. FBD pada desain M-CDPR dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 FBD Model Geometri M-CDPR

Dimana:

- r_i = panjang telescopic arm pada mobile base j.
- β_j = derajat kemiringan *telescopic arm* pada *mobile base j*.

 \mathbf{a}_i = vektor posisi *anchor point* pada *mobile base j*.

 ρ_i = panjang jarak *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.

p = vektor posisi *point mass* terhadap *fixed coordinate*.

 γ_i = sudut *mobile base j* terhadap sudut 0° *fixed coordinate*.

Untuk mendapatkan vektor – vektor tersebut, digunakan persamaan:

$$\mathbf{l}_j^b = \mathbf{a}_j^b - \mathbf{p} \tag{4.1}$$

Dimana:

$$j = \text{nomor mobile base }; 1, 2, 3, ..., m.$$

 \mathbf{l}_{i}^{b} = vektor panjang kabel *mobile base j*.

 \mathbf{a}_{j}^{b} = vektor dari *exit point* pada *mobile base j* terhadap *fixed coordinate.*

Setelah mendapatkan vektor panjang kabel, dapat dicari unit vektornya dengan membagi vektor tersebut dengan norm seperti pada persamaan 2.2.

4.1.2 Analisa Kesetimbangan Dinamis Platform

Tahapan ini menganalisa kesetimbangan *platform* saat bergerak sepanjang trajektori yang ditentukan. Analisa ini didasari oleh hukum Newton kedua. *Output* dari hasil analisa ini adalah mendapatkan nilai gaya tegangan kabel. Kesetimbangan dinamis *platform* dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 4.2 Kesetimbangan Dinamis Platform

Persamaan yang berlaku pada kondisi kesetimbangan dinamis *platform* dapat dilihat pada persamaan 4.2 dan gaya tegangan kabel yang tidak memenuhi persamaan 4.3 diaanggap tidak *feasible*. Ketika tegangan kabel bernilai 0 maka kemungkinan kabel mengalami *slack* sehingga tegangan kabel diberi batas nilai 1 N.

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{w}_{\boldsymbol{e}} = m\ddot{\mathbf{p}} \tag{4.2}$$

$$\tau_j \ge 1 \tag{4.3}$$

Dimana:

W = matriks wrench

 τ = gaya tegangan kabel

 τ_i = gaya tegangan kabel pada kabel milik *mobile base j*

 w_e = gaya dari luar

m = massa point mass

 $\ddot{\mathbf{p}}$ = vektor percepatan *point mass* dari trajektori

Kemudian kita perlu mencari nilai gaya tegangan kabel akibat beban dari *platform* dengan rumus sebagai berikut:

$$\mathbf{f}_{\mathbf{p}} = \mathbf{W}\tau \tag{4.4}$$

Dimana:

 \mathbf{f}_{p} = Vektor gaya tegangan kabel akibat beban dari *paltform*

4.1.3 Analisa Kesetimbangan Dinamis Kabel

Untuk menganalisa kesetimbangan dinamis kabel digunakan persamaan dari analisa vibrasi kabel. Analisa ini mengikuti metode *finite element*, dimana kabel dibagi menjadi sebanyak n - nodal. Nodal "0" terletak pada anchor point dan nodal "n" terletak pada *end effector*. Antar nodal disebut sebagai elemen, sehingga terdapat sebanyak n - elemen seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Pembagian node pada kabel M-CDPR

Analisa ini hanya akan melihat vibrasi yang terjadi pada end effector atau disebut sebagai platform. Oleh karena itu pembagian kedalam beberapa elemen tersebut dapat disederhanakan menjadi satu elemen sepanjang kabel atau antara nodal "0" pada *platform* dan nodal "n" pada *anchor point*. Pada simulasi ini akan elemen akan dibagi ke dalam 5 elemen sehingga terdapat node 0 sebagai posisi *platform* hingga node 5 sebagai posisi *anchor point* terlihat seperti pada gambar 4.4





Semua kabel terhubung pada satu titik dimana merupakan posisi dari platform seperti pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Free Body Diagram Nodal "0" End Effector

Untuk mencari gaya kekakuan pada *platform* melalui persamaan 2.35 dapat disederhanakan menjadi:

$$\mathbf{f}_{ke1j}^{o} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{kpj}^{o} \\ \mathbf{f}_{k1j}^{o} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{c1j}^{o} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{pj}^{o} \\ \mathbf{x}_{1j}^{o} \end{bmatrix} + \mathbf{k}_{s1j}^{o} \cdot \mathbf{l}_{e1j}^{o}$$
(4.5)

$$\mathbf{f}_{kp}^{o} = \mathbf{f}_{kp_{1}}^{o} + \mathbf{f}_{kp_{2}}^{o} + \mathbf{f}_{kp_{3}}^{o}$$
(4.6)

Dimana :

- $\mathbf{f}_{k_{e_1j}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan elemen ke 1 pada kabel *mobile* base j terhadap fixed coordinate.
- $\mathbf{f}_{kp_j}^{o}$: Vektor gaya kekakuan kabel pada nodal "0" *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.
- $\mathbf{f}_{k_{1j}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan kabel pada nodal "1" milik kabel mobile base j terhadap fixed coordinate.
- $\mathbf{k}_{c_{1j}}^{o}$: Matriks kekakuan antar nodal elemen ke-1 pada kabel mobile base j terhadap fixed coordinate.
- \mathbf{x}_{1j}^{o} : Vektor antar nodal elemen ke-1 pada kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.
- $\mathbf{k_{s_{1j}}}^{o}$: Matriks kekakuan sepanjang elemen ke-1 pada kabel mobile base j terhadap fixed coordinate
- l_{e1j}^{o} : Vektor panjang elemen ke-1 pada kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.

 $\mathbf{x}_{p_j}^{o}$: Vektor posisi nodal "0" *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.

 \mathbf{x}_{1j}^{o} : Vektor posisi nodal "1" milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed* coordinate.

Sehingga persamaan dinamis *platform* dapat dipenuhi dengan persamaan:

$$\sum_{j=1}^{3} \mathbf{M}_{c_{p_{j}}} \ddot{\mathbf{x}}_{p} \quad ^{o} + m_{p} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{p} \quad ^{o} + \mathbf{f}_{k_{p}} \quad ^{o} = m_{p} \cdot \mathbf{g}$$
(4.7)

$$\mathbf{M}_{cp_{j}} = \frac{\rho A l_{j}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.8)

Dimana:

- $\mathbf{M_{cp}}_{j}^{o}$: Matriks massa nodal "0" *platform* milik kabel *mobile* base j terhadap fixed coordinate.
- $\ddot{\mathbf{x}}_{\mathbf{p}}$ ° : Vektor percepatan pada nodal "0" *platform* terhadap *fixed coordinate*.
- $m_{\rm p}$: Massa beban *platform*.
- $\mathbf{f}_{\mathrm{kp}_{j}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan pada nodal "0" *platform* terhadap *fixed coordinate*.
- **g** : Vektor gravitasi.
- ρ : Massa jenis kabel.
- *A* : Luas penampang kabel.
- l_{e1i} : Panjang elemen ke-1 milik milik kabel *mobile base j*.

