



TESIS - TE142599

**KOMPENSASI EKSTERNAL *DISTURBANCE*  
MENGUNAKAN CTC DENGAN NDO UNTUK  
PENGATURAN FORMASI *DIFFERENTIAL DRIVE*  
*MOBILE ROBOT***

ARYA KUSUMAWARDANA  
07111650020001

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPARTMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017





TESIS - TE142599

**KOMPENSASI EKSTERNAL *DISTURBANCE*  
MENGUNAKAN CTC DENGAN NDO UNTUK  
PENGATURAN FORMASI *DIFFERENTIAL DRIVE*  
*MOBILE ROBOT***

ARYA KUSUMAWARDANA  
07111650020001

DOSEN PEMBIMBING  
Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN  
DEPARTMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Arya Kusumawardana  
NRP. 07111650020001

Tanggal Ujian : 21 Desember 2017  
Periode Wisuda : Maret 2018

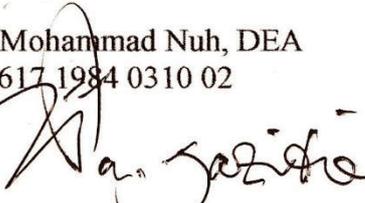
Disetujui oleh:



1. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. (Pembimbing I)  
NIP: 1968 0812 1994 0320 01



2. Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA (Penguji)  
NIP: 1959 0617 1984 0310 02

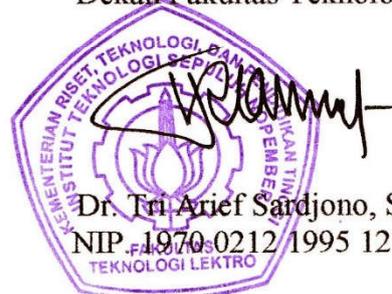


3. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng. (Penguji)  
NIP: 1959 0219 1986 1010 01



4. Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T. (Penguji)  
NIP: 1957 0424 1985 0210 01

Dekan Fakultas Teknologi Elektro



Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.  
NIP. 1970 0212 1995 1210 01

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**KOMPENSASI EKSTERNAL *DISTURBANCE* MENGGUNAKAN CTC DENGAN NDO UNTUK PENGATURAN FORMASI *DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE ROBOT*” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.**

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Desember 2017



Arya Kusumawardana

NRP. 07111650020001

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**KOMPENSASI EKSTERNAL *DISTURBANCE*  
MENGUNAKAN CTC DENGAN NDO UNTUK  
PENGATURAN FORMASI *DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE  
ROBOT***

Nama mahasiswa : Arya Kusumawardana  
NRP : 07111650020001  
Pembimbing : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

**ABSTRAK**

Pengaturan formasi untuk *mobile* robot khususnya DDMR (*Differential Drive Mobile Robot*) telah banyak dikembangkan, hal ini dikarenakan pengaturan multi robot akan lebih efektif dibandingkan dengan satu robot untuk menyelesaikan suatu tugas tertentu. Metode untuk pembentukan formasi sekaligus *tracking* trayektori menjadi fokus pengembangan penelitian tentang pengaturan formasi. Dalam tesis ini digunakan pendekatan SBC (*Separation Bearing Control*) dan SSC (*Separation Separation Control*) untuk pembentukan formasi sekaligus *tracking* trayektori. Metode CTC juga digunakan untuk masing-masing *agent*. Metode tersebut digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dinamika dari DDMR. Selain itu untuk menyelesaikan permasalahan *disturbance* pada robot, pada penelitian ini menggunakan metode NDO (*Nonlinear Disturbance Observer*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan CTC dengan NDO mampu mereduksi pengaruh *disturbance* pada robot sehingga formasi yang telah terbentuk dapat dipertahankan sesuai kriteria yang telah ditentukan.

Kata kunci: (*Differential Drive Mobile Robot, Separation Bearing Control, Separation Separation Control, Computed Torque Control, Nonlinear Disturbance Observer*)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **EXTERNAL DISTURBANCE COMPENSATION USING CTC WITH NDO FOR FORMATION CONTROL OF DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE ROBOT**

By : Arya Kusumawardana  
Student Identity Number : 07111650020001  
Supervisor : Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT.

## **ABSTRACT**

Formation control for mobile robots especially DDMR (Differential Drive Mobile Robot) have been widely developed, this is because multi robot control will be more effective than that of a robot to accomplish a specific task. Methods for formation and tracking trajectory are the focus of research development on formation control. In this thesis the approach of SBC (Separation Bearing Control) and SSC (Separation Separation Control) are used to create formation and trajectory tracking. CTC method is also used for each agent. The method is used to solve the dynamic problem of DDMR. In addition, to solving the problem of disturbance in the robot, in this research use NDO (Nonlinear Disturbance Observer) method. Simulation results show that the use of CTC with NDO can reduce the effect of disturbance on the robot and the formation can be maintained according to the criteria.

**Key words:** (*Differential Drive Mobile Robot, Separation Bearing Control, Separation Separation Control, Computed Torque Control, Nonlinear Disturbance Observer*)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah atas limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan baik. Tesis ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Magister pada Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan judul:

**“KOMPENSASI EKSTERNAL *DISTURBANCE* MENGGUNAKAN CTC DENGAN NDO UNTUK PENGATURAN FORMASI *DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE ROBOT*”.**

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tesis ini tidak lepas dari peran berbagai pihak yang telah memberikan bantuan. Untuk itu, tidak lupa penulis sampaikan ucapan terimakasih kepada Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. selaku pembimbing Tesis atas segala bimbingan dan motivasi dari beliau hingga terselesaikannya Tesis ini.

Khususnya kepada kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan doa, serta pengorbanan yang tulus demi tercapainya cita-cita penulis. Serta, teman-teman S2 Teknik Sistem Pengaturan yang selalu memberikan dukungan dan saran demi kesempurnaan Tesis ini. Semoga buku Tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro pada khususnya.

Surabaya, 4 Desember 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

|                                                                                                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| LEMBAR PENGESAHAN .....                                                                                                 | iii  |
| PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....                                                                                          | v    |
| ABSTRAK.....                                                                                                            | vii  |
| ABSTRACT.....                                                                                                           | ix   |
| KATA PENGANTAR .....                                                                                                    | xi   |
| DAFTAR ISI.....                                                                                                         | xiii |
| DAFTAR GAMBAR.....                                                                                                      | xv   |
| DAFTAR TABEL.....                                                                                                       | xix  |
| BAB I PENDAHULUAN.....                                                                                                  | 1    |
| 1.1. Latar Belakang.....                                                                                                | 1    |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                                                                                              | 2    |
| 1.3. Tujuan.....                                                                                                        | 2    |
| 1.4. Batasan Masalah.....                                                                                               | 2    |
| 1.5. Kontribusi.....                                                                                                    | 3    |
| BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....                                                                              | 5    |
| 2.1. Kajian Pustaka.....                                                                                                | 5    |
| 2.1.1. <i>Formation Control of Wheeled Mobile Robots Based on Fuzzy Logic and System Dynamics</i> [3] .....             | 5    |
| 2.1.2. <i>A Fuzzy Compensated PID Controller for Formation Control of Mobile Robot</i> [4].....                         | 9    |
| 2.1.3. <i>Modelling and Control of a 2-DOF Planar Parallel Manipulator for Semiconductor Packaging Systems</i> [9]..... | 13   |
| 2.1.4. <i>Control of Decentralized Geometric Formations of Mobile Robots</i> [2] .....                                  | 15   |
| 2.2. Dasar Teori .....                                                                                                  | 16   |
| 2.2.1. Model Matematika DDMR ( <i>Differential Drive Mobile Robot</i> ) .....                                           | 16   |
| 2.2.2. Kontroler CTC.....                                                                                               | 21   |
| 2.2.3. Pendekatan <i>Leader-Follower</i> Pada Pengaturan Formasi .....                                                  | 22   |
| 2.2.4. <i>Disturbance Observer</i> untuk <i>Nonlinear System</i> .....                                                  | 23   |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....                                   | 25 |
| 3.1. Pendekatan <i>Leader-follower</i> Untuk Pengaturan Formasi ..... | 25 |
| 3.1.1. Rancangan SBC .....                                            | 25 |
| 3.1.2. Rancangan SSC.....                                             | 26 |
| 3.2. Rancangan CTC dengan <i>Disturbance Observer</i> .....           | 29 |
| 3.3. Rancangan Keseluruhan Sistem.....                                | 31 |
| 3.4. Rancangan Kontroler untuk Leader .....                           | 32 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....                                      | 33 |
| 4.1. Pengujian CTC .....                                              | 33 |
| 4.1.1. Pengujian CTC Tanpa <i>Disturbance</i> .....                   | 34 |
| 4.1.2. Pengujian Kontrol CTC dengan <i>Disturbance</i> .....          | 40 |
| 4.2. Pengujian CTC dengan NDO.....                                    | 72 |
| BAB V PENUTUP .....                                                   | 81 |
| 5.1. Kesimpulan .....                                                 | 81 |
| 5.2. Saran.....                                                       | 81 |
| DAFTAR PUSTAKA.....                                                   | 83 |
| LAMPIRAN .....                                                        | 85 |
| LAMPIRAN A.....                                                       | 85 |
| LAMPIRAN B .....                                                      | 93 |
| RIWAYAT PENULIS .....                                                 | 99 |

## DAFTAR GAMBAR

|             |                                                                        |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.1  | Konfigurasi leader-follower secara geometri .....                      | 6  |
| Gambar 2.2  | Diagram Blok Keseluruhan .....                                         | 8  |
| Gambar 2.3  | Kondisi Robot dalam bentuk formasi dengan path .....                   | 8  |
| Gambar 2.4  | Kondisi Ketika Terjadi disturbance terhadap leader .....               | 9  |
| Gambar 2.5  | Blok diagram keseluruhan sistem.....                                   | 12 |
| Gambar 2.6  | Kontroler PID dengan kompensator Fuzzy .....                           | 12 |
| Gambar 2.7  | Blok Linierisasi .....                                                 | 14 |
| Gambar 2.8  | PID-CTC.....                                                           | 14 |
| Gambar 2.9  | Pendekatan Leader-follower Pada Dua Robot Mobile.....                  | 15 |
| Gambar 2.10 | Bentuk umum pendekatan SBC.....                                        | 22 |
| Gambar 2.11 | Bentuk umum formasi SSC .....                                          | 23 |
| Gambar 3.1  | Pendekatan Leader-follower dengan SBC.....                             | 25 |
| Gambar 3.2  | Pendekatan Leader-follower dengan SSC .....                            | 27 |
| Gambar 3.4  | Blok Pengaturan Formasi .....                                          | 28 |
| Gambar 3.5  | Blok diagram dinamika DDMR dengan CTC-disturbance<br>observer .....    | 30 |
| Gambar 3.6  | Blok Diagram Rancangan CTC dengan disturbance observer .....           | 31 |
| Gambar 4.1  | Formasi yang diharapkan .....                                          | 34 |
| Gambar 4.2  | Sinyal error dinamika $R_L$ tanpa disturbance.....                     | 35 |
| Gambar 4.3  | Sinyal error kinematika $R_L$ tanpa disturbance.....                   | 36 |
| Gambar 4.4  | Sinyal error dinamika $R_{F1}$ tanpa disturbance .....                 | 36 |
| Gambar 4.5  | Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b).....    | 37 |
| Gambar 4.6  | Sinyal error dinamika $R_{F2}$ tanpa disturbance .....                 | 38 |
| Gambar 4.7  | Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b).....    | 39 |
| Gambar 4.8  | Sinyal error dinamika $R_{F3}$ tanpa disturbance .....                 | 39 |
| Gambar 4.9  | Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ .....                           | 40 |
| Gambar 4.10 | Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-1 .....    | 41 |
| Gambar 4.11 | Sinyal error kinematika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-1 ....   | 41 |
| Gambar 4.12 | Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-1 ..... | 42 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.13 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-1 ..... | 43 |
| Gambar 4.14 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-1 .....                                 | 44 |
| Gambar 4.15 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-1 ..... | 45 |
| Gambar 4.16 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-1 .....                                 | 45 |
| Gambar 4.17 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan diturbance pengujian ke-1 .....                          | 46 |
| Gambar 4.18 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-2.....                                     | 46 |
| Gambar 4.19 Sinyal error kinematika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-2.....                                   | 47 |
| Gambar 4.20 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-2 .....                                 | 48 |
| Gambar 4.21 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-2 ..... | 49 |
| Gambar 4.22 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-2 .....                                 | 49 |
| Gambar 4.23 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-2 ..... | 50 |
| Gambar 4.24 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-2 .....                                 | 51 |
| Gambar 4.25 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan diturbance pengujian ke-2 .....                          | 51 |
| Gambar 4.26 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-3.....                                     | 52 |
| Gambar 4.27 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-3.....                                     | 53 |
| Gambar 4.28 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-3 .....                                 | 53 |
| Gambar 4.29 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-3 ..... | 54 |
| Gambar 4.30 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-3 .....                                 | 55 |
| Gambar 4.31 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-3 ..... | 56 |
| Gambar 4.32 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-3 .....                                 | 56 |
| Gambar 4.33 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan diturbance pengujian ke-3 .....                          | 57 |
| Gambar 4.34 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-4.....                                     | 57 |
| Gambar 4.35 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-4.....                                     | 58 |
| Gambar 4.36 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-4 .....                                 | 58 |
| Gambar 4.37 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-4 ..... | 59 |
| Gambar 4.38 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-4 .....                                 | 60 |

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.39 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-4 ..... | 61 |
| Gambar 4.40 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-4 .....                                 | 61 |
| Gambar 4.41 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan disturbance pengujian ke-4 .....                         | 62 |
| Gambar 4.42 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                                    | 62 |
| Gambar 4.43 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                                    | 63 |
| Gambar 4.44 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                                 | 63 |
| Gambar 4.45 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-5 ..... | 64 |
| Gambar 4.46 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                                 | 65 |
| Gambar 4.47 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-5 ..... | 66 |
| Gambar 4.48 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                                 | 66 |
| Gambar 4.49 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan disturbance pengujian ke-5 .....                         | 67 |
| Gambar 4.50 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                                    | 67 |
| Gambar 4.51 Sinyal error kinematika $R_L$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                                  | 68 |
| Gambar 4.52 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                                 | 68 |
| Gambar 4.53 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-6 ..... | 69 |
| Gambar 4.54 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                                 | 70 |
| Gambar 4.55 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan disturbance pengujian ke-6 ..... | 71 |
| Gambar 4.56 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                                 | 71 |
| Gambar 4.57 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan disturbance pengujian ke-6 .....                         | 72 |
| Gambar 4.58 Sinyal error dinamika $R_L$ dengan NDO .....                                                           | 73 |
| Gambar 4.59 Sinyal error kinematika $R_L$ dengan NDO .....                                                         | 74 |
| Gambar 4.60 Sinyal error dinamika $R_{F1}$ dengan NDO .....                                                        | 74 |
| Gambar 4.61 Sinyal error $e_{lF1}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F1}$ (b) dengan NDO .....                        | 75 |
| Gambar 4.62 Sinyal error dinamika $R_{F2}$ dengan NDO .....                                                        | 75 |
| Gambar 4.63 Sinyal error $e_{lF2}$ (a) dan Sinyal error $e_{\beta F2}$ (b) dengan NDO .....                        | 76 |
| Gambar 4.64 Sinyal error dinamika $R_{F3}$ dengan NDO .....                                                        | 77 |
| Gambar 4.65 Sinyal error $e_{l2F3}$ dan $e_{l2F3}$ dengan NDO .....                                                | 77 |
| Gambar 4.66 Formasi robot ketika mengikuti trayektori .....                                                        | 79 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2.1 <i>Rule based</i> untuk <i>torque magnitude</i> ..... | 7  |
| Tabel 2.2 <i>Rule based</i> untuk <i>torque different</i> ..... | 8  |
| Tabel 4.1 Parameter Robot .....                                 | 33 |
| Tabel 4.2 Referensi .....                                       | 34 |
| Tabel 4.3 Perbandingan <i>MSE</i> .....                         | 79 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Pengaturan formasi multi robot untuk DDMR (*Differential Drive Mobile Robot*) merupakan pengaturan multi robot untuk bergerak membentuk suatu formasi atau bergerak dalam formasi dengan mengikuti suatu lintasan tertentu. *Survey* terkait pengaturan formasi telah dilakukan, dimana formasi dapat dibentuk berdasarkan posisi, perpindahan, dan jarak antar robot [1].

Pada penelitian [2], permasalahan pengaturan formasi dapat diselesaikan dengan menggunakan pendekatan *leader-follower*. Permasalahan pengaturan formasi hanya mengacu pada kinematika robot. Sedangkan pergerakan suatu robot juga dipengaruhi oleh dinamika dari robot. Pada penelitian [3] dan [4] telah disertakan dinamika robot pada permasalahan pengaturan formasi.

Pada penelitian yang telah disebutkan, pengaturan formasi dibentuk hanya dengan jarak antara *leader* dengan satu *follower* dan sudut *bearing* dari *leader* atau pada literatur [5] disebut sebagai *separation-bearing controller* (SBC). Namun, ketika menggunakan metode SBC, formasi yang dibentuk tidak dapat diketahui jarak antar *follower*. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pada penelitian [6] telah berhasil diterapkan metode *separation-separation controller* (SSC). Namun, kekurangan pada metode SSC adalah ketika terjadi permasalahan pada satu *follower*, maka akan terjadi permasalahan pada *follower* yang lainnya karena formasi bukan hanya bergantung dari *leader* melainkan juga dengan *follower* lain.

Pada penelitian [3] dan [4] pengujian dilakukan tanpa adanya *external disturbance* pada *follower* robot. Padahal, adanya gangguan dari luar sistem yang dikenakan pada robot akan menyebabkan terjadinya perubahan pada formasi yang dibuat karena penggunaan metode SSC dimana posisi dari satu *follower* dipengaruhi oleh *follower* lainnya. Untuk menangani permasalahan *disturbance* pada sistem nonlinear, penelitian [7] telah berhasil menerapkan DOBC (*Disturbance Observer Based Control*) untuk menyelesaikan permasalahan yang timbul akibat adanya *disturbance*. Untuk menyelesaikan permasalahan akibat adanya *disturbance*, nilai *disturbance* diestimasi dengan masukan berupa sinyal

kontrol pada sistem dan sinyal *output* sistem. Hasil estimasi tersebut kemudian dikurangkan dengan sinyal *disturbance*, ketika sinyal hasil estimasi mendekati sinyal *disturbance*, maka akan secara langsung *disturbance* dapat terkompensasi. Sifat dari *disturbance observer* untuk sistem nonlinier yang didesain adalah fleksibel, sehingga dapat diterapkan dengan metode kontrol nonlinear apapun.

Pada penelitian ini, digunakan metode SBC dan SSC untuk pengaturan formasi. sedangkan untuk pengaturan dinamika robot digunakan metode CTC. Untuk mengestimasi sinyal *disturbance* pada robot digunakan metode NDO. Dengan penggunaan NDO pada *inner-loop* sistem diharapkan dapat mengurangi pengaruh *disturbance* sehingga formasi yang dibentuk dari *outer-loop* sistem dapat dipertahankan.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas pada penelitian ini adalah, bagaimana merancang kontroler untuk mempertahankan formasi yang dibentuk oleh beberapa robot *follower* terhadap *leader* ketika terdapat *disturbance*.

## **1.3. Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan kontroler untuk robot *follower* agar mampu mempertahankan formasi terhadap *leader* dan *follower* lain yang berada pada satu formasi ketika terdapat *disturbance*.

## **1.4. Batasan Masalah**

Diasumsikan parameter-parameter robot yang digunakan untuk pemodelan sistem dapat diukur dengan tepat. Pendekatan pengaturan formasi menggunakan *leader-follower* dengan metode *separation-bearing controller* (SBC) dan *separation-separation controller* (SSC), sehingga terfokus pada *follower* robot. Jumlah follower yang digunakan adalah 3 robot. Selain itu, Formasi yang digunakan adalah formasi dengan konfigurasi yang tetap dengan ketentuan jarak antar robot dan sudut *bearing*.

### **1.5. Kontribusi**

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah yaitu memberikan rancangan kontroler untuk pengaturan formasi DDMR dimana formasi dibentuk menggunakan pendekatan *leader-follower* dengan metode SBC dan SSC yang digunakan untuk mempertahankan posisi antar robot. SSC yang digunakan diterapkan pada keseluruhan robot *follower*. Selain itu untuk mempertahankan formasi robot ketika terdapat *disturbance* (pada dinamika robot) digunakan metode CTC (*Computed Torque Control*) dengan *disturbance observer*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Kajian Pustaka

Pengaturan formasi mobile robot merupakan pengembangan dari pengaturan *single robot* dimana pada kasus tersebut digunakan multi robot untuk tujuan tertentu. Pada penelitian ini, pengaturan mobile robot difokuskan pada permasalahan adanya *disturbance* pada robot ketika robot membentuk formasi dan *tracking* trayektori. Adapun beberapa penelitian tentang pengaturan formasi dan metode kontrol untuk dinamika robot akan dibahas pada sub-bab berikut:

##### 2.1.1. *Formation Control of Wheeled Mobile Robots Based on Fuzzy Logic and System Dynamics* [3]

Penelitian tentang pengaturan formasi yang dilakukan yaitu pengaturan *mobile robot* menggunakan logika Fuzzy-Mamdani pada sistem non-holonomic dengan disertai dinamika robot. Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan dari pengaturan formasi yang menggunakan logika fuzzy dengan *kinematics* robot [8].

Pada penelitian tersebut, model robot diturunkan menggunakan Lagrange-Euler, sebagai berikut.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) = E(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (2.1)$$

Dimana  $M(q)$  merupakan matriks massa/inersia  $5 \times 5$ ,  $V(q, \dot{q})$  merupakan vektor dari kecepatan nonlinear yang dipengaruhi oleh gaya dan  $\tau$  merupakan torsi vektor 2 dimensi  $\tau = [\tau_l \quad \tau_r]$ .  $E(q)$  merupakan matriks transformasi *input*.

Diberikan,

$$v(t) = [\dot{\theta}_l \quad \dot{\theta}_r]^T \quad (2.2)$$

$$\dot{q} = S(q).v(t) \quad (2.3)$$

Matriks  $S(q)$  adalah sebagai berikut

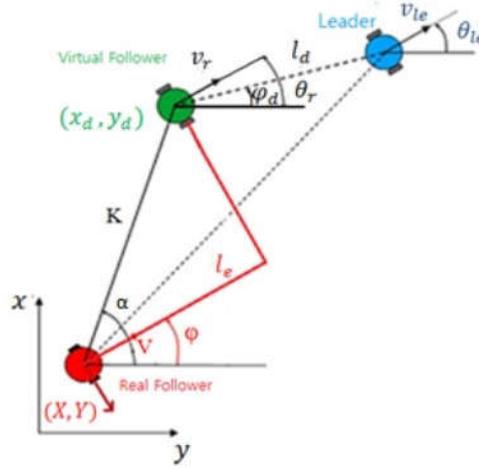
$$S(q) = \begin{bmatrix} c(b \cos \phi - d \sin \phi) & c(b \cos \phi + d \sin \phi) \\ c(b \sin \phi + d \cos \phi) & c(b \sin \phi - d \cos \phi) \\ c & -c \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

dimana  $c = \frac{r}{2b}$ . Dari persamaan dinamika robot yang telah diberikan, bentuk state space ditunjukkan pada persamaan (2.6)

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} S \cdot v \\ f_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (S^T \cdot M \cdot S)^{-1} S^T \cdot E \end{bmatrix} \tau \quad (2.6)$$

dimana  $x = [x_c \ y_c \ \phi \ \theta_l \ \theta_r \ \dot{\theta}_l \ \dot{\theta}_r]^T$ ,  $f_2 = (S^T M S)^{-1} (-S^T M \dot{S} v - S^T V)$

Pengaturan formasi yang digunakan pada penelitian tersebut menggunakan pendekatan *leader-follower*. Secara geometri pendekatan *leader-follower* yang digunakan pada penelitian tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Konfigurasi *leader-follower* secara geometri

Pada Gambar 2.1 diketahui terdapat parameter  $K$ ,  $\alpha$ , dan  $l_e$ , dimana masing-masing parameter tersebut dijelaskan pada persamaan (2.7), (2.8), (2.9).

$$K = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \quad (2.7)$$

$$\alpha = \text{atan2}((x_d - x), (y_d - y)) \quad (2.8)$$

$$l_e = (x_d - x) \cos \varphi + (y_d - y) \sin \varphi \quad (2.9)$$

Sedangkan untuk kondisi yang diinginkan adalah  $K = 0$  dan  $\varphi = \theta_r$ .

