



TUGAS AKHIR - TM 141585

ANALISA STATIS DAN DISTRIBUSI KEKAKUAN ROBOT PARALEL 3-RPS SEBAGAI ALAT REHABILITASI TUMIT

RATH KAUTSAR FIRDAUS
NRP 02111645000041

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR – TM 141585

**ANALISA STATIS DAN DISTRIBUSI KEKAKUAN
ROBOT PARALEL 3-RPS SEBAGAI ALAT
REHABILITASI TUMIT**

**RATH KAUTSAR FIRDAUS
NRP. 02111645000041**

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 – TM 141585

**STATIC ANALYSIS AND STIFFNESS
DISTRIBUTION PARALLEL ROBOT 3-RPS AS AN
ANKLE REHABILITATION**

**RATH KAUTSAR FIRDAUS
NRP. 02 111 645 0000 41**

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

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

ANALISA STATIS DAN DISTRIBUSI KEKAKUAN ROBOT PARALEL 3-RPS SEBAGAI ALAT REHABILITASI TUMIT

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 :

RATH KAUTSAR FIRDAUS

NRP. 021116 45 000041

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Latifah Nurahmi, ST, MSc, Ph.D (Pembimbing)
NIP. 1986201712037
2. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT (Penguji I)
NIP. 198907052015042005
3. Dr.Eng Unggul Wasiwitonon, M.Eng, Sc (Penguji II)
NIP. 197805102001121001
4. Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, Ph.D (Penguji III)
NIP. 196912031994031001

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISA STATIS DAN DISTRIBUSI KEKAKUAN ROBOT PARALEL 3-RPS SEBAGAI ALAT REHABILITASI TUMIT

Nama : Rath Kautsar Firdaus
NRP : 0211164500041
Pembimbing : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Proses penyembuhan atau rehabilitasi cedera tumit selama ini biasa dilakukan dengan cara tradisional. Namun tidak semua pasien dapat menerima rehabilitasi tradisional dikarenakan terapis hanya bisa melayani satu pasien secara bergantian dimana prosesnya diulang terus menerus sehingga membutuhkan jumlah tenaga yang sama dalam waktu yang lama. Efektifitas pelatihan juga sangat tergantung pada keahlian terapis. Robot paralel 3-RPS merupakan sebuah mekanisme robot yang mempunyai tiga derajat kebebasan dan masing-masing kakinya tersusun dari revolute joint, prismatic joint, dan spherical joint. Mekanisme tersebut kemudian dikembangkan dalam tugas akhir ini menjadi alat rehabilitasi tumit. Penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui kondisi kesetimbangan dari konfigurasi robot paralel 3-RPS berdasarkan gaya dan momen virtual pada mekanisme. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter desain terhadap distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS sebagai alat rehabilitasi tumit.

Dalam melakukan analisa, dimulai dengan pemodelan kinematika maupun letak koordinat pada satu kaki robot untuk menentukan gaya dan momen constraint serta gaya dan momen aktuasi dalam bentuk twist dan wrench pada masing-masing joint. Gaya dan momen tersebut kemudian dirumuskan menjadi matriks Jacobian yang selanjutnya digunakan untuk menganalisa kesetimbangan statis maupun kekakuan. Matriks Jacobian dirumuskan menjadi matriks Kekakuan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak MATLAB sehingga didapatkan

grafik yang menjelaskan hubungan antara nilai kekakuan terhadap variasi parameter desain.

Hasil yang didapatkan adalah masing-masing kaki pada struktur robot paralel 3-RPS mempunyai satu gaya constraint dan satu gaya aktuasi. Kondisi kesetimbangan robot paralel 3-RPS direpresentasikan oleh matrik Jacobian yang didapat dengan menggabungkan semua gaya-gaya tersebut. Semakin jauh posisi kaki ketiga terhadap kaki pertama, maka kekakuan robot akan semakin rendah. Semakin besar ukuran platform, maka nilai kekakuan robot akan semakin besar. Untuk mendapatkan nilai kekakuan yang tinggi, posisi kaki kedua dapat divariasikan dan bergantung pada arah wrench yang diterapkan pada platform.

Kata kunci: rehabilitasi, tumit, 3-RPS, kekakuan, statis, Jacobian, *constraint*, *wrench*

STATIC ANALYSIS AND STIFFNESS DISTRIBUTION PARALLEL ROBOT 3-RPS AS AN ANKLE REHABILITATION

Nama : Rath Kautsar Firdaus
NRP : 02111645000041
Pembimbing : Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Healing process or rehabilitation of ankle injuries during this time is usually done in the traditional way. However, not all patients can receive traditional rehabilitation because the therapist can only serve one patient in turn where the process is repeated continuously so that it takes the same amount of energy for a long time. The effectiveness of the training is also highly dependent on the therapist's expertise. The 3-RPS parallel robot is a robotic mechanism that has three degrees of freedom and each leg is composed of a revolute joint, prismatic joint, and spherical joint. The mechanism is then developed in this final task to be an ankle rehabilitation device. This study aims to determine the equilibrium condition of the 3-RPS parallel robot configuration based on the virtual force and moment on the mechanism. In addition, this study aims to determine the effect of design parameters on stiffness distribution in 3-RPS parallel robot as an ankle rehabilitation device.

In the analysis, starting with kinematics modeling and the location of the coordinates on one robot leg to determine the force and moment of the constraint and the force and moment of the actuation in the form of twist and wrench on each joint. Then the forces and moments are formulated into Jacobian matrices which are then used to analyze the static equilibrium and stiffness. The Jacobian matrix is formulated into a Stiffness matrix and simulated using MATLAB program to obtain a graph which explains the relationship between the stiffness distribution to variations in design parameters.

The results obtained are that each leg in a 3-RPS parallel robot structure has one constraint force and one actuation force. By combining all of these forces, a Jacobian matrix formulation representing the 3-RPS parallel equilibrium condition is obtained. The farther the third leg position against the first leg, then the robot stiffness will be lower. The larger the size of the platform, then the robot stiffness will be greater. To get a large stiffness value, the position of the second leg can be varied and depends on the direction of wrench applied to the platform.

Key words: *Rehabilitation, ankle, 3-RPS, stiffness, static, Jacobian, constraint, wrench*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah S.W.T karena atas rahmat-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul “**ANALISA STATIS DAN DISTRIBUSI KEKAKUAN ROBOT PARALEL 3-RPS SEBAGAI ALAT REHABILITASI TUMIT**” telah diselesaikan. Pada kesempatan kali ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam bentuk apapun, baik secara langsung maupun tidak langsung, diantaranya kepada:

1. Ibunda Werdiningsih, Om Setiya Muji Nugroho, Yosca Rose Anggita, dan Adik Salsabila Arasy Syifa Aura, serta keluarga besar yang telah memberi dukungan.
2. Ibu Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis.
3. Seluruh dosen, staff Departemen Teknik Mesin ITS.
4. Teman-teman Lab Otomasi Industri Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Teman-teman Lintas Jalur Angkatan 2016 Departemen Teknik Mesin ITS.
6. Rekan seperjuangan Tugas Akhir ini, Pradiktio Putrayudanto dan M. Taufik Ali Rahman.
7. Grup ‘Kabinet Komting ITS’.
8. Teman-teman D3 Politeknik Negeri Jakarta Angkatan 2012, khususnya grup ‘Dewa Bender’.
9. Semua pihak yang telah membantu dan tidak dapat dituliskan satu per satu.

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

Surabaya, Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian.....	4
1.3 Batasan Masalah Penelitian.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Derajat Kebebasan dan Jenis Gerakan.....	7
2.1.1. <i>Links</i> dan <i>Joints</i>	7
2.1.2. Derajat Kebebasan.....	9
2.2 Posisi, Orientasi, dan Lokasi <i>Rigid Body</i>	10
2.3 Teori <i>Screw</i>	12
2.3.1. <i>Screw</i>	13
2.3.2. Sistem <i>Twist</i> dan <i>Wrench</i>	14
2.3.3. <i>Reciprocal Screw</i>	15
2.3.4. <i>Twist</i> dan <i>Wrench</i> pada <i>Joint</i>	16
2.4 Analisa Jacobian pada Robot Paralel.....	17
2.5 Analisa Statis.....	19
2.6 Analisa Kekakuan.....	20
2.7 Struktur dan Gerakan Pergelangan Kaki.....	22
2.8 Alat Rehabilitasi Tumit.....	24
2.8.1. Robot PHARAD (<i>Parallel link type Human Ankle Rehabilitation</i>).....	25

2.8.2. Robot ICAR (<i>Impedance Control of Ankle Rehabilitation Robot</i>)	26
BAB III	27
METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	27
3.1.1 <i>Flowchart</i> Perumusan Matrik Jacobian	28
3.2 Proses Penelitian.....	29
3.2.1. Identifikasi Masalah	30
3.2.2. Studi Literatur.....	30
3.2.3. Analisa Geometri Robot Paralel 3-RPS.....	30
3.2.4. Penurunan Jacobian Matrik	30
3.2.5. Analisa Statis	31
3.2.6. Analisa Kekakuan.....	31
3.2.7. Hasil Output yang Diinginkan	32
BAB IV	33
PEMBAHASAN	33
4.1. Geometri Robot Paralel 3-RPS.....	33
4.2. Analisis Kesetimbangan Statis	36
4.2.1. Penurunan Jacobian Matrik	36
4.3. Matrik Kekakuan Robot Paralel 3-RPS.....	42
4.3.1. Kekakuan Aktuasi.....	43
4.3.2. Kekakuan <i>Constraint</i>	44
4.4. Pemodelan Kekakuan Robot Paralel 3-RPS	47
4.5. Distribusi Kekakuan Robot Paralel 3-RPS	50
4.6. Contoh Studi Kasus	65
BAB V	71
KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA	73
BIODATA PENULIS	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tingkat Cedera yang Terjadi pada Olahraga Bola Voli (Gerardo, 2015).....	1
Gambar 1.2. Posisi Pergelangan Kaki yang Memicu Terjadinya Cedera (Healthwise Staff, 2017)	2
Gambar 1.3 Rehabilitasi Cedera Tumit Secara Tradisional (Zhijiang Lu, 2015)	3
Gambar 2.1 Bentuk dan Jenis-Jenis Joint (Park, 2017).....	8
Gambar 2.2 Posisi Vektor Titik P Terhadap Fixed Frame A (Tsai, 1999)	11
Gambar 2.3 Lokasi Titik P Terhadap Sistem Koordinat Fixed Frame dan Moving Frame (Tsai, 1999).....	12
Gambar 2.4 Perpindahan Sebuah Benda Rigid dari Titik Satu ke Titik Lainnya.....	13
Gambar 2.5 Screw Coordinates (Kong, 2003).....	14
Gambar 2.6 Konsep <i>Reciprocal Screw</i>	16
Gambar 2.7 Joint pada Kaki ke-i Terhadap Sistem Koordinat Fixed Frame dan Moving Platform (Tsai, 1999).....	17
Gambar 2.8 (a)Struktur Sendi Pergelangan Kaki (b) Pergerakan Sendi Pergelangan Kaki (Yonezawa, 2014).....	23
Gambar 2.9 Range Gerakan Sendi Pergelangan Kaki (Zhijiang Lu, 2015)	24
Gambar 2.10 Mekanisme Robot PHARAD (Yonezawa, 2014) ..	25
Gambar 2.11 Prototype Robot PHARAD (Yonezawa, 2014) ...	26
Gambar 2.12 Mekanisme Robot ICARR (Xie, 2008).....	26
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	28
Gambar 3.2 Flowchart Twist dan Constraint Wrench	28
Gambar 3.3 Flowchart Jacobian Berdasarkan Screw	29
Gambar 4.1 Model Mekanisme 3-RPS (A). Top, (B). Front, (C). 3-RPS Mock-up.....	34
Gambar 4.2 Geometri Robot Paralel 3-RPS (Nurahmi, 2017) ..	35
Gambar 4.3 Twist Setiap Joint pada Robot Paralel 3-RPS	37
Gambar 4.4 Actuation dan Constraint Wrench pada Robot Paralel 3-RPS	39

Gambar 4.5 Unit Screw pada Satu Kaki RPS	40
Gambar 4.6 FBD pada Satu Kaki.....	45
Gambar 4.7 Geometri Robot Paralel 3-RPS	48
Gambar 4.8 Desain Pertama.....	67
Gambar 4.9 Desain Kedua	68
Gambar 4.10 Desain Ketiga	69

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Motor Lead Screw	43
Tabel 4.2 Data Spesifikasi Material PLA	46
Tabel 4.3 Parameter Desain yang Divariasikan.....	48
Tabel 4.4 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu x	51
Tabel 4.5 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu y	53
Tabel 4.6 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu z	56
Tabel 4.7 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu x	58
Tabel 4.8 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu y	60
Tabel 4.9 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu z.	63
Tabel 4.10 Detail Hasil yang Didapatkan.....	65
Tabel 4.11 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Pertama	67
Tabel 4.12 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Kedua	68
Tabel 4.13 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Ketiga	69

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR SIMBOL

DOF	= <i>Degrees of Freedom</i> atau derajat kebebasan
RPS	= <i>Revolute, Prismatic, Spherical Joint</i>
$\hat{\$}$	= <i>Unit Screw</i>
$\hat{\$}_0$	= <i>Zero pitch crew</i>
$\hat{\$}_\infty$	= <i>Infinite pitch screw</i>
\mathcal{W}	= <i>Sistem wrench</i>
\mathcal{T}	= <i>Sistem twist</i>
ξ_0	= <i>Zero pitch twist</i>
ξ_∞	= <i>Infinite pitch twist</i>
ζ_0	= <i>Zero pitch wrench</i>
ζ_∞	= <i>Infinite pitch wrench</i>
Σ_0	= <i>Sistem koordinat fixed frame</i>
Σ_1	= <i>Sistem koordinat moving frame</i>
r_{Ai}^0	= Titik A_i ($i=1,2,3$) berdasarkan sistem koordinat <i>fixed frame</i>
r_{Bi}^1	= Titik B_i ($i=1,2,3$) berdasarkan sistem koordinat <i>moving frame</i>
J	= <i>Jacobian matrik</i>
J_a	= <i>Jacobian aktuasi</i>
J_c	= <i>Jacobian constraint</i>
J^T	= <i>Jacobian transpose</i>
\mathbf{F}	= <i>Vektor gaya dan momen</i>
χ	= <i>Matrik kekakuan diagonal</i>
k_a	= <i>Kekakuan aktuator</i>
k_c	= <i>Kekakuan constraint</i>
K	= <i>Matrik kekakuan</i>
λ	= <i>Eigenvalues</i>

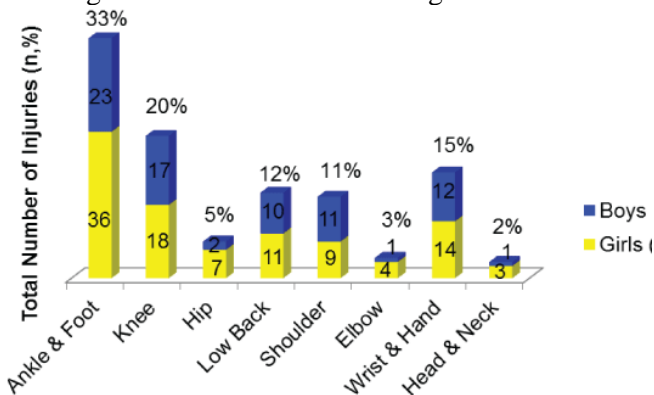
“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB I PENDAHULUAN

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

1.1 Latar Belakang Masalah

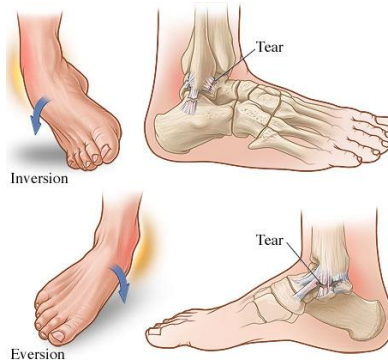
Cedera pada tumit atau keseleo biasa terjadi saat berolahraga dan pada kehidupan sehari-hari (Pengju Sui, 2009). Keseleo didefinisikan sebagai cedera pada sendi, dimana terjadi robekan dari ligament yang menghubungkan tulang ke tulang (Sumartiningsih, 2012). Olahraga yang membutuhkan gerakan melompat, berputar, dan memutar seperti bola basket, bola voli, sepak bola dan perubahan arah yang eksplosif seperti sepak bola, tenis, dan hoki sangat rentan terhadap cedera tumit (Sports Medicine Australia, 2010). Menurut ACSM (*American College of Sports Medicine*), 25.000 orang Amerika mengalami cedera tumit setiap hari (9 juta per tahun). Cedera tumit juga menyumbang hampir setengah dari semua cedera olahraga.



Gambar 1.1 Tingkat Cedera yang Terjadi pada Olahraga Bola Voli (Gerardo, 2015)

Gambar 1.1 menunjukkan tingkat presentase cedera yang biasa terjadi pada olahraga bola voli pada tahun 2015. Data diambil dari 210 orang peserta yang terdiri dari 105 orang laki-laki dan 105 orang perempuan. Cedera pada tumit menduduki peringkat tertinggi (33%), diikuti cedera lutut (20%), cedera pergelangan tangan (15%), cedera punggung (12%), cedera bahu (11%), cedera pinggul (5%), cedera siku (3%) dan cedera kepala atau leher (2%). Hal ini menunjukkan bahwa tingkat cedera pada tumit dikatakan tinggi.

Setelah mengalami cedera tumit, sendi pergelangan kaki bisa menjadi tidak stabil seperti pada gambar 1.2 dan butuh waktu lama untuk pulih. Sebagian besar cedera tumit sembuh dalam waktu 2 sampai 6 minggu, namun apabila cedera parah bisa mencapai 12 minggu (Sports Medicine Australia, 2010). Apabila cedera tumit tidak ditangani dengan baik, maka bisa menyebabkan kecacatan. Proses penyembuhan atau rehabilitasi selama ini biasa dilakukan dengan cara tradisional.



Gambar 1.2. Posisi Pergelangan Kaki yang Memicu Terjadinya Cedera (*Healthwise Staff, 2017*)

Rehabilitasi tumit secara tradisional dapat dibagi menjadi dua, yaitu pelatihan pasif dan pelatihan aktif. Dalam pelatihan pasif, seorang terapis pada prinsipnya membantu pasien dengan latihan pasif sebagai bagian dari rehabilitasi awal yaitu menahan posisi pergelangan kaki di posisi tertentu dan berlangsung selama

beberapa waktu seperti pada gambar 1.3 (Zhijiang Lu, 2015). Pada saat yang sama terapis perlu memijat dan merangsang otot yang saling berhubungan. Selain itu terapis juga akan memandu pasien untuk melakukan gerakan memutar pergelangan kaki. Sedangkan dalam pelatihan aktif, proses pemulihan pasien dengan menggunakan peralatan bantu sederhana seperti perban atau kain.