Dari persamaan 3.19 dapat kita cari nilai vibrasi kabel sebagai berikut:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{p_{j}}^{o(k)} = \left(\sum_{j=1}^{3} \mathbf{M}_{c_{p_{j}}} + m_{p}\right)^{-1} \left(m_{p} \cdot \mathbf{g} - \mathbf{f}_{k_{p_{j}}}^{o}\right)$$
(4.9)

$$\dot{\mathbf{x}}_{p_j} \overset{o(k+1)}{=} \dot{\mathbf{x}}_{p_j} \overset{o(k)}{=} + \ddot{\mathbf{x}}_{p_j} \overset{o(k)}{=} \Delta t$$
(4.10)

$$\mathbf{x}_{p_{j}}^{o(k+1)} = \mathbf{x}_{p_{j}}^{o(k)} + \dot{\mathbf{x}}_{p_{j}}^{o(k+1)}$$
(4.11)

Dimana :

- $\ddot{\mathbf{x}}_{p_j}^{o(\kappa)}$: Vektor percepatan pada nodal "0" atau *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke – k.
- $\dot{\mathbf{x}}_{p_j}^{o(k)}$: Vektor kecepatan pada nodal "0" atau *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke k.
- $\dot{\mathbf{x}}_{p_j}^{o(k+1)}$: Vektor kecepatan pada nodal "0" atau *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke – k+1.
- $\mathbf{x}_{p_j}^{o(\kappa)}$: Vektor posisi pada nodal "0" atau *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke – k.
- $\mathbf{x}_{p_j}^{0(k+1)}$: Vektor posisi atau vibrasi kabel pada nodal "0" atau *platform* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke – k+1.

Δt : Durasi waktu

Dengan konfigurasi awal M-CDPR dimana k = 0, akan didapatkan nilai vibrasi pertama $\mathbf{x}_{p_j}^{o(k+1)}$ pada waktu k + 1. Pada nodal "n" *anchor point* terdapat gaya seperti pada gambar 4.4. dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$\mathbf{f}_{ke5j}^{o} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{k4j}^{o} \\ \mathbf{f}_{kaj}^{o} \end{bmatrix} = \mathbf{k}_{c5j}^{o} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{4j}^{o} \\ \mathbf{x}_{aj}^{o} \end{bmatrix} + \mathbf{k}_{s5j}^{o} \cdot \mathbf{l}_{e5j}^{o} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{M}_{c_{a_{j}}}^{o} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{a_{j}}^{o} + \mathbf{f}_{k_{a}}^{o} = \mathbf{f}_{a_{j}}^{o}$$
 (4.13)

$$\mathbf{f}_{a_j}^{o} = \mathbf{M}_{c_{a_j}}^{o} \cdot \ddot{\mathbf{x}}_{a_j}^{o} + \mathbf{f}_{k_{a_j}}^{o}$$
(4.14)

Dimana :

- $\mathbf{f}_{k_{e5j}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan elemen ke 5 pada kabel *mobile* base j terhadap fixed coordinate.
- $\mathbf{f}_{\mathbf{k}_{a_{j}}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan kabel pada nodal "n" anchor point milik kabel mobile base j terhadap fixed coordinate.
- $\mathbf{f}_{k_{4j}}^{o}$: Vektor gaya kekakuan kabel pada nodal "4" milik kabel mobile base j terhadap fixed coordinate.
- $\mathbf{k}_{c_{5j}}^{o}$: Matriks kekakuan antar nodal elemen ke-5 pada kabel mobile base j terhadap fixed coordinate.
- \mathbf{x}_{4j}^{o} : Vektor antar nodal ke-4 pada kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.
- $\mathbf{k}_{s_{5j}}^{o}$: Matriks kekakuan sepanjang elemen ke-5 pada kabel mobile base j terhadap fixed coordinate
- l_{e5j}^{o} : Vektor panjang elemen ke-5 pada kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.

- $\mathbf{x}_{a_j}^{o}$: Vektor posisi nodal "n" *anchor point* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.
- $\ddot{\mathbf{x}}_{a_j}^{o}$: Vektor percepatan pada nodal "n" atau *anchor point* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate* waktu ke k.
- $\mathbf{M}_{c_{a_j}}^{o}$: Matriks massa nodal "n" *anchor point* milik kabel *mobile base j* terhadap *fixed coordinate*.

Nilai $\mathbf{f}_{a_j}^{o(k)}$ selanjutnya akan digunakan pada persamaan dinamis *reconfigurable boom*. Perhitungan ini dilakukan hingga mencapai batas atas iterasi yang sudah ditentukan.

4.1.4 Analisa Kesetimbangan Mobile Base M-CDPR

Untuk melakukan analisa ini mobile base akan dipisahkan menjadi dua bagian yaitu upper body dan lower body. Upper body merupakan bagian dari reconfigurable boom hingga gaya reaksi pada titik b yang terletak di bagian atas permukaan mobile base. Upper body ini digunakan untuk menganalisa kesetimbangan dinamis dari reconfigurable boom. Lower body merupakan bagian dari gaya reaksi pada titik b hingga titik kontak roda dengan permukaan tanah. Lower body ini digunakan untuk menganalisa kesetimbangan statis tiap mobile base.



Gambar 4.6 FBD Mobile Base

4.1.4.1. Analisa Kesetimbangan Dinamis pada Upper Body (Reconfigurable Boom)

Pada bagian *upper body*, *reconfigurable boom* perlu dianalisa kesetimbangan dinamisnya. Analisa ini mengikuti hukum Newton kedua. Pada analisa ini kecepatan dan percepatan pada *reconfigurable boom* akan diperhitungkan. Output dari analisa ini adalah untuk mendapatkan gaya reaksi yang ada pada titik B atau \mathbf{f}_{bj}^{i} seperti pada gambar 4.6 dimana gaya reaksi tersebut akan digunakan untuk menganalisa kesetimbangan statis dari tiap *mobile base*. Maka didapatkan FBD yang digunakan untuk menganalisa kesetimbangan dinamis *reconfigurable boom* seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 FBD reconfigurable boom

4.1.4.1.1. Analisa Kinematik Upper Body

Dari FBD *reconfigurable boom* pada gambar 4.7 *boom* memiliki sudut sebesar β dan terbagi menjadi dua bagian yaitu silinder dan piston. Silinder memiliki cog (*centre of gravity*) terletak pada titik E₁ dengan vektor posisi milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate* sebagai berikut:

$$\mathbf{E}_{1j}^{\ i} = \begin{bmatrix} e_1 \cdot \cos\beta \\ 0 \\ e_1 \sin\beta \end{bmatrix}$$
(4.15)