Pada penelitian tersebut fuzzy logic yang digunakan adalah untuk mengatur robot follower agar tetap pada posisi dan arah hadap yang sama dengan virtual. Sehingga terdapat 2 permasalahan arah hadap dari *follower*, yaitu ketika jauh dari virtual dan ketika berada pada virtual.

Untuk permasalahan pertama, pada penelitian tersebut menggunakan persamaan (2.9) untuk menyelesaikannya.

$$\varphi_{md1} = C_{o_{md}} \theta_r + (1 - C_{o_{md}}) \alpha \quad (2.9)$$

dimana nilai  $C_{o_{md}}$  bernilai 0 sampai 1 dan didapatkan dari fuzzy logic.

Pada kasus yang kedua, dimana robot *follower* berada pada virtual, maka orientasi dari robot *follower* sama dengan virtual, yaitu.

$$\varphi_{md2} = \theta_r \quad (2.10)$$

Dari persamaan (2.9) dan (2.10), maka didapatkan arah hadap yang sesuai untuk robot *follower* dan dijelaskan pada persamaan (2.11).

$$\varphi_{md} = (1 - Co_k)\varphi_{md1} + Co_k \cdot \varphi_{md2} \quad (2.11)$$

dimana nilai  $Co_k$  bernilai 0 sampai 1 dan didapatkan dari fuzzy logic

Robot bergerak jika diberikan torsi untuk roda kanan dan kiri. Untuk membuat robot *follower* dapat berada tepat pada virtual pada penelitian tersebut menggunakan logika fuzzy dengan masukan  $l_e$ ,  $\dot{l}_e$ ,  $e_\theta$ , dan  $\dot{e}_\theta$ . Terdapat dua logika fuzzy, yaitu  $l_e$  dan  $\dot{l}_e$  digunakan untuk mencari *torque magnitude*. Sedangkan  $e_\theta$ , dan  $\dot{e}_\theta$  digunakan untuk mencari *torque different*. Untuk  $e_\theta$  dicari menggunakan persamaan (2.12)

$$e_\theta = \varphi_{md} - \varphi \quad (2.12)$$

*Rule* untuk *torque magnitude* ditunjukkan pada Tabel 2.1. Sedangkan untuk *torque different* ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Untuk mencari nilai masing-masing torsi ( $\tau_l, \tau_r$ ), digunakan persamaan (2.13) dan (2.14). Adapun blok diagram secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.2.

$$\tau_l + \tau_r = \tau_{magnitude} \quad (2.13)$$

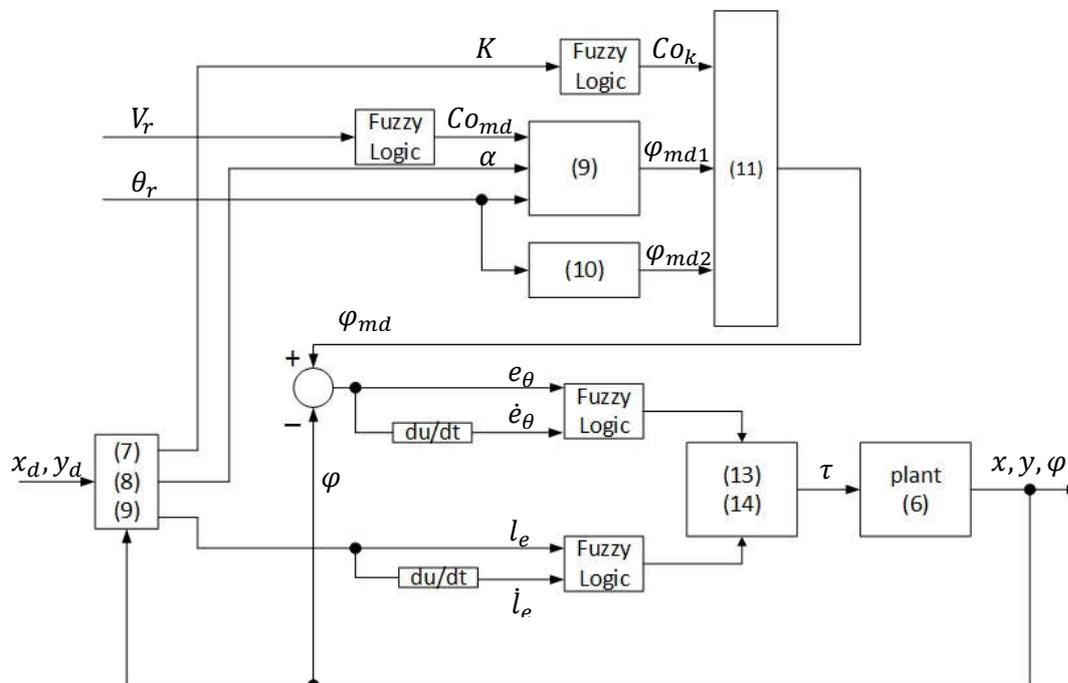
$$\tau_l - \tau_r = \tau_{different} \quad (2.14)$$

Tabel 2.1 *Rule based* untuk *torque magnitude*

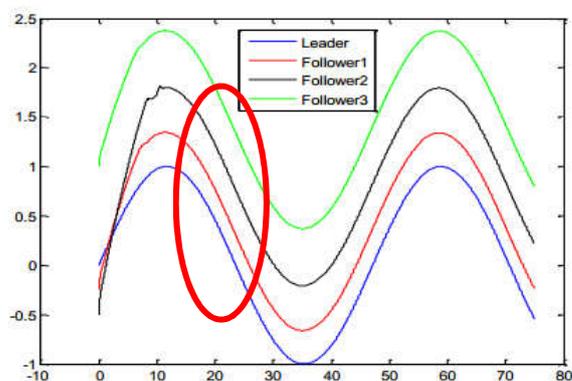
|       |    | $\dot{l}_e$ |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|-------------|----|----|----|----|----|----|
|       |    | NL          | NM | NS | ZE | PS | PM | PL |
| $l_e$ | NL | PS          | PM | PM | PM | PM | PL | PL |
|       | NM | PS          | PM | PL | PL | PL | PL | PL |
|       | NS | NM          | NS | ZE | PS | PM | PM | PL |
|       | ZE | PM          | PS | ZE | ZE | ZE | NS | NM |
|       | PS | PM          | PS | ZE | NS | NM | NM | NL |
|       | PM | NS          | NL | NL | NL | NL | NL | NL |
|       | PL | NS          | NM | NM | NM | NM | NL | NL |

Tabel 2.2 Rule based untuk torque different

|            |    | $\dot{e}_\theta$ |    |    |    |    |    |    |
|------------|----|------------------|----|----|----|----|----|----|
|            |    | NL               | NM | NS | ZE | PS | PM | PL |
| $e_\theta$ | NL | NL               | NL | NL | NM | NM | NS | ZE |
|            | NM | NL               | NL | NL | NM | NS | ZE | PS |
|            | NS | NL               | NL | NM | NS | ZE | PS | PM |
|            | ZE | NL               | NM | NS | ZE | PS | PM | PL |
|            | PS | NM               | NS | ZE | PS | PM | PL | PL |
|            | PM | NS               | ZE | PS | PM | PL | PL | PL |
|            | PL | ZE               | PS | PM | PL | PL | PL | PL |



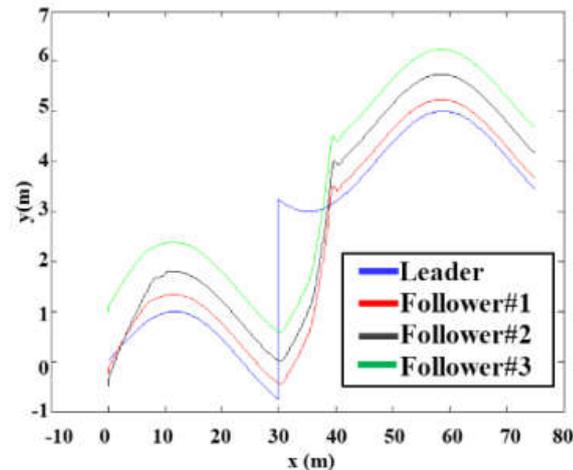
Gambar 2.2 Diagram Blok Keseluruhan



Gambar 2.3 Kondisi Robot dalam bentuk formasi dengan path

Dari Gambar 2.3 terlihat bahwa terjadi perubahan jarak antar masing-masing *leader*. Sedangkan respon dari *follower* ketika *leader* terkena *disturbance* ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Dari Gambar 2.4 terlihat bahwa terjadi tumbukan antar robot *follower* ketika terdapat *disturbance* pada *leader*. Hal ini terjadi karena respon dari robot *follower* cukup lambat ketika terjadi perubahan posisi pada *leader*.



Gambar 2.4 Kondisi Ketika Terjadi *disturbance* terhadap *leader*

Dari sistem yang telah didesain, formasi robot dibentuk oleh *follower* robot yang posisinya ditentukan dari robot virtual. Hal tersebut mengakibatkan robot follower hanya mengacu ke satu titik tertentu sehingga ketika adanya perubahan yang mendadak tidak dapat menjaga jarak antar robot *follower* dan menyebabkan adanya *collision*. Selain itu pada kontroler yang dibuat belum terdapat algoritma untuk menangani adanya *disturbance* sehingga tidak terdapat pengujian untuk membuktikan apakah sistem yang didesain bersifat *robust* terhadap gangguan atau tidak.

### 2.1.2. *A Fuzzy Compensated PID Controller for Formation Control of Mobile Robot* [4]

Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengontrol mobile robot dalam bentuk formasi. Metode yang digunakan adalah PID dengan kompensasi fuzzy sebagai solusi untuk menyelesaikan permasalahan dinamika nonlinear dari robot mobile, sedangkan untuk kinematika dari robot digunakan *feedback linearization* sebagai kontrolernya.

Pemodelan mobile robot pada penelitian tersebut dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian kinematika dan dinamika robot. Kinematika robot ditunjukkan pada persamaan (2.15), sedangkan dinamika robot ditunjukkan pada persamaan (2.16).

$$\dot{q} = S(q)v(t) \quad (2.15)$$

dengan

$$S(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad v(t) = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

Sedangkan  $q = [x_c \quad y_c \quad \theta]^T$ .

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (2.16)$$

Dimana

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & md \sin \theta \\ 0 & m & -md \cos \theta \\ md \sin \theta & -md \cos \theta & I \end{bmatrix}, V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & md\dot{\theta} \cos \theta \\ 0 & 0 & md\dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(q) = 0, B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ R & -R \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}, A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ -d \end{bmatrix}$$

$$\lambda = -m(\dot{x} \cos \theta + \dot{y} \sin \theta)\dot{\theta}$$

Persamaan (2.16) dapat juga direpresentasikan dalam bentuk persamaan state yang ditunjukkan pada persamaan (2.17)

$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = M^{-1}(q)(-V_m(q, \dot{q})\dot{q} - A^T(q)\lambda + B(q)\tau) \quad (2.17)$$

$$z_1 \equiv q = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}, z_2 \equiv \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix}$$

Dari state yang ditunjukkan pada persamaan (2.17) maka memungkinkan untuk didapatkan kecepatan  $[v \quad \omega]^T$  robot mobile dengan persamaan (2.18) berikut:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta \\ \frac{-\dot{x}_c}{d} \sin \theta + \frac{\dot{y}_c}{d} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Kecepatan yang didapatkan dari persamaan (2.19) dapat dikonversi menjadi kecepatan putaran roda  $[w_R \quad w_L]^T$  yang ditunjukkan pada persamaan (2.20).

$$w_R = \frac{1}{r}(v + R\omega), w_L = \frac{1}{r}(v - R\omega) \quad (2.20)$$

Untuk mengatur robot dalam bentuk formasi, dalam kasus ini hanya kinematika pada robot yang secara langsung mempengaruhi. Persamaan kinematika robot formasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{z}_{lf} = G(z_{lf}, \beta_{lf})u_f + F(z_{lf})u_l, \quad \dot{\beta}_{lf} = \omega_l - \omega_f \quad (2.21)$$

$$z_{lf} = \begin{bmatrix} L_{lf} \\ \psi_{lf} \end{bmatrix}, \quad \beta_{lf} = \theta_l - \theta_f$$

$$u_l = \begin{bmatrix} v_l \\ \omega_l \end{bmatrix}, \quad u_f = \begin{bmatrix} v_f \\ \omega_f \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{lf} & d \sin \gamma_{lf} \\ -\frac{\sin \gamma_{lf}}{L_{lf}} & \frac{d \cos \gamma_{lf}}{L_{lf}} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} -\cos \psi_{lf} & 0 \\ \frac{\sin \psi_{lf}}{L_{lf}} & -1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{lf} = \beta_{lf} + \psi_{lf}$$

Dari persamaan (2.21), digunakan *input-output linearization* untuk mendapatkan sinyal *input*. persamaan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.2)

$$u_f = G^{-1}(p - Fu_l) \quad (2.22)$$

$$p = k(z_{lf}^d - z_{lf}), \quad k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$$

Konstanta  $k_1$  dan  $k_2$  merupakan gain kinematika. Untuk memperoleh kestabilan dari kontrol kinematika, maka persamaan (2.22) disubstitusikan ke persamaan (2.21) sehingga didapatkan persamaan *closed loop* sebagai berikut:

$$\dot{z}_{lf} = p = k(z_{lf}^d - z_{lf}) \quad (2.23)$$

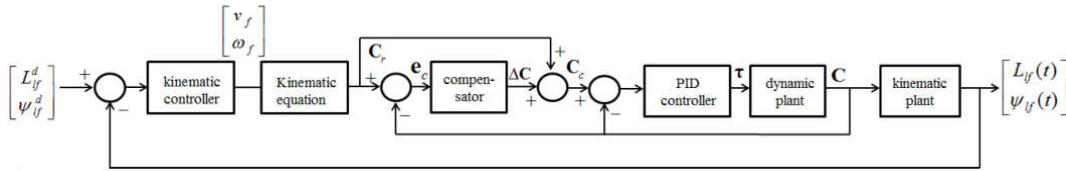
Error didefinisikan sebagai  $e \equiv z_{lf}^d - z_{lf}$ . Karena  $z_{lf}^d$  tidak bergantung dengan waktu, setelah diturunkan terhadap waktu, maka didapatkan persamaan error sebagai berikut:

$$\dot{e} + ke = 0 \quad (2.24)$$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{lf}^d - l_{lf} \\ \psi_{lf}^d - \psi_{lf} \end{bmatrix}$$

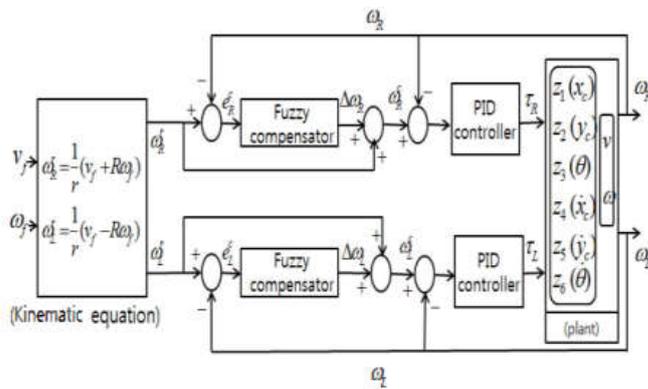
Jika  $k_1 > 0$  dan  $k_2 > 0$ , maka error akan menuju ke 0. Dengan demikian, memungkinkan untuk mengetahui bahwa sistem stabil.

Untuk menyelesaikan permasalahan dinamika mobile robot, pada penelitian ini menggunakan PID kontroler dengan fuzzy kompensator. Diagram blok keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Blok diagram keseluruhan sistem

Kompensator fuzzy digunakan untuk mengurangi error  $e_c$  yang disebabkan oleh dinamika dari mobile robot. Kompensator fuzzy dibutuhkan karena PID tidak cukup akurat untuk menyelesaikan permasalahan sistem nonlinier tersebut. Adapun blok diagram dari kontroler PID dengan kompensator fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kontroler PID dengan kompensator Fuzzy

Sesuai dengan Gambar 2.6, untuk mendapatkan  $C_c$  ditunjukkan pada persamaan (2.25).

$$C_c = C_r + \Delta C \quad (2.25)$$

$$C_c = \begin{bmatrix} \omega_R^c \\ \omega_L^c \end{bmatrix}$$

Dari persamaan (2.25) dapat diketahui bahwa *output* dari kompensator berupa kecepatan roda kanan dan kiri. Untuk dapat digunakan sebagai sinyal *input* pada dinamika robot, perlu dikonversikan menggunakan persamaan (2.20).

Dari metode yang digunakan pada penelitian tersebut kelebihannya adalah persamaan robot dibuat menjadi dua bagian, yaitu kinematika dan dinamika. Dari masing-masing persamaan tersebut diberikan kontroler untuk membuat error *tracking* menjadi 0. Namun pada penyelesaian dinamika robot, kontrol PID kurang cocok untuk digunakan, meskipun terdapat fuzzy kompensator, namun PID maupun

*membership function* fuzzy yang diperoleh dengan *tuning* secara manual akan sulit untuk didapatkan kondisi yang dapat menyelesaikan permasalahan dinamika sistem nonlinear (memerlukan bnyak percobaan dengan *trial and error*). Dengan kondisi tersebut, akan rentan terhadap perubahan dinamika pada lingkungan robot (adanya *disturbance*). Selain itu pemodelan kinematika robot yang digunakan untuk membentuk suatu formasi hanya menggunakan dua robot (*leader* dan *follower*) dan jika ditambahkan dengan satu atau lebih follower dengan menggunakan algoritma yang sama seperti pada persamaan (2.21) untuk masing masing robot, hal ini akan membuat titik acuan follower hanya tergantung pada *leader* sehingga tidak dapat mempertahankan jarak antar *follower*.

### 2.1.3. *Modelling and Control of a 2-DOF Planar Parallel Manipulator for Semiconductor Packaging Systems* [9]

Penelitian ini membahas mengenai pemodelan dan pengendalian robot 2-dof *planar parallel manipulator*. Metode yang digunakan untuk mengendalikan robot pada *XY plane* adalah CTC (*Computed Torque Control*) dengan PID.

Diketahui model kinematika dari robot ditunjukkan pada persamaan (2.26) dan (2.27).

$$x = (d_1 + d_3)/2 \quad (2.26)$$

$$y = \sqrt{l^2 - \frac{(d_3 - d_1)^2}{4}} + d_y$$

$$d_1 = x - \sqrt{l^2 - (y - d_y)^2} \quad (2.27)$$

$$d_3 = x + \sqrt{l^2 - (y - d_y)^2}$$

Sedangkan dinamika dari robot ditunjukkan pada persamaan (2.28)

$$F_p = M_p(q)\ddot{q} + C_p(q, \dot{q}) \quad (2.28)$$

Diketahui bahwa persamaan (2.28) merupakan model nonlinear dari robot. Untuk mempermudah pengaturan sistem nonlinear, pertama adalah mengaplikasikan *feedback linearization* untuk mengonversi sistem nonlinear menjadi sistem linear. Vektor  $F_p$  ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$F_p = M_p(q)u + C_p(q, \dot{q}) \quad (2.29)$$

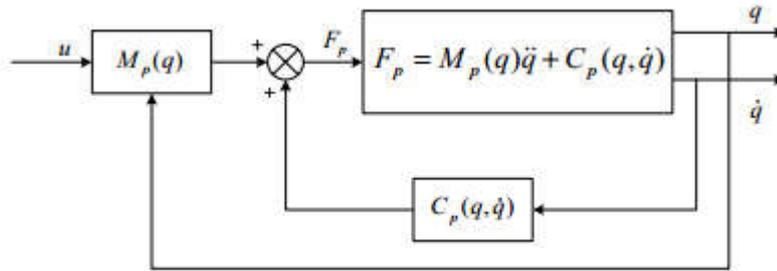
Sehingga dari persamaan (2.8) dan (2.29) didapatkan

$$M_p(q)\ddot{q} + C_p(q, \dot{q}) = M_p(q)u + C_p(q, \dot{q}) \quad (2.30)$$

$$\ddot{q} = u$$

Pada Gambar 2.7 ditunjukkan blok diagram linierisasi dari sistem yang digunakan. Jika  $\ddot{q}^d$  merupakan join akselerasi yang diinginkan dan  $v$  merupakan *control output* dari posisi *feedback loop*, maka  $u$  dapat dituliskan sebagai

$$u = \ddot{q} + v \quad (2.31)$$



Gambar 2.7 Blok Linierisasi

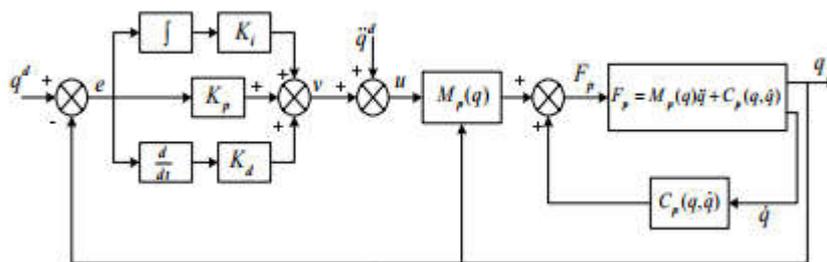
PID-CTC digunakan pada penelitian tersebut untuk mengendalikan posisi dari robot. PID kontroler ditunjukkan pada persamaan (2.32)

$$v = K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e} \quad (2.32)$$

dimana  $e$  merupakan error posisi antara yang diharapkan  $q^d$  dengan aktual posisi  $q$ . Substitusi persamaan (2.32) ke persamaan (2.30), didapatkan

$$F_p = M_p(q) [\ddot{q} + K_p e + K_i \int e dt + K_d \dot{e}] + C_p(q, \dot{q}) \quad (2.33)$$

Persamaan (2.33) merupakan PID-CTC yang digunakan untuk kontroler pada planar manipulator. Blok diagram PID-CTC ditunjukkan pada Gambar 2.8.