Gambar 1.3 Rehabilitasi Cedera Tumit Secara Tradisional (Zhijiang Lu, 2015)

Rehabilitasi dini dan berkelanjutan seperti ini diharapkan dapat mengurangi efek samping maupun rawat inap pasien. Namun tidak semua pasien dapat menerima rehabilitasi tradisional dikarenakan terapis hanya bisa melayani satu pasien secara bergantian dimana prosesnya diulang terus menerus sehingga membutuhkan waktu yang lama. Efektifitas pelatihan juga sangat tergantung pada keahlian terapis (Chunbao Wang, 2015). Sementara itu, rehabilitasi tradisional tidak dapat menggabungkan pelatihan aktif dan pelatihan pasif secara efektif. Untuk alasan ini banyak perangkat rehabilitasi yang menggunakan robotika telah dikembangkan secara aktif di banyak negara dan lembaga penelitian (Yonezawa, 2014).

Salah satu alternatif yang bisa digunakan untuk mengatasi permasalahan yang telah disebutkan sebelumnya adalah penggunaan alat dengan mekanisme robot paralel 3-RPS yang mempunyai tiga derajat kebebasan. Robot ini tersusun atas *fix base* dan *moving platform* yang dihubungkan oleh tiga buah kaki dimana

masing-masing kakinya tersusun atas *revolute joint*, *prismatic joint*, dan *spherical joint*. Alat ini berfungsi untuk rehabilitasi tingkat awal yang bisa digunakan pada posisi duduk maupun berbaring. Penggunaan alat ini akan membantu proses pemulihan cedera pergelangan kaki sehingga proses rehabilitasi menjadi lebih efektif dan efisien. Selain itu kemudahan alat yang bisa dipakai dimana saja, *flexible*, *wearable* dan juga memungkinkan pasien untuk latihan secara berulang dan intensif tanpa pengawasan terapis.

Alat rehabilitasi tumit harus mampu menahan gaya dan momen eksternal dari kaki pasien. Gaya dan momen eksternal yang diberikan pada *platform* dapat menyebabkan defleksi berupa translasi dan rotasi pada *platform* tersebut. Besar dari defleksi ini tergantung pada besar kekakuan robot. Dalam melakukan perancangan alat rehabilitasi tumit, kekakuan menjadi salah satu faktor penting yang harus dipertimbangkan. Robot harus mempunyai kekakuan yang besar, karena jika gaya yang diberikan terlalu besar akan menyebabkan defleksi yang tidak dapat ditoleransi (Schilling, 2003). Dengan mengetahui sifat kekakuan robot, dapat diketahui kinerja dan desain yang optimal. Oleh karena itu, tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisa kesetimbangan statis dan distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kondisi kesetimbangan dari konfigurasi robot paralel 3-RPS berdasarkan gaya dan momen virtual pada mekanisme?
2. Bagaimana pengaruh parameter desain terhadap distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS sebagai alat rehabilitasi tumit?

1.3 Batasan Masalah Penelitian

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

1. Mekanisme yang digunakan dalam penelitian hanya membahas 3-RPS dengan derajat kebebasan adalah 3-DOF, yaitu berupa satu gerakan translasi dan dua gerakan rotasi.
2. Robot paralel 3-RPS merupakan alat rehabilitasi pasif.
3. Tidak membahas secara detail mengenai jenis gerakan dari mekanisme alat.
4. Massa tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.
5. Tidak membahas tentang sistem kontrol.
6. Jenis motor dan diameter *revolute joint* ditetapkan sebelumnya.
7. Tidak membahas pengaruh kekakuan dari material.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui kondisi kesetimbangan dari konfigurasi robot paralel 3-RPS berdasarkan gaya dan momen virtual pada mekanisme.
2. Mengetahui pengaruh parameter desain terhadap distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS sebagai alat rehabilitasi tumit.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberikan wawasan baru tentang teknologi robot khususnya mengenai robot paralel 3-RPS.
2. Memberikan inovasi baru sebagai alat rehabilitasi pada tumit.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan menjelaskan literatur-literatur yang digunakan pada penelitian ini. Materi yang akan dibahas adalah Derajat Kebebasan dan Jenis Gerakan, Posisi, Orientasi, dan Lokasi *Rigid Body*, Teori *Screw*, Analisa Jacobian Pada Robot Paralel, Analisa Statis, Analisa Kekakuan, Struktur dan Gerakan Pergelangan Kaki, dan Alat Rehabilitasi Tumit. Penjelasan lebih lanjut akan dijelaskan pada subbab di bawah ini.

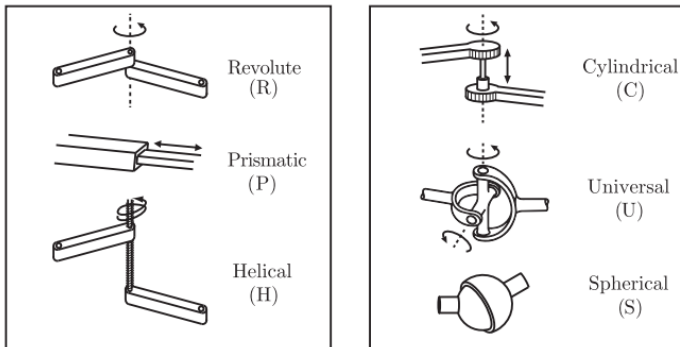
2.1 Derajat Kebebasan dan Jenis Gerakan

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

2.1.1. Links dan Joints

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

higher pair yang umum digunakan dalam mekanisme robot, diantaranya adalah:



Gambar 2.1 Bentuk dan Jenis-Jenis *Joint* (Park, 2017)

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

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

2.1.2. Derajat Kebebasan

Derajat kebebasan, atau biasa disebut dengan *degree of freedom* (DOF), merupakan banyaknya parameter atau input independen yang dibutuhkan untuk mendefinisikan suatu mekanisme secara utuh. Terdapat persamaan yang digunakan untuk menentukan jumlah DOF berdasarkan banyaknya *links*, *joints* dan tipe *joints* dari sebuah mekanisme. Persamaan tersebut adalah *Grübler Kutzbach Criterion* yang dapat dituliskan:

$$F = \lambda (n - j - 1) + \sum_i f_i \quad (2.1)$$

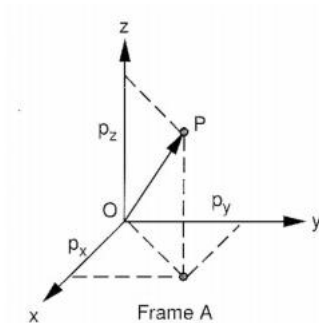
dimana:

- F : Jumlah DOF mekanisme
- f_i : Jumlah gerakan relatif *joint* i
- j : Jumlah *joint* dalam suatu mekanisme
- n : Jumlah *link* dalam suatu mekanisme
- λ : Jumlah DOF dalam ruang dimana mekanisme tersebut bekerja, nilai untuk mekanisme spatial $\lambda = 6$ dan untuk mekanisme planar dan *spherical* $\lambda = 3$

2.2 Posisi, Orientasi, dan Lokasi *Rigid Body*

Studi kinematika dalam mekanisme robot memerlukan tiga komponen, diantaranya adalah: posisi, lokasi dan orientasi dari sebuah objek. Lokasi objek dapat ditentukan apabila sistem koordinat referensi (*fixed frame*) dan sistem koordinat objek (*moving frame*) tersebut diketahui (Tsai, 1999). Sistem koordinat yang digunakan dalam penentuan lokasi umumnya menggunakan Sistem Koordinat Kartesian. Parameter yang dibutuhkan dalam penentuan lokasi pada ruang tiga dimensi adalah berjumlah enam, diantaranya sistem koordinat *fixed frame* (x , y dan z) dan sistem koordinat *moving frame* (u , v dan w). Posisi dari titik-titik suatu objek dapat dianalisa apabila lokasi objek terhadap sistem koordinat referensi dapat diketahui

Posisi dari titik objek terhadap referensi koordinat dapat dituliskan dalam bentuk vector 3×1 (*position vector*). Sebagai contoh, titik P dalam referensi koordinat A seperti yang tertera pada gambar 2.2. *Subskrip* x , y dan z merepresentasikan proyeksi vektor posisi dalam *axis* sistem koordinat referensi. Vektor posisi dapat ditulis sebagai berikut:

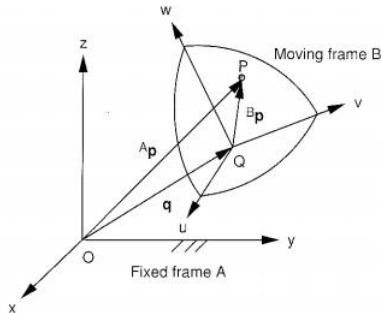


Gambar 2.2 Posisi Vektor Titik P Terhadap *Fixed Frame A* (Tsai, 1999)

$${}^A\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Lokasi dari sebuah objek yang ditinjau dapat ditentukan dari posisi koordinat dan orientasi *moving frame B* terhadap sistem koordinat referensi *fixed frame A*. Titik O merupakan titik pusat dari *fixed frame A*, sedangkan titik Q merupakan titik pusat *moving frame B*.

Sebagai contoh, posisi dari titik P dapat dituliskan dalam bentuk vektor \mathbf{p} terhadap *fixed frame A* menjadi ${}^A\mathbf{p} = \overrightarrow{OP}$. Hal ini juga berlaku untuk sistem koordinat *moving frame B* dalam bentuk vektor \mathbf{p} menjadi ${}^B\mathbf{p} = \overrightarrow{QP}$. Untuk menurunkan persamaan antara vektor ${}^A\mathbf{p}$ dan ${}^B\mathbf{p}$, maka dibentuk vektor \overrightarrow{OP} dari penjumlahan dua vektor tersebut:



Gambar 2.3 Lokasi Titik P Terhadap Sistem Koordinat *Fixed Frame* dan *Moving Frame* (Tsai, 1999)

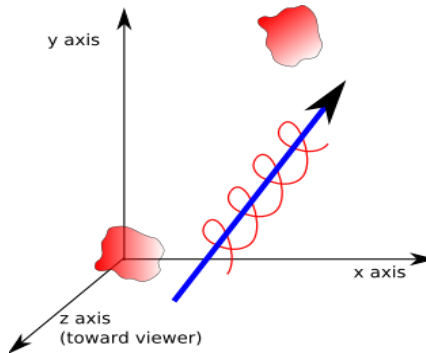
$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OQ} + \overrightarrow{QP}$$

$${}^A\mathbf{p} = {}^A R_B {}^B\mathbf{p} + {}^A\mathbf{q} \quad (2.3)$$

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

2.3 Teori Screw

Perpindahan dari sebuah benda *rigid* yang berada dalam ruang tiga dimensi baik secara *finite* maupun *infinite* dapat dianalisa menggunakan teori *screw* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. *Screw* mempunyai sumbu \$ dan gerakan *nut* yang bisa berupa translasi dan rotasi pada sumbu yang sama. Kombinasi gerakan translasi dan rotasi tersebut dapat disebut sebagai *screw displacement* sedangkan sumbu \$ disebut *screw axis* (Tsai, 1999).



Gambar 2.4 Perpindahan Sebuah Benda *Rigid* dari Titik Satu ke Titik Lainnya

2.3.1. Screw

Sebuah *screw* dapat dipresentasikan dengan sistem koordinat yang disebut dengan *screw coordinates* seperti pada gambar 2.5 dan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\hat{\$} = \begin{bmatrix} r \times s + \lambda s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

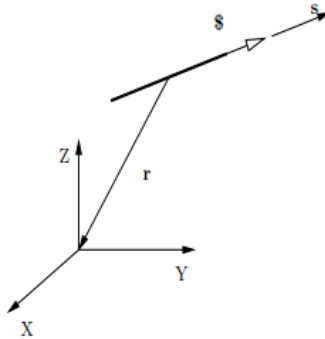
dimana:

s : unit vektor yang menunjukkan arah dari sumbu $\$$

r : posisi vektor yang diukur dari titik referensi x y z ke sembarang titik pada sumbu $\$$

λ : *pitch*, yaitu rasio dari rotasi dan translasi

$r \times s$: suatu vektor yang didefinisikan sebagai momen yang diukur dari sumbu $\$$ terhadap titik referensi x y z .



Gambar 2.5 *Screw Coordinates* (Kong, 2003)

Revolute joint mempunyai *pitch* ($\lambda = 0$) dan menyebabkan *joint* berputar pada titik sendiri sehingga tidak dapat bergerak secara translasi, melainkan hanya memungkinkan untuk bergerak secara rotasi. Sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{\$}_0 = \begin{bmatrix} s \\ s_0 \times s \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Prismatic joint mempunyai *pitch* ($\lambda = \infty$) dan menyebabkan *joint* hanya bisa bergerak secara translasi karena tidak mempunyai titik pasti dan hanya mempunyai arah. Sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{\$}_\infty = \begin{bmatrix} 0 \\ s \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Penulisan $\hat{\$}_0$ dan $\hat{\$}_\infty$ masing-masing dapat didefinisikan sebagai *zero pitch crew* dan *infinite pitch screw* (Tsai, 1999).

2.3.2. Sistem *Twist* dan *Wrench*

Twist berhubungan dengan kecepatan sudut dan kecepatan linier dari suatu benda *rigid* sedangkan *wrench* berhubungan dengan gaya dan momen yang bekerja pada benda *rigid*. Konsep *twist* adalah cara mudah untuk

menggambarkan perpindahan dari benda *rigid* yang berada di ruang tiga dimensi baik secara *finite* maupun *infinite*.

Sistem *twist* dari rantai paralel kinematik (PKC) adalah sebesar f -sistem dimana $f \leq F$ dan F menunjukkan jumlah derajat kebebasan dari rantai kinematik tersebut. (Kong, 2003). *Twist* dan *wrench* dari suatu *joint* dapat dinotasikan dengan simbol ξ dan ζ sedangkan \mathcal{T} dan \mathcal{W} digunakan untuk mempresentasikan sistem *twist* dan sistem *wrench*. Hampir sama dengan penulisan $\hat{\mathcal{S}}_0$ dan $\hat{\mathcal{S}}_\infty$, penulisan $\xi_0, \xi_\infty, \zeta_0, \zeta_\infty$ masing-masing didefinisikan sebagai *zero pitch twist*, *infinite pitch twist*, *zero pitch wrench*, dan *infinite pitch wrench*.

Pada robot paralel, sistem *wrench* dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\mathcal{W} = \sum_{i=1}^m \mathcal{W}^i \quad (2.7)$$

dimana:

\mathcal{W}^i adalah *wrench* pada kaki ke- i

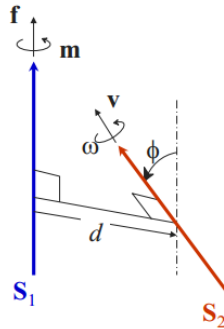
Sedangkan sistem *twist* dari rantai kinematik didapat dengan menggunakan persamaan:

$$\mathcal{T} = \{6 - \Sigma \mathcal{W}^i\} \quad (2.8)$$

dimana: \mathcal{T} adalah jumlah sistem *twist* yang mempresentasikan jumlah derajat kebebasan

2.3.3. Reciprocal Screw

Reciprocal adalah suatu kondisi jika sebuah *wrench* yang diterapkan pada sistem tidak akan mempengaruhi *twist* dari sistem tersebut sehingga tidak terjadi kerja diantara kedua sistem *screw* tersebut. Dua buah *screw* S_1 (*pitch* h_1) dan S_2 (*pitch* h_2) seperti yang dimodelkan pada gambar 2.6 dapat dikatakan *reciprocal* apabila: sebuah *wrench* yang diterapkan pada S_1 tidak akan mempengaruhi *twist* S_2 , sebuah *wrench* yang diterapkan pada S_2 tidak akan mempengaruhi *twist* S_1 dan kondisi *reciprocal* adalah murni secara geometris.



Gambar 2.6 Konsep *Reciprocal Screw*

Dua buah *screw* dapat dikatakan *reciprocal* apabila mengikuti syarat berikut:

1. Dua buah $\$_{\infty}$ akan selalu *reciprocal* satu sama lain.
2. Sebuah $\$_{\infty}$ *reciprocal* terhadap $\$_0$ jika dan hanya jika kedua sumbunya tegak lurus satu sama lain.
3. Dua buah $\$_0$ *reciprocal* satu sama lain jika dan hanya jika kedua sumbunya *coplanar* (sejajar atau berpotongan) (Kong, 2003).

2.3.4. *Twist dan Wrench pada Joint*

Terdapat beberapa *joint* yang umum digunakan dalam mekanisme robot yang terkait dengan *screw* dan *reciprocal screw*, sebagai berikut:

1. *Revolute Joint*

Twist pada *revolute joint* adalah 1-sistem yaitu *zero-pitch screw* ξ_0 yang arahnya sepanjang sumbu *joint*. Sedangkan *wrench* membentuk 5-sistem yang mengandung semua ζ_0 yang sumbunya berpotongan dengan sumbu *joint* dan semua ζ_{∞} yang sumbunya tegak lurus dengan sumbu *revolute*.

2. *Prismatic Joint*

Twist pada *prismatic joint* adalah 1-sistem yaitu *infinite-pitch screw* ξ_{∞} yang arahnya sepanjang sumbu *joint*.

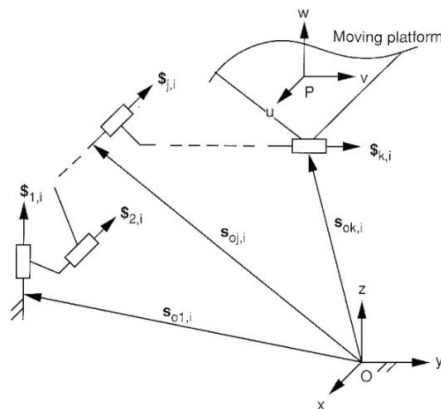
Sedangkan *wrench* membentuk 5-sistem yang mengandung semua ζ_o yang sumbuinya tegak lurus dengan sumbu *joint* dan semua ζ_∞ .

3. Spherical Joint

Twist pada *spherical joint* adalah 3-sistem yaitu *zero-pitch screw* ξ_o yang arahnya melewati pusat dari *joint* dan juga *wrench* yang membentuk 3-sistem yang melewati pusat dari *spherical joint* (Tsai, 1999).