Pada piston terdapt *cog* yang terletak pada titik E_2 dengan vektor posisi milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate* sebagai berikut:

$$\mathbf{E}_{2j}^{\ i} = \begin{bmatrix} (\lambda - e_2) . \cos\beta \\ 0 \\ (\lambda - e_2) sin\beta \end{bmatrix}$$
(4.16)

Dimana:

λ	: panjang <i>boom</i> .
β	: sudut <i>boom</i> .
e ₁ E ₁ .	: panjang dari titik B ⁱ base coordinate ke titik
e ₂ E 2.	: panjang dari titik $\mathbf{a}_j{}^i$ base coordinate ke titik

Terdapat juga \mathbf{a}_{j}^{i} sebagai vektor posisi *anchor point* milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate* beserta turunannya yaitu $\ddot{\mathbf{a}}_{j}^{i}$ percepatan *anchor point* yang akan digunakan sebagai $\ddot{\mathbf{x}}_{a_{j}}^{o}$ pada persamaan 4.13 dan $\boldsymbol{\beta}_{j}^{i}$ sebagai vektor sudut milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate* beserta turunannya yaitu kecepatan sudutnya $\dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{i}$ dan percepatan sudutnya $\ddot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{i}$. Masing – masing turunan vektor dipenuhi dengan persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{a}_{j}^{i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \cdot \cos\beta \\ 0 \\ \boldsymbol{\lambda} \cdot \sin\beta \end{bmatrix}$$
(4.17)

$$\ddot{\mathbf{x}}_{aj}^{\ i} = \ddot{\mathbf{a}}_{j}^{\ i} = \frac{\mathbf{d}^{2} \mathbf{a}_{j}^{\ i}}{\mathbf{d}^{2} \mathbf{t}}$$

$$= \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \cos\beta - 2 \cdot \dot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \dot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \sin\beta - \boldsymbol{\lambda} \cdot \ddot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \sin\beta - \boldsymbol{\lambda} \cdot \dot{\boldsymbol{\beta}}^{2} \cdot \cos\beta \\ 0 \\ \ddot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \sin\beta - 2 \cdot \dot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \dot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \cos\beta + \boldsymbol{\lambda} \cdot \ddot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \cos\beta - \boldsymbol{\lambda} \cdot \dot{\boldsymbol{\beta}}^{2} \cdot \sin\beta \end{bmatrix}$$

$$(4.18)$$

12 i

$$\boldsymbol{\beta}_{j}^{i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\beta} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

$$\dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{\ i} = \begin{bmatrix} 0\\ \dot{\boldsymbol{\beta}}\\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

$$\ddot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{\ i} = \begin{bmatrix} 0\\ \ddot{\boldsymbol{\beta}}\\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

Dimana :

$\dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{i}$: vektor kecepatan sudut milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate*

 $\ddot{\boldsymbol{\beta}}_{j}^{i}$: vektor percepatan sudut milik kabel *mobile base j* terhadap *base coordinate*

Adapun inersia matriks diperlukan untuk analisa kesetimbangan dinamis terhadap momen di titik B. Inersia matriks pada silinder dan piston atau $I_{E1_j}^l$ dan $I_{E2_j}^l$ masing – masing terhadap *boom coordinate* dipenuhi dengan bentuk:

$$\begin{split} \mathbf{I}_{\text{E1}}_{j}^{l} & = \begin{bmatrix} \frac{m_{\text{E1}}r_{\text{E1}}^{2}}{6} & 0 & 0\\ 0 & \frac{m_{\text{E1}}(l_{\text{E1}}^{2} + r_{\text{E1}}^{2})}{12} & 0\\ 0 & 0 & \frac{m_{\text{E1}}(l_{\text{E1}}^{2} + r_{\text{E1}}^{2})}{12} \end{bmatrix} & (4.22) \\ \mathbf{I}_{\text{E2}}_{j}^{l} & & \\ \mathbf{I}_{\text{E2}}_{j}^{l} & & \\ = \begin{bmatrix} \frac{m_{\text{E2}}r_{\text{E2}}^{2}}{6} & 0 & 0\\ 0 & \frac{m_{\text{E2}}(l_{\text{E2}}^{2} + r_{\text{E2}}^{2})}{12} & 0\\ 0 & 0 & \frac{m_{\text{E2}}(l_{\text{E2}}^{2} + r_{\text{E2}}^{2})}{12} \end{bmatrix} & (4.23) \end{split}$$

Dimana:

$m_{\rm E1}$: Massa silinder.	
$l_{\rm E1}$: Panjang silinder.	
$r_{\rm E1}$: Jari – jari silinder.	
$m_{\rm E2}$: Massa piston.	
$l_{\rm E2}$: Panjang piston.	
$r_{\rm E2}$: Jari – jari piston.	

Matriks inersia diatas perlu diubah terhadap *boom coordinate* menggunakan matriks rotasi ⁱ \mathbf{R}_1 seperti yang ditunjukkan persamaan berikut:

$${}^{l}\mathbf{R}_{i} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$
(4.24)

$${}^{i}\mathbf{R}_{l} = {}^{l}\mathbf{R}_{i}^{-1} \tag{4.25}$$

$$\mathbf{I}_{\mathrm{E1}j}^{i} = {}^{i}\mathbf{R}_{\mathrm{l}}.\mathbf{I}_{\mathrm{E1}j}^{l}.{}^{i}\mathbf{R}_{\mathrm{l}}^{\mathrm{l}}$$
(4.26)

$$\mathbf{I}_{\mathrm{E2}j}^{i} = {}^{i}\mathbf{R}_{\mathrm{l}}.\mathbf{I}_{\mathrm{E2}j}^{l}.{}^{i}\mathbf{R}_{\mathrm{l}}^{\mathrm{T}}$$
(4.27)

4.1.4.1.2. Analisa Dinamis Upper Body

Dari analisa kinematik *upper body*, akan dilakukan analisa dinamis pada *upper body*. Analisa dinamis dimulai dengan mencari nilai percepatan pada *boom*, yaitu percepatan silinder dan piston. Untuk percepatan silinder didapatkan melalui penurunan sebagai berikut:

$$\mathbf{a}_{\mathrm{E1}}^{i} = \frac{\mathrm{d}^{2}\mathbf{E}_{1}}{\mathrm{d}^{2}\mathrm{t}} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_{1} \cdot \left(\ddot{\beta} \cdot \sin\beta + \dot{\beta}^{2} \cdot \cos\beta\right) \\ 0 \\ \mathbf{e}_{1} \cdot \left(\ddot{\beta} \cdot \cos\beta - \dot{\beta}^{2} \cdot \sin\beta\right) \end{bmatrix}$$
(4.28)

Dimana:

Ë

 $\dot{\beta}$: kecepatan sudut

: percepatan sudut

Dan untuk percepatan piston didapatkan melaui penurunan sebagai berikut:

$$\mathbf{a}_{\mathrm{E2}}{}^{i} = \frac{\mathrm{d}^{2}\mathbf{E}_{2}}{\mathrm{d}^{2}\mathrm{t}}$$

$$= \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \cos\beta - 2 \cdot \dot{\boldsymbol{\lambda}}\dot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \sin\beta - (\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{e}_{2}) \cdot (\ddot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \sin\beta + \dot{\boldsymbol{\beta}}^{2} \cdot \cos\beta) \\ 0 \\ \ddot{\boldsymbol{\lambda}} \cdot \sin\beta + 2 \cdot \dot{\boldsymbol{\lambda}}\dot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \cos\beta + (\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{e}_{2}) \cdot (\ddot{\boldsymbol{\beta}} \cdot \cos\beta - \dot{\boldsymbol{\beta}}^{2} \cdot \sin\beta) \end{bmatrix}$$

$$(4.29)$$
Dimana:
$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} : \text{kecepatan perubahan paniang boom}$$

 λ : kecepatan perubahan panjang *boom*

 $\ddot{\lambda}$: percepatan perubahan panjang *boom*

Selain percepatan, kita perlu mengubah gaya pada *anchor point* terhadap *fixed coordinate* atau $\mathbf{f}_{a_j}^{o}$ dan percepatan gravitasi terhadap *fixed coordinate* atau \mathbf{G}^{o} menjadi gaya kabel dan gravitasi terhadap *base coordinate* dengan menggunakan matriks rotasi ⁱ \mathbf{R}_{o} seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$${}^{\mathrm{o}}\mathbf{R}_{\mathrm{i}} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0\\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.30)

$${}^{i}\mathbf{R}_{o} = {}^{o}\mathbf{R}_{i}^{-1} \tag{4.31}$$

$$\mathbf{f}_{a_{j}}^{i} = {}^{i}\mathbf{R}_{o} \cdot \mathbf{f}_{a_{j}}^{o} \tag{4.32}$$

$$\mathbf{g}^{i} = {}^{i}\mathbf{R}_{0}\mathbf{g}^{0} \tag{4.33}$$

Maka kesetimabangan dinamis *upper body reconfigurable boom* dipenuhi dengan persamaan:

$${}^{i}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{M}_{\mathrm{B}} = \frac{d^{i}\boldsymbol{h}_{\mathrm{B}}}{dt}$$
(4.34)

$${}^{i}\boldsymbol{\Sigma}\mathbf{M}_{\mathrm{B}} = m_{e1} {}^{i}\mathbf{E}_{1} \times {}^{i}\mathbf{a}_{E1} + m_{e1} {}^{i}\mathbf{E}_{2} \times {}^{i}\mathbf{a}_{E2} + {}^{i}\mathbf{I}_{E1}\ddot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} + \dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} \times \left({}^{i}\mathbf{I}_{E1}\dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} \right) + {}^{i}\mathbf{I}_{E2}\ddot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} + \dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} \times \left({}^{i}\mathbf{I}_{E2}\dot{\boldsymbol{\beta}}_{j}{}^{i} \right)$$

$$(4.35)$$

Nilai momen di titik B ${}^{i}\Sigma M_{B}$ akan digunakan pada persamaan ZMP untuk mencari nilai ZMP.

4.1.4.2. Analisa Kesetimbangan Statis pada Lower Body (Mobile Base) M-CDPR

Tiap *mobile base* akan dianalisa kesetimabangan statisnya. Analisa dilakukan dengan menggunakan hukum Newton pertama. Hasil gaya reaksi dari analisa kesetimbangan dinamis *reconfigurable boom* digunakan pada analisa ini. Selain itu gaya kontak dan momen tiap ban dijadikan parameter kesetimbangan statis *mobile base*. Hal ini akan menunjukkan apakah *mobile base* mengalami *tipping* ataupun *rolling*. Mengikuti bentuk *lower body* pada gambar 4.5 maka kita bisa mendapatkan FBD kesetimbangan statis *mobile base* seperti pada gambar 4.8.

Gambar 4.8 FBD mobile base

Untuk analisa *tipping* yang terjadi pada sumbu y digunakan persamaan:

$$\mathbf{f}_{\rm fr}{}_{i}{}^{\rm o} = \mathbf{f}_{\rm r1}{}_{i}{}^{\rm o} + \mathbf{f}_{\rm r4}{}_{i}{}^{\rm o} \tag{4.33}$$

$$\mathbf{f}_{rrj}^{0} = \mathbf{f}_{r2j}^{0} + \mathbf{f}_{r3j}^{0}$$
(4.34)

$$\Sigma f_{\rm z}^{\ 0} = 0 \tag{4.35}$$

$$(m_{mcdpr_{j}}, g_{z}^{o} + m_{e1j} + m_{e2j})g_{z}^{o} + f_{az_{j}}^{o} + f_{frz_{j}}^{o} + f_{rrz_{j}}^{o} = 0$$
(4.36)

$$f_{frz_{j}}^{o} = -(m_{mcdpr_{j}} + m_{e1j} + m_{e2j}) g_{z}^{o} - f_{az_{j}}^{o} - f_{rrz_{j}}^{o}$$

$$(4.37)$$

$$\Sigma \mathbf{M}_{j}^{o} = 0 \qquad (4.38)$$

$$\mathbf{c}_{\mathrm{fr}_{j}^{o}} \times \mathbf{f}_{\mathrm{fr}_{j}^{o}} + \mathbf{c}_{\mathrm{rr}_{j}^{o}} \times \mathbf{f}_{\mathrm{rr}_{j}^{o}} + \mathbf{a}_{j}^{o} \times \mathbf{f}_{\mathrm{a}_{j}^{o}} + \mathbf{g}_{\mathrm{mcdpr}_{j}^{o}} \cdot \mathbf{m}_{\mathrm{mcdpr}_{j}} \times \mathbf{g}^{o} + \mathbf{g}_{\mathrm{me1}_{j}^{o}} \cdot \mathbf{m}_{\mathrm{e1}_{j}} \times \mathbf{g}^{o} + \mathbf{g}_{\mathrm{me2}_{j}^{o}} \cdot \mathbf{m}_{\mathrm{e1}_{j}} \times \mathbf{g}^{o} = \mathbf{0} \qquad (4.39)$$

$$\Sigma M_{\mathbf{y}_j}^{\mathbf{o}} = 0 \tag{4.40}$$

$$f_{\text{rrz}_{j}}^{0} = \begin{pmatrix} c_{\text{frx}_{j}}^{0} - g_{\text{mcdprx}_{j}}^{0} \end{pmatrix} \cdot m_{\text{mcdpr}_{j}} \cdot g_{z}^{0} \\ + \left(c_{\text{frx}_{j}}^{0} - g_{\text{me1x}_{j}}^{0} \right) \cdot m_{\text{e1}_{j}} \cdot g_{z}^{0} + \\ \left(c_{\text{frx}_{j}}^{0} - g_{\text{me2x}_{j}}^{0} \right) \cdot m_{\text{me1}_{j}} \cdot g_{z}^{0} \left(c_{\text{frx}_{j}}^{0} - a_{x_{j}}^{0} \right) \cdot f_{\text{az}_{j}}^{0} \\ \frac{+ a_{z_{j}}^{0} \cdot f_{\text{ax}_{j}}^{0}}{c_{\text{rrx}_{j}}^{0} - c_{\text{frx}_{j}}^{0}} \end{pmatrix}$$
(4.41)