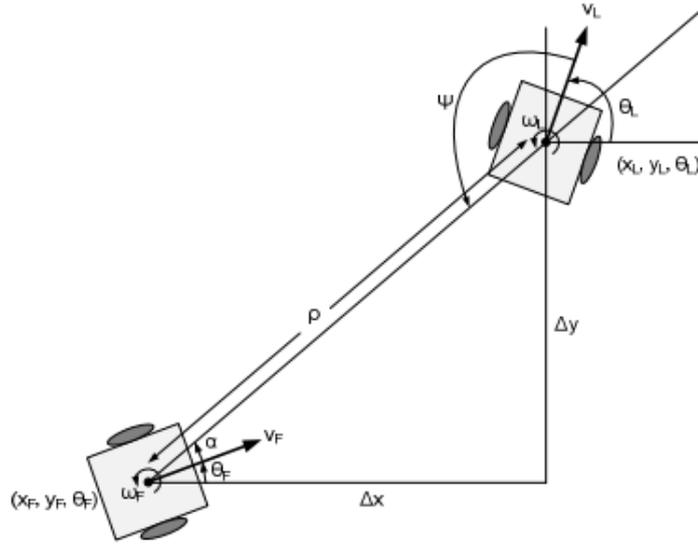


Gambar 2.8 PID-CTC

Dari metode PID-CTC yang digunakan, dapat diketahui bahwa CTC yang digunakan mampu menyelesaikan persoalan nonlinear dari sistem nonlinear. Sedangkan PID digunakan untuk tracking dari trayektori yang diinginkan. Namun konfigurasi tersebut hanya dapat digunakan pada robot dengan model dinamika dan kinematika dalam satu persamaan.

### 2.1.4. Control of Decentralized Geometric Formations of Mobile Robots [2]

Penelitian ini membahas mengenai pengaturan formasi robot dengan pendekatan *leader-follower* menggunakan metode *input-output linearization*. Pendekatan *leader-follower* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Pendekatan *Leader-follower* Pada Dua Robot *Mobile*

Dari Gambar 2.9 dapat diperoleh pemodelan untuk robot *follower* sebagai berikut:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x_L - x_F)^2 + (y_L - y_F)^2} \\ \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{y_L - y_F}{x_L - x_F} \right) - \theta_F \\ \varphi = \alpha + \theta_F - \theta_L + \pi \end{cases} \quad (2.34)$$

Dari persamaan (2.34) diturunkan sehingga didapatkan persamaan (2.35).

$$\begin{cases} \dot{\rho} = v_F \cos \alpha + v_L \cos \varphi \\ \dot{\alpha} = \frac{v_F \sin \alpha}{\rho} + \frac{v_L \sin \varphi}{\rho} - \dot{\theta}_F \\ \dot{\varphi} = \frac{v_F \sin \alpha}{\rho} + \frac{v_L \sin \varphi}{\rho} - \dot{\theta}_L \end{cases} \quad (2.35)$$

Selanjutnya didapatkan model kinematika dari robot *follower* yang ditunjukkan pada persamaan (2.36).

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 \\ \frac{\sin \alpha}{\rho} & -1 \\ \frac{\sin \alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_F \\ \omega_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\cos \varphi & 0 \\ \frac{\sin \varphi}{\rho} & 0 \\ \frac{\sin \varphi}{\rho} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ \omega_L \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Dari persamaan (2.36) diketahui terdapat tiga state yaitu  $\rho$ ,  $\alpha$ , dan  $\varphi$  dimana masing-masing variabel tersebut adalah jarak antara *leader* dengan *follower*, sudut antara *leader* dengan *follower* dan sudut yang terbentuk antara arah hadap *leader* dengan garis jarak antara *leader* dengan *follower*. Jika *set point* yang digunakan agar *follower* dapat membentuk suatu formasi adalah  $\rho$  dan  $\alpha$ , maka dapat digunakan *input-output linearization* yang ditunjukkan pada persamaan (2.37).

$$\begin{bmatrix} v_F \\ \omega_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} & -1 \\ \frac{\rho}{\rho} & -1 \end{bmatrix} \left[ \begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\cos \varphi & 0 \\ \frac{\sin \varphi}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ \omega_L \end{bmatrix} \right] \quad (2.37)$$

dimana untuk  $\dot{\rho}$  dan  $\dot{\alpha}$  dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_d - \rho \\ \alpha_d - \alpha \end{bmatrix}$$

Dari *state* yang digunakan pada persamaan (2.36) dapat diketahui bahwa untuk menentukan posisi *follower* digunakan  $\rho$  dan  $\alpha$ . Jika formasi dibentuk lebih dari 2 robot (lebih dari satu *follower*) dan menggunakan model yang sama, maka formasi hanya tergantung pada posisi leader saja, dan berarti masing-masing *follower* tidak memiliki informasi satu dengan lainnya. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya *collision* antar *follower* karena hanya mempertahankan jarak dengan *leader* saja dan tidak dengan *follower* lainnya. Disamping kekurangan dari model yang didesain, terdapat kelebihan dari metode kontrol yang digunakan. *Input-output linearization* yang digunakan untuk mengatur *follower* mampu menyelesaikan permasalahan nonlinear dari sistem.

## 2.2. Dasar Teori

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai dasar teori yang digunakan pada penelitian ini. Adapaun beberapa dasar teori tersebut adalah sebagai berikut:

### 2.2.1. Model Matematika DDMR (*Differential Drive Mobile Robot*)

Untuk dapat mengendalikan DDMR pada bidang dua dimensi (x, y) maka diperlukan persamaan kinematika dan dinamika DDMR. Persamaan kinematika DDMR diperlukan untuk dapat menganalisa pergerakan robot pada bidang dua dimensi, sedangkan untuk dinamika robot diperlukan untuk menganalisa kondisi dinamik dari robot.

Secara luas persamaan kinematika dari DDMR dijelaskan pada literatur [10]. Diberikan kecepatan linear pada DDMR sebagai berikut.

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \quad (2.38)$$

Sedangkan kecepatan angular adalah sebagai berikut

$$\omega = \frac{v_r - v_l}{2L} = r \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2} \quad (2.39)$$

Dimana  $v_r$  dan  $v_l$  merupakan kecepatan linear roda kanan dan kiri,  $r$  merupakan radius dari roda. Sedangkan  $L$  merupakan jarak antara titik pusat roda dengan garis tengah *body* robot.

Persamaan (2.38) dan (2.39) dapat direpresentasikan pada kecepatan titik pusat robot ( $\dot{x}_r$ ,  $\dot{y}_r$  dan  $\dot{\theta}$ ) yang ditunjukkan pada persamaan (2.40).

$$\begin{cases} \dot{x}_r = r \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \\ \dot{y}_r = 0 \\ \dot{\theta} = R \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2} \end{cases} \quad (2.40)$$

Sehingga dalam bentuk perkalian matriks sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{2b} & \frac{r}{2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Dari persamaan (2.41) didapatkan persamaan kecepatan DDMR pada *inertial frame* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Atau dapat juga direpresentasikan dalam bentuk seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Persamaan dinamika robot DDMR dapat diturunkan menggunakan pendekatan lagrange-euler. Persamaan lagrange dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \Lambda^T(q)^\lambda \quad (2.44)$$

Diaman  $L = K - P$  merupakan fungsi lagrange,  $K$  merupakan energi kinetik dari sistem,  $P$  merupakan energy potensial dari sistem,  $q_i$  merupakan *generalized*

*coordinates*,  $F$  merupakan vector gaya,  $\Lambda$  merupakan matriks *constraints*, dan  $\lambda$  merupakan vector dari lagrange multipliers.

Untuk DDMR, dipilih *generalized coordinates* sebagai berikut

$$q = [x_a \quad y_a \quad \theta \quad \varphi_r \quad \varphi_l]^T \quad (2.45)$$

Sedangkan untuk energi kinetik dari *body* robot ditunjukkan pada persamaan (2.46), energi kinetik untuk masing-masing roda ditunjukkan pada persamaan (2.47) dan (2.48). Untuk energi potensial adalah 0 karena robot diasumsikan bergerak pada bidang dua dimensi dimana tidak ada gerakan atau gaya pada koordianat z.

$$K_c = \frac{1}{2}m_c v_c^2 + \frac{1}{2}I_c \dot{\theta}^2 \quad (2.46)$$

$$K_{wr} = \frac{1}{2}m_w v_{wr}^2 + \frac{1}{2}I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w \dot{\varphi}_r^2 \quad (2.47)$$

$$K_{wl} = \frac{1}{2}m_w v_{wl}^2 + \frac{1}{2}I_m \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}I_w \dot{\varphi}_l^2 \quad (2.48)$$

Diaman  $m_c$  merupakan massa robot tanpa roda dan actuator,  $m_w$  merupakan massa roda dan aktuator,  $I_c$  merupakan momen inersia DDMR dari sumbu vertical melalui pusat massa,  $I_w$  merupakan momen inersia roda dan motor, dan  $I_m$  merupakan momen inersia roda di sekitar diameter roda.

Semua kecepatan kemudian direpresentasikan ke bentuk *generalized coordinates* menggunakan persamaan kecepatan pada *frame* inersia DDMR.

$$v_i^2 = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 \quad (2.49)$$

Maka didapatkan

$$\begin{cases} x_c = x_a + d \cos \theta \\ y_c = y_a + d \sin \theta \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\begin{cases} x_{wr} = x_a + b \cos \theta \\ y_{wr} = y_a + b \sin \theta \end{cases} \quad (2.51)$$

$$\begin{cases} x_{wl} = x_a - b \cos \theta \\ y_{wl} = y_a + b \sin \theta \end{cases} \quad (2.52)$$

Menggunakan persamaan (2.50)-(2.52) dan dengan persamaan (2.46)-(2.48) maka energi kinetik total adalah sebagai berikut

$$K = \frac{1}{2}m(\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) - m_c d \dot{\theta} (\dot{y}_a \cos \theta - \dot{x}_a \sin \theta) + \frac{1}{2}I_w(\dot{\varphi}_r^2 + \dot{\varphi}_l^2) + \frac{1}{2}I\dot{\theta}^2 \quad (2.53)$$

Dimana  $m = m_c + 2m_w$ , dan  $I = I_c + m_c d^2 + 2m_w b^2 + 2I_m$ .

Menggunakan persamaan (2.44), dari persamaan (2.53) didapatkan persamaan-persamaan berikut

$$m\ddot{x}_a - md\ddot{\theta} \sin \theta - md\dot{\theta}^2 \cos \theta = C_1 \quad (2.54)$$

$$m\ddot{x}_a - md\ddot{\theta} \cos \theta - md\dot{\theta}^2 \sin \theta = C_2 \quad (2.55)$$

$$I\ddot{\theta} - md\ddot{x}_a \sin \theta + md\ddot{y}_a \cos \theta = C_3 \quad (2.56)$$

$$I_w\ddot{\phi}_r = \tau_r + C_4 \quad (2.57)$$

$$I_w\ddot{\phi}_l = \tau_l + C_5 \quad (2.58)$$

Dimana ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ ) merupakan koefisien yang dikorelasikan ke *kinematics constraints*. Dari persamaan (2.54)-(2.58) dapat dituliskan kebentuk persamaan seperti berikut.

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} = B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \quad (2.59)$$

Dimana

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -md \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & md \cos \theta & 0 & 0 \\ -md \sin \theta & md \cos \theta & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_w \end{bmatrix},$$

$$V(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -md\dot{\theta} \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -md\dot{\theta} \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B(q) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ dan}$$

$$\Lambda^T(q)\lambda = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & \cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta & \sin \theta \\ 0 & b & -b \\ 0 & -r & 0 \\ 0 & 0 & -r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya adalah menghilangkan  $\Lambda^T(q)\lambda$  pada persamaan (2.59) karena lagrange multipliers  $\lambda_i$  tidak diketahui. Pertama, mendefinisikan vector yang telah direduksi.

$$\eta = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Selanjutnya, merepresentasikan *generalized coordinates* menggunakan persamaan kinematika pada persamaan (2.42), maka didapatkan.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}_r \\ \dot{\psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \theta & r \sin \theta \\ r \sin \theta & -r \cos \theta \\ \frac{r}{b} & -\frac{r}{b} \\ 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\psi}_r \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Persamaan (2.59) dapat dituliskan dalam bentuk persamaan lain dengan cara sebagai berikut.

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (2.62)$$

Maka didapatkan

$$S^T(q)\Lambda^T(q) = 0 \quad (2.63)$$

Kemudian menurunkan persamaan (2.62) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\ddot{q} = \dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \quad (2.64)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.62) dan (2.64) ke persamaan (2.59) maka didapatkan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} M(q)[\dot{S}(q)\eta + S(q)\dot{\eta}] + V(q, \dot{q})[S(q)\eta] &= B(q)\tau - \Lambda^T(q)\lambda \\ S^T(q)M(q)S(q)\dot{\eta} + S^T(q)[M(q)\dot{S}(q) + V(q, \dot{q})S(q)]\eta &= S^T(q)B(q)\tau - \\ S^T(q)\Lambda^T(q)\lambda \end{aligned} \quad (2.65)$$

Dari persamaan (2.65) dapat didefinisikan matriks baru sebagai berikut

$$\bar{M}(q) = S^T(q)M(q)S(q),$$

$$\bar{V} = S^T(q)M(q)\dot{S}(q) + S^T(q)V(q, \dot{q})S(q),$$

$$\bar{B} = S^T(q)B(q)$$

Sehingga dinamika DDMR dapat direduksi menjadi persamaan berikut.

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (2.66)$$

Dimana

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} I_w + \frac{r^2}{4b^2}(mL^2 + I) & \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I) \\ \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 - I) & I_w + \frac{r^2}{4b^2}(mb^2 + I) \end{bmatrix},$$

$$\bar{V}(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{r^2}{2b}m_c d\dot{\theta} \\ -\frac{r^2}{2b}m_c d\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}$$

Dari persamaan (2.66) dapat diketahui bahwa  $\tau$  merupakan sinyal *input* dan *output* dari persamaan tersebut adalah kecepatan putaran roda DDMR ( $\dot{\phi}_r$  dan  $\dot{\phi}_r$ ).

### 2.2.2. Kontroler CTC

CTC (*Computed Torque Control*) merupakan metode kontrol yang mengaplikasikan *feedback linearization* pada sistem nonlinear [11]. Pada penelitian tentang robot dengan model dinamika [9] yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.1.3, berhasil menggunakan metode CTC untuk menyelesaikan persoalan nonlinear dari sistem tersebut.

Jika diketahui suatu sistem DDMR seperti pada persamaan (2.66), maka dapat dipilih sinyal kontrol  $\tau$  seperti pada persamaan (2.67).

$$\bar{M}(q)a + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau \quad (2.67)$$

Selanjutnya adalah mensubstitusikan persamaan (2.67) ke persamaan (2.66) sehingga didapatkan sebagai berikut.

$$\bar{B}(q)^{-1}(\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta) = \bar{B}(q)^{-1}(\bar{M}(q)a + \bar{V}(q, \dot{q})\eta) \quad (2.68)$$

Dari persamaan (2.68) dapat diketahui bahwa nonlinear dari sistem tersebut mampu dihilangkan sehingga.

$$\dot{\eta} = a \quad (2.69)$$

Jika  $\dot{\eta}^d$  merupakan percepatan putaran roda DDMR yang diinginkan dan  $u$  merupakan *control output*, maka.

$$a = \dot{\eta}^d + u \quad (2.70)$$

Sinyal  $u$  merupakan keluaran dari kontroler dari *feedback loop* sehingga jika digunakan kontroler PD maka  $u$  dapat dituliskan sebagai berikut.

$$u = K_p e \quad (2.71)$$

Dimana  $e = \dot{\eta}^d - \dot{\eta}$  maka sinyal kontrol P-CTC untuk DDMR dapat dituliskan seperti pada persamaan (2.72).

$$\tau = \bar{B}(q)^{-1}(\bar{M}(q)[\dot{\eta} + K_p e] + \bar{V}(q, \dot{q})\eta) \quad (2.72)$$

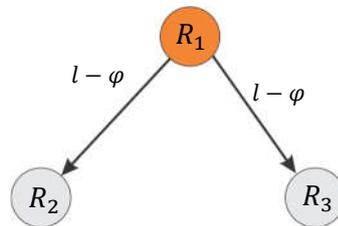
Dimana  $K_p$  merupakan diagonal matriks  $2 \times 2$ .

### 2.2.3. Pendekatan *Leader-Follower* Pada Pengaturan Formasi

Pada permasalahan pengaturan formasi, pendekatan *Leader-follower* telah berhasil digunakan pada penelitian yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.1.1 dan 2.1.2 serta pada penelitian [12], [2].

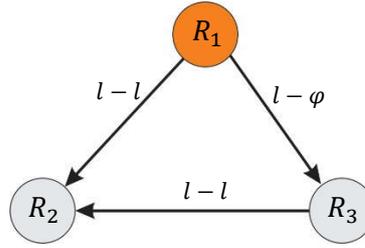
Pada literatur [5] digunakan metode *separation-bearing controller* (SBC) dimana untuk membentuk suatu formasi dilakukan dengan cara menentukan jarak relatif *leader* dengan *follower* dan sudut yang terbentuk antara arah hadap *leader* dengan jarak relatif yang dinotasikan sebagai  $l - \varphi$ . Pada literatur tersebut juga dibahas mengenai *separation-separation controller* (SSC) dimana formasi dapat dibentuk dari masing-masing jarak antara *leader* dengan *follower* dan terdapat satu *follower* yang memperoleh informasi jarak dari kedua robot lainnya metode tersebut dinotasikan sebagai  $l - l$ . Untuk kasus SBC dapat digunakan pada formasi 2 robot sedangkan untuk SSC digunakan dengan formasi lebih dari dua robot. Kedua metode tersebut telah berhasil diterapkan pada penelitian [6].

Jika diketahui  $R_1$  adalah *leader*,  $R_2$  dan  $R_3$  adalah *follower*, maka secara sederhana alur informasi pada pendekatan *leader-follower* SBC ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bentuk umum pendekatan SBC

Dari Gambar 2.10 jika informasi yang dikirimkan dari *leader* ke *follower* adalah posisi *leader* maka formasi dapat dibentuk hanya dengan menentukan jarak *leader* dengan *follower* (informasi hanya dari *leader*). Untuk kasus 2 robot memang cara ini dapat dilakukan dengan baik. Namun, untuk *follower* lebih dari 2, agar posisi antara keseluruhan robot dapat dipertahankan maka harus terdapat informasi yang dikirimkan dari *follower* satu ke *follower* lainnya (SSC). Secara sederhana formasi *leader-follower* dengan pendekatan SSC ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Bentuk umum formasi SSC

Dari Gambar 2.11 dapat diketahui bahwa terdapat informasi yang dikirimkan  $R_1$  ke  $R_2$  dan  $R_3$  ke  $R_2$ . Jika nilai yang diharapkan untuk membentuk suatu formasi adalah jarak pada masing-masing robot, maka formasi dapat dibentuk dan hal ini sekaligus akan terhindar dari tabrakan antar *follower* karena  $R_2$  akan selalu menjaga jarak yang telah ditentukan dengan  $R_3$ .

#### 2.2.4. Disturbance Observer untuk Nonlinear System

*Disturbance* pada suatu sistem akan menyebabkan *error tracking* ketika suatu kontroler tidak memiliki metode untuk menanganinya. Diperlukan suatu metode untuk dapat mereduksi *error tracking* yang disebabkan adanya *disturbance* tersebut.

Pada sistem yang bersifat nonlinear dapat menggunakan DOBC (*Disturbance Observer Based Control*) untuk menangani *disturbance* dari luar sistem [7]. Metode ini mampu mengurangi *error tracking* yang disebabkan oleh *disturbance* dan dapat digunakan dengan kontroler nonlinear apapun sehingga lebih fleksibel.

Sistem nonlinear dapat dituliskan seperti pada persamaan (2.74).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g_1(x(t))u + g_2(x(t))d(t) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (2.74)$$

Dimana  $x$  merupakan *state vector*,  $u$  merupakan *input*, dan  $d$  merupakan *external disturbance*. *Disturbance* dihasilkan oleh sistem linear dari luar yang dapat dituliskan pada persamaan (2.75).

$$\begin{cases} \dot{\xi} = A\xi \\ d = C\xi \end{cases} \quad (2.75)$$

Untuk mengestimasi *disturbance* yang tidak diketahui  $d$ , maka *disturbance observer* dituliskan pada persamaan (2.76).

$$\begin{cases} \dot{\hat{\xi}} = A\hat{\xi} + l(x)(\dot{x} - f(x) - g_1(x)u - g_2(x)\hat{d}) \\ \hat{d} = C\hat{\xi} \end{cases} \quad (2.76)$$

Dimana  $l(x)$  merupakan gain untuk observer.

*Disturbance observer* pada persamaan (2.76) belum dapat diimplementasikan karena harus memerlukan penurunan *state*. Untuk mengestimasi *disturbance* dapat digunakan persamaan (2.77)

$$\begin{cases} \dot{z} = (A - l(x)g_2(x)C)z + Ap(x) - l(x) \\ \quad (g_2(x)Cp(x) + f(x) + g_1(x)u) \\ \hat{\xi} = z + p(x) \\ \hat{d} = C\hat{\xi} \end{cases} \quad (2.77)$$

dimana  $z$  merupakan *internal state variables* dan  $p(x)$  merupakan fungsi nonlinear yang didesain.

## BAB III

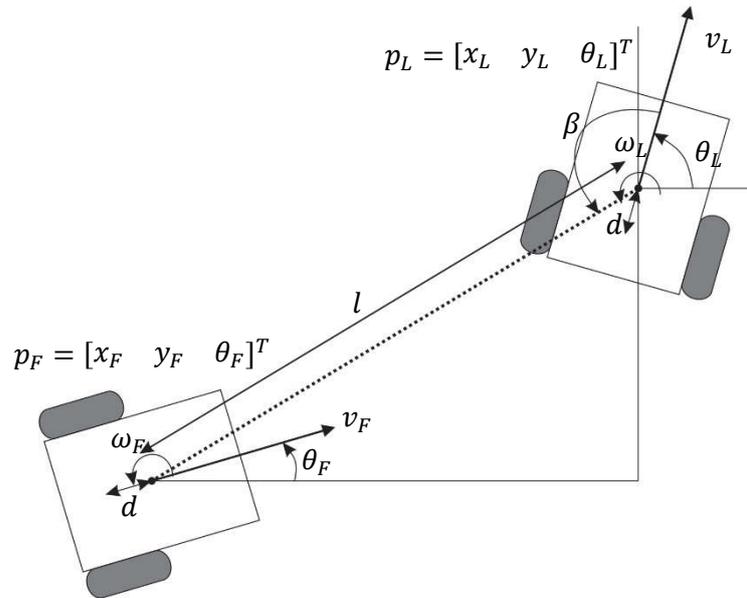
### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Pendekatan *Leader-follower* Untuk Pengaturan Formasi

Pada penelitian ini digunakan dua metode yaitu SBC dan SSC. Kedua metode tersebut akan diterapkan pada robot *follower* yang diatur berdasarkan jarak masing-masing *follower* terhadap *leader*.