2.4 Analisa Jacobian pada Robot Paralel

Jacobian didefinisikan sebagai sebuah matrik yang menghubungkan kecepatan input pada aktuator ke kecepatan output pada *moving platform*. Pada robot paralel biasanya terdiri dari beberapa kaki dimana setiap kaki terdiri dari beberapa *link* yang digabungkan dengan berbagai macam *joint*. Biasanya satu atau lebih *joint* pada tiap kaki dikendalikan oleh aktuator, sedangkan *joint* lainnya bersifat pasif. Pada gambar 2.7 menunjukkan beberapa *joint* yang saling terhubung pada sebuah rantai kinematik dimana *subskrip* pertama menunjukkan jumlah *joint* dan *subskrip* kedua menunjukkan jumlah kaki ke-*i* (Tsai, 1999).



Gambar 2.7 *Joint* pada Kaki ke-*i* Terhadap Sistem Koordinat *Fixed Frame* dan *Moving Platform* (Tsai, 1999)

Dengan demikian kecepatan tiap waktu dari *moving platform* ($\$p$) dapat digambarkan sebagai kombinasi linear dari ℓ putaran sesaat sesuai persamaan:

$$\$p = \sum_{j=1}^{\ell} \dot{q}_{j,i} \hat{\$}_{j,i} \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.9)$$

dimana

$\$p$: kecepatan *platform* tiap satuan waktu

$\dot{q}_{j,i}$: menunjukkan intensitas atau kecepatan aktuator

$\hat{\$}_{j,i}$ menunjukkan unit *screw* pada *joint* ke- j dan kaki ke- i

Persamaan tersebut mengandung beberapa *screw joint* yang tidak digerakkan dan dapat dihilangkan dengan menerapkan teori *reciprocal screw*. Dengan mengasumsikan bahwa *joint* yang digerakkan pada tiap kaki muncul pertama kali, misal g . Kemudian dengan mendefinisikan unit *screw* g , $\hat{\$}_{rj,i}$ dengan nilai $j=1, 2, \dots, g$ dimana setiap *unit screw* harus *reciprocal* terhadap semua *joint* yang tidak digerakkan pada kaki ke- i sehingga didapat sebuah vektor $\hat{\$}_{rg,i}$. Kedua buah sisi dari persamaan tersebut diatas dikalikan dengan vektor $\hat{\$}_{rg,i}$ dan kemudian menghasilkan g buah persamaan sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$J_{x,i} \$p = J_{q,i} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (2.10)$$

dimana:

$$J_{x,i} = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{r1,i}^T \\ \hat{\$}_{r2,i}^T \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\$}_{rg,i}^T \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$J_{q,i} = \begin{bmatrix} \hat{\$}_{r1,i}^T \hat{\$}_{1,i} & \hat{\$}_{r1,i}^T \hat{\$}_{2,i} & \dots & \hat{\$}_{r1,i}^T \hat{\$}_{g,i} \\ \hat{\$}_{r2,i}^T \hat{\$}_{1,i} & \hat{\$}_{r2,i}^T \hat{\$}_{2,i} & \dots & \hat{\$}_{r2,i}^T \hat{\$}_{g,i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\$}_{rg,i}^T \hat{\$}_{1,i} & \hat{\$}_{rg,i}^T \hat{\$}_{2,i} & \dots & \hat{\$}_{rg,i}^T \hat{\$}_{g,i} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\dot{q}_i = [\dot{q}_{1,i}, \dot{q}_{2,i}, \dots, \dot{q}_{g,i}]^T \quad (2.13)$$

2.5 Analisa Statis

Analisa statis dari robot paralel merupakan analisa yang dilakukan pada *platform* pada saat posisi dan orientasi tidak berubah. Hal ini didasarkan pada hukum Newton yang pertama:

$$\sum F = 0 \quad (2.14)$$

Dimana F merupakan gaya yang terjadi pada *platform*. *Platform* diharapkan stabil pada saat kondisi 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:

$$\sum M = 0 \quad (2.15)$$

Dimana 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.

Analisa gaya statis penting dalam menentukan kualitas transmisi gaya melalui berbagai *joints* dari sebuah mekanisme (J. Jesus C.S, 2012). Keseimbangan statis pada robot digambarkan sebagai keadaan dimana gaya maupun momen eksternal yang dilakukan oleh *platform* mampu diimbangi gaya maupun momen internal pada *joint*.

Pada robot paralel, Jacobian matrik dirumuskan sebagai berikut:

$$J\dot{x} = \dot{q} \quad (2.16)$$

dimana:

J adalah Jacobian matrik

$\dot{\mathbf{x}}$ mempresentasikan vektor kecepatan pada *platform*

$\dot{\mathbf{q}}$ mempresentasikan vektor kecepatan pada *actuated joint*

Analisa statis berhubungan dengan Jacobian matrik dan dapat ditulis menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (2.17)$$

\mathbf{F} merupakan vektor dari gaya dan momen output pada *platform*.

Vektor ini dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$\boldsymbol{\tau}$ merupakan vektor dari gaya atau torsi pada *actuated joint* pada kaki ke- i dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \tau_i \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.6 Analisa Kekakuan

Robot digunakan untuk melakukan tugas tertentu yang menyebabkan *platform* memberikan beberapa gaya dan momen. Gaya dan momen tersebut akan menyebabkan *platform* terdefleksi dari lokasi yang diinginkan. Jumlah defleksi adalah fungsi dari gaya yang diterapkan dan kekakuan robot. Dengan demikian kekakuan robot memiliki dampak langsung pada keakuratan posisi. Kekakuan suatu robot bergantung pada beberapa faktor, seperti ukuran dan material yang digunakan pada *links*, susunan *joint*, mekanisme transmisi mekanis, dan aktuator. Seiring dengan penggunaan *links* yang semakin lama semakin tipis, penyesuaian *links* menjadi sumber utama defleksi. Untuk robot paralel dapat

diasumsikan bahwa *links* yang digunakan benar-benar *rigid* (Tsai, 1999).

Dimisalkan vektor defleksi pada *actuated joint* sebagai $\Delta \mathbf{q} = [\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_i]^T$. Dua buah persamaan vektor $\Delta \mathbf{q}$ dan $\boldsymbol{\tau}$ dapat dihubungkan dengan sebuah matrik diagonal $i \times i$ sehingga persamaannya menjadi seperti berikut:

$$\boldsymbol{\tau} = \chi \Delta \mathbf{q} \quad (2.20)$$

dimana:

$$\chi = \text{diag}[k_1, k_2, \dots, k_i]$$

Persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam persamaan matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau}_1 \\ \boldsymbol{\tau}_2 \\ \cdot \\ \boldsymbol{\tau}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q}_1 \\ \Delta \mathbf{q}_2 \\ \cdot \\ \Delta \mathbf{q}_i \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Gaya output pada *platform* berhubungan dengan defleksinya oleh matrik kekakuan K . Matriks kekakuan merupakan matriks yang simetris dan bergantung konfigurasi robot paralel. Hubungan tersebut dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$\mathbf{F} = K \Delta \mathbf{x} \quad (2.22)$$

Dengan menggunakan persamaan Jacobian matrik robot paralel seperti pada persamaan (2.16) yaitu: $J\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{q}}$, persamaan tersebut dapat diturunkan menjadi:

$$J \frac{dx}{dt} = \frac{dq}{dt} \quad (2.23)$$

$$J \cdot dx \cdot dt = dq \cdot dt \quad (2.24)$$

$$J \cdot dx = dq \quad (2.25)$$

$$J \int_{x_0}^{x_i} dx = \int_{x_0}^{x_i} dq \quad (2.26)$$

$$J \cdot \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{q} \quad (2.27)$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa defleksi pada motor, yaitu $\Delta \mathbf{q}$ berhubungan dengan defleksi pada *platform* $\Delta \mathbf{x}$ oleh matrik Jacobian. $\Delta \mathbf{x}$ merupakan vektor dari defleksi pada *platform*. Vektor ini dinyatakan dalam persamaan matrik sebagai berikut:

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \phi \\ \Delta \theta \\ \Delta \psi \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Dengan melakukan substitusi pada dua persamaan diatas, yaitu (2.22) dan (2.20) ke persamaan (2.17) didapat sebuah persamaan baru, yaitu

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (2.29)$$

$$K \Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^T \chi \Delta \mathbf{q} \quad (2.30)$$

$$K \Delta \mathbf{x} = \mathbf{J}^T \chi \Delta \mathbf{x} \mathbf{J} \quad (2.31)$$

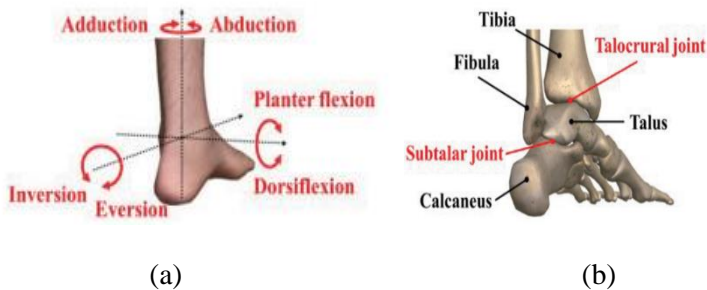
$$K = \mathbf{J}^T \chi \mathbf{J} \quad (2.32)$$

dimana:

K merupakan matriks kekakuan dari robot paralel

2.7 Struktur dan Gerakan Pergelangan Kaki

Sendi pada pergelangan kaki merupakan salah satu sendi paling kompleks dalam tubuh manusia dan memiliki pengaruh besar pada kemampuan berjalan manusia. Seperti pada gambar 2.9(a), sendi pergelangan kaki adalah gabungan beberapa tulang yang terdiri dari tibia, fibula, talus, dan kalkaneus dan gerakannya adalah gerakan kombinasi yang melibatkan sendi talocrural dan subtalar (Yonezawa, 2014).

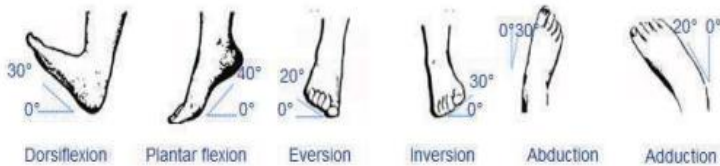


Gambar 2.8 (a) Struktur Sendi Pergelangan Kaki (b) Pergerakan Sendi Pergelangan Kaki (Yonezawa, 2014)

Pada dasarnya sendi pergelangan kaki mempunyai tiga derajat kebebasan yang bergerak dalam tiga arah rotasi yaitu *dorsiflexion* dan *planter flexion*, *inversion* dan *eversion*, *adduction* dan *abduction* (Zhijiang Lu, 2015). Seperti pada gambar 2.9(b), koordinat kartesian x, y, z diterapkan pada sendi pergelangan kaki dan mewakili tiga sumbu yang berputar.

1. Pada sumbu x, terjadi gerakan *dorsiflexion* dan *planterflexion*. *Dorsiflexion* atau *planterflexion* digunakan untuk menggambarkan gerakan rotasi yang terjadi pada bidang *sagittal*. Rentang gerakan *dorsiflexion* normal adalah 30° sedangkan rentang gerakan *plantarflexion* normal adalah 40° .
2. Pada sumbu y, terjadi gerakan *eversion* dan *inversion*. *Eversion* atau *inversion* mengacu pada gerakan kaki yang berputar mengelilingi sumbu *longitudinal* atau bidang *frontal*. Gerakan *eversion* terjadi apabila tepi kaki bagian luar diangkat dan tepi dalamnya diturunkan. Gerakan *inversion* terjadi apabila tepi kaki bagian dalam diangkat dan tepi luarnya diturunkan. Rentang gerakan *eversion* normal adalah 20° sedangkan rentang gerakan *inversion* normal adalah 30° .
3. Pada sumbu z, terjadi gerakan *abduction* dan *adduction*. *Abduction* atau *adduction* didefinisikan sebagai gerakan rotasi tulang talus pada bidang *tranverse*. Rentang gerakan *abduction*

normal adalah 30° sedangkan rentang gerakan *adduction* normal adalah 20° (Pengju Sui, 2009).



Gambar 2.9 Range Gerakan Sendi Pergelangan Kaki (Zhijiang Lu, 2015)

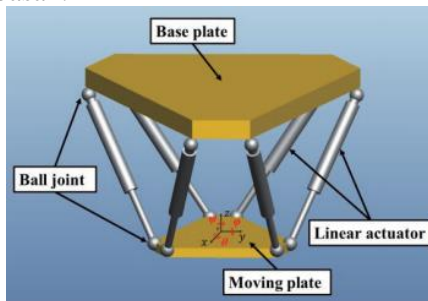
Kombinasi dari ketiga gerakan yang melintasi sendi talocrural dan subtalar menciptakan gerakan dengan tiga derajat kebebasan (3-DOF), sehingga gerakan pada tumit ini menunjukkan bahwa persyaratan desain untuk alat rehabilitasi tumit adalah minimal robot harus memiliki gerakan 3-DOF. *Ankle joint* tidak melakukan gerakan *spherical* karena kaki tidak dapat melakukan gerak inversi dan eversi sepenuhnya. Meskipun sambungan pada tumit memiliki titik pusat rotasi sendiri yang juga merupakan perpotongan dari tiga sumbu, kaki hanya dapat melakukan gerakan supinasi dan pronasi. Supinasi dan pronasi terdiri dari gerakan dalam tiga bidang (*frontal*, *sagittal*, dan *transverse*). Sebagai akibatnya, robot paralel harus mampu untuk melakukan gerakan tersebut yang bisa menjadi gerakan translasi dan rotasi (Nurahmi, 2017).

2.8 Alat Rehabilitasi Tumit

Dalam perkembangan dunia robotika, ada banyak penelitian yang fokus pada robot rehabilitasi tumit. Rehabilitasi dengan robot terbukti lebih efisien dibandingkan dengan metode tradisional (Chunbao Wang, 2015). Beberapa diantaranya telah diterapkan secara langsung untuk rehabilitasi di banyak negara. Berikut di bawah ini beberapa alat rehabilitasi tumit:

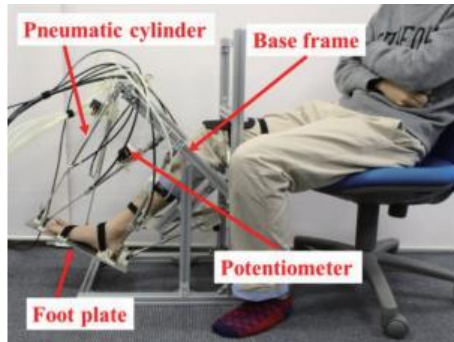
2.8.1. Robot PHARAD (*Parallel link type Human Ankle Rehabilitation*)

Robot PHARAD (*Parallel link type Human Ankle Rehabilitation*) seperti pada gambar 2.10 terdiri dari *moving plate* dan *base plate* yang dihubungkan dengan enam buah aktuator. Robot PHARAD tersusun dari 6-SPS yang masing-masing mewakili *spherical joint*, *prismatic joint*, dan *spherical joint* sehingga memungkinkan untuk bergerak dengan enam derajat kebebasan.



Gambar 2.10 Mekanisme Robot PHARAD (Yonezawa, 2014)

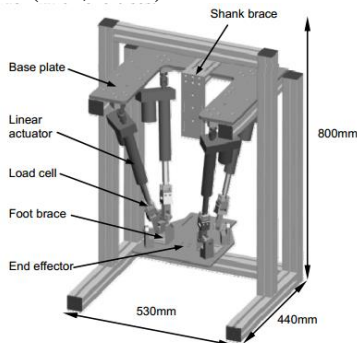
Robot ini dapat digunakan untuk hampir semua ukuran kaki sebagai pelatihan pasif. Selain itu, robot ini dilengkapi dengan sensor *displacement* pada masing-masing aktuator (silinder pneumatik) untuk mengukur gerakan pergelangan kaki secara akurat. Dengan meletakkan kaki pasien di atas *moving plate*, mekanisme robot ini dapat melakukan pengukuran dan rehabilitasi yang disesuaikan dengan gerakan pergerakan kaki yang kompleks seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Prototipe Robot PHARAD (Yonezawa, 2014)

2.8.2. Robot ICAR (*Impedance Control of Ankle Rehabilitation Robot*)

Mekanisme yang digunakan merupakan robot paralel dan terdiri dari empat buah actuator yang menghubungkan *fixed base* dengan *platform* seperti pada gambar 2.12. Mekanisme ini terdiri dari tiga-DOF berupa tiga gerakan rotasi. Robot ini dirancang untuk bisa menahan beban hingga 100Nm. Dengan mekanisme seperti ini, didapatkan nilai k untuk masing-masing *joint* sebesar $k_1 = 50, k_2 = 1, k_3 = 80000, k_4 = 600$. Hal ini sangat dihindari, karena gaya pada aktuator sebisa mungkin harus dikurangi untuk menjamin keamanan robot (Xie, 2008).