Untuk analisa *rolling* pada sumbu x digunakan persamaan:

$$\mathbf{f}_{rg_{j}}^{o} = \mathbf{f}_{r1_{j}}^{o} + \mathbf{f}_{r2_{j}}^{o}$$
(4.42)

$$\mathbf{f}_{\mathrm{lf}_{j}}^{\mathrm{o}} = \mathbf{f}_{\mathrm{r4}_{j}}^{\mathrm{o}} + \mathbf{f}_{\mathrm{r3}_{j}}^{\mathrm{o}} \tag{4.43}$$

$$\Sigma f_z^{\ o} = 0 \tag{4.44}$$

$$(m_{\text{mcdpr}_{j}} + +m_{e1j} + m_{e2j})g_{z}^{\,0} + f_{az_{j}}^{\,0} + f_{rgz_{j}}^{\,0} + f_{lfz_{j}}^{\,0} = 0$$

$$(4.45)$$

$$f_{\text{rgz}_{j}}^{o} = -(m_{\text{mcdpr}_{j}} + m_{e1j} + m_{e2j})g_{z}^{o} - f_{az_{j}}^{o} - f_{f_{1}z_{j}}^{o}$$
(4.46)

$$\Sigma \mathbf{M}_{j}^{o} = 0 \tag{4.47}$$

$$c_{\mathrm{rg}_{j}^{0}} \times f_{\mathrm{rg}_{j}^{0}} + c_{\mathrm{lf}_{j}^{0}} \times f_{\mathrm{lf}_{j}^{0}} + b_{j}^{0} \times f_{\mathrm{b}_{j}^{0}} \\ + g_{\mathrm{mcdpr}_{j}^{0}} \cdot m_{\mathrm{mcdpr}_{j}} \times g^{0} \\ + g_{\mathrm{e1}_{j}^{0}} \cdot m_{\mathrm{e1}_{j}} \times g^{0} \\ + g_{\mathrm{e1}_{j}^{0}} \cdot m_{\mathrm{e1}_{j}} \times g^{0} = \mathbf{0}$$

$$(4.48)$$

$$f_{lfz_{j}^{0}} = \sum M_{x}^{0} = 0 \qquad (4.49)$$

$$f_{lfz_{j}^{0}} = \left(c_{rgy_{j}^{0}} - g_{mcdpry_{j}^{0}} \right) \cdot m_{mcdpr_{j}} \cdot g^{z} + \left(c_{rgy_{j}^{0}} - g_{me1y_{j}^{0}} \right) \cdot m_{e1j} \cdot g^{z} + \left(c_{rgy_{j}^{0}} - g_{me2y_{j}^{0}} \right) \cdot m_{e2j} \cdot g^{z} + \left(c_{rgy_{j}^{0}} - a_{y_{j}^{0}} \right) \cdot f_{az_{j}^{0}} + a_{z_{j}^{0}} \cdot f_{by_{j}^{0}} + \left(c_{rgy_{j}^{0}} - a_{y_{j}^{0}} \right) \cdot f_{az_{j}^{0}} + a_{z_{j}^{0}} \cdot f_{by_{j}^{0}} + c_{rgy_{j}^{0}} - c_{rgy_{j}^{0}} \right)$$

Dimana:

\mathbf{c}_{1j}^{0}	= vektor posisi <i>outrigger</i> 1, <i>mobile base j</i> , terhadap <i>fixed coordinate</i> .
$\mathbf{f}_{\mathrm{fr}_{j}}^{\mathrm{o}}$	= gaya reaksi terhadap <i>outrigger</i> depan <i>mobile</i> base j terhadap fixed coordinate
$\mathbf{f}_{\mathrm{rr}j}^{\mathrm{o}}$	= gaya reaksi terhadap <i>outrigger</i> belakang <i>mobile</i> base j terhadap fixed coordinate
$\mathbf{f}_{\mathrm{rg}_{j}}^{\mathrm{o}}$	= vektor gaya reaksi pada outrigger kanan mobile base j terhadap fixed coordinate
$\mathbf{f}_{\mathrm{lf}_{j}}^{\mathrm{o}}$	= vektor gaya reaksi terhadap outrigger kiri mobile base j terhadap fixed coordinate
m_{mcpdr_j}	= Massa <i>mobile base</i> M-CDPR ke <i>j</i>
g ^o	= vektor percepatan gravitasi.
b ^o _j	= vektor posisi titik B pada mobile base j terhadap fixed coordinate.

 \mathbf{f}_{bj}^{o} = vektor gaya reaksi di titik B pada *mobile base* ke *j* terhadap *fixed coordinate*.

4.1.5 Analisa ZMP pada M-CDPR

Pada tahap ini dilakukan analisa terhadap zero moment point tiap mobile base. Analisa ZMP pada M-CDPR dilakukan dengan menganalisa kestabilan tiap mobile base pada local coordinate masing-masing mobile base. Untuk mengubah dari fixed coordinate ke local coordinate bisa digunakan persamaan:

$$\begin{bmatrix} a_{x_{j}^{i}} \\ a_{y_{j}^{i}} \\ a_{z_{j}^{i}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\left(a_{x_{j}^{0}}\right)^{2} + \left(a_{y_{j}^{0}}\right)^{2} - \left(\rho_{i} - \frac{panjang}{2}\right)} \\ \frac{lebar}{2} \\ a_{z_{j}^{0}} \end{bmatrix}$$
(4.51)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ax}^{i} \\ \mathbf{f}_{ay}^{i} \\ \mathbf{f}_{az}^{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{ai}^{x} / cos(\gamma_{i}) \\ \mathbf{f}_{ai}^{x} / sin(\gamma_{i}) \\ \mathbf{f}_{ai}^{z} \end{bmatrix}$$
(4.52)