##### 3.1.1. Rancangan SBC

Pada penelitian ini, akan digunakan metode SBC untuk menentukan posisi *follower* terhadap *leader*. Seperti pada literatur [5], metode SBC merupakan pengaturan posisi robot *follower* terhadap *leader* dengan referensi  $l$  dan  $\beta$  yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Pendekatan *Leader-follower* dengan SBC

Dari Gambar 3.1 maka didapatkan persamaan untuk robot *follower* sebagai berikut.

$$l = \sqrt{(x_L - x_F - d \cos \theta_F)^2 + (y_L - y_F - d \sin \theta_F)^2} \quad (3.1)$$

$$\beta = \pi - \text{atan2}(y_F + d \sin \theta_F - y_L, x_L - x_F - d \cos \theta_F) - \theta_L \quad (3.2)$$

Dari persamaan (3.1) dan (3.2) diturunkan sehingga mendapatkan persamaan-persamaan berikut.

$$\dot{l} = v_F \cos \gamma - v_L \cos \beta + d\omega_F \sin \gamma \quad (3.3)$$

$$\dot{\beta} = \frac{v_L \sin \beta}{l} - \frac{v_L \sin \gamma}{l} + \frac{d\omega_F \cos \gamma}{l} - \omega_L \quad (3.4)$$

Dimana  $\gamma = \theta_L - \theta_F + \beta$ ,  $\omega_L = \dot{\theta}_L$  dan  $\omega_F = \dot{\theta}_F$

Dari persamaan (3.3) dan (3.4) dapat direpresentasikan menjadi persamaan (3.5).

$$\dot{z}_F = G_F(z_F, \gamma)u_F + F_F(z_F)u_L \quad (3.5)$$

Dimana

$$\dot{z}_F = [\dot{l} \quad \dot{\beta}]^T,$$

$$G_F(z_F, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & d \sin \gamma \\ -\frac{\sin \gamma}{l} & \frac{d \cos \gamma}{l} \end{bmatrix}, F_F(z_F) = \begin{bmatrix} -\cos \beta & 0 \\ \frac{\sin \beta}{l} & -1 \end{bmatrix},$$

$$u_F = [v_F \quad \omega_F]^T \text{ dan } u_L = [v_L \quad \omega_L]^T$$

Persamaan (3.5) merupakan persamaan nonlinear maka dapat diselesaikan menggunakan *input-output linearization* menggunakan persamaan (3.6).

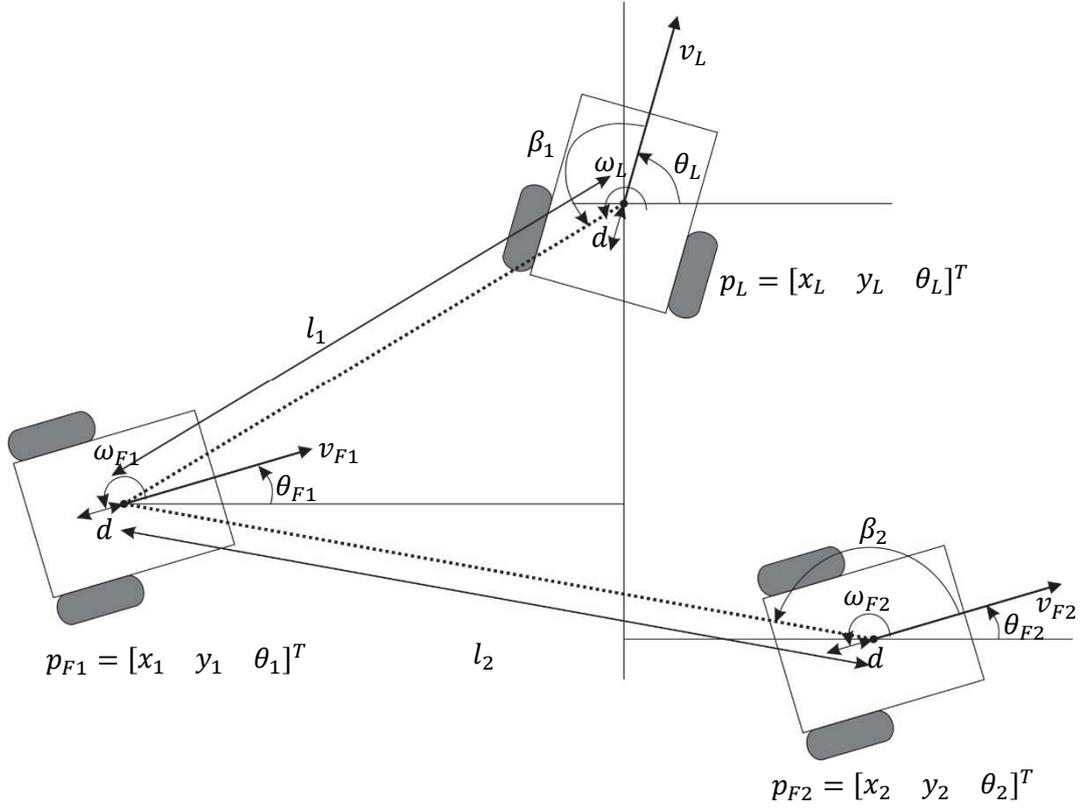
$$u_F = G_F^{-1}(s_F - F_F u_L) \quad (3.6)$$

dimana  $s_F = k(z_F^d - z_F)$ ,  $z_F^d$  merupakan nilai yang diharapkan. Karena parameter yang menjadi referensi adalah  $l$  dan  $\beta$ , maka persamaan (3.6) dapat dituliskan menjadi persamaan (3.7).

$$\begin{bmatrix} v_F \\ \omega_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & d \sin \gamma \\ -\frac{\sin \gamma}{l} & \frac{d \cos \gamma}{l} \end{bmatrix}^{-1} \left( \begin{bmatrix} k_1(l^d - l) \\ k_2(\beta^d - \beta) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\cos \beta & 0 \\ \frac{\sin \beta}{l} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ \omega_L \end{bmatrix} \right) \quad (3.7)$$

### 3.1.2. Rancangan SSC

Pada penelitian ini, juga akan digunakan metode SSC untuk membentuk suatu formasi robot. Seperti halnya pada literatur [5] metode SSC yang digunakan menggunakan parameter  $l_1$  dan  $l_2$  untuk menentukan posisi dari *follower*, sesuai dengan yang telah dijelaskan pada sub bab 2.2.3 formasi robot ditentukan oleh jarak antar leader dengan *follower* serta *follower* dengan *follower* lainnya. Secara sederhana metode SSC secara geometri ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pendekatan *Leader-follower* dengan SSC

Dari Gambar 3.2 maka didapatkan persamaan untuk *follower*  $R_{f1}$  sebagai berikut.

$$l_1 = \sqrt{(x_L - x_1 - d \cos \theta_{F1})^2 + (y_L - y_1 - d \sin \theta_{F1})^2} \quad (3.8)$$

$$l_2 = \sqrt{(x_2 - x_1 - d \cos \theta_{F1})^2 + (y_2 - y_1 - d \sin \theta_{F1})^2} \quad (3.9)$$

Dari persamaan (3.8) dan (3.9) diturunkan sehingga mendapatkan persamaan-persamaan berikut.

$$\dot{l}_1 = v_{F1} \cos \gamma_1 - v_L \cos \beta_1 + d \omega_{F1} \sin \gamma_1 \quad (3.10)$$

$$\dot{l}_2 = v_{F1} \cos \gamma_2 - v_{F2} \cos \beta_2 + d \omega_{F1} \sin \gamma_2 \quad (3.11)$$

dimana  $\omega_{F1} = \dot{\theta}_{F1}$ ,  $\omega_L = \dot{\theta}_L$ ,  $\gamma_1 = \theta_L - \theta_{F1} + \beta_1$ , dan  $\gamma_2 = \theta_{F2} - \theta_{F1} + \beta_2$ .

Pada kasus ini, robot dapat membentuk formasi menggunakan dua parameter  $l_1$  dan  $l_2$ , maka untuk mendesain kontroler menggunakan *input-output linearization* dapat menggunakan persamaan (3.10) dan (3.11), sehingga didapatkan persamaan (3.12).

$$\begin{cases} v_{F1} = \frac{k_1(l_1^d - l_1) + v_L \cos \beta_1 - d\omega_{F1} \sin \gamma_1}{\cos \gamma_1} \\ \omega_{F1} = \frac{k_1(l_1^d - l_1) \cos \gamma_2 + v_L \cos \beta_1 \cos \gamma_2}{d \sin(\gamma_1 - \gamma_2)} + \frac{v_{F2} \cos \beta_2 \cos \gamma_1 - k_2(l_2^d - l_2) \cos \gamma_1}{d \sin(\gamma_1 - \gamma_2)} \end{cases} \quad (3.12)$$

Untuk persamaan (3.7) dan (3.12), stabilitas sistem dibahas pada literatur [13]. Jika *output* kontroler merupakan kecepatan linear  $v_{F1}$  dan angular  $\omega_{F1}$ , maka untuk menyesuaikan dengan kondisi dinamika sistem dinamana referensi berupa kecepatan roda kanan  $\dot{\phi}_r$  dan kiri  $\dot{\phi}_l$  dapat dikonversikan menggunakan persamaan (3.13).

$$\begin{cases} \dot{\phi}_r = \frac{(v+b\omega)}{R} \\ \dot{\phi}_l = \frac{(v-b\omega)}{R} \end{cases} \quad (3.13)$$

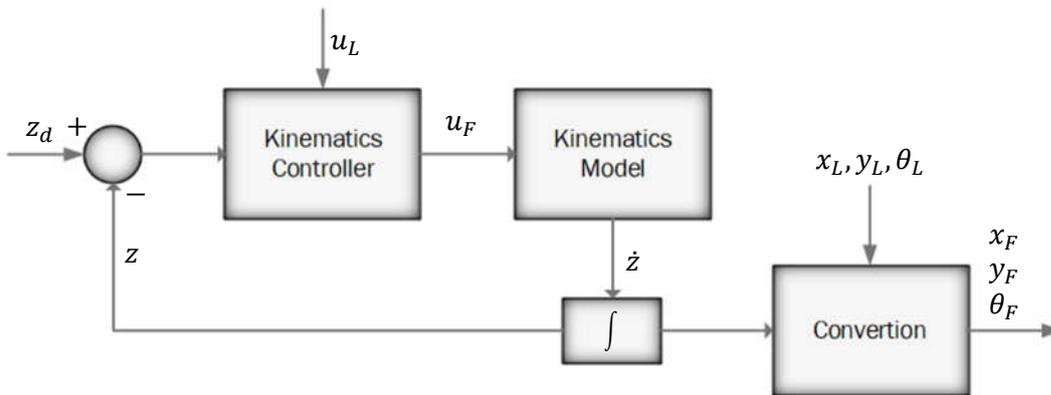
Sedangkan untuk mengonversi kembali ke bentuk kecepatan linear dan angular ditunjukkan pada persamaan (3.14).

$$\begin{cases} v_F = R \frac{(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \\ \omega_F = R \frac{(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2L} \end{cases} \quad (3.14)$$

Untuk mengetahui posisi dari robot pada bidang dua dimensi  $(x, y)$  dapat digunakan persamaan:

$$\begin{cases} x_F = x_L + l \cos(\theta_L + \beta) \\ y_F = y_L - l \sin(\theta_L + \beta) \end{cases} \quad (3.15)$$

Blok diagram dari keseluruhan pengaturan formasi untuk *follower* ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Blok Pengaturan Formasi

### 3.2. Rancangan CTC dengan *Disturbance Observer*

Pada penelitian ini akan dirancang CTC sebagai kontroler dinamika DDMR. Selain itu, untuk mengurangi pengaruh *disturbance* pada sistem, dirancang *nonlinear disturbance observer* (NDO). NDO yang dirancang digunakan untuk mengestimasi *disturbance*, hasil estimasi tersebut akan dimasukkan ke CTC untuk kompensasi *disturbance* pada robot.

Jika diketahui model dinamika sistem tanpa adanya *disturbance* ditunjukkan pada persamaan (2.66), maka sistem dengan adanya *disturbance* dapat dituliskan pada persamaan (3.16).

$$\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta = \bar{B}(q)\tau + \tau_d \quad (3.16)$$

dimana  $\tau_d$  merupakan vektor *disturbance*  $2 \times 1$ .

Dari persamaan (3.16) maka CTC dengan kontroler P dapat dituliskan pada persamaan (3.17).

$$\tau = \bar{B}^{-1}(\bar{M}(q)[\dot{\eta} + K_p e] + \bar{V}(q, \dot{q})\eta) \quad (3.17)$$

dimana  $K_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2})$  dan  $e = \eta_d - \eta$ . Sedangkan untuk CTC dengan NDO ditunjukkan pada persamaan (3.18).

$$\tau = \bar{B}^{-1}(\bar{M}(q)[\dot{\eta}^d + K_p e] + \bar{V}(q, \dot{q})\eta - \hat{\tau}_d) \quad (3.18)$$

Jika persamaan (3.18) disubstitusikan ke persamaan (3.16) (dengan asumsi  $\tau_d$  dan  $\hat{\tau}_d$  saling meniadakan) maka akan didapatkan dinamika *closed-loop* sebagai berikut

$$\dot{e} + K_p e = 0 \quad (3.19)$$

Dari persamaan (3.19) dapat diketahui bahwa sistem akan stabil jika  $K_p > 0$

Untuk mendapatkan persamaan estimasi  $\tau_d$ , persamaan (3.17) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\tau_d = \bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta - \bar{B}(q)\tau \quad (3.20)$$

Sehingga NDO dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{\hat{\tau}}_d = -L(q)(\hat{\tau}_d - \tau_d) \quad (3.21)$$

dari persamaan (3.20) didapatkan.

$$\dot{\hat{\tau}}_d = -L(q)\hat{\tau}_d + L(q)(\bar{M}(q)\dot{\eta} + \bar{V}(q, \dot{q})\eta - \tau) \quad (3.22)$$

dimana  $L(q)$  merupakan *gain observer*. Karena  $\dot{\eta}$  sulit untuk didapatkan, maka persamaan (3.22) tidak dapat secara langsung digunakan. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut digunakan notasi  $\tau_z$ , dari persamaan (3.22) sebagai berikut:

$$\dot{\tau}_z \equiv -L(q)\hat{\tau}_d + 0 + L(q)(\bar{V}(q, \dot{q})\eta - \tau) \quad (3.23)$$

$$\dot{\tau}_z \equiv -L(q)\tau_z + p(\dot{q}) + L(q)(\bar{V}(q, \dot{q})\eta - \tau) \quad (3.24)$$

dimana  $p \equiv \bar{M}(q)\dot{\eta}$ . Dari persamaan (3.23) dan (3.24) didapatkan

$$\hat{\tau}_d = \tau_z + p(\dot{q}) \quad (3.25)$$

$$\dot{\hat{\tau}}_d = \dot{\tau}_z + p'(\dot{q})\dot{\eta} \quad (3.26)$$

Dari persamaan (3.23) – (3.26) penggunaan  $\dot{\eta}$  untuk NDO akan dapat dihilangkan.

Berdasarkan persamaan (3.22) dan (3.23) didapatkan

$$\dot{\hat{\tau}}_d - \dot{\tau}_z = L(q)\bar{M}(q)\dot{\eta} \quad (3.27)$$

Dari persamaan (3.26) dan (3.27) didapatkan

$$L(q)\bar{M}(q)\dot{\eta} = p'(\dot{q})\dot{\eta} \quad (3.28)$$

$$p'(\dot{q}) = L(q)\bar{M}(q) \quad (3.29)$$

Dimana  $p(\dot{q})$  pada persamaan (3.24) dan (3.26) dapat ditentukan dari persamaan berikut.

$$p(\dot{q}) = C * \eta \quad (3.30)$$

dimana  $C$  merupakan matriks konstan, maka dapat diketahui

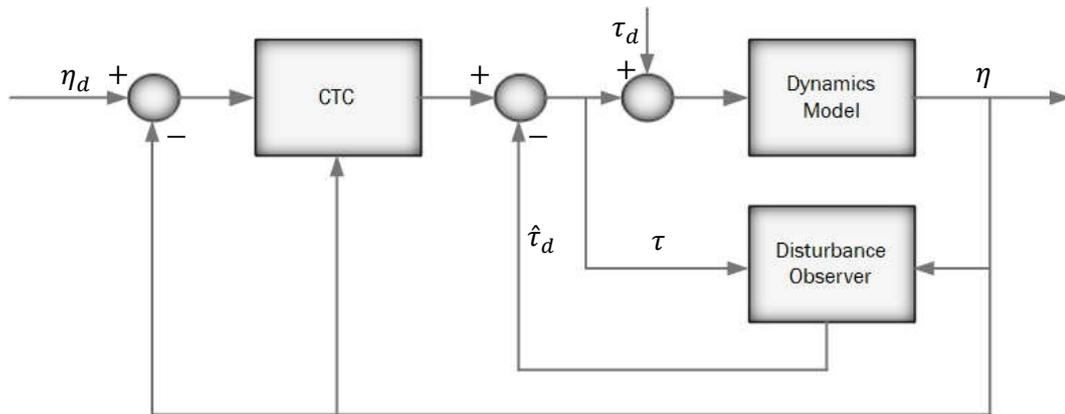
$$p'(\dot{q}) = C \text{ dan } L(q) = C\bar{M}(q)^{-1} \quad (3.31)$$

Sehingga didapatkan persamaan baru hasil modifikasi dari persamaan (3.22) sebagai berikut.

$$\dot{\tau}_z = L(\bar{V}(q, \dot{q})\eta - \bar{B}(q)\tau - \hat{\tau}_d) \quad (3.32)$$

$$\hat{\tau}_d = \tau_z + p(\dot{q}) \quad (3.33)$$

Dari persamaan (3.18) dapat diketahui bahwa ketika hasil estimasi  $\hat{\tau}_d$  memiliki nilai yang mendekati *disturbance*  $\tau_d$ , maka pengaruh  $\tau_d$  terhadap sistem dapat dikurangi. Adapun diagram blok untuk dinamika sistem ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Blok diagram dinamika DDMR dengan CTC-disturbance observer

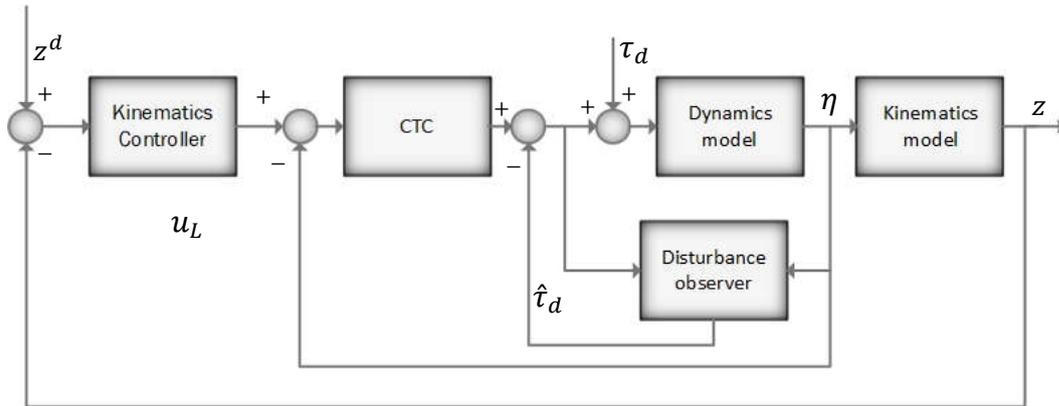
### 3.3. Rancangan Keseluruhan Sistem

Diketahui bahwa pada rancangan penelitian ini model dinamika robot disertai *disturbance* yang digunakan ditunjukkan pada persamaan (3.16). Permasalahan nonlinear dari model yang digunakan dapat diselesaikan menggunakan CTC, sedangkan untuk permasalahan adanya *disturbance* diselesaikan menggunakan *disturbance observer* yang ditunjukkan pada persamaan (3.32) dan persamaan (3.33).

Untuk permasalahan pengaturan formasi, pada rancangan penelitian ini menggunakan pendekatan *leader-follower* dengan metode SBC dan SSC. Kedua metode digunakan untuk membentuk suatu formasi berdasarkan jarak dan sudut *bearing*.

Dari model kinematika dan dinamika robot, maka dapat didesain sistem secara keseluruhan dengan mengombinasikan kinematika dan dinamika. Model dinamika robot merupakan *inner-loop* dari keseluruhan sistem dimana referensinya berupa kecepatan roda kanan dan kiri. Sedangkan kinematika robot merupakan *outter-loop* dengan referensi posisi dari robot yang diharapkan ketika membentuk suatu formasi. Secara umum, sistem pada *follower* robot ditunjukkan pada Gambar 3.5.

Dari rancangan keseluruhan sistem yang telah didesain diharapkan robot *follower* dapat tetap mempertahankan formasi yang dibentuk ketika adanya *disturbance*.



Gambar 3.5 Blok Diagram Rancangan CTC dengan *disturbance observer*

### 3.4. Rancangan Kontroler untuk Leader

Pada penelitian ini, untuk *tracking* trayektori diperlukan kontroler pada robot *leader*. Adapun kontroler yang digunakan adalah *input-output feedback linearization*.(IOFL) Model kinematika *leader* ditunjukkan pada persamaan (3.34).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

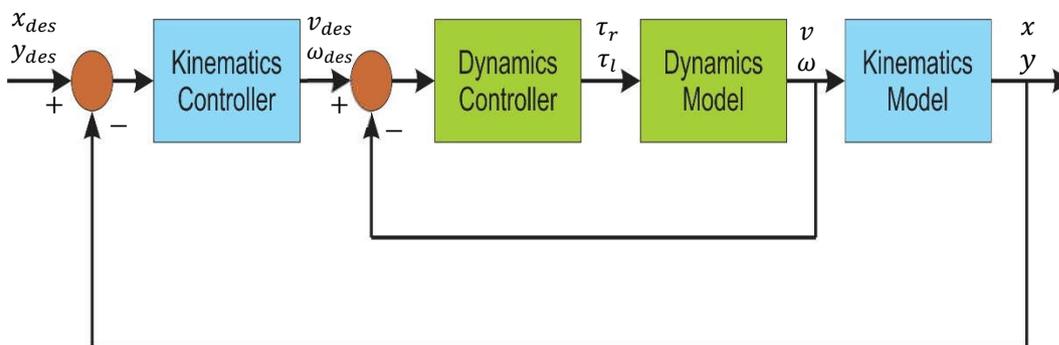
Adapun IOFL ditunjukkan pada persamaan (3.35). Sedangkan untuk model dinamika dari leader digunakan persamaan (3.16).

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_{des} + k_{L1}(x_{des} - x) \\ \dot{y}_{des} + k_{L2}(y_{des} - y) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Dimana

$$\dot{x}_{des} = \frac{dx_{des}}{dt}, \dot{y}_{des} = \frac{dy_{des}}{dt},$$

sedangkan  $x_{des}$  dan  $y_{des}$  merupakan koordinat  $x$  dan  $y$  yang diinginkan. Blok diagram untuk leader ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Blok diagram leader

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, akan dibahas mengenai hasil perancangan pada bab III. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah perancangan yang telah dilakukan berhasil atau masih memiliki kekurangan. Formasi robot dibentuk dari empat buah robot. Robot pertama merupakan *leader* robot yang akan mengikuti trayektori, sedangkan tiga robot lainnya merupakan *follower* robot yang akan mengikuti *leader* dengan ketentuan jarak dan sudut *bearing* untuk robot ke 2 dan ke 3 sedangkan robot ke 4 berdasarkan jarak antar *follower*. Akan dilakukan beberapa tahap pengujian untuk kinerja CTC tanpa adanya *disturbance* dan dengan adanya *disturbance*, serta pengujian dengan NDO sebagai kompensator yang akan dijelaskan lebih lanjut pada bab ini.