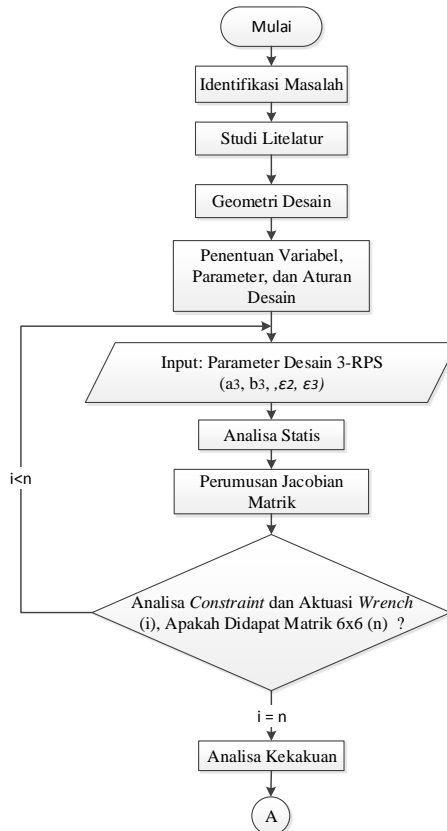
Gambar 2.12 Mekanisme Robot ICARR (Xie, 2008)

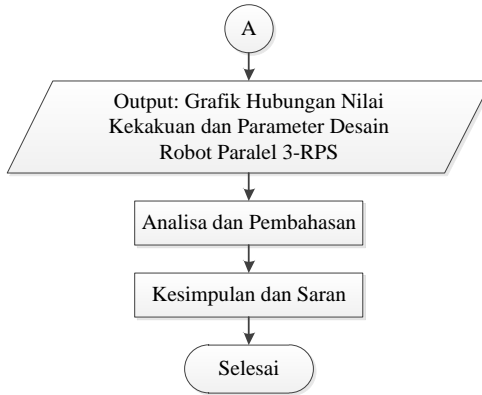
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai *flowchart* penelitian dan penjelasan lebih rinci mengenai *flowchart*. Penjelasan lebih lanjut akan dibahas pada subbab di bawah ini:

3.1 *Flowchart* Penelitian

Penelitian akan dilakukan sesuai dengan tahapan- tahapan seperti pada gambar 3.1 di bawah ini:



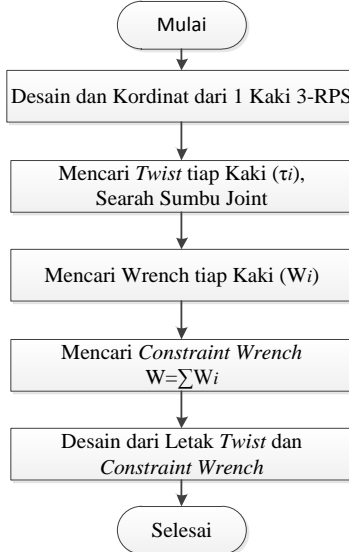


Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.1.1 *Flowchart* Perumusan Matrik Jacobian

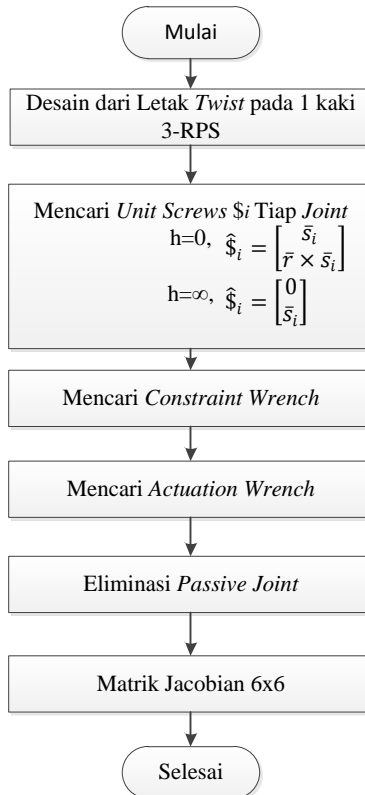
Proses mencari matrik Jacobian terdiri dari dua *flowchart* seperti berikut:

A. *Flowchart* Twist dan Constraint Wrench



Gambar 3.2 *Flowchart* Twist dan Constraint Wrench

B. Flowchart Jacobian Berdasarkan Screw



Gambar 3.3 Flowchart Jacobian Berdasarkan Screw

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, perumusan Jacobian matrik, analisa geometri robot paralel 3-RPS, analisa statis, dan analisa kekakuan. Untuk lebih lengkap, setiap proses akan dijelaskan di bawah ini:

3.2.1. Identifikasi Masalah

Pada tahap ini dilakukan identifikasi masalah yang diambil dari analisis alat bantu yang digunakan untuk rehabilitasi tumit. Hal ini dilakukan agar penulis mendapatkan spesifikasi khusus dari alat bantu tersebut. Hasil keluaran dari proses ini digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penentuan parameter desain robot paralel 3-RPS. Sebelum parameter desain robot paralel 3-RPS ditentukan, konsep robot paralel 3-RPS perlu untuk didalami terlebih dahulu pada proses studi literatur.

3.2.2. Studi Literatur

Studi literature yang dilakukan meliputi konsep analisa geometri, analisa kinematika, perumusan Jacobian matrik, alat rehabilitasi rumit yang telah dikembangkan saat ini, mekanisme dan konsep robot paralel 3-RPS, analisa statis, dan analisa kekakuan. Studi literature dilakukan dengan cara membaca jurnal, buku, dan penelitian terdahulu. Hasil keluaran yang diharapkan adalah pengetahuan yang cukup untuk melanjutkan penelitian

3.2.3. Analisa Geometri Robot Paralel 3-RPS

Analisa geometri diawali dengan membuat model mekanisme robot 3-RPS sesuai parameter mekanisme. Mekanisme yang dibuat terdiri dari tiga bagian, yaitu *base* dengan sistem koordinat *fixed frame*, *platform* dengan sistem koordinat *moving frame*, dan tiga buah kaki yang masing-masing yang tersusun dari 3 buah *joint*. Output dari proses ini adalah parameter desain dan variabel desain.

3.2.4. Penurunan Jacobian Matrik

Penurunan Jacobian matrik didapatkan melalui dua proses sebagai berikut:

A. *Twist dan Constraint Wrench*

Pada proses ini, desain dan koordinat dari satu kaki dilakukan untuk mendapatkan *twist* dan *wrench* pada masing-masing *joint* untuk tiap kaki. Penurunan *twist* dan *wrench* berdasarkan teori pada sub.bab 2.3.4. Hasil keluaran proses ini adalah mendapatkan jumlah dan letak dari *constraint wrench* pada mekanisme robot paralel 3-RPS.

B. *Jacobian Berdasarkan Screw*

Jumlah dan letak *constraint wrench* pada masing-masing kaki yang telah didapat sebelumnya digunakan untuk mencari unit vektor $\hat{\$}_i$ pada masing-masing *joint* dimana $i= 1, 2, 3, 4, 5$. Persamaan (2.5) digunakan untuk menentukan *unit vector* pada *revolute* dan *spherical joint* sedangkan persamaan (2.6) digunakan untuk menentukan *unit vektor* pada *prismatic joint*. Kecepatan tiap waktu dari *moving platform* ($\$_0$) didapat dengan menggunakan persamaan (2.9). Hasil keluaran proses ini adalah matrik Jacobian (6x6) yang menjadi input untuk proses analisa statis dan kekakuan

3.2.5. *Analisa Statis*

Analisa statis bertujuan untuk mengetahui kondisi kesetimbangan mekanisme robot paralel 3-RPS berdasarkan parameter dan variabel desain yang digunakan. Kondisi tersebut adalah ketika gaya maupun momen eksternal yang diberikan oleh *platform* dapat diimbangi oleh gaya maupun momen pada *actuated joint*.

3.2.6. *Analisa Kekakuan*

Analisa kekakuan dilakukan untuk mencari nilai matrik kekakuan K pada robot paralel 3-RPS. Analisa kekakuan dilakukan berulang pada matrik kekakuan dengan memvariasikan parameter desain yang digunakan dimana

parameter desain ini berhubungan dengan Jacobian matrik. Proses analisa ini menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB. Output dari proses ini adalah grafik yang mendefinisikan pengaruh parameter desain terhadap distribusi kekakuan.

3.2.7. Hasil Output yang Diinginkan

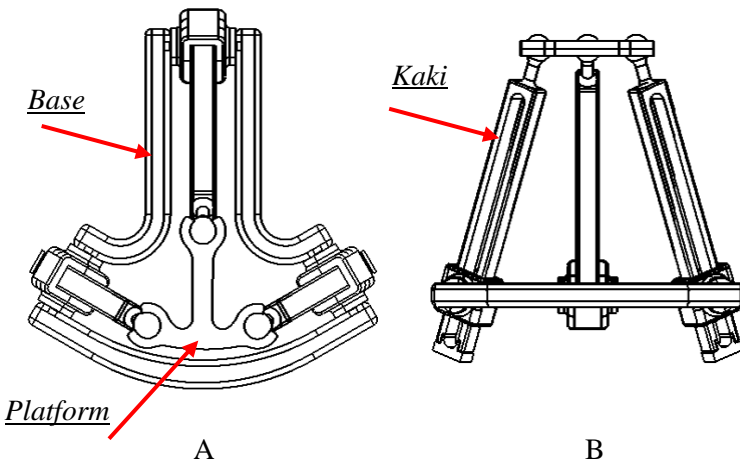
Output yang diinginkan adalah hubungan gaya dan momen maupun distribusi kekakuan terhadap parameter desain yang digunakan.

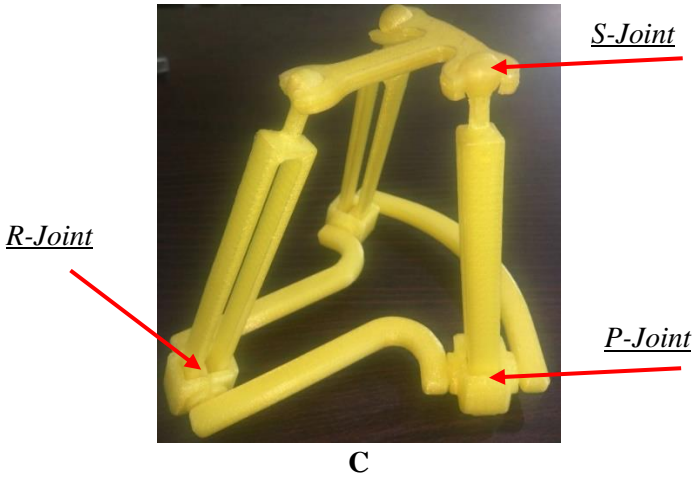
BAB IV PEMBAHASAN

Pada bab ini, pembahasan penelitian akan disampaikan. Penjelasan lebih lanjut akan dibahas pada subbab di bawah ini:

4.1. Geometri Robot Paralel 3-RPS

Analisa geometri merupakan tahapan pembuatan mekanisme berdasarkan parameter desain yang didapat dari data-data pada proses identifikasi masalah. Parameter desain disusun dengan mempertimbangkan kinematika, jenis gerakan, dan derajat kebebasan. Jenis gerakan yang dibutuhkan dalam proses desain disesuaikan dengan struktur sendi pergelangan kaki maupun gerakan pergerakan kaki, yaitu berupa satu translasi dan dua rotasi. Mekanisme yang dibuat adalah robot paralel 3-RPS seperti yang terlihat pada gambar 4.1 yang terdiri dari *fixed base*, *moving platform* dan tiga buah kaki yang menghubungkan *fixed base* dengan *platform*. Masing-masing kaki terdiri dari *prismatic joint*, *revolute joint*, dan *spherical joint*.





Gambar 4.1 Model Mekanisme 3-RPS (A). *Top*, (B). *Front*, (C). *3-RPS Mock-up*

Pada gambar 4.2 menjelaskan tentang geometri robot paralel 3-RPS. Titik O adalah titik pusat pada *fixed frame* (Σ_0) yang terletak di *base* dan terdiri dari sumbu x , y , dan z . Titik Q adalah titik pusat pada *moving frame* (Σ_1) yang terletak di *platform* dan terdiri dari sumbu u , v , dan w .

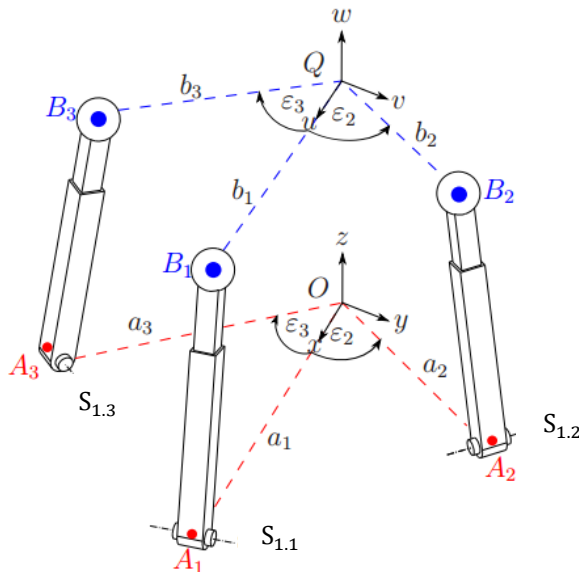
Titik A_i dapat berada di sembarang titik pada sumbu $z = 0$ dan bergantung pada parameter desain a_i dan ε_i dimana a_i adalah jarak antara titik A_i dan titik O . Titik A_1 diasumsikan berada pada sumbu x , maka nilai dari $\varepsilon_1 = 0^\circ$ sehingga koordinat dari titik A_i dan sumbu *revolute joint* $\mathbf{s}_{1,i}$ dapat ditulis sebagai berikut:

$$r_{A1}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r_{A2}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\varepsilon_2)a_2 \\ \sin(\varepsilon_2)a_2 \\ 0 \end{bmatrix}, r_{A3}^0 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\varepsilon_3)a_3 \\ \sin(\varepsilon_3)a_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{s}_{1,1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{s}_{1,2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\varepsilon_2) \\ \cos(\varepsilon_2) \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{s}_{1,3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\varepsilon_3) \\ \cos(\varepsilon_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Titik B_i dapat berada di sembarang titik pada sumbu $w = 0$ dan bergantung pada parameter desain b_i dan ε_i dimana b_i adalah jarak antara titik B_i dan titik Q . Titik B_1 diasumsikan berada pada sumbu u , maka nilai dari $\varepsilon_1 = 0^\circ$ sehingga koordinat dari titik B_i dapat ditulis sebagai berikut:

$$r_{B_1}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, r_{B_2}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\varepsilon_2)b_2 \\ \sin(\varepsilon_2)b_2 \\ 0 \end{bmatrix}, r_{B_3}^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(\varepsilon_3)b_3 \\ \sin(\varepsilon_3)b_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$



Gambar 4.2 Geometri Robot Paralel 3-RPS (Nurahmi, 2017)

Terdapat 8 buah parameter desain, yaitu $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ yang nilainya tidak diketahui. Parameter desain ini tidak saling bergantung satu sama lain dan berhubungan dengan aturan desain sebagai berikut:

$$a_1 = -a_3 \frac{\cos(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\cos(\varepsilon_2)}, a_2 = a_3 \frac{\cos(\varepsilon_3)}{\cos(\varepsilon_2)}$$

$$b_1 = -b_3 \frac{\cos(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\cos(\varepsilon_2)}, b_2 = b_3 \frac{\cos(\varepsilon_3)}{\cos(\varepsilon_2)}$$

$$\varepsilon_2 \neq \pm \frac{\pi}{2} \text{ atau } \varepsilon_2 \neq \pm \frac{3\pi}{2}$$

Dengan mengikuti aturan desain tersebut, jumlah parameter yang tidak diketahui berkurang menjadi empat buah, yaitu $a_3, b_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ (Nurahmi, 2017). Keempat parameter desain ini menjadi parameter desain yang digunakan dalam menganalisa kesetimbangan statis dan tingkat kekakuan pada robot paralel 3-RPS.

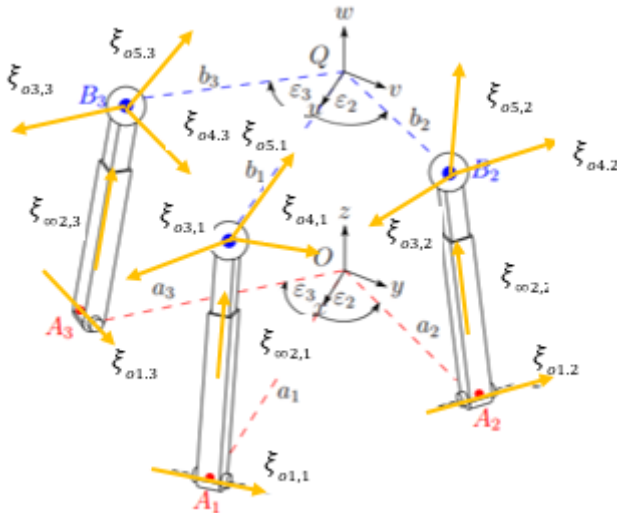
4.2. Analisis Kesetimbangan Statis

Analisa statis bertujuan untuk mengetahui kondisi kesetimbangan mekanisme robot paralel 3-RPS berdasarkan parameter dan variabel desain yang digunakan. Konsep *screw* digunakan untuk mencari *actuation* dan *constraint wrench* dimana *wrench* tersebut digunakan untuk penurunan Jacobian matrik. Jacobian matrik berhubungan dengan *actuation* dan *constraint wrench* dan berpengaruh pada kesetimbangan statis pada robot paralel 3-RPS.

4.2.1. Penurunan Jacobian Matrik

Pada penurunan Jacobian matrik dimulai dengan menentukan *twist* dan *wrench* pada satu kaki robot RPS. *Twist* berhubungan dengan kecepatan sudut dan kecepatan linier pada *joint* sedangkan *wrench* berhubungan dengan gaya dan momen yang bekerja pada *platform*. Dalam perumusan sistem *twist* dan

sistem *wrench* pada robot paralel 3-RPS dilakukan dengan memodelkan geometri terlebih dahulu seperti pada gambar 4.3. Kemudian dianalisa *twist* dari masing-masing *joint* tiap kaki dimana arah *twist* adalah sepanjang sumbu *joint*. Pada *joint* yang gerakannya berupa rotasi, *twist* berupa *zero-pitch screw* ξ_o , sedangkan pada *joint* yang gerakannya berupa translasi, *twist* berupa *infinite-pitch screw* ξ_∞ .