Dari hasil analisa didapatkan kesimpulan apakah *mobile base* akan stabil atau tidak saat *platform* bergerak sepanjang trajektori. Untuk analisa *tipping* dan *rolling* bisa digunakan persamaan:

$$0 = \overline{M}_{0j} - (\mathbf{f}_{\mathrm{fr}_j}^{\ i} + \mathbf{f}_{\mathrm{rr}_j}^{\ i})d_j \tag{4.53}$$

$$d_{x_{j}}{}^{i} = \begin{pmatrix} \left(\mathbf{a}_{z_{j}}{}^{i} \cdot f_{\mathbf{a}_{x_{j}}{}^{i}} \right) - \left(\mathbf{a}_{x_{j}}{}^{i} \cdot f_{\mathbf{a}_{z_{j}}{}^{i}} \right) \\ - \left(g_{\text{mcdpr}_{x_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{mcdpr}_{j}} g_{z}{}^{i} \right) \\ - \left(g_{\text{me1}_{x_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me1}_{j}} g_{y}{}^{i} \right) \\ - \left(g_{\text{me2}_{x_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me2}_{j}} g_{z}{}^{i} \right) \\ \frac{-\left(g_{\text{me2}_{x_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me2}_{j}} g_{z}{}^{i} \right)}{f_{\text{rrz}_{j}{}^{i}} + f_{\text{frz}_{j}{}^{i}}} + {}^{i} \Sigma M_{\text{By}} \\ d_{y_{j}}{}^{i} = \begin{pmatrix} \left(b_{z_{j}}{}^{i} \cdot f_{\text{b}_{y_{j}{}}{}^{i}} \right) - \left(b_{y_{j}}{}^{i} \cdot f_{\text{b}_{z_{j}{}}{}^{i}} \right) \\ - \left(g_{\text{mcdpr}_{y_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{mcdpr}_{j}} g_{z}{}^{i} \right) \\ - \left(g_{\text{mcl}_{y_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me1}_{j}} g_{z}{}^{i} \right) \\ - \left(g_{\text{me1}_{y_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me2}_{j}} g_{z}{}^{i} \right) \\ \frac{-\left(g_{\text{me2}_{y_{j}}{}^{i}} \cdot m_{\text{me2}_{j}} g_{z}{}^{i} \right)}{f_{\text{lfz}_{j}{}^{i}} + f_{\text{rgz}_{j}{}^{i}} \\ 0 \leq d_{x_{j}}{}^{i} \leq panjang \\ 0 \leq d_{y_{j}}{}^{i} \leq lebar \end{pmatrix}$$

$$(4.56)$$

4.1.6 Parameter Desain M-CDPR

Pada penelitian ini, digunakan parameter sebagai berikut:

Tabel 4.1 Parameter desain M-CDPR

No.	Parameter	Nilai
1	Panjang M-CDPR	6.42 m
2	Lebar M-CDPR (dengan outrigger)	6.3 m

3	Tinggi M-CDPR	3.3 m	
4	\mathbf{g}_{mcdpri}^{w}	2 m	
5	<i>m</i> _{silinder}	20 kg	
6	$m_{ m piston}$	10 kg	
7	m _{mcdpr}	26,495 kg	
8	Trajektori	Horizontal helix	
9	m (payload)	3000 kg	
10	ρ	30 m	
11	γ_1	325°	
12	γ_2	85°	
13	γ_3	205°	
14	<i>x</i> ₀	0 m	
15	<i>y</i> ₀	0 m	
16	Z_0	10 m	
16	ω	0.105 rad/s durasi T = 60 s	
		0.0175 rad/s durasi T = 360 s	
18	r_c	2 m	
19	ho kabel	0.0456 kg	
20	$r_{ m kabel}$	0.0045 m	
21	E (Modulus Elastisitas)	28 x 10 ⁶	
22	Time iteration	0-100sec (increment 1/15 sec)	

Tabel 4.2 Parameter boom pada mobile base

Jenis Boom	Panjang (m)	В(°)
Non-Reconfigurable	25	100
Decentiquestle	20-25	100-140
Reconjigurable	(increment 2.5)	(increment 5)

4.2 Hasil Simulasi

4.2.1 Distribusi Gaya Tegangan Kabel, ZMP dan Vibrasi Kabel M-CDPR

Analisa gaya tegangan kabel, *zero moment point* (ZMP) dan vibrasi kabel M-CPDR dengan *end effector* yang bergerak melalui trajektori *horizontal helix* dibagi menjadi 2. Bagian pertama menjelaskan hasil analisa *non-reconfigurable* M-CDPR dan bagian kedua menjelaskan hasil analisa *reconfigurable* M-CDPR

4.2.1.1. Non-Reconfigurable M-CDPR

Gambar 4.9 Hasil Simulasi MATLAB Non-Reconfigurable M-CDPR dengan trajektori horizontal helix

Perhitungan dan simulasi dengan menggunakan software MATLAB seperti pada gambar 4.9 menghasilkan data distribusi gaya tegangan kabel, ZMP dan vibrasi kabel yang memenuhi ke setimbangan statis dan dinamis dari 3 mobilebase untuk M-CDPR dengan lengan berjenis non-reconfigurable. Data

diambil selama 360 detik dimana telah terbentuk trajektori 10/36 lingkaran.

Gambar 4.10 menunjukkan grafik gaya tengan kabel pada ketiga *mobile base* dengan *payload* 3500 kg bergerak secara sinusoidal. Bentuk ini berkaitan dengan trajektori yang dilalui *end effector* yang merupakan *horizontal helix* berupa lingkaran. Grafik pada gambar 4.10 terhenti pada kisaran detik ke 80 - 100. Hal ini disebabkan oleh adanya ketidakseimbangan dinamis dimana kabel kehilangan tegangan atau terjadi *tipping* dan *rolling* pada salah satu atau beberapa *mobile base*. Dari grafik distribusi tegangan ini menujukkan bentuk sinusoidal dimana tegangan akan selalu pada nilai puncak dan lembah, sehingga kemungkinan terjadinya kehilangan tegangan pada salah satu kabel secara tiba – tiba sangat tidak mungkin. Dimana gaya tegangan kabel pada grafik tersebut tidak menyentuh nilai $\tau = 0$ pada masing masing kabel. Untuk itu dapat disimpulkan bahwa telah terjadi *tipping* atau rolling pada salah satu atau lebih *mobile base*.

Gambar 4.11 Grafik Distribusi ZMP Non-Reconfigurabel M-CDPR Melewati Trajektori Horizontal Helix

Data kesetimbangan statis mobile base ditunjukkan dengan grafik ZMP. Pada grafik ini terdapat perbandingan waktu dengan d_u dan d_v untuk masing – masing mobile base. Gambar 4.10 (a) dan (b) menunjukkan pergerakan posisi ZMP pada analisa tipping dan rolling masing – masing. Semua posisi ZMP berada dalam batas ZMP mobile base hingga end effector mencapai trajektori di kisaran detik ke 80 - 100. Namun pada grafik rolling tampak pergerakan posisi ZMP pada mobile base ke 3 naik menuju batas. Dari hasil analisa pada kisaran detik ke 80 - 100 ZMP pada mobile base ke 3 seperti pada gambar 4.10 (b) naik melewati batas sehingga terjadi rolling. Untuk pergerakan ZMP pada gambar 4.10 (a), ZMP tipping untuk masing – masing mobile base masih berada dalam batas ZMP.