#### 4.1. Pengujian CTC

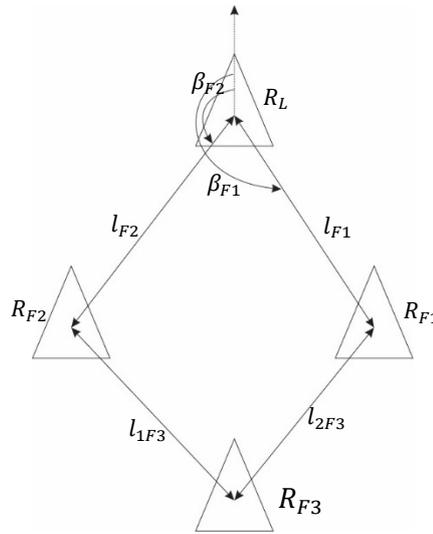
Pada tahap ini akan diuji CTC tanpa adanya *disturbance* dan dengan diberikan *disturbance*. Adapun parameter robot yang digunakan untuk pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Parameter Robot

| Parameter | Nilai parameter          |
|-----------|--------------------------|
| $r$       | 0.025m                   |
| $b$       | 0.1m                     |
| $d$       | 0.05m                    |
| $m_c$     | 3kg                      |
| $m_w$     | 0.01kg                   |
| $I_c$     | 1.5625kg.m <sup>2</sup>  |
| $I_w$     | 0.0005kg.m <sup>2</sup>  |
| $I_m$     | 0.00025kg.m <sup>2</sup> |

Pada penelitian ini, kriteria formasi dapat dibentuk atau terpenuhi jika robot *follower 1* ( $R_{F1}$ ) mampu mempertahankan jarak dengan  $|e_{l_{F1}}| < 0.038m$  dan error bearing  $|e_{\beta_{F1}}| < 0.19rad$ , untuk robot *follower 2* ( $R_{F2}$ )  $|e_{l_{F2}}| < 0.038m$  dan error bearing  $|e_{\beta_{F2}}| < 0.19rad$ . Sedangkan untuk robot *follower 3* mampu mempertahankan jarak dengan  $|e_{l_{1F3}}| < 0.038m$  dan  $|e_{l_{2F3}}| < 0.038m$ .

Pada penelitian ini,  $R_{F1}$  dan  $R_{F2}$  menggunakan SBC sedangkan  $R_{F3}$  menggunakan SSC. Secara sederhana bentuk formasi robot ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Formasi yang diharapkan

#### 4.1.1. Pengujian CTC Tanpa *Diturbance*

Pada tahap ini, robot diuji untuk membentuk formasi seperti pada Gambar 4.1 sekaligus mengikuti trayektori. Untuk membentuk formasi diberikan referensi pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Referensi

| Robot    | Parameter referensi | Nilai referensi |
|----------|---------------------|-----------------|
| $R_{F1}$ | $l_{F1}$            | $\sqrt{0.6}m$   |
|          | $\beta_{F1}$        | $135^\circ$     |
| $R_{F2}$ | $l_{F2}$            | $\sqrt{0.6}m$   |
|          | $\beta_{F2}$        | $225^\circ$     |
| $R_{F3}$ | $l_1$               | $\sqrt{0.6}m$   |
|          | $l_2$               | $\sqrt{0.6}m$   |

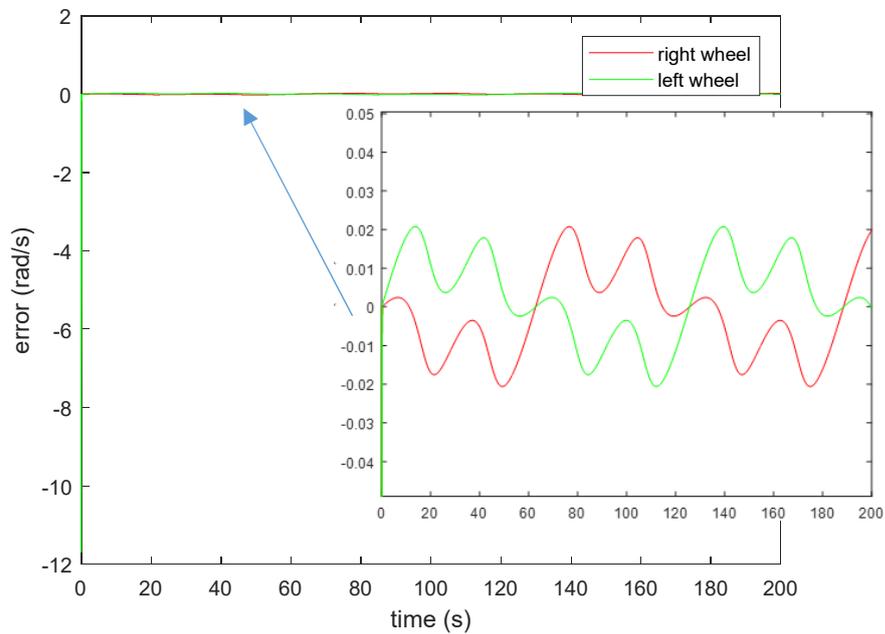
Adapun trayektori yang digunakan ditunjukkan pada persamaan (4.1).

$$\begin{cases} x = 5 \sin\left(\frac{t}{20}\right) \\ y = 10 \sin\left(\frac{t}{40}\right) \end{cases} \quad (4.1)$$

Pengujian masing-masing robot tanpa *disturbance* adalah sebagai berikut:

- a. Pengujian leader ( $R_L$ ) tanpa *disturbance*

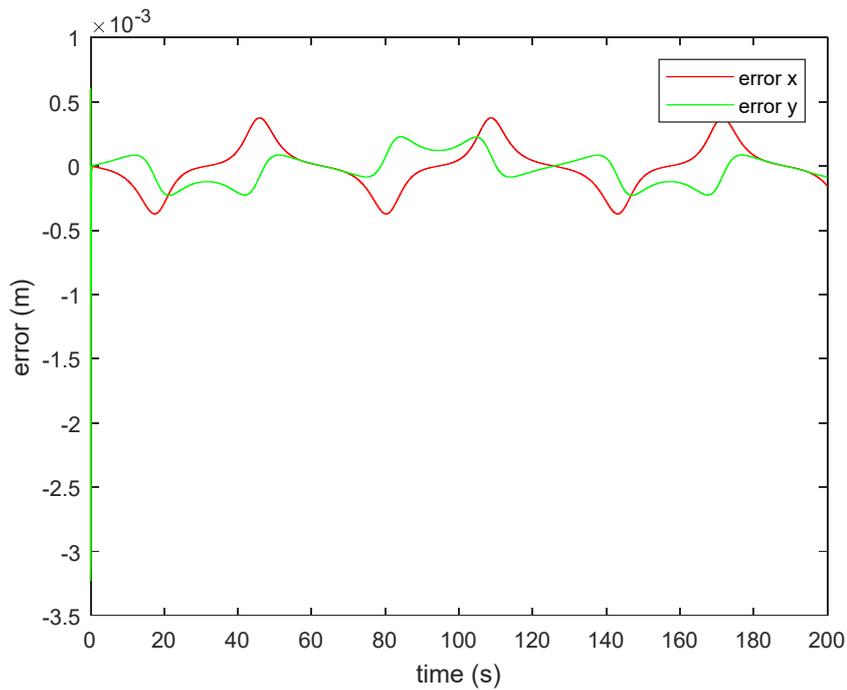
Untuk Mengetahui performa CTC pada leader tanpa adanya *disturbance* ditunjukkan sinyal error roda kanan  $e_{\omega rL}$  dan sinyal error roda kiri  $e_{\omega lL}$  pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Sinyal error dinamika  $R_L$  tanpa *disturbance*

Sinyal error dinamika  $R_L$  tanpa adanya *disturbance* yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 memiliki nilai error yang cukup besar pada  $t < 0.5s$ . Namun mendekati 0 untuk  $t > 0.5s$ . Hal tersebut menunjukkan bahwa performa CTC tanpa *disturbance* untuk  $R_L$  dapat dikatakan baik dengan  $MSEe_{\omega rL} = 0.0179$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 0.0179$ .

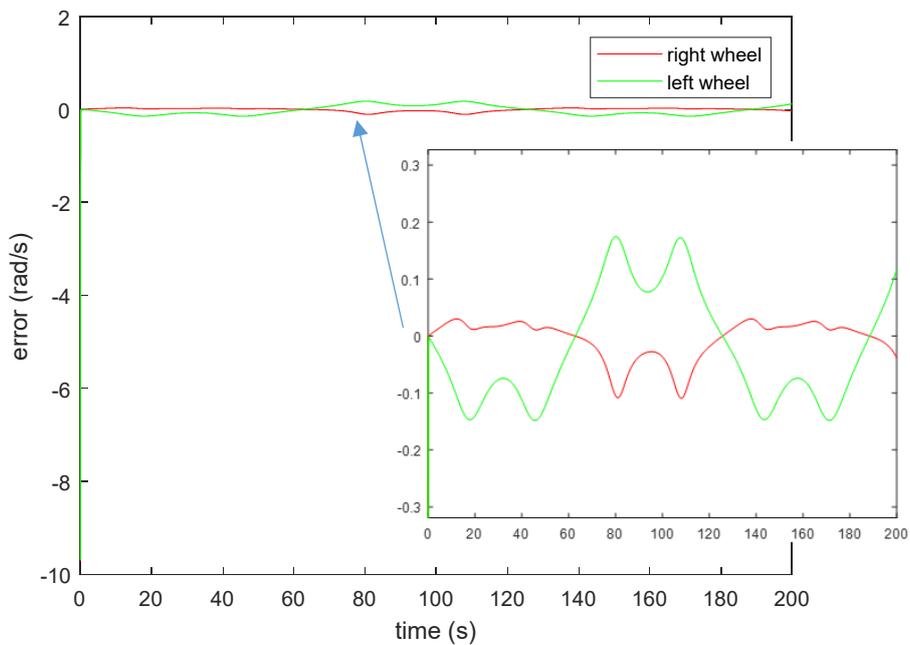
Untuk sinyal error kinematika  $R_L$ , yaitu  $e_x$  dan  $e_y$  ditunjukkan pada Gambar 4.3. Dari Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa error kinematika  $R_L$  tanpa *disturbance* bernilai cukup kecil dengan  $MSEe_x = 3.485e - 09$  dan  $MSEe_y = 3.455e - 09$ .



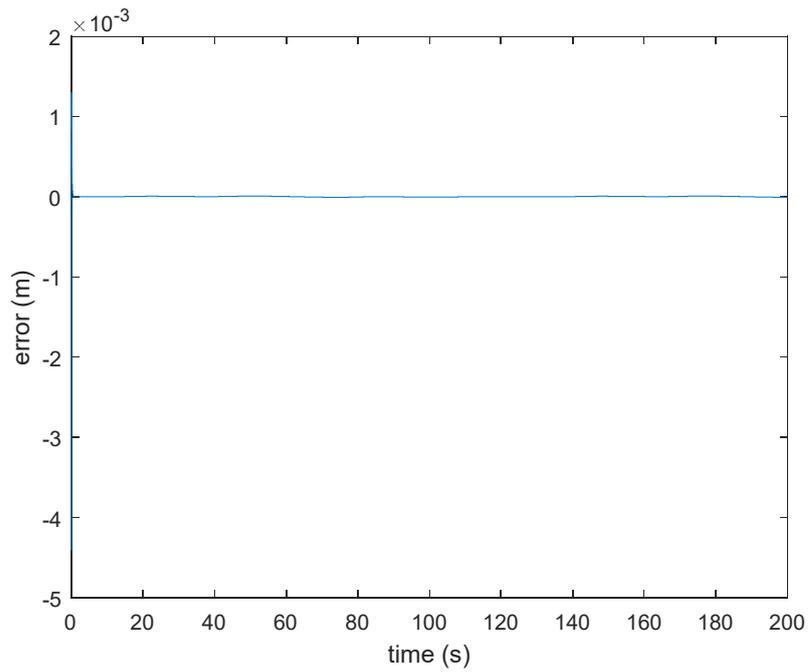
Gambar 4.3 Sinyal error kinematika  $R_L$  tanpa *disturbance*

b. Pengujian Follower 1 ( $R_{F1}$ ) tanpa *disturbance*

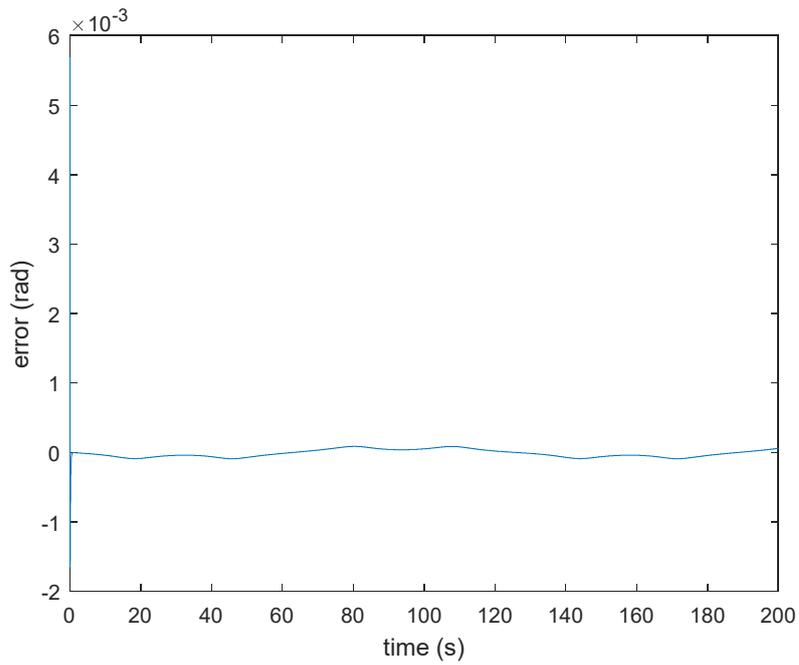
Peforma CTC tanpa disturbance pada  $R_{F1}$  ditunjukkan pada sinyal error dinamika  $R_{F1}$  Gambar 4.4. Adapun sinyal error dari kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  tanpa *disturbance*



(a)



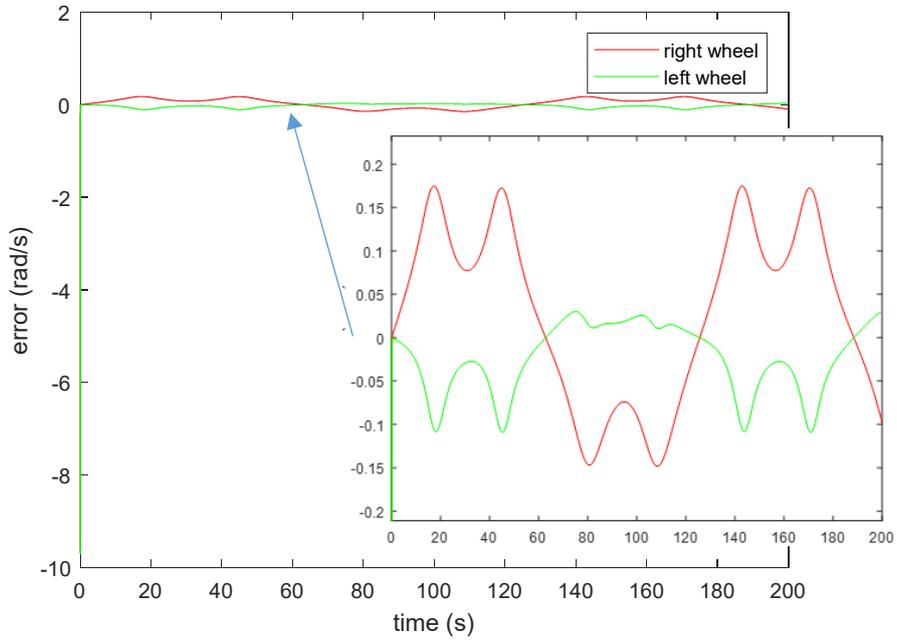
(b)

Gambar 4.5 Sinyal error  $e_{lF_1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F_1}$  (b)

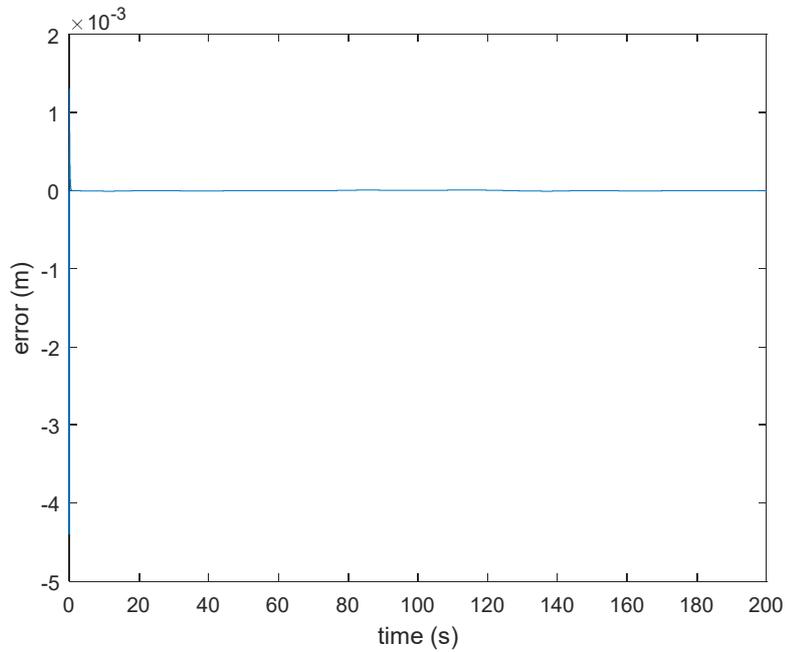
Dari Gambar 4.4 diketahui bahwa nilai error dinamika  $R_{F_1}$  tanpa disturbance cukup kecil meskipun terdapatn error tracking. Adapun  $MSE e_{\omega r F_1} = 0.0088$  dan  $MSE e_{\omega l F_1} = 0.0167$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F_1}$ ,  $MSE e_{l F_1} = 1.815e - 09$  dan  $MSE e_{\beta F_1} = 5.113e - 09$ .

c. Pengujian Follower 2 ( $R_{F2}$ ) tanpa *disturbance*

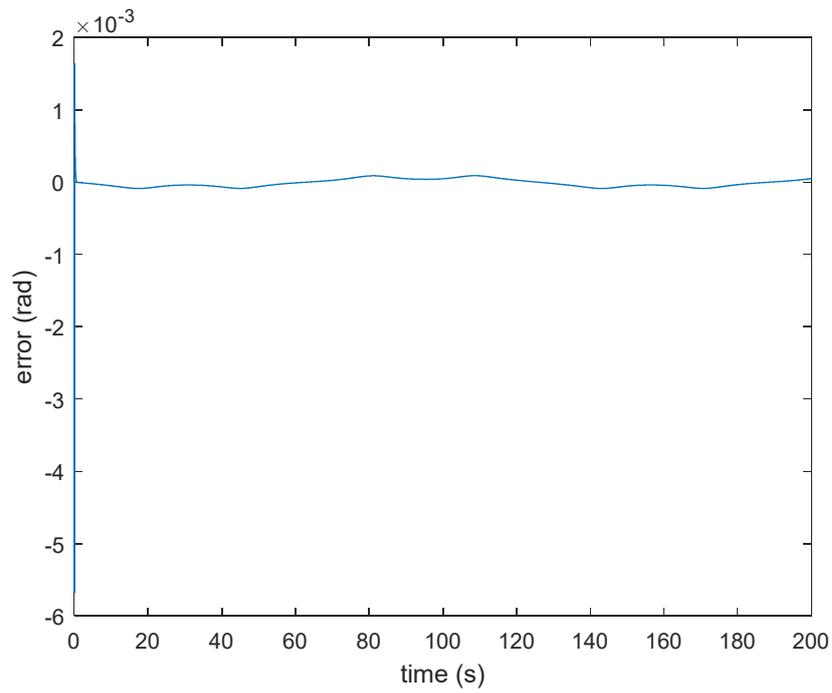
Peforma CTC tanpa *disturbance* pada  $R_{F2}$  ditunjukkan pada sinyal error dinamika  $R_{F2}$  Gambar 4.6. Adapun sinyal error dari kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  tanpa *disturbance*



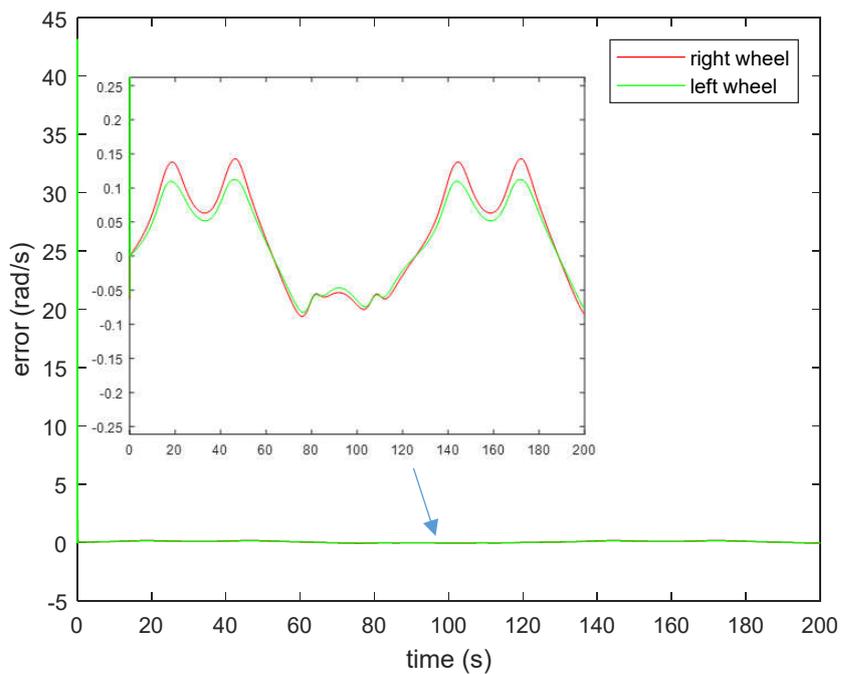
(a)



(b)

Gambar 4.7 Sinyal error  $e_{lF_2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F_2}$  (b)

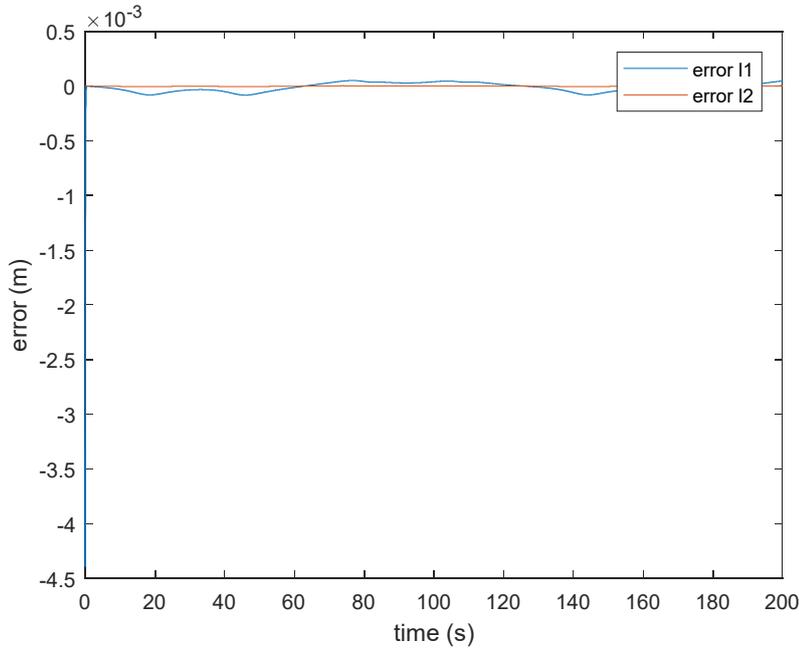
Seperti halnya  $R_{F_1}$ , dinamika error  $R_{F_2}$  memiliki error tracking. Adapun  $MSE e_{\omega r F_2} = 0.0172$  dan  $MSE e_{\omega l F_2} = 0.0095$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F_2}$ ,  $MSE e_{lF_2} = 1.811e - 09$  dan  $MSE e_{\beta F_2} = 5.060e - 09$ .