Gambar 4.3 *Twist* Setiap *Joint* pada Robot Paralel 3-RPS

Wrench pada satu kaki robot RPS dicari dengan menggunakan konsep *reciprocal screw*, yaitu ketika gaya dan momen *wrench* diterapkan pada masing-masing *twist* tidak akan mempengaruhi *twist* dari robot tersebut sehingga tidak terjadi kerja diantara kedua sistem *screw* tersebut. Berikut di bawah ini merupakan perincian sistem *twist* dan sistem *wrench* untuk masing-masing kaki pada robot paralel 3-RPS:

$$\begin{aligned} \textit{twist} \text{ pada kaki 1, } \tau_1 &= \{\xi_{01,1}, \xi_{\infty 2,1}, \xi_{03,1}, \xi_{04,1}, \xi_{05,1}\} \\ \textit{twist} \text{ pada kaki 2, } \tau_2 &= \{\xi_{01,2}, \xi_{\infty 2,2}, \xi_{03,2}, \xi_{04,2}, \xi_{05,2}\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{twist pada kaki 3, } \tau_3 &= \{\xi_{01,3}, \xi_{\infty 2,3}, \xi_{03,3}, \xi_{04,3}, \xi_{05,3}\} \\
 \text{wrench pada kaki 1, } W_1 &= \{\zeta_{04,1}\} \\
 \text{wrench pada kaki 2, } W_2 &= \{\zeta_{04,2}\} \\
 \text{wrench pada kaki 3, } W_3 &= \{\zeta_{04,3}\}
 \end{aligned}$$

Sistem *wrench* untuk keseluruhan mekanisme robot 3-RPS adalah jumlah dari *wrench* pada masing-masing kaki atau bisa ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_{i=1}^m W^i \\
 W &= \{\zeta_{04,1}, \zeta_{04,2}, \zeta_{04,3}\}
 \end{aligned}$$

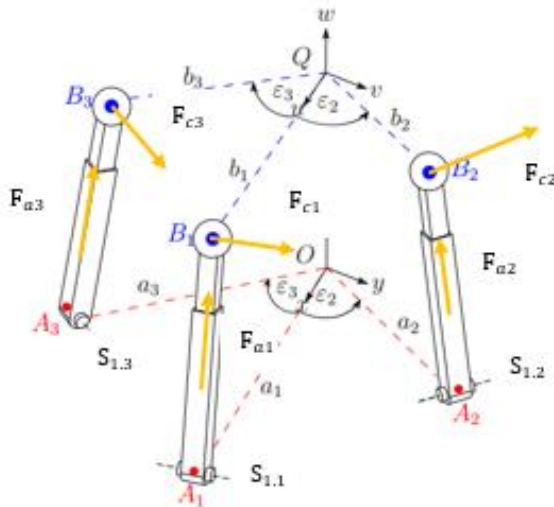
Sedangkan sistem *twist* hanya menunjukkan jumlah derajat kebebasan pada robot paralel 3-RPS atau bisa ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \tau &= \{6 - \Sigma W^i\} \\
 \tau &= \{6 - 3\} \\
 \tau &= 3 - \text{DOF}
 \end{aligned}$$

Letak dari *constraint wrench* adalah *reciprocal* terhadap semua *twist* yang ada pada satu kaki sedangkan letak dari *actuation wrench* adalah *reciprocal* terhadap semua *twist* kecuali *twist* pada *joint* yang diaktuasi dan arahnya harus tidak sama dengan arah *constraint wrench*. Letak *constraint wrench* dan *actuation wrench* dapat dilihat pada gambar 4.4.

Didapat *constraint* dan *actuation wrench* pada robot paralel 3-RPS untuk masing-masing adalah sebagai berikut:

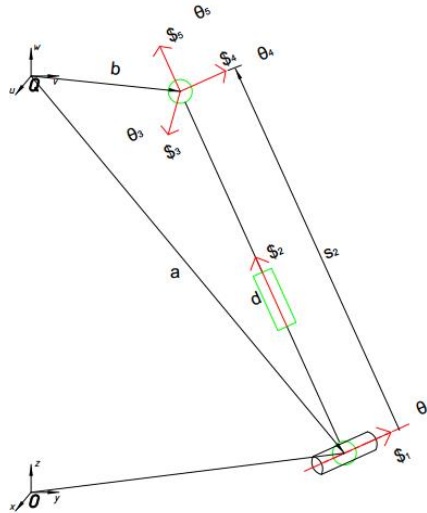
$$\begin{aligned}
 W_c &= \{F_{c1}, F_{c2}, F_{c3}\} \\
 W_a &= \{F_{a1}, F_{a2}, F_{a3}\}
 \end{aligned}$$



Gambar 4.4 Actuation dan Constraint Wrench pada Robot Paralel 3-RPS

Pada gambar 4.5 menggambarkan arah *unit screw* pada satu kaki robot RPS, dimana *revolute joint* disimbolkan dengan *unit screw* $\hat{\$}_1$, *prismatic joint* disimbolkan dengan *unit screw* $\hat{\$}_2$ dan *spherical joint* disimbolkan dengan tiga buah *unit screw* yang saling berpotongan yaitu $\hat{\$}_3$, $\hat{\$}_4$, dan $\hat{\$}_5$. Dua buah koordinat kartesian yaitu $Q(u, v, w)$ dan $O(x, y, z)$ masing-masing ditambahkan pada *moving platform* dan *fixed base*.

Ada lima buah *unit screws* yang terdapat pada satu kaki robot RPS. *Unit screw* $\hat{\$}_2$ adalah satu-satunya *joint* yang diaktiasi, sedangkan 4 buah *unit screw* lainnya bersifat pasif atau tidak diaktiasi.



Gambar 4.5 Unit Screw pada Satu Kaki RPS

Pada *joint* yang diaktuasi adalah berupa *involute pitch screw* sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{\$}_{\infty} = \begin{bmatrix} 0 \\ s \end{bmatrix}$$

Sedangkan pada *joint* pasif adalah berupa *zero pitch screw* sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{\$}_0 = \begin{bmatrix} s \\ r \times s \end{bmatrix}$$

Berikut di bawah ini merupakan perincian *unit screw* untuk masing-masing *joint* pada satu kaki robot paralel 3-RPS:

$$\text{Unit screw 1, } \hat{\$}_{1,i} = \begin{bmatrix} \bar{s}_{1,i} \\ r_a^1 \times \bar{s}_{1,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw 2, } \hat{\$}_{2,i} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{s}_{2,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw 3, } \hat{\$}_{3,i} = \begin{bmatrix} \bar{s}_{3,i} \\ r_b^1 \times \bar{s}_{3,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw 4, } \hat{\$}_{4,i} = \begin{bmatrix} \bar{s}_{4,i} \\ r_b^1 \times \bar{s}_{4,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw 5, } \hat{\$}_{5,i} = \begin{bmatrix} \bar{s}_{5,i} \\ r_b^1 \times \bar{s}_{5,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw constraint wrench reciprocal, } \hat{\$}_{rc} = \begin{bmatrix} r_b^1 \times \bar{s}_{1,i} \\ \bar{s}_{1,i} \end{bmatrix}$$

$$\text{Unit screw actuation wrench reciprocal, } \hat{\$}_{ra} = \begin{bmatrix} r_b^1 \times \bar{s}_{2,i} \\ \bar{s}_{2,i} \end{bmatrix}$$

Matrik Jacobian 6x6 didapatkan dengan cara melakukan eliminasi pada *passive joint* yaitu dengan *dot product* pada *unit screw actuation wrench reciprocal* $\hat{\$}_{ra}$ dan *unit screw constraint wrench reciprocal* menggunakan persamaan berikut:

$$\$_Q = \sum_{j=1}^l \dot{q}_{j,i} \hat{\$}_{j,i} \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\hat{\$}_Q = \dot{\theta}_{1,i} \hat{\$}_{1,i} + \dot{d}_i \hat{\$}_{2,i} + \dot{\theta}_{3,i} \hat{\$}_{3,i} + \dot{\theta}_{4,i} \hat{\$}_{4,i} + \dot{\theta}_{5,i} \hat{\$}_{5,i}$$

$$\hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_Q = \dot{\theta}_{1,i} \hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_{1,i} + \dot{d}_i \hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_{2,i} + \dot{\theta}_{3,i} \hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_{3,i} \\ + \dot{\theta}_{4,i} \hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_{4,i} + \dot{\theta}_{5,i} \hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_{5,i}$$

$$\hat{\$}_{ra}^T \hat{\$}_Q = \dot{d}_i \cdot 1$$

$$\hat{\$}_{ra} \cdot \hat{\$}_{rc}^T \hat{\$}_Q = \dot{d}_i \cdot 1 \cdot \hat{\$}_{rc}$$

$$J_{6 \times 6} \cdot \$_Q = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapat perumusan Jacobian matrik sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} (r_{b1}^1 \times \bar{s}_{2,1})^T & \bar{s}_{2,1}^T \\ (r_{b2}^1 \times \bar{s}_{2,2})^T & \bar{s}_{2,2}^T \\ (r_{b3}^1 \times \bar{s}_{2,3})^T & \bar{s}_{2,3}^T \\ (r_{b1}^1 \times \bar{s}_{1,1})^T & \bar{s}_{1,1}^T \\ (r_{b2}^1 \times \bar{s}_{1,2})^T & \bar{s}_{1,2}^T \\ (r_{b3}^1 \times \bar{s}_{1,3})^T & \bar{s}_{1,3}^T \end{bmatrix}_{6 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{d}_1 \\ \dot{d}_2 \\ \dot{d}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Persamaan Jacobian matrik tersebut diatas digunakan untuk menganalisa kekakuan maupun statis dengan mengubah parameter desain yang digunakan dalam penelitian ini.

4.3. Matrik Kekakuan Robot Paralel 3-RPS

Matrik jacobian 6×6 yang didapat sebelumnya merupakan kombinasi dari dua buah matrik 3×6 yaitu *actuation jacobian matrik* dan *constraint jacobian matrix* sehingga dapat juga ditulis sebagai berikut:

$$J = \begin{bmatrix} J_a \\ J_c \end{bmatrix}_{6 \times 6}$$

Setelah matrik jacobian diketahui, maka langkah selanjutnya adalah merumuskan matrik kekakuan robot paralel 3-RPS dimana dipengaruhi juga oleh nilai dari χ seperti pada persamaan (2.32):

$$K = J^T \chi J$$

$$\chi = \begin{bmatrix} k_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{a3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{c3} \end{bmatrix}$$

Dimana K adalah matrik kekakuan 6×6 yang menghubungkan antara *wrench* yang diterapkan pada *platform* dengan defleksi pada *platform*. Matrik kekakuan tersebut dapat diuraikan menjadi dua bagian. Bagian pertama $K_a = J_a^T \chi_a J_a$ berhubungan dengan kekakuan pada aktuator dan bagian kedua $K_c = J_c^T \chi_c J_c$ berhubungan dengan kekakuan pada *constraint* dimana $\chi_a = \text{diag}[k_{a1}, k_{a2}, k_{a3}]$ dan $\chi_c = \text{diag}[k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}]$.

4.3.1. Kekakuan Aktuasi

Pada robot paralel 3-RPS joint yang diaktuator untuk masing-masing kaki adalah *prismatic joint*. Torsi dari aktuator (τ_i) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \chi_a \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \Delta q_2 \end{bmatrix}$$

dimana

$$\chi_a = \begin{bmatrix} k_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{a3} \end{bmatrix}$$

χ_a menyatakan matrik kekakuan aktuasi diagonal 3×3 dan $k_{a,i}$ menunjukkan nilai kekakuan pada aktuator yang digunakan. Nilai k_a didapat dari nilai kekakuan pada motor yang digunakan untuk menggerakkan tiga kaki robot paralel 3-RPS. Motor yang digunakan untuk masing-masing kaki adalah sama yaitu jenis *lead screw* motor dengan diameter 20(mm). Spesifikasi motor yang digunakan dapat dilihat pada table 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Data Spesifikasi *Motor Lead Screw*

Dimensi	
Nominal Diameter Size	20 mm
Lead	5 mm
Nut Type	FL
Ball Screw and Nut Assembly	7832838

Performance Data	
Dynamic Load Capacity	11.5 kN
Static Load Capacity	15.5 kN
Minimum Stiffness	0.3 $kN/\mu m$
Screw Specifications	
Major Diameter	19.6 mm
Minor Diameter	16.7 mm
Max. Length	4000 mm
Screw Weight	2.0 kg/m

Pada jenis motor ini mempunyai nilai kekakuan sebesar 0.3 ($kN/\mu m$). Selanjutnya dengan mengkonversikan satuan nilai menjadi berikut:

$$k_a = 0.3 \left(\frac{kN}{\mu m} \right) \times \left[\frac{1000N}{1kN} \times \frac{1000\mu m}{1mm} \right]$$

$$k_a = 300000(N/mm)$$

Setelah nilai kekakuan diketahui, kemudian dimasukkan ke dalam matrik aktuasi χ_a sebagai berikut:

$$\chi_a = \begin{bmatrix} 300000 & 0 & 0 \\ 0 & 300000 & 0 \\ 0 & 0 & 300000 \end{bmatrix}$$

4.3.2. Kekakuan *Constraint*

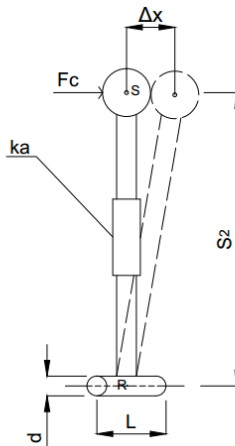
Kekakuan *constraint* bergantung pada susunan robot paralel 3-RPS maupun gaya *constraint* yang bekerja pada robot tersebut. Terdapat tiga buah gaya *constraint* yaitu F_{c1} , F_{c2} , F_{c3} yang terletak pada masing-masing kaki dan arahnya adalah sejajar dengan sumbu *revolute joint*. Gaya *constraint* tersebut dapat menyebabkan defleksi pada robot dan bergantung pada nilai kekakuan k_c . Kekakuan akibat *constraint* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} F_{c1} \\ F_{c2} \\ F_{c3} \end{bmatrix} = \chi_c \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}$$

dimana

$$\chi_c = \begin{bmatrix} k_{c1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{c3} \end{bmatrix}$$

χ_c menyatakan matrik kekakuan constraint diagonal 3×3 dan $k_{c,i}$ menunjukkan nilai kekakuan akibat gaya constraint. Nilai k_c pada robot paralel 3-RPS dapat dicari dengan mengetahui gaya-gaya yang bekerja. Gambar 4.6 menjelaskan tentang FBD pada satu kaki:



Gambar 4.6 FBD pada Satu Kaki

Desain dari susunan kaki 3-RPS tersebut sebelumnya ditentukan dimensi yang sudah disesuaikan, yaitu panjang revolute joint sebesar 28.4 [mm] dengan diameter 15 [mm]. Berikut penjelasan untuk masing-masing gaya yang mempengaruhi nilai kekakuan k_c :

1. Kekakuan akibat gaya F_c

Pada gambar FBD di atas, gaya F_c terletak memotong titik pusat *spherical joint* dan sejajar dengan sumbu *revolute joint* sehingga terjadi gaya tekan pada kaki robot. Gaya tersebut

menyebabkan adanya gaya reaksi pada *revolute joint*. Hal ini juga menyebabkan adanya defleksi pada kaki robot paralel 3-RPS. Defleksi tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta x_i = \frac{L}{EA} F_{ci}$$

Dimana: $k_c = \frac{EA}{L}$, L mempresentasikan panjang *revolute joint*, A mempresentasikan luas penampang *revolute joint* yang tegak lurus dengan gaya *constraint*, E mempresentasikan nilai modulus Young dari material yang digunakan. Pada robot paralel 3-RPS menggunakan material plastik jenis PLA (*Polylatic Acid*) dengan spesifikasi material seperti pada table 4.2 di bawah:

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Material PLA

Material Property	PLA (Polylatic Acid)
Tensile Strength	59 Mpa
Elongation at break	7 %
Density	1.21-1.3 g/cm^3
Young Modulus	3500 Mpa

Material PLA mempunyai nilai modulus Young (E) sebesar 3500 Mpa. Dengan mengetahui nilai tersebut dari maka nilai k_c dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$k_{c,I} = \frac{EA}{L}$$

$$k_{c,I} = \frac{E \cdot \pi d^2}{L \cdot 4}$$

$$k_{c,I} = \frac{3500[N/mm^2] \cdot \pi (15[mm])^2}{28.4 [mm] \cdot 4}$$

$$k_{c,I} = 21778[N/mm]$$

2. Kekakuan akibat bending

Gaya *constraint* yang bekerja pada kaki robot paralel 3-RPS juga menyebabkan bending. Kekakuan akibat bending dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$k_{c,II} = \frac{EI}{L^3}$$

dimana I mempresentasikan momen inersia pada penampang *revolute joint* yang berbentuk lingkaran, $I = \frac{\pi(d)^4}{64}$. Persamaan tersebut menjadi sebagai berikut:

$$k_{c,II} = \frac{E \cdot \pi(d)^4}{64 \cdot L^3}$$

$$k_{c,II} = \frac{3500[N/mm^2] \cdot \pi(15[mm])^4}{64 \cdot (28.4[mm])^3}$$

$$k_{c,II} = 379.7 [N/mm]$$

Nilai k_c secara keseluruhan adalah penjumlahan dari kekakuan akibat gaya *constraint* F_c dan kekakuan akibat bending, sehingga diperoleh nilai k_c sebagai berikut:

$$k_c = k_{c,I} + k_{c,II}$$

$$k_c = 21778.21[N/mm] + 379.7[N/mm]$$

$$k_c = 22158 [N/mm]$$

Setelah nilai k_c diketahui, kemudian dimasukkan ke dalam matrik *constraint* χ_c sebagai berikut:

$$\chi_c = \begin{bmatrix} 22158 & 0 & 0 \\ 0 & 22158 & 0 \\ 0 & 0 & 22158 \end{bmatrix}$$

4.4. Pemodelan Kekakuan Robot Paralel 3-RPS

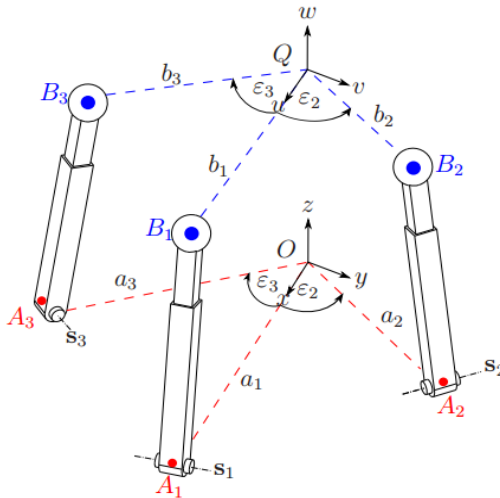
Pada penelitian ini terdapat empat parameter desain yang tidak diketahui seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya yaitu $a_3, b_3, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Nilai dari keempat parameter desain ini dapat

berubah satu sama lain, oleh karena itu salah satu parameter ditetapkan yaitu $a_3 = 100$ [mm]. Sedangkan untuk ketiga parameter desain lainnya divariasikan. Nilai b_3 diasumsikan lebih kecil dari nilai a_3 dan bernilai positif.

Robot paralel 3-RPS mempunyai 3-DOF yaitu berupa satu gerakan translasi dan dua gerakan rotasi. Gerakan translasi platform ke arah sumbu z dibatasi sebesar 100 [mm]. Sedangkan gerakan rotasi ϕ mempunyai *range* nilai $[-180^\circ, 180^\circ]$ dan gerakan rotasi θ mempunyai *range* nilai $[0, 180^\circ]$. Rincian parameter desain yang divariasikan dapat dilihat pada table di bawah 4.3 di bawah ini:

Tabel 4.3 Parameter Desain yang Divariasikan

Parameter	b_3 (mm)	ε_2	ε_3
Min	25	0	-90°
Max	100	90°	0



Gambar 4.7 Geometri Robot Paralel 3-RPS

Variasi parameter tersebut akan menyebabkan terbentuknya beberapa desain pada robot paralel 3-RPS seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 dengan tingkat kekakuan yang berbeda-beda. Parameter desain divariasikan menggunakan bantuan perangkat lunak ‘MATLAB’ dan dilakukan *looping* sebanyak 5 kali. Variasi parameter tersebut menyebabkan perubahan nilai pada matrik kekakuan total, sehingga akan didapat beberapa matrik kekakuan dengan nilai kekakuan yang bervariasi.

Distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS dapat dievaluasi menggunakan *eigenvalue* (λ) dari matrik kekakuan total. Dalam hal ini, kekakuan tersebut dibatasi oleh nilai eigen minimum dan nilai eigen maksimum. Eigen maksimum (λ_{max}) mempresentasikan nilai kekakuan maksimum sedangkan eigen minimum (λ_{min}) mempresentasikan nilai kekakuan minimum yang dimiliki oleh struktur robot. Pada satu matrik kekakuan 6×6 , terdapat enam buah nilai eigen yaitu:

$$\lambda = [\lambda_x \lambda_y \lambda_z \lambda_{\theta x} \lambda_{\theta y} \lambda_{\theta z}]^T$$

Dimana masing-masing *eigenvalue* mempresentasikan nilai kekakuan robot dalam menahan *wrench* eksternal yang diberikan pada platform.

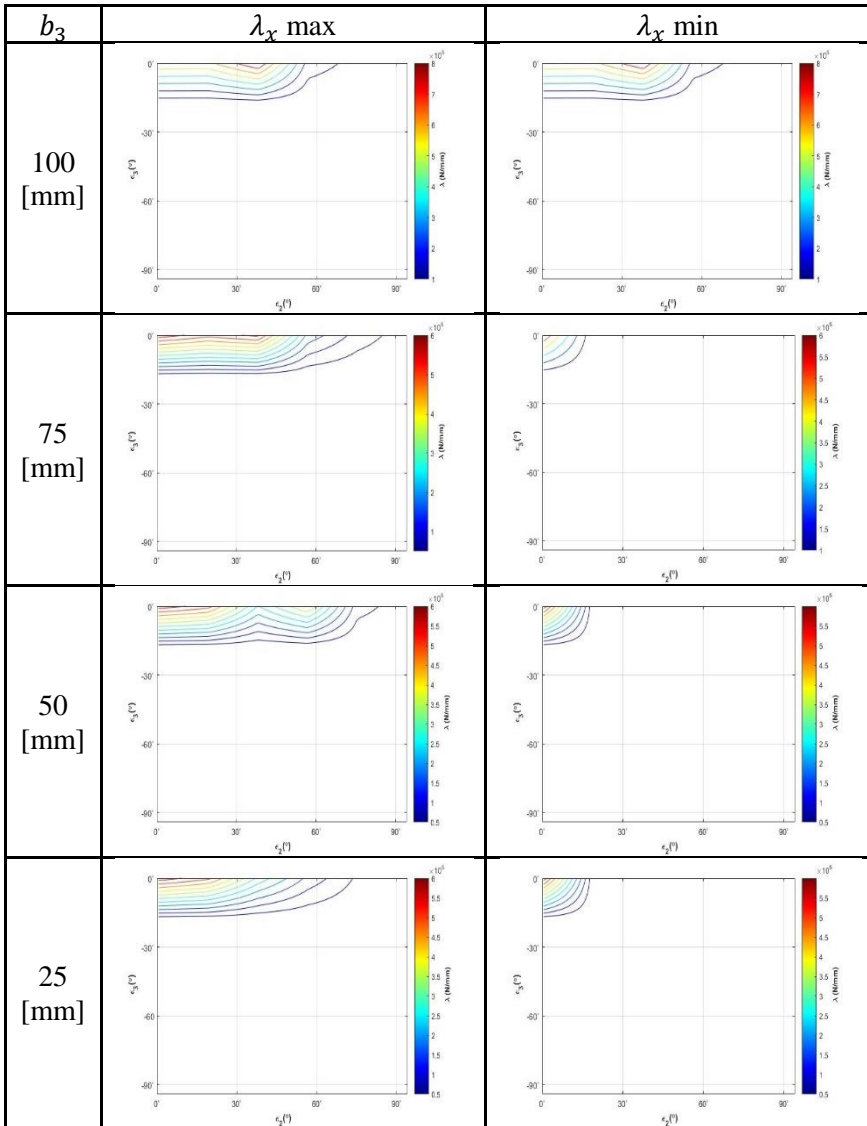
Eigenvalues didapat dengan memvariasikan gerakan rotasi keseluruhan terlebih dahulu. Sehingga untuk satu desain dengan gerakan rotasi $\phi = [-180^\circ, 180^\circ]$ dan gerakan rotasi $\theta = [0, 180^\circ]$ akan didapat 25 buah matrik 6×1 yang menunjukkan nilai λ . Dari jumlah keseluruhan matrik 6×1 tersebut kemudian diidentifikasi untuk masing-masing nilai $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \lambda_{\theta x}, \lambda_{\theta y}, \lambda_{\theta z}$ ke dalam sebuah matrik baru sehingga didapat enam buah matrik, yaitu matrik λ_x , matrik λ_y , matrik λ_z , matrik $\lambda_{\theta x}$, matrik $\lambda_{\theta y}$, dan matrik $\lambda_{\theta z}$. Selanjutnya dengan memvariasikan nilai ε_2 dan ε_3 pada nilai b_3 yang tetap, yaitu 25 mm, 50 mm, 75 mm, atau 100 mm maka akan didapat nilai λ untuk masing-masing matrik baru sebanyak 625 buah. Dari jumlah

keseluruhan nilai λ tersebut kemudian diambil nilai λ_{max} dan nilai λ_{min} yang masing-masing mempresentasikan nilai kekakuan maksimal dan nilai kekakuan minimal robot dalam menahan *wrench* yang diterapkan pada *platform*. Dalam melakukan plot grafik menggunakan nilai λ_{max} dan nilai λ_{min} dan akan dibahas di subbab selanjutnya.

4.5. Distribusi Kekakuan Robot Paralel 3-RPS

Distribusi kekakuan robot paralel 3-RPS akan dibahas sesuai grafik yang didapat dari hasil variasi parameter yang dilakukan. Grafik tersebut berupa grafik kartesian dengan sumbu x mewakili nilai ε_2 sedangkan sumbu y mewakili nilai ε_3 . Garis-garis berwarna pada grafik mempresentasikan distribusi kekakuan yang nilainya dapat dilihat dengan cara membandingkan warna pada garis dengan keterangan warna yang terdapat di grafik. Nilai λ mempunyai satuan [N/mm], sedangkan besar nilai *wrench* bergantung pada nilai λ yang didapat. Untuk mendapatkan kesetimbangan statis, *wrench* yang diterapkan harus sama atau tidak lebih besar dari nilai λ minimal. Berikut di bawah ini adalah pembahasan masing-masing grafik pada kekakuan total robot paralel 3-RPS.

Pada tabel 4.4. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya translasi ke arah x pada nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dengan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Kekakuan terbesar ditunjukkan dengan nilai λ terbesar. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.4 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu x

Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa λ_{xmax} terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan ε_2 antara 30° sampai 40° dengan *eigenvalues* sekitar $7.5 \times 10^5 N/mm$. Semakin kecil nilai ε_3 menyebabkan penurunan pada nilai kekakuan maksimal. Terlihat juga bahwa λ_{xmin} terbesar mempresentasikan nilai kekakuan minimal yaitu ketika pada kondisi desain ε_2 maupun ε_3 sekitar 0° dengan *eigenvalues* sekitar $5.5 \times 10^5 N/mm$. Hal ini menunjukkan bahwa kaki kedua dan kaki ketiga robot tidak seharusnya didesain berhimpitan dengan kaki pertama. Seiring dengan bertambahnya nilai ε_2 maupun penurunan nilai ε_2 akan menyebabkan penurunan pada nilai λ_{min} .

Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa λ_{xmax} terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada posisi ε_2 antara 0° sampai 45° dengan *eigenvalues* sekitar $5.7 \times 10^5 N/mm$. Distribusi kekakuan mengalami penurunan saat posisi ε_3 mengalami penurunan nilai dari -5° hingga seterusnya menjauhi posisi kaki pertama. Terlihat juga bahwa λ_{xmin} terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 dan nilai ε_3 sekitar 0° dengan *eigenvalues* sekitar $5.5 \times 10^5 N/mm$.

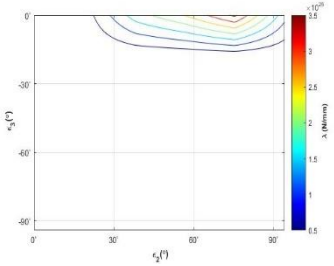
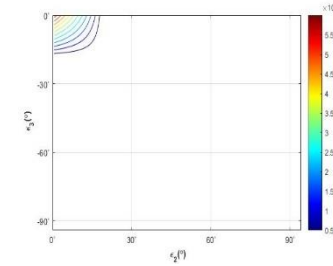
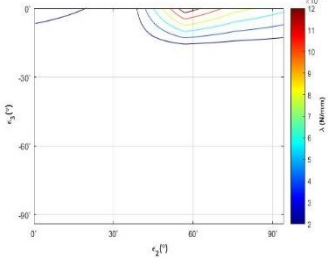
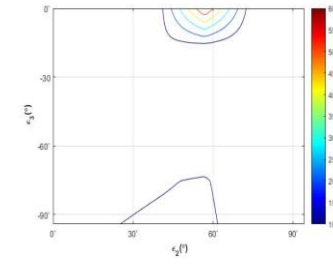
Pada saat nilai $b_3 = 50$, λ_{xmax} terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 0° sampai 20° dengan *eigenvalues* sekitar $5.6 \times 10^5 N/mm$. Selanjutnya distribusi kekakuan mengalami penurunan *eigenvalues* pada saat ε_2 mengalami kenaikan antara 20° sampai 90° . Sama halnya pada saat penurunan nilai ε_3 dari rentang nilai -5° hingga seterusnya menjauhi kaki pertama. Sedangkan λ_{xmin} terbesar terjadi pada saat kondisi desain ε_2 maupun ε_3 sekitar 0° atau dekat dengan kaki pertama dimana *eigenvalues* sekitar $5.4 \times 10^5 N/mm$.

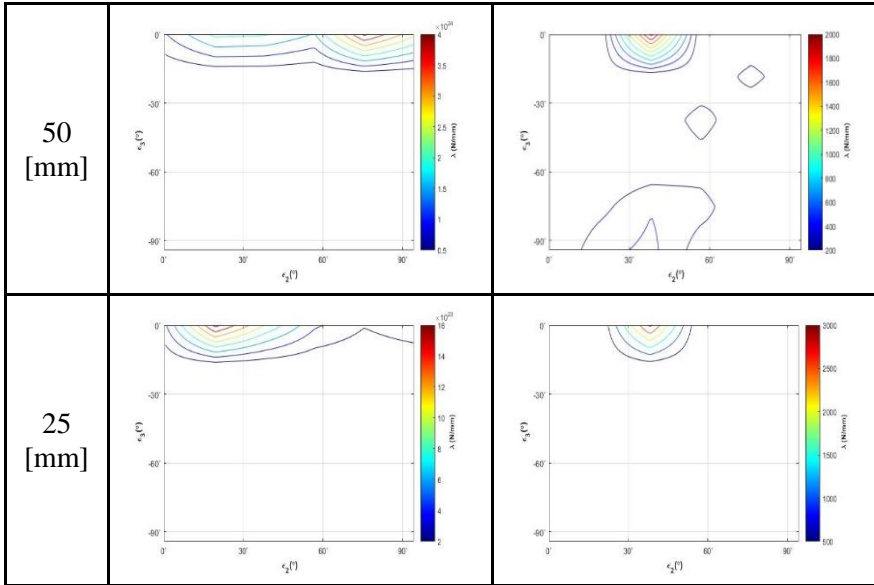
Pada saat nilai $b_3 = 25$, terlihat bahwa λ_{xmax} terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 0° sampai 5° dengan *eigenvalues* sekitar $5.5 \times 10^5 N/mm$. Untuk distribusi kekakuan juga tidak terlalu jauh kondisi pada saat $b_3 = 50$. Terlihat juga bahwa λ_{xmin} terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_3 dan ε_2 sekitar 0° dengan *eigenvalues* sekitar 5×10^5 .

Berdasarkan hasil tersebut, didapatkan distribusi kekakuan yang relative sama antar satu dengan lainnya atau dapat dikatakan variasi parameter b_3 tidak terlalu berpengaruh besar terhadap distribusi kekakuan terhadap letak posisi ε_3 dan ε_2 . Semakin besar nilai b_3 maka semakin besar *eigenvalues*. Pada saat ukuran *platform* sama dengan ukuran *base* atau dalam kata lain nilai $b_3=100$, posisi kaki kedua tidak diperbolehkan kurang dari 30° terhadap kaki pertama demi mendapatkan kekakuan robot yang maksimal dalam menahan gaya translasi dari arah x.

Pada tabel 4.5. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya translasi ke arah sumbu y pada nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dengan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.5 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu y

b_3	λ_y max	λ_y min
100 [mm]		
75 [mm]		



Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa $\lambda_{y_{max}}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada posisi ε_3 sekitar -10° dan ε_2 antara 70° sampai 80° dengan *eigenvalues* sekitar $3 \times 10^{25} \text{ N/mm}$. Penurunan nilai ε_3 dari -5° menjauhi kaki pertama akan menyebabkan penurunan pada distribusi nilai kekakuan maksimal sedangkan kenaikan nilai ε_2 pada saat nilai ε_3 yang tetap tidak akan mempengaruhi nilai kekakuan. Terlihat juga bahwa $\lambda_{y_{min}}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan minimal yaitu ketika posisi ε_2 sekitar 5° dan ε_3 sekitar -5° dengan *eigenvalues* sekitar $5.5 \times 10^5 \text{ N/mm}$.

Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa $\lambda_{y_{max}}$ terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada posisi ε_2 antara 50° sampai 70° dengan *eigenvalues* sekitar $11 \times 10^{24} \text{ N/mm}$. Distribusi kekakuan mengalami penurunan pada saat penurunan nilai ε_3 dari -10° menjauhi posisi kaki pertama, sedangkan kenaikan nilai ε_2 tidak berpengaruh besar pada

distribusi kekakuan. Terlihat juga bahwa λ_{ymin} terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 sekitar 50° dan nilai ε_3 sekitar 0° sampai 10° dengan *eigenvalues* sekitar $5500 N/mm$. Pada posisi ε_3 sekitar -80° sampai -90° dengan posisi ε_2 dimanapun akan mempunyai kekakuan yang sangat rendah. Hal ini menunjukkan bahwa posisi kaki ketiga tidak seharusnya didesain jauh dari kaki pertama.

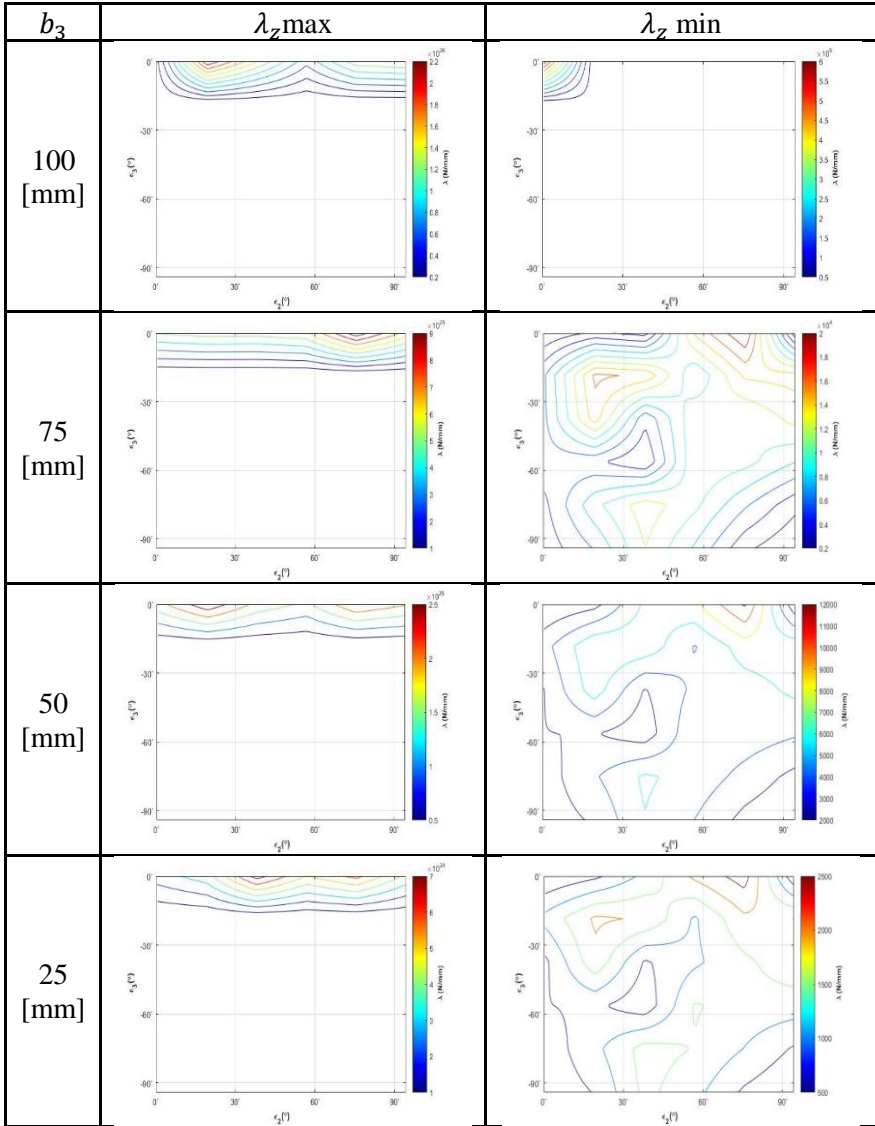
Pada saat nilai $b_3 = 50$, λ_{ymax} terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan posisi ε_2 antara 70° sampai 80° dengan *eigenvalues* sekitar $3.7 \times 10^{24} N/mm$. Selanjutnya distribusi kekakuan mengalami penurunan pada saat nilai ε_3 mengalami penurunan. Terlihat juga bahwa λ_{ymin} terbesar berapa pada kondisi desain ε_2 sekitar 40° dan ε_3 sekitar 0° sampai -10° dengan *eigenvalues* sekitar $1900 N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 25$, terlihat bahwa λ_{ymax} terbesar berada pada saat posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 20° dengan *eigenvalues* sekitar $15 \times 10^{23} N/mm$. Distribusi kekakuan dari rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 60° terlihat cenderung mengalami kenaikan pada saat posisi ε_3 mendekati 0° . Distribusi kekakuan sangat rendah pada saat posisi ε_2 lebih besar dari 60° . Terlihat juga bahwa λ_{ymin} terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 sekitar 40° dan ε_3 sekitar 0° sampai -10° dengan *eigenvalues* sekitar $2500 N/mm$.