Hasil analisa *tipping* dan *rolling* menunjukkan *nonreconfigurable* M-CDPR dengan lintasan trajektori *Horizontal Helix* tidak dapat mempertahankan kesetimbangan statisnya pada kisaran detik ke 80 - 100 yang diakibatkan oleh terjadinya *rolling* pada *mobile base* ke 3.

Gambar 4.12 Grafik Vibrasi dengan Perbedaan Nilai antara Aktual dan Lintasan Trajektori *Horizontal Helix* pada *End Effector*

Untuk melihat besarnya vibrasi yang terjadi pada *end effector* yang dapat dilihat melalui grafik vibrasi pada gambar 4.12. Gambar 4.12 (a), (b) dan (c) menunjukkan posisi *end effector* secara aktual dan sesuai lintasan trajektori *Helix*. Terdapat perbedaan antara posisi *end effector* secara aktual dan lintasan trajektori untuk masing – masing sumbu. Hal ini menunjukan terdapat vibrasi pada *end effector* yang dimana nilai vibrasi ini merupakan selisih antara posisi *end effector* secara aktual dan lintasan.

4.2.1.2. Reconfigurable M-CDPR

Hasil perhitungan dan simulasi menggunakan software MATLAB seperti pada gambar 4.9 menunjukan data distribusi gaya tengan kabel dan ZMP yang memenuhi kesetimbangan statis dan dinamis dari ke 3 *mobile base* untuk M-CDPR dengan lengan berjenis *reconfigurable*. Data diambil selama 300 detik dimana telah terbentuk 1 lingkaran. Distribusi gaya tengan kabel, ZMP dan vibrasi dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar 4.13 Grafik Distribusi Tegangan Kabel *Reconfigurable* M-CDPR dengan Trajektori *Horizontal Helix*

Gambar 4.14 Grafik Distribusi ZMP *Reconfigurable* M-CDPR dengan Trajektori *Horizontal Helix*

(b) Sumbu - y


Gambar 4.15 Grafik Vibrasi dengan Perbedaan Nilai antara Aktual dan Lintasan Trajektori *Horizontal Helix* pada *End Effector*



60



Gambar 4.16 Grafik Distribusi Panjang dan Sudut Lengan Boom

Gambar 4.13 merupakan gaya tegangan kabel ke 3 mobile base dengan payload 3600 kg bergerak naik turun secara acak. Bentuk ini berbeda dengan grafik pada gambar 4.10 yang tidak mengikuti bentuk sinusoidal. Hal ini diakibatkan pada reconfigurable, lengan M-CDPR mengalami perubahan panjang maupun sudut akibat konfigurasi sehingga menciptakan nilai gaya tegangan kabel yang paling minimum. Perubahan panjang lengan dan sudutnya menghasilkan kecepatan dan percepatan lengan, baik panjang maupun sudut lengan, sehingga mempengaruhi besar tegangan.

Data kesetimbangan statis *mobile base* ditunjukkan dengan grafik ZMP. Pada grafik ini terdapat perbandingan waktu dengan d_u dan d_v untuk masing – masing *mobile base*. Gambar 4.13 (a) dan (b) menunjukkan pergerakan posisi ZMP pada analisa *tipping* dan *rolling* untuk *payload* 3600 kg. Grafik analisa *tipping* dan *rolling* memiliki *trendline* nilai yang sama yang

dimana nilai pergerakannya tetap kecil akibat konfigurasi pada lengan yang menjaga kesetimbangan statis.

Vibrasi pada kabel dapat dilihat pada gambar 4.15 (a), (b) dan (c). Pada grafik ini terdapat perbandingan waktu dengan posisi *end effector* secara aktual dan sesuai lintasan trajektori *horizontala helix*. Sama seperti analisa vibrasi pada *nonreconfigurable*, pada *reconfigurable* terdapat perbedaan posisi *end effector* secara aktual dan sesuai lintasan trajektori. Hal ini menunjukkan vibrasi terhadap *end effector* dimana nilai vibrasi merupakan selisih antara posisi *end effector* secara aktual dan sesuai lintasan trajektori. Dibandingkan dengan vibrasi pada *nonreconfigurable*, vibrasi pada *reconfigurable* terlihat lebih kecil untuk masing – masing sumbunya.

Kemudian untuk melihat distribusi perubahan panjang dan sudut lengan dapat dilihat pada gambar 4.16 (a) dan (b). Jika kita bandingkan dengan grafik distribusi tegangan dan ZMP untuk *rolling* maupun *tipping* dapat dilihat bahwa perubahan distribusi lengan menyebabkan grafik sinusoidal tegangan dan ZMP mengalami perubahan bentuk. Hal ini menjelaskan bahwa perubahan pada grafik distribusi tegangan dan ZMP diakibatkan oleh perubahan sudut lengan.

4.2.2 Analisa Durasi Waktu untuk Reconfigurable

Analisa ini bertujuan untuk melihat pengaruh durasi waktu terhadap sistem *reconfigurable*. Kita membagi durasi waktu menjadi 2 yaitu T=60 detik dan T=360 detik. Analisa ini melihat apakah dengan semakin kecil waktu dapat menyebabkan *tipping* atau *rolling* pada *mobile base* M-CDPR. Hasil analisa dapat dilihat seperti pada gambar berikut



Gambar 4.17 Grafik Distribusi ZMP *Tipping Reconfigurable* M-CDPR dengan Trajektori *Horizontal Helix*



Gambar 4.18 Grafik Distribusi ZMP Rolling Reconfigurable M-CDPR dengan Trajektori Horizontal Helix

Pada gambar 4.17 merupakan grafik *tipping*. Dapat dilihat pada grafik 4.17(a) mengalami *tipping* di *mobile base* ke 1 pada kisaran waktu 0-20 detik. Sedangkan pada 4.17(b) untuk durasi waktu 360 detik tidak mengalami *tipping* sama sekali. Untuk 4.18 (a) dan (b) memiliki grafik nilai ZMP *rolling* berada di nilai batas. Hal ini menunjukkan pengaruh waktu terhadap *reconfigurable* bahwa *tipping* lebih mudah terjadi pada *reconfigurable* bila trajektori dikerjakan dalam waktu yang singkat. Walaupun *reconfigurable* mampu menjaga tension untuk tidak berada dibawah nilai batas, namun bila tidak menjaga waktu untuk perubahan bentuk *boom* pada *reconfigurable* dapat mengakibatkan *tipping* semakin besar. Untuk ZMP *rolling* tidak menerima pengaruh karena perubahan sudut menambah momen pada sumbu y atau *tipping* pada *mobile base*.