Gambar 4.8 Sinyal error dinamika  $R_{F_3}$  tanpa *disturbance*

d. Pengujian Follower 3 ( $R_{F3}$ ) tanpa *disturbance*

Peforma CTC tanpa *disturbance* pada  $R_{F3}$  ditunjukkan pada sinyal error dinamika  $R_{F3}$  Gambar 4.8. Adapun sinyal error dari kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l1F3}$

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, sinyal  $e_{\omega rF3}$  dan  $e_{\omega lF3}$  pada kondisi awal bernilai besar, pada  $t < 0.2s$  sinyal error kedua roda mendekati 0. Adapun  $MSEe_{\omega rF3} = 0.1021$  dan  $MSEe_{\omega lF3} = 0.0997$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 6.309e - 09$  dan  $MSEe_{l2F3} = 1.024e - 11e$ .

Dari keseluruhan pengujian yang dilakukan, dapat diketahui bahwa kriteria formasi yang telah ditentukan dapat terpenuhi. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan adanya *disturbance* pada masing-masing robot.

#### 4.1.2. Pengujian Kontrol CTC dengan *Disturbance*

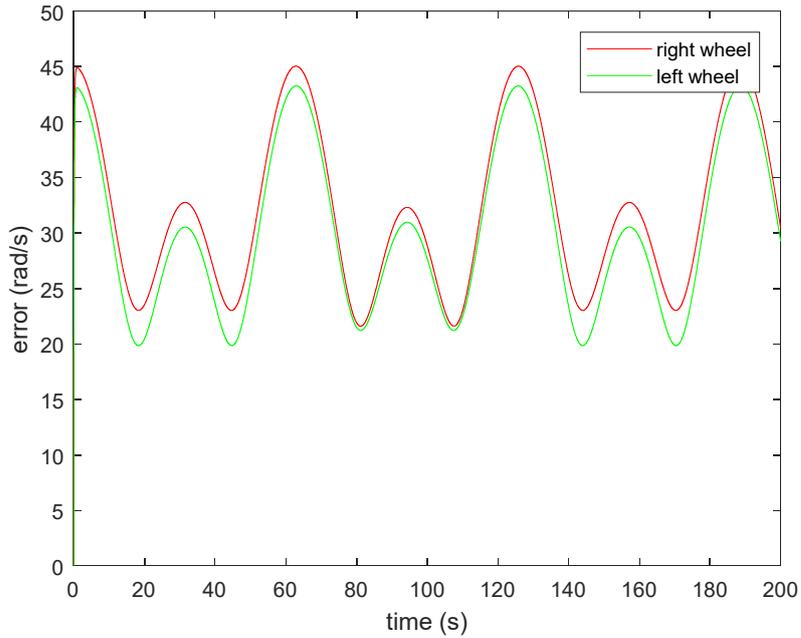
Pada tahap ini dilakukan pengujian ketika masing-masing robot terkena *disturbance*. Sedangkan *disturbance* yang akan diberikan ditunjukkan pada persamaan (4.2) [14].

$$\tau_d = -(C_{cu} \text{sgn}(\eta) + C_v \eta) \quad (4.2)$$

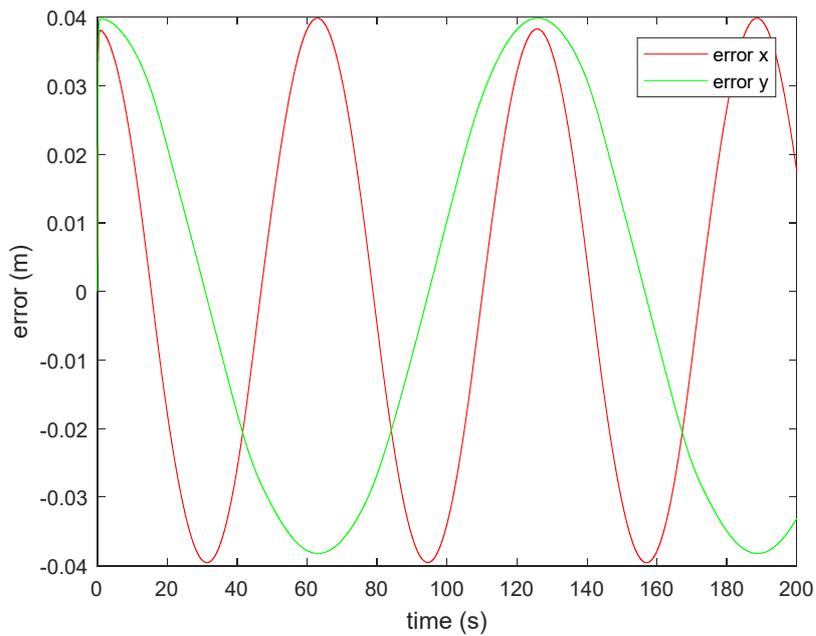
Dimana untuk  $C_{cu} = \text{diag}(0.1)$  dan  $C_v = \text{diag}(0.057)$ . Adapun pengujian dengan *disturbance* dilakukan menjadi 6 tahapan sebagai berikut :

a. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada  $R_L$

Pada tahap ini *disturbance* dikenakan pada  $R_L$ , sedangkan keseluruhan follower tidak terkena *disturbance*. Peforma CTC dengan *disturbance* pada  $R_L$  ditunjukkan pada sinyal error dinamika  $R_L$  Gambar 4.10. Adapun sinyal error dari kinematika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.11.



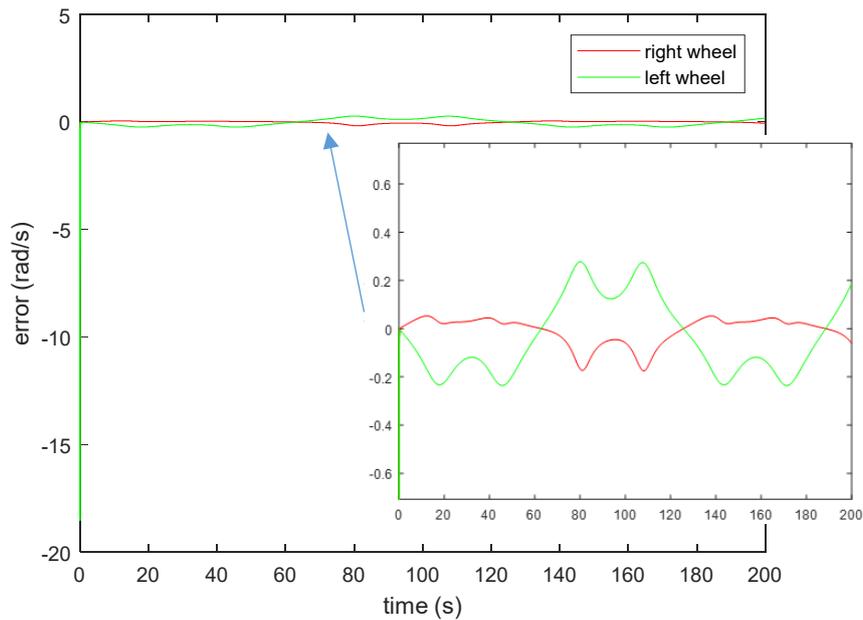
Gambar 4.10 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-1



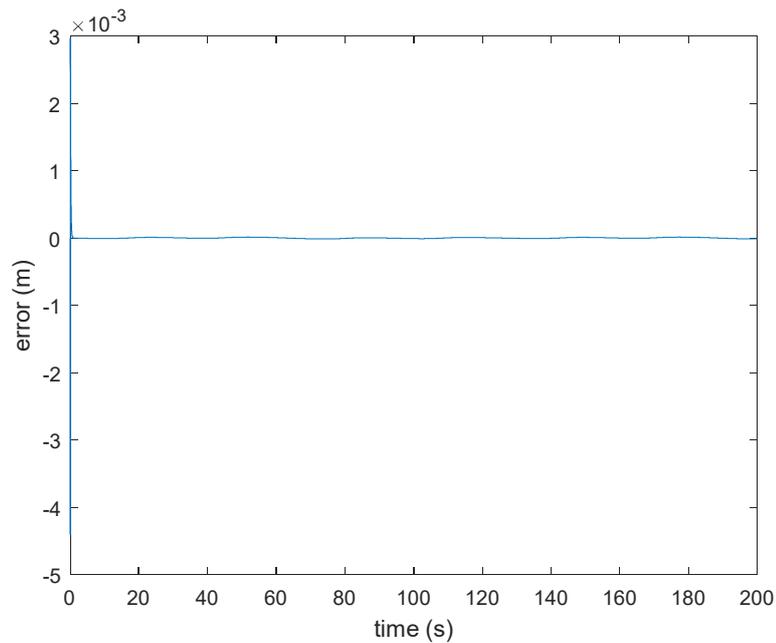
Gambar 4.11 Sinyal error kinematika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-1

Dari Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dapat terlihat bahwa sinyal error dinamika dan kinematika  $R_L$  meningkat ketika sistem terkena *disturbance*. Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 1.091e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 9.694e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 7.962e - 04$  dan  $MSEe_y = 8.130e - 04$ .

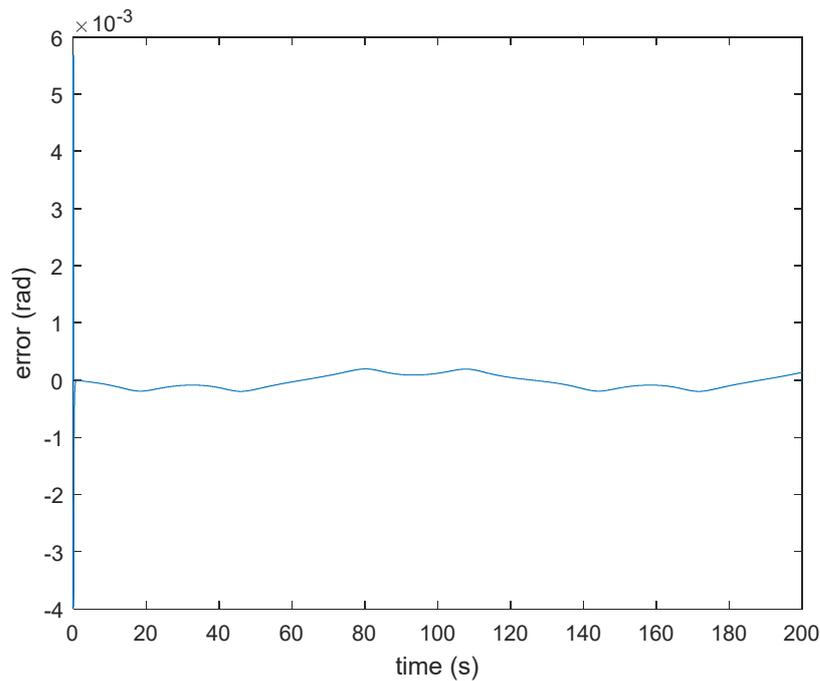
Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.12. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.12 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-1



(a)



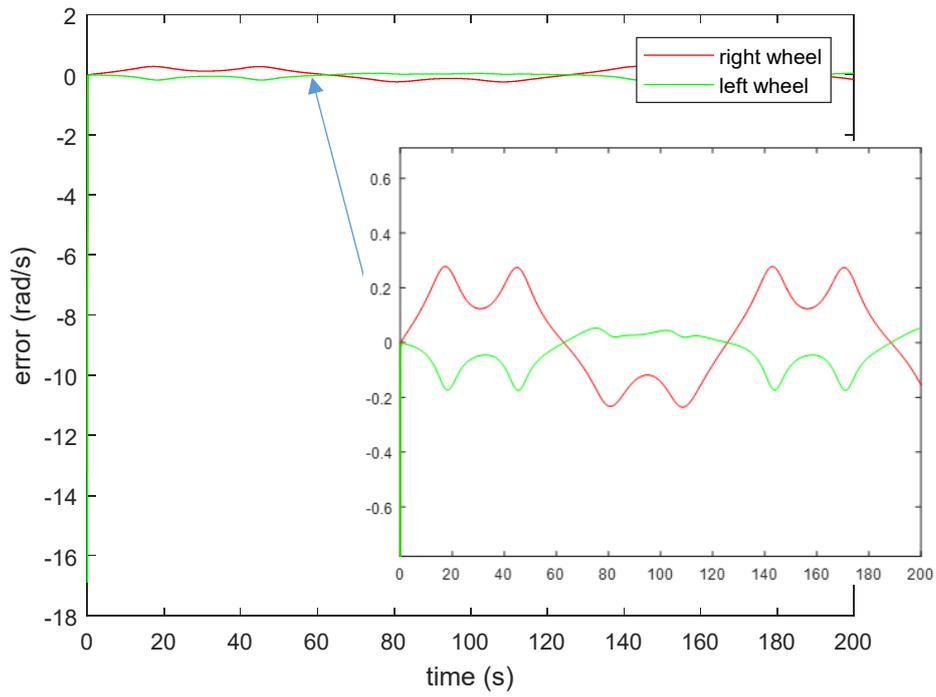
(b)

Gambar 4.13 Sinyal error  $e_{lF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-1

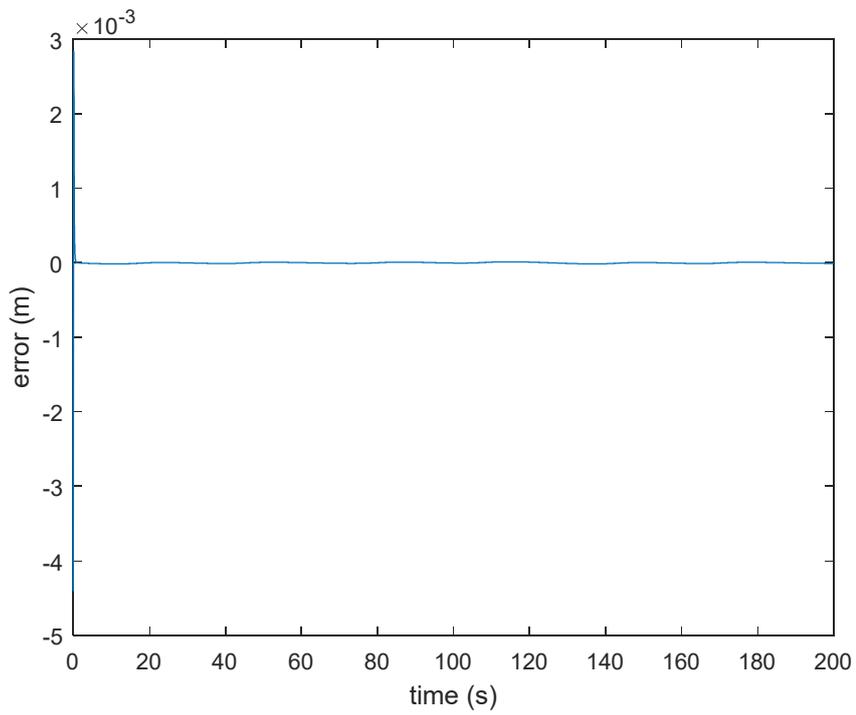
Dari Gambar 4.12 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F1}$  meningkat dengan  $MSE e_{\omega r F1} = 0.0257$  dan  $MSE e_{\omega l F1} = 0.0619$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE e_{l F1} = 5.531e - 09$  dan  $MSE e_{\beta F1} = 2.328e - 08$ . Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan sinyal error maupun  $MSE R_{F1}$  pada pengujian ke-1 memiliki perubahan yang tidak terlalu besar dan kriteria yang ditentukan masih terpenuhi.

Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.14. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.15.

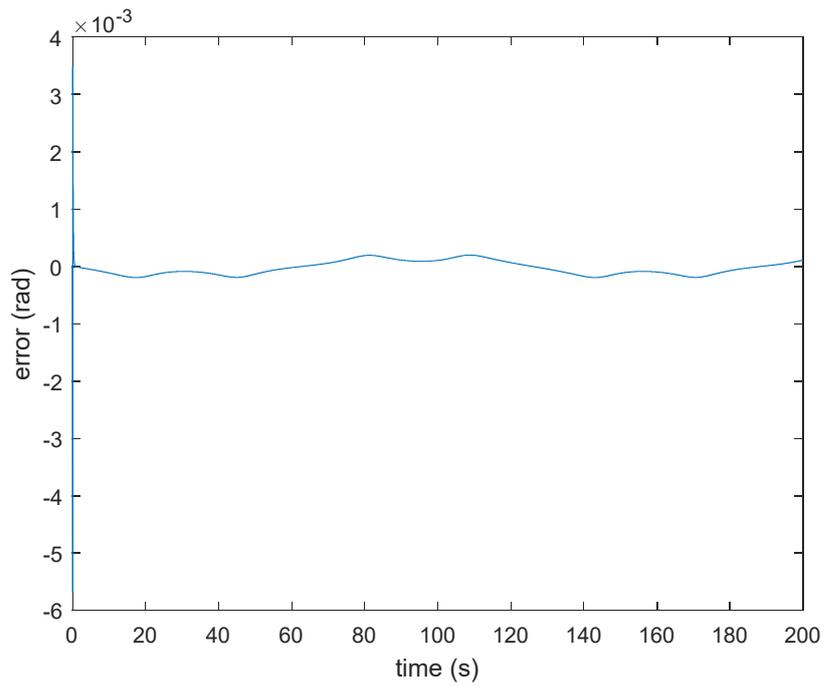
Seperti halnya pada  $R_{F1}$ , dari Gambar 4.14 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  meningkat dengan  $MSE e_{\omega r F2} = 0.0502$  dan  $MSE e_{\omega l F2} = 0.0331$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{l F2} = 5.154e - 09$  dan  $MSE e_{\beta F2} = 2.113e - 08$ . Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan sinyal error maupun  $MSE R_{F2}$  pada pengujian ke-1 memiliki perubahan yang tidak terlalu besar dan kriteria yang ditentukan masih terpenuhi.



Gambar 4.14 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-1



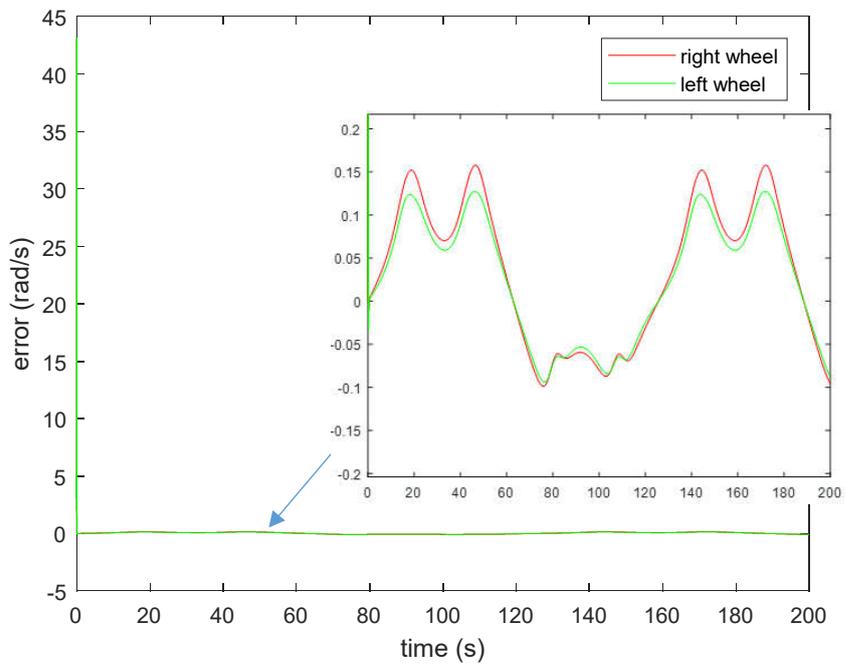
(a)



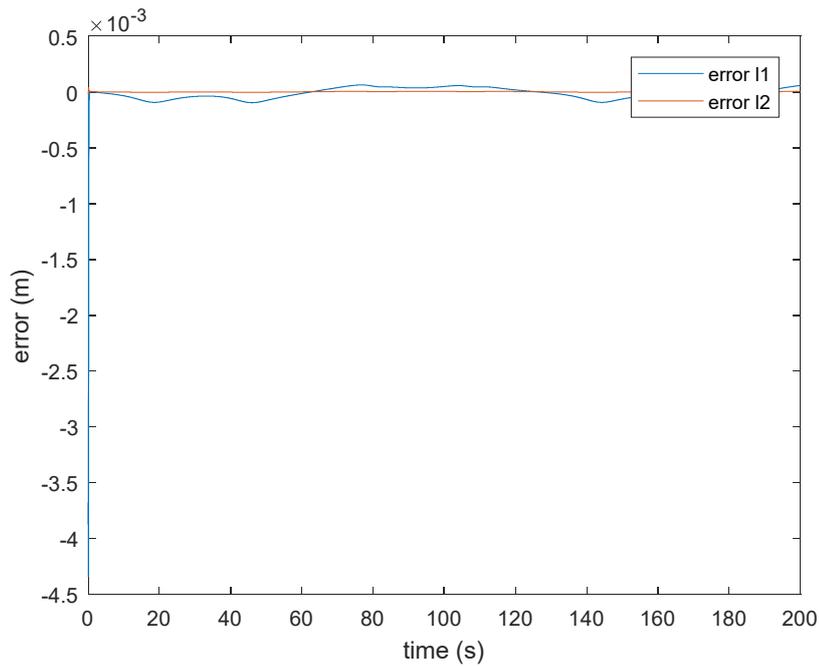
(b)

Gambar 4.15 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-1

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.16. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.17.

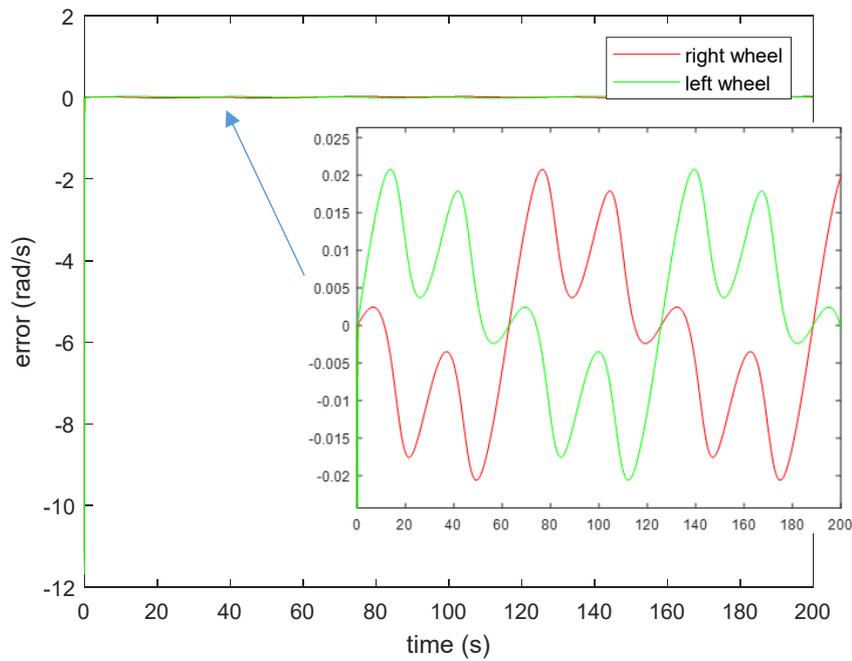


Gambar 4.16 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-1



Gambar 4.17 Sinyal error  $e_{I2F3}$  dan  $e_{I2F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-1

Sinyal error yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan 4.17 tidak jauh berbeda dengan sinyal error  $R_{F3}$  tanpa *disturbance*. Adapun  $MSEe_{\omega rF3} = 0.1067$  dan  $MSEe_{\omega lF3} = 0.1039$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 9.722e - 09$  dan  $MSEe_{l2F3} = 1.086e - 11$ .