Berdasarkan hasil tersebut, semakin besar nilai b_3 maka *eigenvalues* semakin besar yang menunjukkan kekakuan semakin besar. Selain itu juga posisi kaki ketiga semakin jauh dari posisi kaki pertama untuk mendapatkan kekakuan yang maksimum dalam menahan gaya translasi ke arah sumbu y.

Pada tabel 4.6. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya translasi ke arah sumbu z pada nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dengan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.6 Distribusi Kekakuan Menahan Translasi Arah Sumbu z



Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa λ_{zmax} terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 20° dengan *eigenvalues* sekitar $2.1 \times 10^{26} N/mm$. Pada saat nilai ε_2 sekitar 60° , menunjukkan distribusi kekakuan paling rendah. Penurunan nilai ε_3 juga menyebabkan distribusi kekakuan menurun. Terlihat juga bahwa λ_{zmin} terbesar mempresentasikan nilai kekakuan minimal yaitu ketika pada kondisi desain ε_2 dan ε_3 sekitar 5° dan sekitar -5° dengan nilai *eigenvalues* $5.5 \times 10^5 N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa λ_{zmax} terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada posisi ε_2 sekitar 75° dengan *eigenvalues* sekitar $8.5 \times 10^{25} N/mm$. Distribusi kekakuan terlihat merata pada rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 90° dengan posisi ε_2 yang tetap. Terlihat juga bahwa λ_{zmin} terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 antara 60° sampai 80° dan nilai ε_3 sekitar 0° sampai -15° dengan *eigenvalues* sekitar $1.8 \times 10^4 N/mm$. Terlihat juga distribusi kekakuan dengan nilai kekakuan yang cukup tinggi yaitu pada saat posisi ε_2 sekitar 15° dan posisi ε_3 sekitar -20° dengan *eigenvalues* sekitar $1.6 \times 10^4 N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 50$, λ_{zmax} terbesar yaitu pada saat berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 25° dengan nilai eigen sekitar $2.4 \times 10^{25} N/mm$. Pada posisi ε_2 antara 70° sampai 90° dengan nilai ε_3 yang sama juga memperlihatkan distribusi kekakuan yang masih cukup tinggi yaitu sekitar $2.3 \times 10^{25} N/mm$. Selanjutnya distribusi kekakuan mengalami penurunan nilai pada saat ε_3 mengalami penurunan nilai. Terlihat juga bahwa λ_{zmin} terbesar yaitu berapa pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -20° dan juga pada pada kondisi desain ε_2 sekitar 70° sampai 80° dengan *eigenvalues* sekitar $10000 N/mm$. Distribusi kekakuan mempunyai tingkat yang sangat rendah pada saat posisi ε_2 dan ε_3 masing-masing lebih dari 30° .

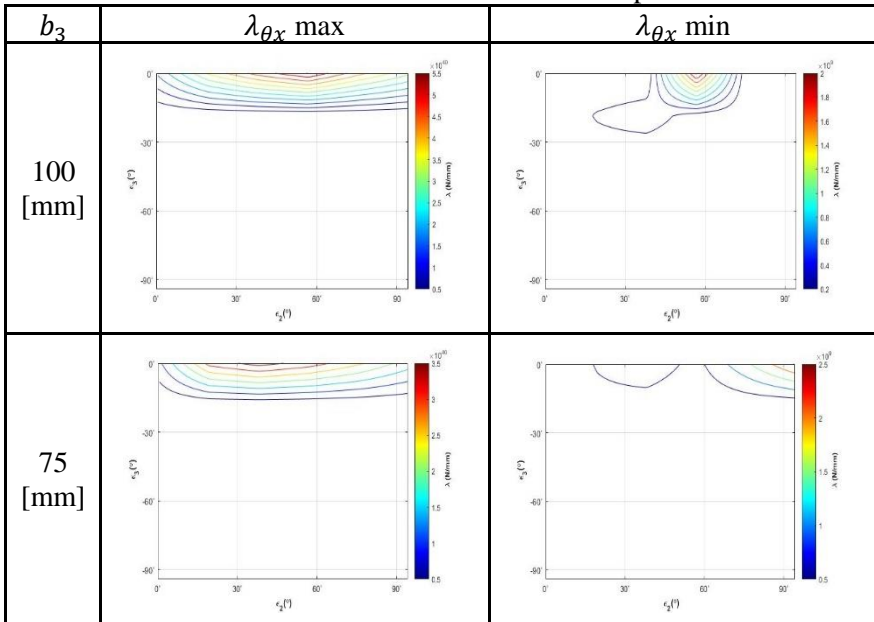
Pada saat nilai $b_3 = 25$, λ_{zmax} terbesar yaitu pada saat berada pada kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 35° dengan *eigenvalues* sekitar $6.5 \times 10^{24} N/mm$. Terlihat juga

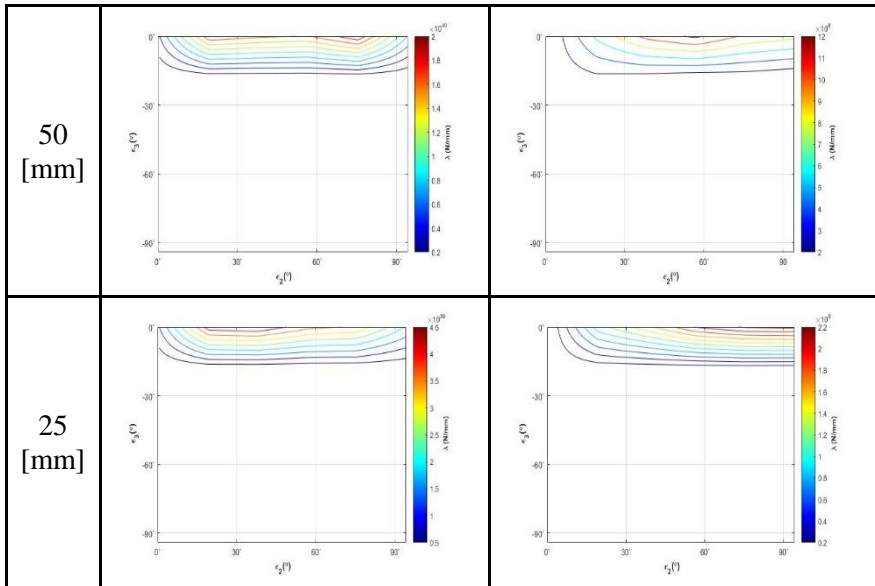
bahwa λ_{zmin} terbesar yaitu berapa pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai 20° dan pada kondisi desain ε_3 sekitar 75° dengan *eigenvalues* sekitar 2400 N/mm .

Berdasarkan hasil tersebut, didapatkan distribusi kekakuan yang berbeda-beda antar satu dengan lainnya yang mempengaruhi posisi dari kaki kedua dan ketiga. Semakin besar nilai b_3 maka semakin besar *eigenvalues*. Distribusi kekakuan akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai ε_2 maupun berkurangnya nilai ε_3 .

Pada tabel 4.7. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya rotasi pada sumbu x pada nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dengan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.7 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu x





Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta xmax}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan ε_2 antara 50° sampai 70° dengan *eigenvalues* sekitar $5.3 \times 10^{40} \text{ N/mm}$. Distribusi kekakuan pada rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 90° dengan nilai ε_3 yang tetap terlihat merata. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta xmin}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan minimal yaitu ketika pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 55° dengan *eigenvalues* sekitar $1.9 \times 10^9 \text{ N/mm}$.

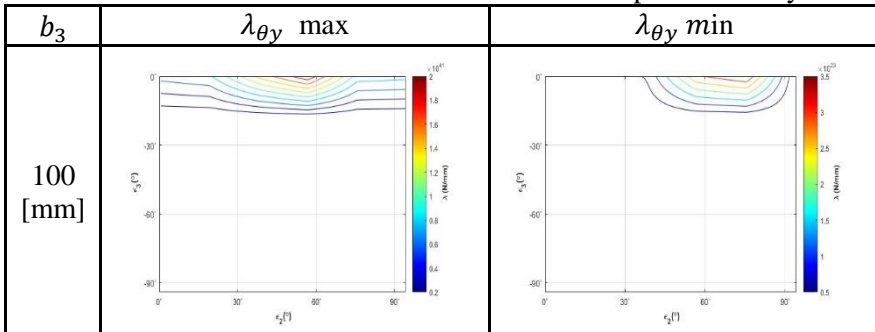
Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta xmax}$ terbesar berada pada kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada kondisi ε_2 sekitar 20° sampai 60° dengan *eigenvalues* sekitar $3.4 \times 10^{40} \text{ N/mm}$. Distribusi kekakuan tidak berbeda jauh dengan kondisi sebelumnya. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta xmin}$ terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 sekitar 80° sampai 90° dan nilai ε_3 sekitar 0° sampai -10° dengan *eigenvalues* sekitar $2 \times 10^9 \text{ N/mm}$.

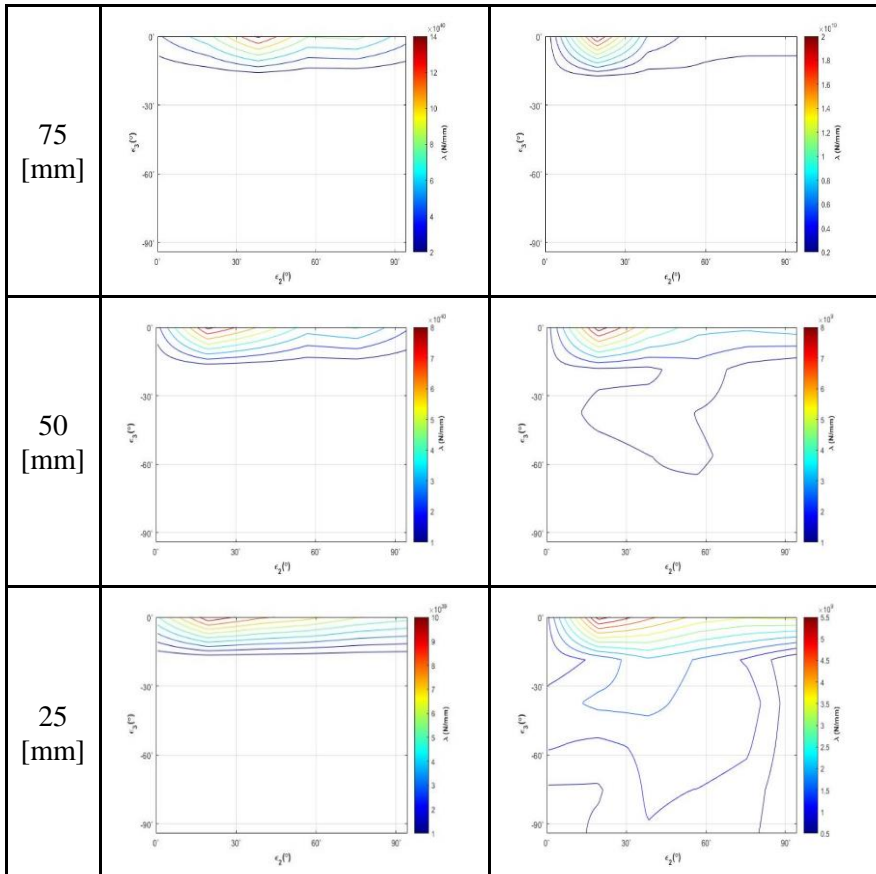
Pada saat nilai $b_3 = 50$, $\lambda_{\theta x max}$ terbesar pada posisi ε_3 antara 0° sampai -15° dan ε_2 antara 15° sampai 75° . Pada kondisi ini mempunyai distribusi kekakuan yang hampir merata dengan *eigenvalues* sekitar $1.9 \times 10^{40} N/mm$. Hal ini menunjukkan bahwa *range* posisi kaki kedua yang terletak pada ε_2 antara 15° sampai 75° mempunyai tingkat kekakuan yang tinggi. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta x min}$ terbesar berada pada kondisi desain ε_2 sekitar 40° sampai 70° dan kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dengan *eigenvalues* sekitar $11 \times 10^8 N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 25$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta x max}$ terbesar berada pada saat kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 15° sampai 40° dengan *eigenvalues* sekitar $4.4 \times 10^{39} N/mm$. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta x min}$ terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_2 sekitar 50° sampai 90° dan ε_3 sekitar 0° sampai -10° dengan *eigenvalues* sekitar $2.1 \times 10^8 N/mm$.

Pada tabel 4.8. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya rotasi pada sumbu y dengan nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.8 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu y





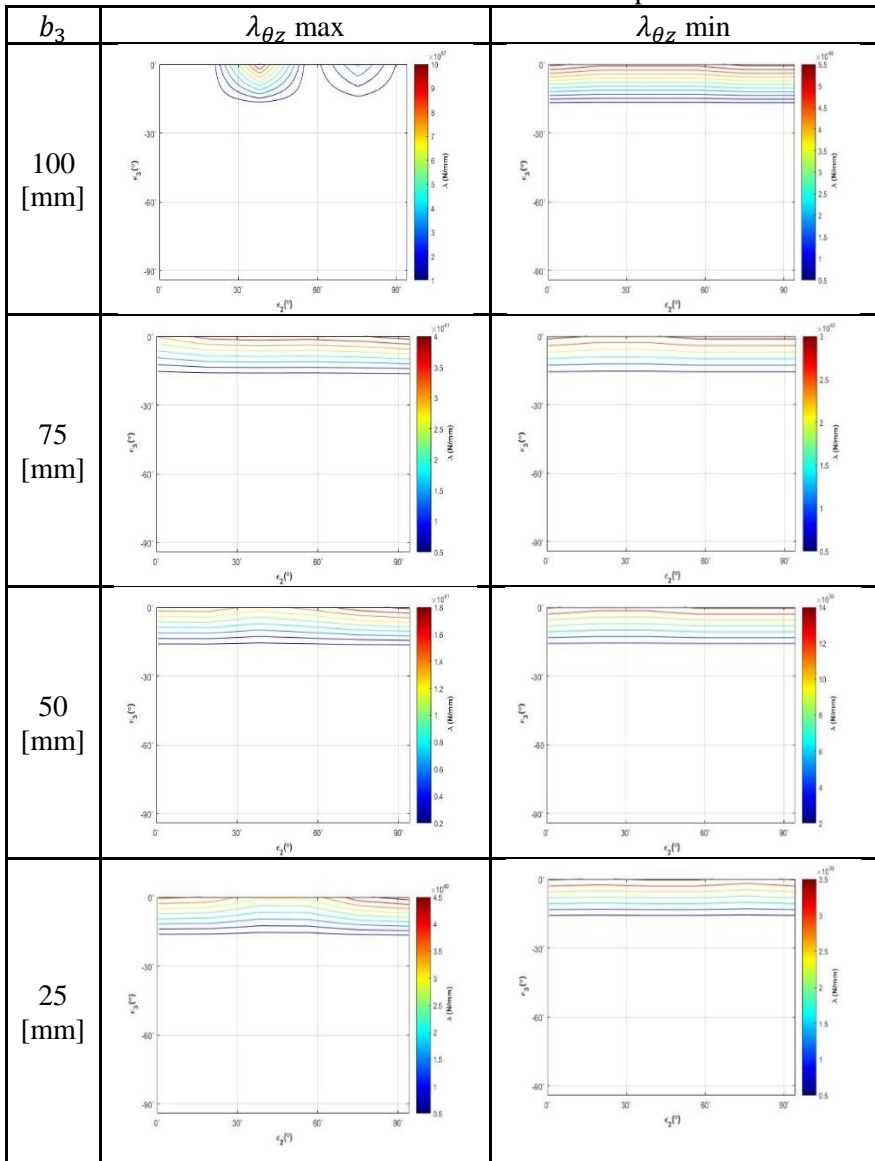
Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta y max}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada kondisi desain ε_3 sekitar -10° dan ε_2 sekitar 50° dengan *eigenvalues* sekitar $1.9 \times 10^{41} N/mm$. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta y min}$ mempunyai nilai terbesar yaitu ketika pada kondisi desain ε_2 antara 60° sampai 80° dan pada kondisi ε_3 sekitar -10° dengan *eigenvalues* sekitar $3.4 \times 10^{23} N/mm$. Penurunan nilai ε_3 akan menyebabkan distribusi kekakuan menurun.

Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta y max}$ terbesar berada pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan pada saat posisi ε_2 sekitar 40° dengan *eigenvalues* sekitar $13 \times 10^{40} N/mm$. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta y min}$ mempunyai nilai terbesar yaitu ketika pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan pada kondisi ε_2 sekitar 10° sampai 20° dengan *eigenvalues* sekitar $1.9 \times 10^{10} N/mm$. Seiring dengan bertambahnya nilai ε_2 maupun penurunan nilai ε_3 akan menyebabkan penurunan pada nilai $\lambda_{\theta y min}$.

Pada saat nilai $b_3 = 50$, $\lambda_{\theta y max}$ terbesar berada pada kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 15° sampai 20° dengan *eigenvalues* sekitar $7.7 \times 10^{40} N/mm$. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta y min}$ terbesar berada pada kondisi desain ε_3 sekitar -10° dan ε_2 sekitar 20° dengan *eigenvalues* sekitar $7.5 \times 10^9 N/mm$. Distribusi kekakuan mempunyai nilai yang paling rendah pada saat ε_3 mengalami penurunan nilai menjauhi posisi kaki pertama.

Pada saat nilai $b_3 = 25$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta y max}$ terbesar berada pada saat kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 15° sampai 25° dengan *eigenvalues* sekitar $9 \times 10^{39} N/mm$. Distribusi kekakuan dari rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 90° terlihat cenderung merata pada saat nilai ε_3 tetap. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta y min}$ terbesar berada pada kondisi desain dengan nilai ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 20° dengan *eigenvalues* sekitar $5.4 \times 10^9 N/mm$.