4.2.3 Analisa Durasi Waktu untuk Vibrasi

Analisa vibrasi kabel dengan *end effector* yang bergerak melalui trajektori *horizontal helix*, membandingkan 2 durasi waktu dalam menyelesaikan trajektori yaitu T=10 detik dengan omega = 0.629 dan T=20 detik dengan omega = 0.314 rad/s. Hasil perhitungan dan simulasi menggunakan *software* MATLAB seperti pada gambar 4.16 menunjukkan data distribusi vibrasi kabel yang memenuhi kesetimbangan statis dan dinmais dari 3 *mobile base* untuk M-CDPR dengan lengan berjenis *reconfigurable*. Data diambil selama 10 detik dimana telah terbentuk trajektori 1 lingkaran.







(b) Vibrasi Sumbu - y



Gambar 4.19 Grafik Distribusi Vibrasi Kabel pada End Effector dengan Trajektori Horizontal Helix

Analisa pada vibrasi kabel untuk perbandingan ke 2 durasi waktu yang berbeda dapat dilihat melalui grafik vibrasi kabel pada end effector dengan trajektori horizontal helix. Nilai vibrasi didapatkan melalui selisih antara posisi end effector secara aktual dan lintasan trajektori. Gambar 4.16 (a), (b) dan (c) menunjukkan grafik vibrasi di end effector untuk 2 durasi waktu yang berbeda pada masing – masing sumbu. Untuk sumbu x dan y, menunjukkan vibrasi dengan durasi waktu 10 detik memiliki vibrasi yang lebih besar dibandingkan dengan durasi waktu 20 detik. Sedangkan pada sumbu z nilai tertinggi vibrasi relatif sama untuk masing – masing durasi waktu. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil durasi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan trajektori maka semakin besar nilai vibrasi yang diakibatkan oleh kecepatan yang semakin besar. Dan karena end effector hanya mengalami perubahan posisi pada sumbu x dan y, maka nilai vibrasi pada sumbu z untuk masing – masing durasi waktu relatif sama akibat tidak ada pengaruh kecepatan trajekotri pada sumbu z.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penilitan yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan yaitu:

- 1. M-CDPR berjenis lengan *reconfigurable* mampu mempertahankan kesetimbangan dinamis *end effector* untuk *payload* 3000 kg dengan trajektori *horizontal helix*. Gaya tegangan kabel, perubahan ZMP dan vibrasi kabel pada *reconfigurable* lebih kecil dibandingkan dengan *non reconfigurable*.
- 2. Pada *reconfigurable* perlu diajaga durasi waktu agar nilai perubahan perceptan dan kecepatan *boom* tetap kecil. Karena *reconfigurable* lebih baik dalam menjaga tension berada diatas batasnya dan tidak terlalu besar, namun perubahan *boom* yang cepat akan menambah resiko *tipping* pada *mobile base* semakin besar
- 3. Vibrasi kabel akan semakin meningkat apabila durasi waktu untuk menyelesaikan lintasan trajektori semakin kecil yang mengakibatkan semakin meningkatnya kecepatan dari *end effetor* bergerak.

5.2 Saran

Dari penilitan yang telah dilakukan saran yang dapat diberikan untuk penelitian ini yaitu:

- 1. Perlu dilakukan konfigurasi baru dalam mengatur kecepatan *boom* dengan merencanakan pergerakan *boom* yang optimal
- 2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh kecepatan perubahan panjang tali terhadap kestabilan *mobile base* M-CDPR.

- 3. Perlu dilakukan penilitian lebih lanjut megenai pengaruh gaya eksternal seperi gesekan pada tali dan pengaruh angin terhadap vibrasi kabel.
- 4. Perlu dilakukan penilitian lebih lanjut mengenai pengaruh bentuk lokasi *mobile base* terhadap kestabilan *mobile base* M-CDPR

DAFTAR PUSTAKA

- Bunga, Halida. Desember 2019. "BNPB: 3.721 Bencana Alam Terjadi Sepanjang 2019". TEMPO.CO.
- Keating, Steven J. 2012. "Renaissance Robotics: Novel applications of Multipurpose Robotic Arms spanning Design Fabrication, Utility, and Art". Massachusetts Institute of Technology. 120.
- Jin, Xue Jun. dkk. 2018. "Geometric Parameter Calibration for a Cable-Driven Parallel Robot Based on a Single One-Dimensional Laser Distance Sensor Measurement and Experimental Modeling". MDPI. 6.
- Zi, Bin., Jun Lin., Sen Qian., 2014. "Localization, Obstacle Avoidance Planning and Control of A Cooperative Cable Parallel robot for multiple Mobile Cranes". Elsevier Ltd. 2.
- Du, Jingli., Wen Ding., Hong Bao., 2015. "Cable Vibration Analysis for Large Workspace Cable-Driven Parallel Manipulators". Mechanisms and Machine Science 12. 439.
- Gosselin, C. 2012. "Global Planning of Dynamically Feasible Trajectories for Three-DOF Spatial Cable-Suspended Parallel Robots". International Conference on Cable-Driven parallel robot (CableCon). 7-18.
- Gosselin, C. 2013. "Cable-Driven Parallel Mechanisms: state of the art and perspectives". Bulletin of the JSME. 2.
- Rasheed, Tahir., Long, Philip., Marquez-Gamez, David., dan Caro, Stéphane., 2017. "Tension Distribution Algorithm for Mobile Cable-Driven Parallel Robots". International Conference on Cable-Driven parallel robot (CableCon). 1-9.

BIODATA PENULIS



Pehulisa Samuel Anggi Barus lahir pada 18 Oktober 1997 dari pasangan Ramli Barus dan Norma Tetty Purba. Penulis merupakan anak dari 3 bersaudara. ketiga Penulis memulai Pendidikan di TK Metodhist Pematang Siantar. Penulis melanjutkan Pendidikan sekolah dasar di SD Methodist Pematang Siantar. Pendidikan menengah di SMP Swasta RK Bintang Timur Pematang Siantar dan Pendidikan menengah atas di SMA Negeri 2 Balige. Penulis

melanjutkan Pendidikan tinggi sarjana di Departemen Teknik Mesin FTI ITS selama 4 tahun sejak 2016 hingga 2020.

Selama menjadi mahasiswa di kampus ITS, penulis ikut bergabung dan memegang jabatan di beberapa organisasi tingkat departemen dan universitas. Penulis merupakan panitia Natal Paskah (Napas) di Persekutuan Mahasiswa Kristen (PMK) ITS pada periode 2017/2018, Wakil Koordinator Logistik Natal Paskah (Napas) di Persekutuan Mahasiswa Kristen (PMK) ITS pada periode kepengurusan 2018/2019, *Steering Committee* Natal Paskah (Napas) di Perseketuan Mahasiswa Kristen (PMK) ITS pada periode 2019. Penulis merupakan Ketua Alumni Paryasop Jatim pada periode 2018/2019. Penulis juga merupakan anggota aktif dari lab Otomasi Industri di Departemen Teknik Mesin ITS.

Untuk informasi dan saran yang dibutuhkan dari dan kepada penulis, dapat menghubungi penulis via email di: <u>sam.baroez@gmail.com</u>