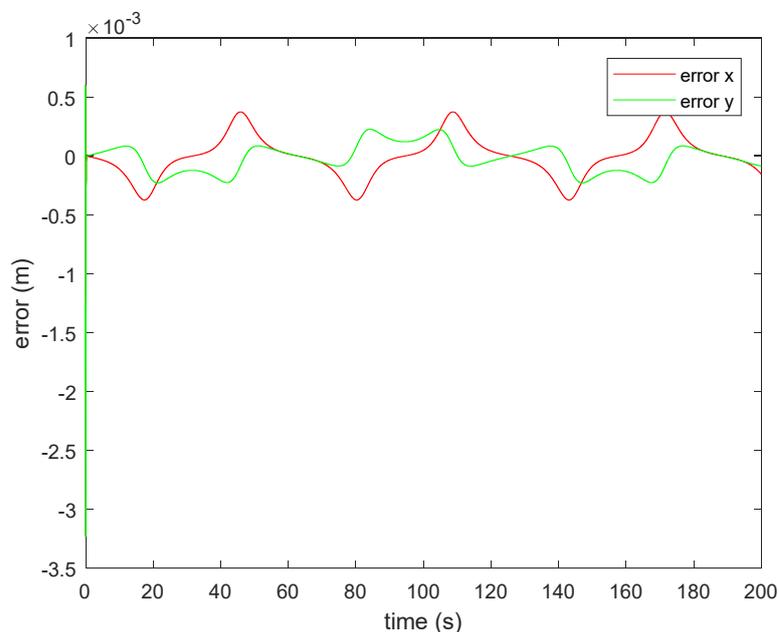


Gambar 4.18 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-2

Dari keseluruhan sinyal error pada pengujian ke-1 menunjukkan ketika  $R_L$  terkena *disturbance*, maka akan mempengaruhi sinyal error seluruh follower. Namun, pada pengujian ke-1 formasi masih dapat terbentuk dengan baik dengan indikator sinyal error masi berada pada range kriteria.

b. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada  $R_{F1}$

Pada pengujian ini *disturbance* akan dikenakan pada  $R_{F1}$ . sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.18. Sedangkan error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.19.



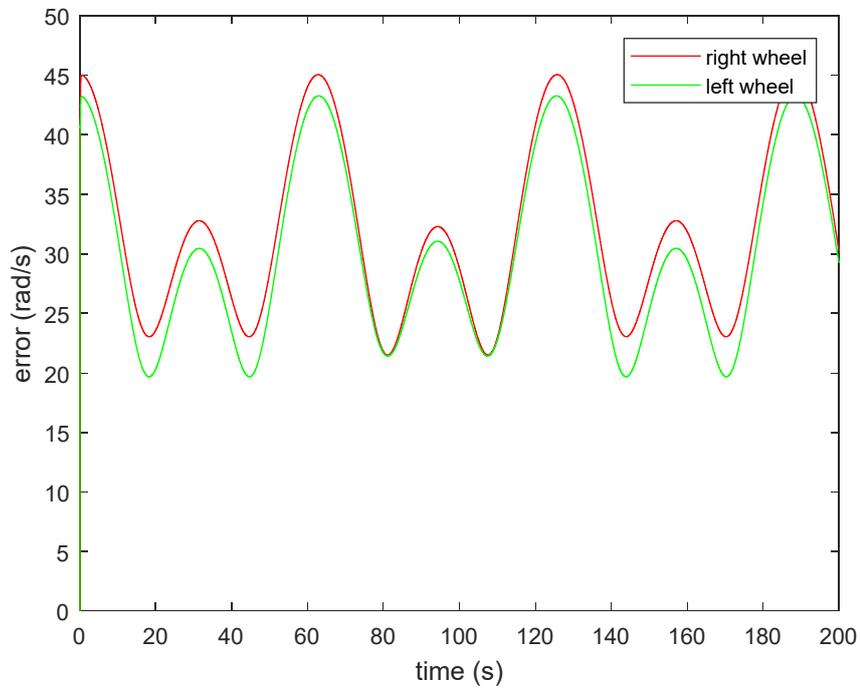
Gambar 4.19 Sinyal error kinematika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-2

Jika dibandingkan dengan pengujian ke-1, pada pengujian ke-2 error pada  $R_L$  lebih kecil dibandingkan dengan error pada pengujian ke-1. Hal ini menunjukkan bahwa *disturbance* pada  $R_{F1}$  tidak berdampak pada  $R_L$ . Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 0.0179$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 0.0179$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 3.3791e - 08$  dan  $MSEe_y = 1.7798e - 08$ .

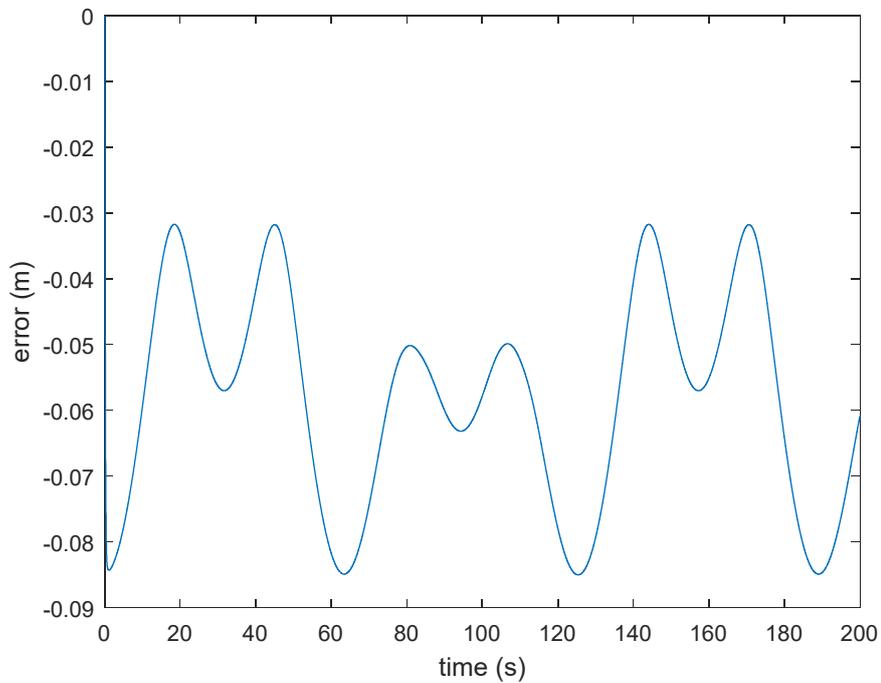
Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.20. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.21.

Dari Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian ke-2 lebih besar dibandingkan dengan pengujian ke-1. Adapun  $MSEe_{\omega rF1} = 1.0911e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lF1} = 9.689e + 02$ . Sedangkan pada

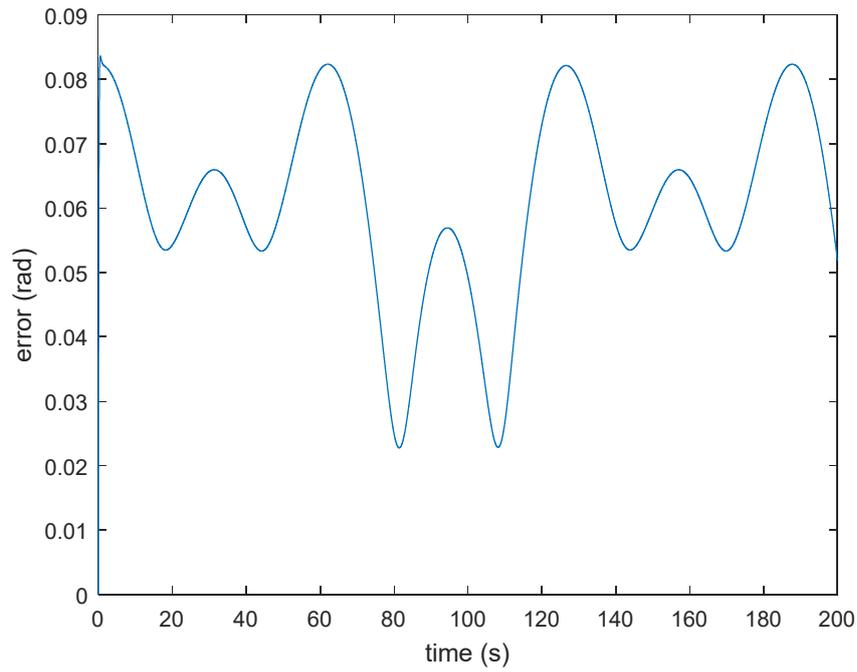
kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE_{e_{lF1}} = 0.00361$  dan  $MSE_{e_{\beta F1}} = 0.034$ . Dengan bertambahnya nilai  $MSE$  dan error maka kriteria yang telah ditetapkan tidak terpenuhi.



Gambar 4.20 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-2



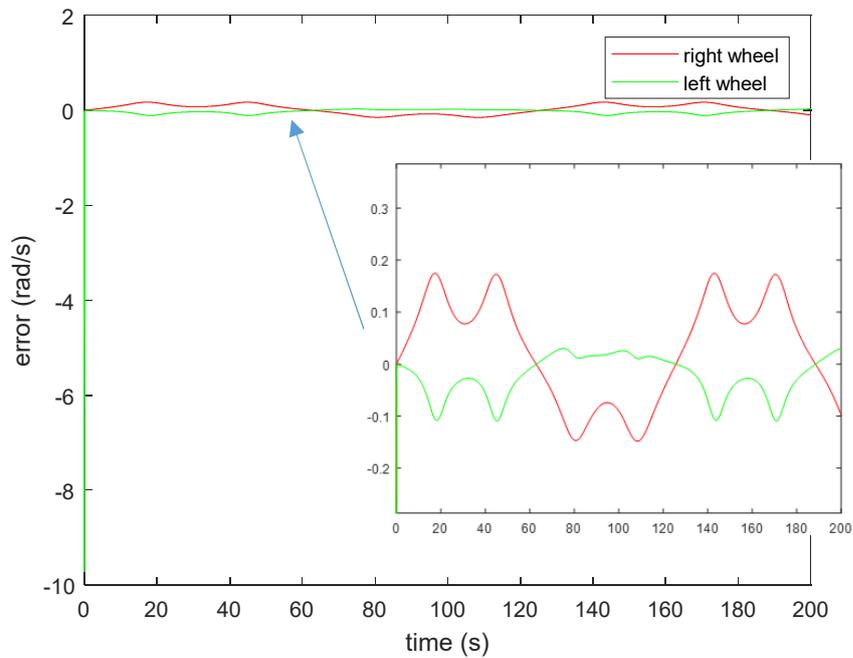
(a)



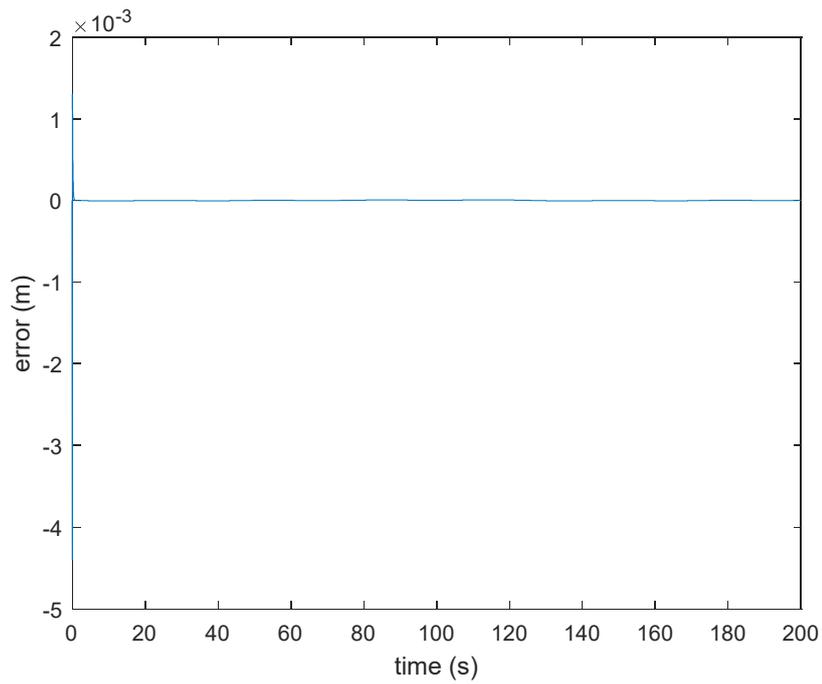
(b)

Gambar 4.21 Sinyal error  $e_{IF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-2

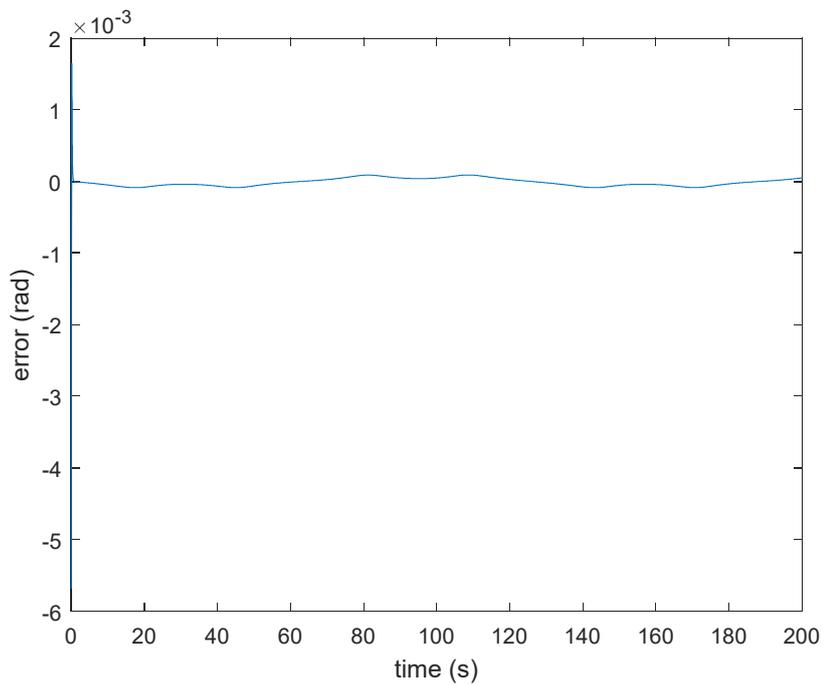
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.22. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.23.



Gambar 4.22 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-2



(a)



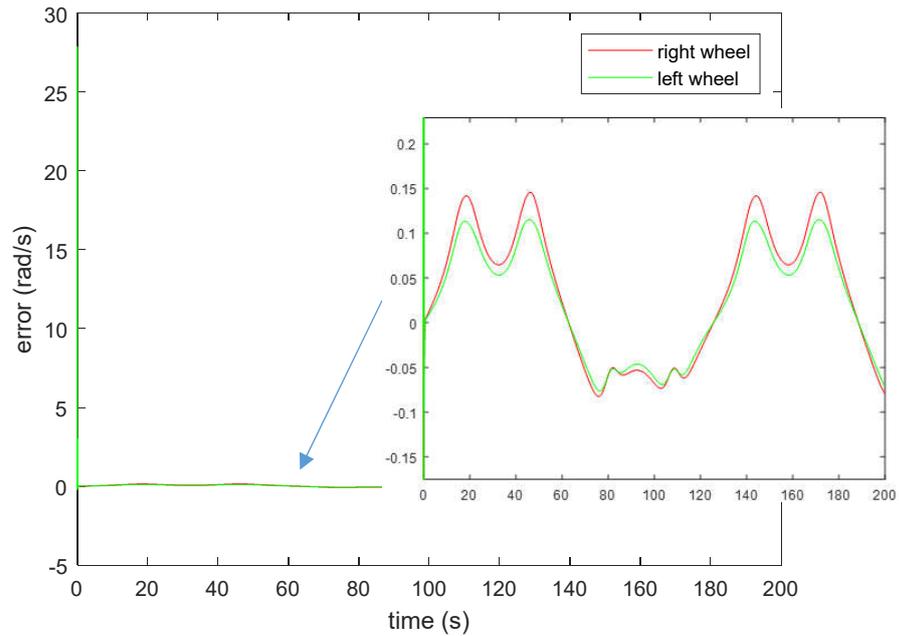
(b)

Gambar 4.23 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-2

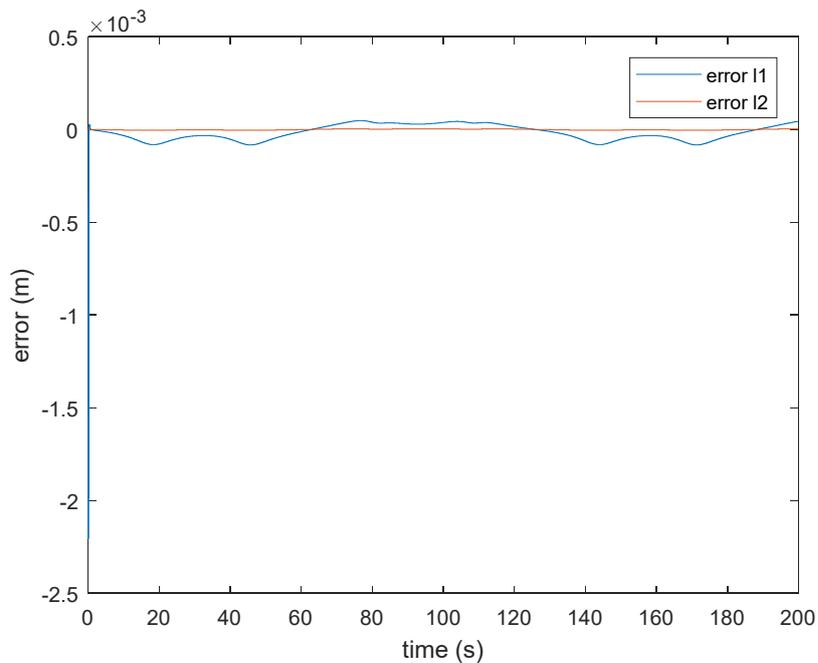
Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  tidak terdapat perubahan yang besar dengan  $MSEe_{\omega rF2} = 0.0206$  dan

$MSE e_{\omega_{lF2}} = 0.0104$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{lF2} = 1.8116e - 09$  dan  $MSE e_{\beta_{F2}} = 5.4244e - 09$ . Dari error dan  $MSE$  yang ditunjukkan dapat terlihat bahwa *disturbance* pada  $R_{F1}$  tidak mempengaruhi kondisi dari  $R_{F2}$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.24. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4.24 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-2

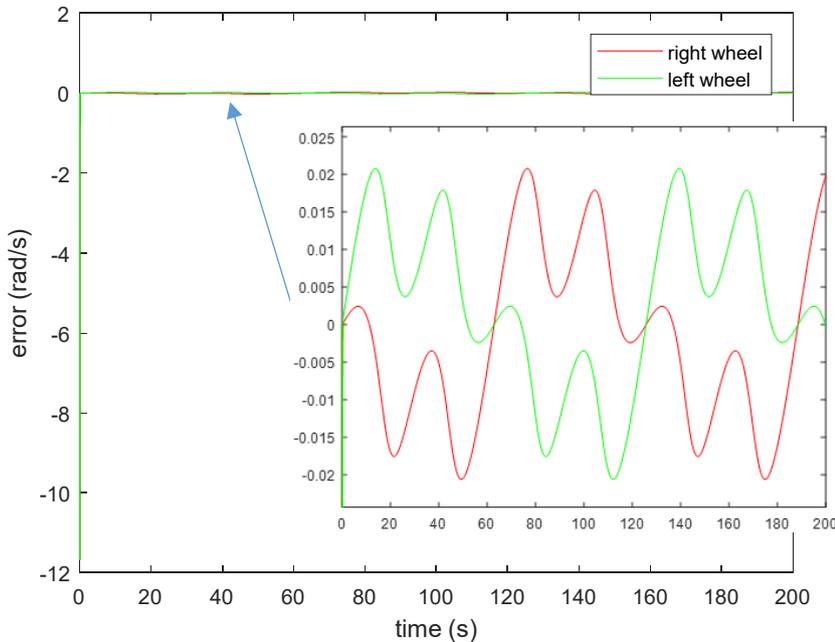


Gambar 4.25 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l2F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-2

Dari Gambar 4.24 dan Gambar 4.25 terlihat bahwa tidak terlalu banyak perubahan dibandingkan dengan pengujian ke-1. Hal ini disebabkan karena untuk membentuk formasi,  $R_{F3}$  tidak hanya berdasarkan jarak  $R_{F1}$  namun juga  $R_{F2}$  sehingga  $R_{F3}$  tetap mampu mempertahankan formasi sesuai kriteria. Adapun  $MSEe_{\omega rF3} = 0.0479$  dan  $MSEe_{\omega lF3} = 0.0455$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 4.068e - 09$  dan  $MSEe_{l2F3} = 1.042e - 11$ .

c. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada  $R_{F2}$

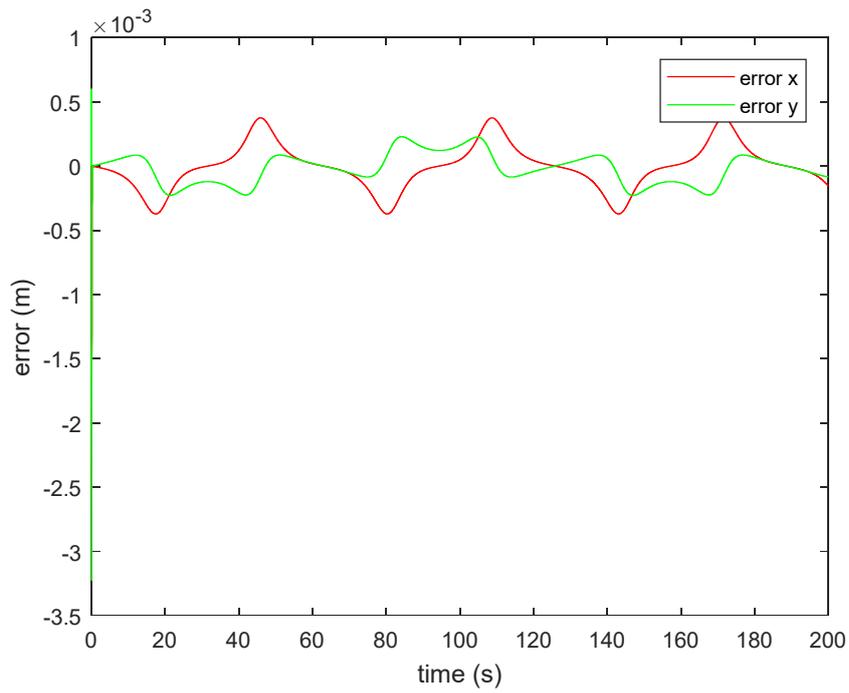
Pada pengujian ini *disturbance* akan dikenakan pada  $R_{F2}$ . sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.26. Sedangkan error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.27.