Pada tabel 4.9. menunjukkan distribusi kekakuan maksimum dan kekakuan minimum robot dalam menerima gaya rotasi pada sumbu z dengan nilai $b_3 = 25, 50, 75, 100$ dan nilai ε_2 dan ε_3 yang divariasikan. Berikut penjelasan untuk masing-masing grafik dengan nilai b_3 yang berbeda-beda:

Tabel 4.9 Distribusi Kekakuan Menahan Rotasi pada Sumbu z

Pada saat nilai $b_3 = 100$, terlihat bahwa $\lambda_{\theta zmax}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan maksimal yaitu terjadi pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan ε_2 sekitar 40° dengan *eigenvalues* sekitar $9.5 \times 10^{57} N/mm$. Terlihat pada grafik $\lambda_{\theta zmin}$ bahwa distribusi kekakuan tidak merata melainkan terpusat pada satu kondisi desain dan bergantung pada nilai ε_3 . Nilai $\lambda_{\theta zmin}$ terbesar mempresentasikan nilai kekakuan minimal yaitu ketika pada kondisi desain ε_2 dari rentang nilai 0° sampai 90° dan pada kondisi ε_3 sekitar 0° sampai -10° . Hal ini menunjukkan bahwa dimanapun posisi kaki kedua tidak akan berpengaruh pada nilai kekakuan minimal dalam menahan gaya rotasi pada sumbu z. Nilai *eigenvalues* terbesar sekitar $5.3 \times 10^{40} N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 75$, terlihat bahwa distribusi kekakuan pada $\lambda_{\theta zmax}$ merata pada rentang nilai ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada rentang nilai ε_2 antara 15° sampai 90° dengan *eigenvalues* sekitar $3.8 \times 10^{41} N/mm$. Semakin bertambahnya nilai ε_2 maupun penurunan nilai ε_3 akan menyebabkan distribusi kekakuan mengalami penurunan. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta zmin}$ terbesar berada pada kondisi desain dengan rentang nilai ε_3 sekitar 0° sampai -5° dan pada rentang nilai ε_2 sekitar 0° sampai 90° dengan *eigenvalues* sekitar $2.9 \times 10^{40} N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 50$, terlihat bahwa distribusi kekakuan pada $\lambda_{\theta zmax}$ cukup merata dengan nilai terbesar berada pada kondisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan ε_2 antara 70° sampai 90° dengan *eigenvalues* sekitar $1.7 \times 10^{41} N/mm$. Selanjutnya distribusi kekakuan terlihat merata seiring perubahan nilai ε_2 dan ε_3 . Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta zmin}$ terbesar berada pada kondisi desain ε_3 sekitar 0° sampai -10° dan pada kondisi ε_2 dengan rentang nilai sekitar 0° sampai 90° dengan *eigenvalues* sekitar $13 \times 10^{39} N/mm$.

Pada saat nilai $b_3 = 25$, terlihat bahwa ada 2 kondisi yang menyebabkan $\lambda_{\theta zmax}$ terbesar yaitu pada saat posisi ε_3 antara 0° sampai -10° sedangkan posisi ε_2 antara 0° sampai 30° dan antara 60° sampai 90° dengan *eigenvalues* yang tidak berbeda cukup jauh yaitu sekitar $4.4 \times 10^{40} N/mm$. Distribusi kekakuan pada posisi

ε_3 yang tetap dengan rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 90° terlihat merata. Terlihat juga bahwa $\lambda_{\theta zmin}$ terbesar berada pada posisi ε_3 antara 0° sampai -10° dan pada rentang nilai ε_2 antara 0° sampai 90° dengan *eigenvalues* sekitar $3.4 \times 10^{39} N/mm$.

4.6. Contoh Studi Kasus

Pada contoh studi kasus yang akan dibahas yaitu dengan mengambil beberapa desain dengan mempertimbangkan nilai kekakuan yang telah dijelaskan pada bahasan sebelumnya. Hasil dari analisa grafik dapat dilihat pada table 4.10.

Tabel 4.10 Detail Hasil yang Didapatkan

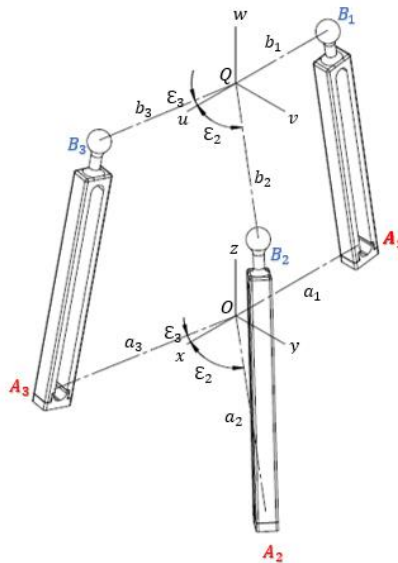
b_3 [mm]	<i>Eigenvalues</i> [N/mm]			ε_2°	ε_3°
100	Max	λ_x	7.5×10^5	$[30^\circ, 40^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		λ_y	3×10^{25}	$[70^\circ, 80^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		λ_z	2.1×10^{26}	20°	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta x}$	5.3×10^{40}	$[50^\circ, 70^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta y}$	1.9×10^{41}	50°	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta z}$	9.5×10^{57}	40°	$[0^\circ, -10^\circ]$
	Min	λ_x	5.5×10^5	0°	0°
		λ_y	5.5×10^5	5°	-5°
		λ_z	5.5×10^5	5°	-5°
		$\lambda_{\theta z}$	5.3×10^{40}	$[0^\circ, 90^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
b_3 [mm]	<i>Eigenvalues</i> [N/mm]			ε_2°	ε_3°
75	Max	λ_x	5.7×10^5	$[0^\circ, 45^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		λ_y	11×10^{24}	$[50^\circ, 70^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		λ_z	8.5×10^{25}	75°	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta x}$	3.4×10^{40}	$[20^\circ, 60^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta y}$	13×10^{40}	40°	$[0^\circ, -10^\circ]$
		$\lambda_{\theta z}$	3.8×10^{41}	$[15^\circ, 90^\circ]$	$[0^\circ, -10^\circ]$
	Min	λ_x	5.5×10^5	0°	0°

		λ_y	5500	50°	[0°, -10°]
		λ_z	1.6×10^4	[60°, 80°]	[0°, -15°]
		$\lambda_{\theta x}$	2×10^9	[80°, 90°]	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta y}$	1.9×10^{10}	[10°, 20°]	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta z}$	2.9×10^{40}	[0°, 90°]	[0°, -5°]
b_3 [mm]		<i>Eigenvalues</i>	<i>[N/mm]</i>	ε_2°	ε_3°
50	Max	λ_x	5.6×10^5	[0°, 20°]	[0°, -10°]
		λ_y	3.7×10^{24}	[70°, 80°]	[0°, -10°]
		λ_z	2.4×10^{25}	25° & 70°	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta x}$	1.9×10^{40}	[15°, 75°]	[0°, -15°]
		$\lambda_{\theta y}$	7.7×10^{40}	[15°, 20°]	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta z}$	1.7×10^{41}	[70°, 90°]	[0°, -10°]
	Min	λ_x	5.4×10^5	0°	0°
		λ_y	1900	40°	[0°, -10°]
		λ_z	10000	[70°, 80°]	[0°, -15°]
		$\lambda_{\theta x}$	11×10^8	[40°, 70°]	[0°, -10°]
$\lambda_{\theta y}$		7.5×10^9	20°	[0°, -10°]	
		$\lambda_{\theta z}$	13×10^{39}	[0°, 90°]	[0°, -10°]
b_3 [mm]		<i>Eigenvalues</i>	<i>[N/mm]</i>	ε_2°	ε_3°
25	Max	λ_x	5.5×10^5	[0°, 5°]	[0°, -10°]
		λ_y	15×10^{23}	20°	[0°, -10°]
		λ_z	6.5×10^{24}	35°	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta x}$	4.4×10^{39}	[15°, 40°]	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta y}$	9×10^{39}	[15°, 25°]	[0°, -10°]
		$\lambda_{\theta z}$	4.4×10^{40}	[0°, 30°] [60°, 90°]	[0°, -10°]
	Min	λ_x	5×10^5	0°	0°
		λ_y	2600	40°	[0°, -10°]
		λ_z	2400	75°	[0°, -20°]
		$\lambda_{\theta x}$	2.1×10^8	[50°, 90°]	[0°, -10°]
$\lambda_{\theta y}$		5.4×10^9	20°	[0°, -10°]	
		$\lambda_{\theta z}$	3.4×10^{39}	[0°, 90°]	[0°, -10°]

Dengan mempertimbangkan nilai parameter desain tersebut, kemudian menggunakan aturan desain seperti pada pembahasan 4.1, maka dapat dipilih beberapa desain dengan nilai parameter sebagai berikut:

Tabel 4.11 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Pertama

ε_2°	ε_3°	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_3 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]
50°	-10°	-78	153	100	-60	115	75



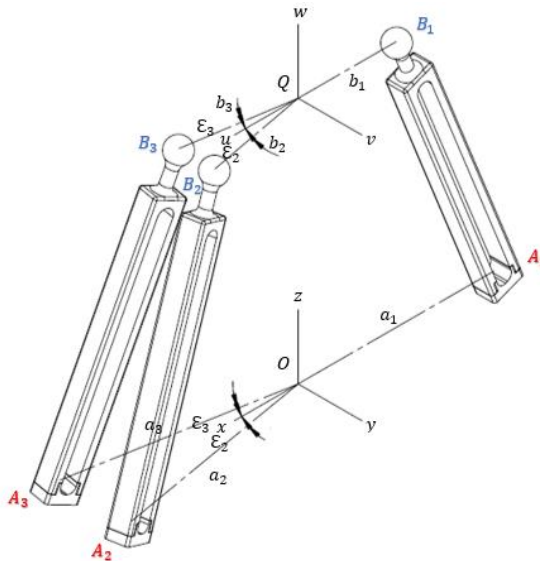
Gambar 4.8 Desain Pertama

Table 4.11 menunjukkan parameter desain yang dipilih untuk desain pertama. Dimensi ini menunjukkan bahwa ukuran platform 0.75 lebih kecil dibanding ukuran base. Kaki kedua terletak 50° terhadap sumbu x (kaki pertama), sedangkan kaki

ketiga terletak -10° terhadap sumbu x. Geometri dari desain tersebut dapat dilihat pada gambar 4.8.

Tabel 4.12 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Kedua

ε_2°	ε_3°	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_3 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]
10°	-10°	-95	100	100	-48	50	50



Gambar 4.9 Desain Kedua

Table 4.12 menunjukkan parameter desain yang dipilih untuk desain kedua. Pada desain kedua, menunjukkan bahwa ukuran *platform* 0.5 lebih kecil dibanding ukuran *base*. Kaki kedua terletak 10° terhadap sumbu x (kaki pertama), sedangkan kaki ketiga terletak -10° terhadap sumbu x. Sehingga dapat ditunjukkan bahwa posisi dari nkaki kedua dan kaki ketiga berdekatan. Geometri dari desain tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.

Tabel 4.13 Parameter Desain yang Dipilih untuk Desain Ketiga

ε_2°	ε_3°	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_3 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]
20°	-10°	-92	105	100	-23	26	25

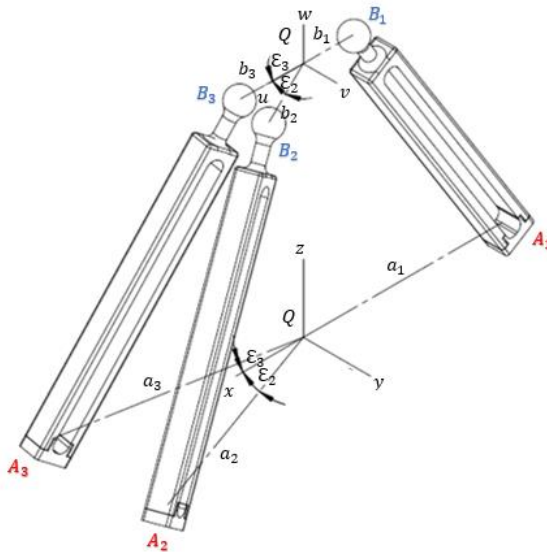
**Gambar 4.10** Desain Ketiga

Table 4.13 menunjukkan parameter desain yang dipilih untuk desain ketiga. Pada desain ketiga, menunjukkan bahwa ukuran *platform* 0.25 lebih kecil dibanding ukuran *base*. Kaki kedua terletak 20° terhadap sumbu x (kaki pertama), sedangkan kaki ketiga terletak -10° terhadap sumbu x. Geometri dari desain tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab 5 memuat subbab kesimpulan dan saran. Berikut penjelasan lebih lanjut mengenai kesimpulan dan saran dari penelitian ini:

5.1 Kesimpulan

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

1. Masing-masing kaki pada struktur robot paralel 3-RPS mempunyai satu gaya *constraint* yang terletak sejajar dengan sumbu *revolute joint* dan satu gaya aktuasi di sepanjang kaki dan memotong titik pusat *spherical joint*. Penggabungan semua gaya-gaya tersebut akan didapat perumusan Jacobian matrik yang menggambarkan kondisi kesetimbangan robot paralel 3-RPS.
2. Terdapat tiga parameter desain yang divariasikan dan mempengaruhi kekakuan robot paralel 3-RPS, yaitu:
 - Parameter desain yang paling berpengaruh terhadap distribusi kekakuan pada robot paralel 3-RPS adalah nilai ε_3 . Semakin rendah nilai ε_3 maka kekakuan robot akan semakin rendah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin jauh posisi kaki ketiga terhadap kaki pertama, maka kekakuan robot akan semakin rendah. Nilai ε_3 yang menunjukkan bahwa robot paralel 3-RPS mempunyai kekakuan yang tinggi adalah pada rentang nilai 0° sampai -10° .
 - Parameter desain ε_2 mempunyai nilai yang menentukan posisi dari kaki kedua. Untuk mendapatkan nilai kekakuan yang tinggi, posisi kaki kedua dapat divariasikan dan bergantung pada arah *wrench* yang diterapkan pada *platform*.
 - Variasi pada nilai b_3 dengan nilai 25, 50, 75, dan 100 berpengaruh pada nilai kekakuan. Semakin besar nilai

b_3 maka nilai kekakuan semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar ukuran *platform*, maka nilai kekakuan robot akan semakin besar.

5.2 Saran

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

1. Diperlukannya penelitian lebih lanjut mengenai aplikasi desain mekanisme 3-RPS pada alat rehabilitasi tumit.
2. Diperlukannya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh material terhadap distribusi kekakuan robot paralel 3-RPS.
3. Diperlukannya pembuatan prototype alat rehabilitasi tumit dengan mengacu pada parameter desain yang sudah digunakan untuk mendapatkan kekakuan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Chunbao Wang, L. W. (2015). "Development of an Ankle Rehabilitation Robot for Ankle Training". **Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation**, (pp. 94-99). Lijiang, China.
- G D McKay, P. A. (2001). "Ankle Injuries in Basketball: Injury Rate and Risk". **Br J Sports Med**, 35, pp. 103-108.
- Gerardo, M. M. (2015). "Epidemiology of Volleyball Related Injuries in the Young Athlete". **International Journal of Sports and Exercise Medicine**.
- Healthwise Staff. (2017, March 21). "Types of Ankle Sprains". **myhealth.alberta.ca**.
- J. Jesus C.S, J. ´.-M.-G.-V. (2012). "Static analysis of spatial parallel manipulators by means of the principle of virtual work". **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, (pp. 385-401). Mexico.
- Kong, X. (2003). **Type Synthesis and Kinematics of General and Analytic Parallel Mechanisms**. Universite Laval, Quebec, Canada.
- Latifah Nurahmi, M. S. (2017). "Dimension Synthesis of 3-RPS Parallel Manipulator with Intersecting R-Axes for Ankle Rehabilitation Device. **18th IEEE International Conference on Advanced Robotics**. Hong Kong.
- Latifah Nurahmi, M. S. (2017). "Motion Type of 3-RPS Parallel Manipulator for Ankle Rehabilitation Device". **ICAMIMIA**.

- Medical University of South Carolina. (2015, jan 05). "Ankle Sprains and Basketball". **Orthopaedics - Sports Medicine**.
- Park, K. M. (2017). **Modern Robotics Mechanics, Planning, and Control**. USA: Cambridge University.
- Pau Golanó, S. a. (n.d.). "Ankle Sprain: Diagnosis and Therapy Starts with Knowledge of Anatomy". **Sports Medicine Journal**, 234-242.
- Pengju Sui, L. Y. (2009). "Analysis and Synthesis of Ankle Motion and Rehabilitation Robots". **Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, (p. 1). Guilin.
- Schilling, R. J. (2003). **"Fundamental of Robotics Analysis and Control"**. New Delhi: Prentice Hall of India.
- Sports Medicine Australia. (2010). "A guide to prevention and management". **Ankle injury**.
- Sumartiningih, S. (2012). "Cedera Keseleo pada Pergelangan Kaki (Ankle Sprains)". **Jurnal Media Ilmu Keolahragaan Indonesia**.
- Tsai, L.-W. (1999). **Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulator**. University of Maryland, Washington, D.C: John Willey & Sons, Inc.
- Xie, Y. H. (2008). "Impedance Control of Ankle Rehabilitation Robot". **Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, (pp. 21-26). Bangkok, Thailand.

Yonezawa, K. N. (2014). "Development and Performance Evaluation of Parallel Link Type Human Ankle Rehabilitation Assistive Device". **Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, (pp. 802-807). Bali, Indonesia.

Zhijiang Lu, C. W. (2015). "Development of a Novel Ankle Rehabilitation Robot with Three Freedoms for Ankle Rehabilitation Training". **The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation**, (pp. 2091-2096). Shenyang, China.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BIODATA PENULIS



Rath Kautsar Firdaus merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Dadang Hendarman dan Ibu Werdiningsih. Penulis lahir di Wonosobo, 28 September 1994. Penulis memulai pendidikan formal di TK Pertiwi Rojoimo, Wonosobo. Penulis melanjutkan jenjang pendidikan dasar di SDN 1 Rojoimo, pendidikan menengah di SMPN 2 Wonosobo, pendidikan menengah atas di SMAN 1 Wonosobo dan pendidikan vokasi di Politeknik

Negeri Jakarta. (PNJ). Penulis sempat bekerja di “ADR Group of Companies” sebagai Staff Produk Engineering. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan tinggi sarjana sebagai mahasiswa angkatan terakhir Lintas Jalur pada tahun 2016 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, Departemen Teknik Mesin.

Semasa kuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis mengikuti kepanitiaan untuk beberapa event seperti *Integrated Petroleum Exploration and Exploitation (IPEE) 2017* dan *Petroleum Integrated Days (PETROLIDA) 2017*. Terakhir penulis aktif sebagai anggota laboratorium di Laboratorium Otomasi Industri, Departemen Teknik Mesin, ITS.

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