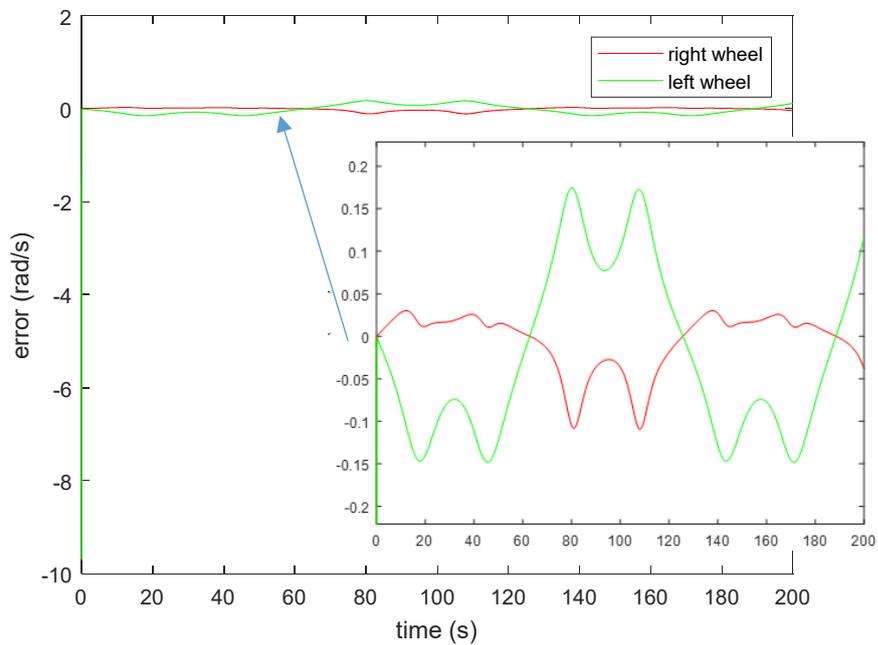
Gambar 4.26 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-3

Pada pengujian ke-3, sinyal error tidak berbeda dengan pengujian ke-2. Hal ini menunjukkan bahwa *disturbance* pada  $R_{F2}$  tidak berdampak pada  $R_L$ . Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 0.0179$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 0.0179$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 3.3791e - 08$  dan  $MSEe_y = 1.7798e - 08$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.28. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.29.



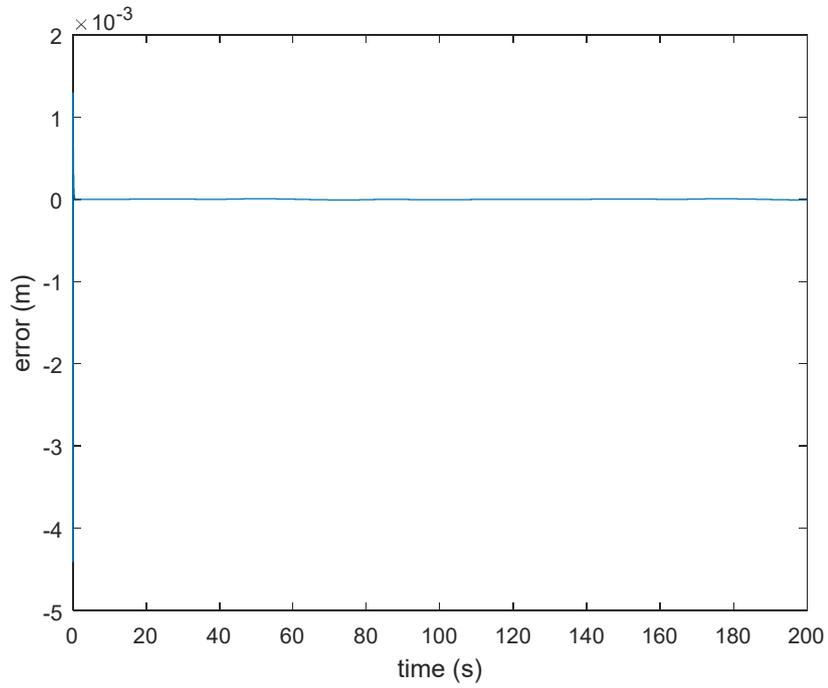
Gambar 4.27 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-3



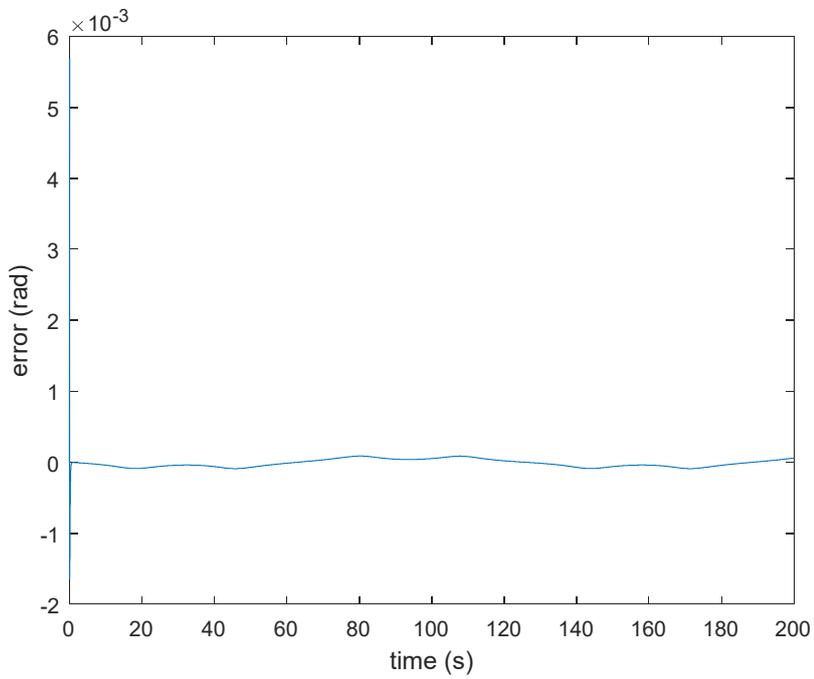
Gambar 4.28 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-3

Dari Gambar 4.28 dan Gambar 4.29 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian ke-3 lebih kecil dibandingkan pada pengujian ke-2. Adapun  $MSE_{e_{\omega rF1}} = 0.0092$  dan  $MSE_{e_{\omega lF1}} = 0.0197$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,

$MSE_{e_{IF1}} = 1.8155e - 09$  dan  $MSE_{e_{\beta F1}} = 5.4925e - 09$ . Dengan bertambahnya nilai  $MSE$  dan error maka kriteria yang telah ditetapkan tidak terpenuhi.



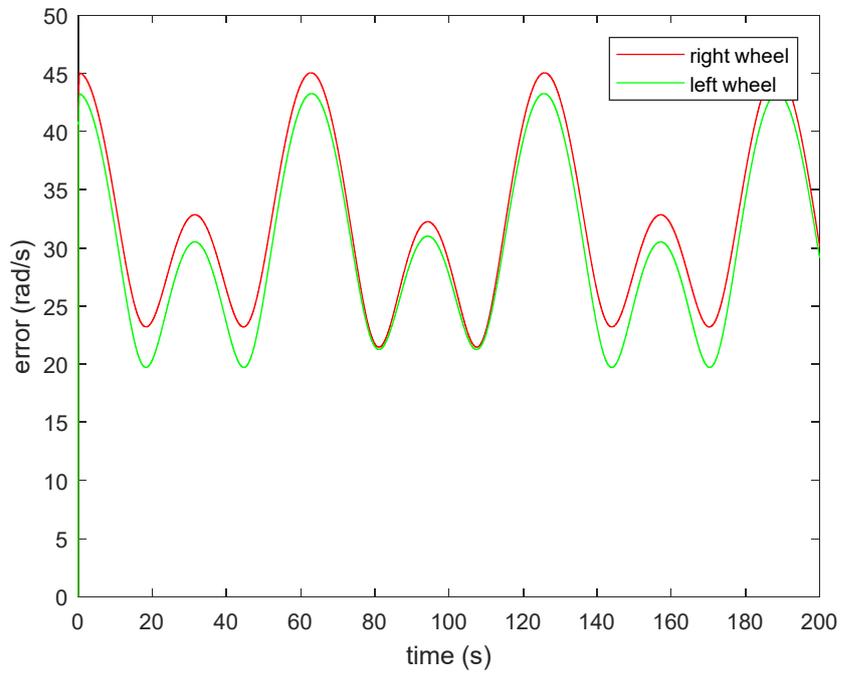
(a)



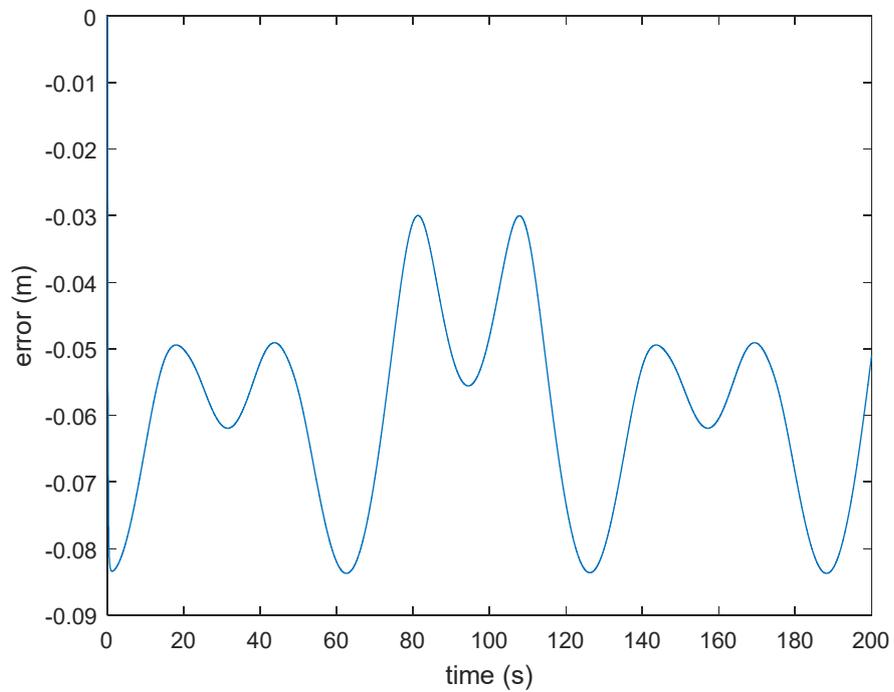
(b)

Gambar 4.29 Sinyal error  $e_{IF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-3

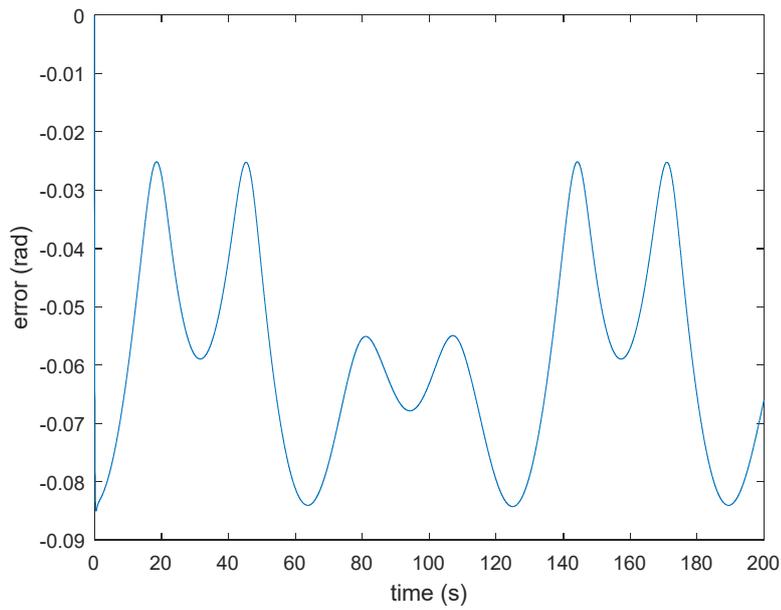
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.30. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4.30 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-3



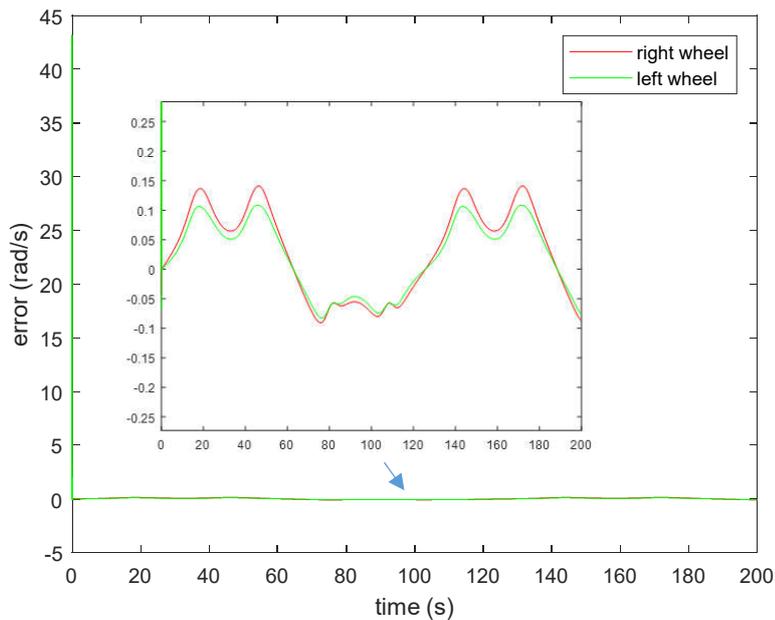
(a)



(b)

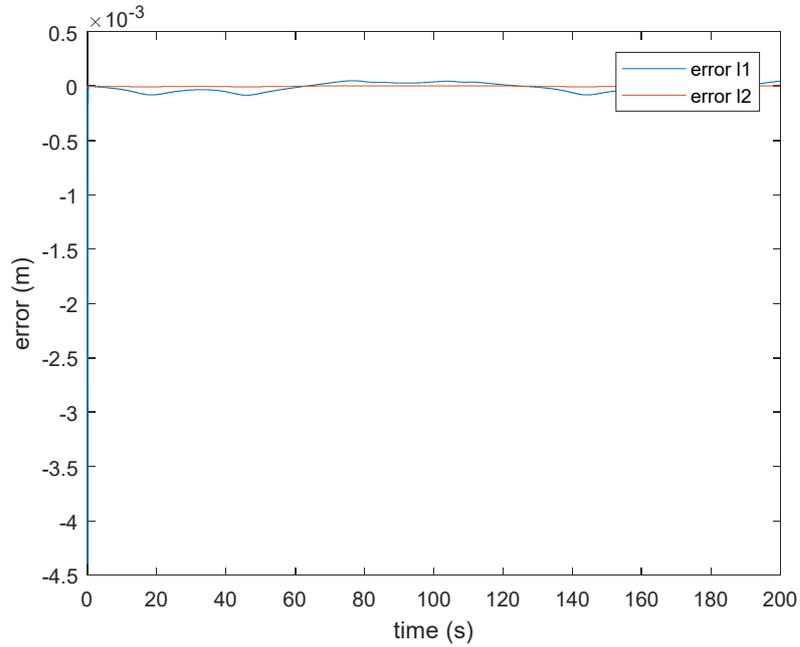
Gambar 4.31 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-3

Gambar 4.30 dan Gambar 4.31 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  lebih besar dibandingkan dengan pengujian ke-2 dengan  $MSE e_{\omega r F2} = 1.0934e + 03$  dan  $MSE e_{\omega l F2} = 9.6885e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{l F2} = 0.037$  dan  $MSE e_{\beta F2} = 0.032$ .



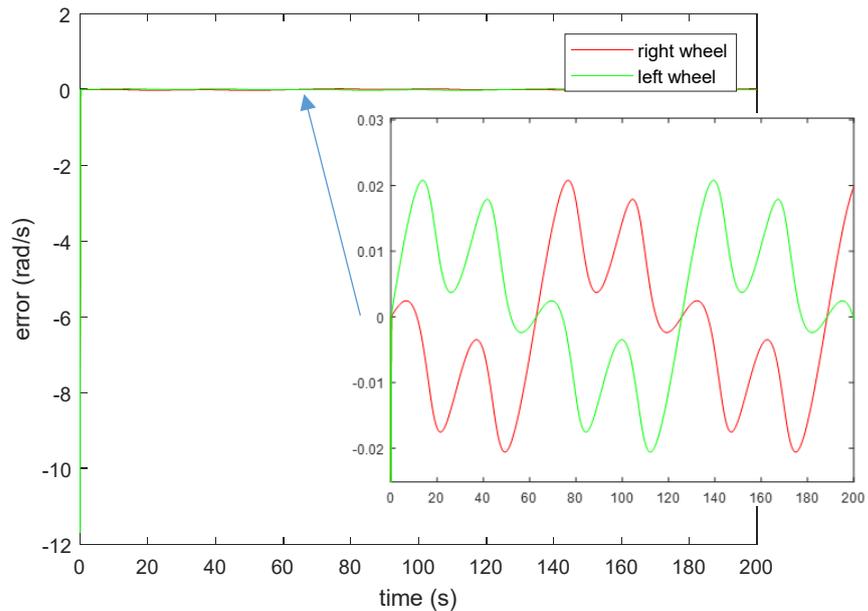
Gambar 4.32 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-3

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.32. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l2F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-3

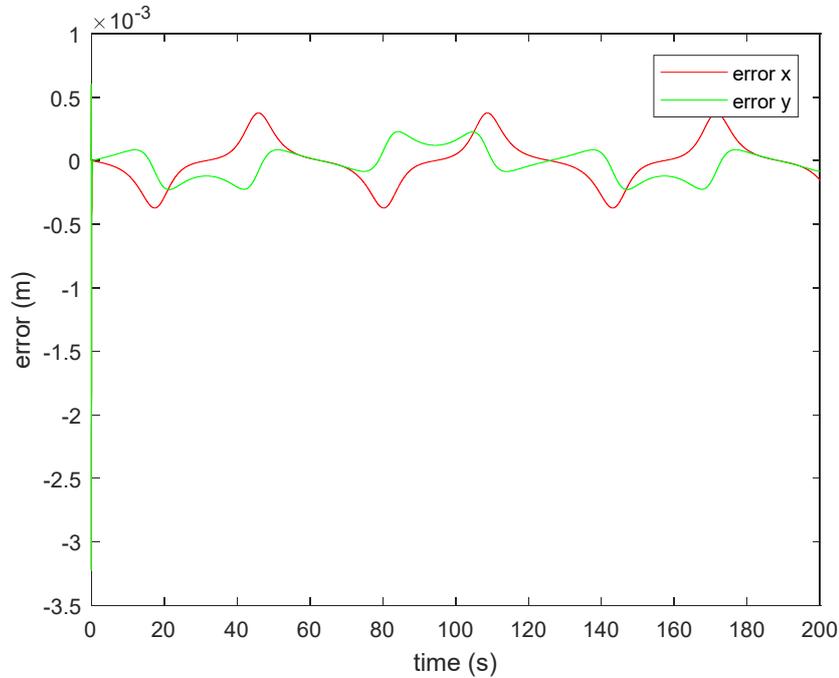
Dari Gambar 4.32 dan Gambar 4.33 terlihat bahwa tidak terlalu banyak perubahan dibandingkan dengan pengujian ke-2. Adapun  $MSE e_{\omega rF3} = 0.1022$  dan  $MSE e_{\omega lF3} = 0.0995$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSE e_{l1F3} = 6.3141e - 09$  dan  $MSE e_{l2F3} = 1.3765e - 11$ .



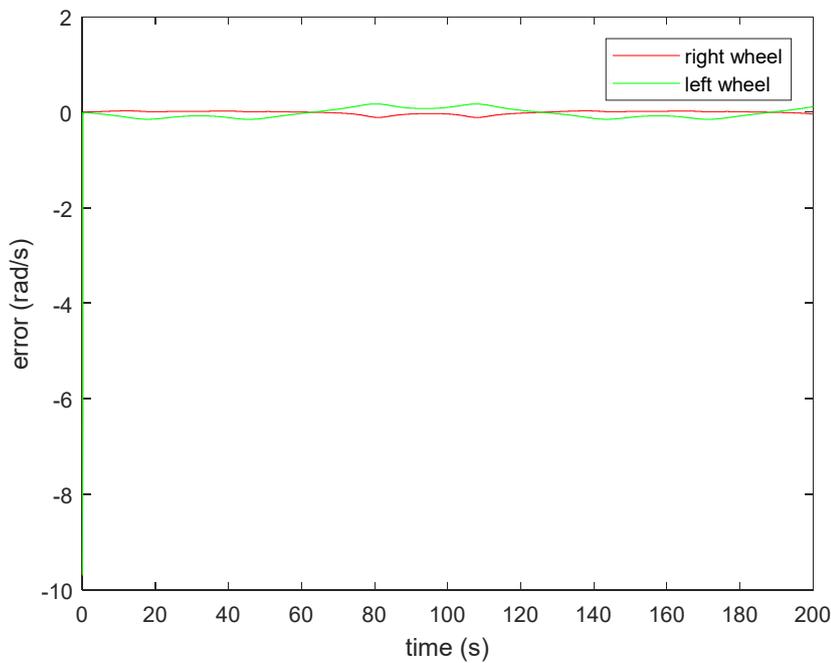
Gambar 4.34 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-4

d. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada  $R_{F3}$

Pada pengujian ini *disturbance* akan dikenakan pada  $R_{F3}$ . sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.34. Sedangkan error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.35.



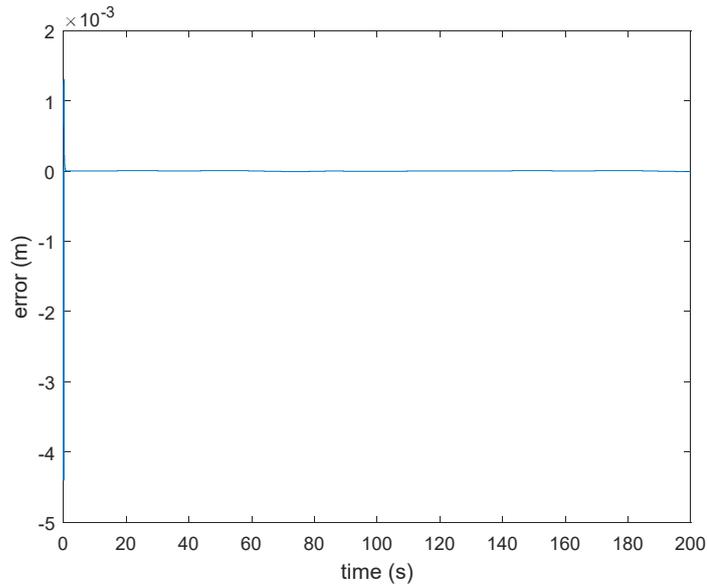
Gambar 4.35 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-4



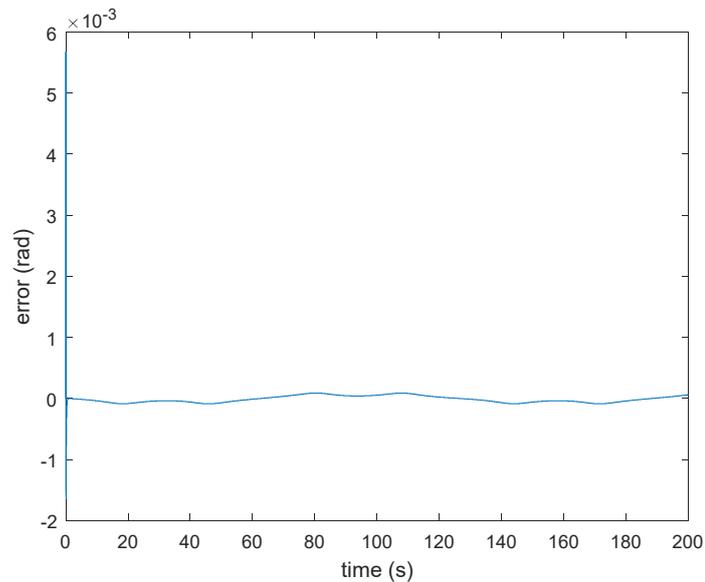
Gambar 4.36 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-4

Pada pengujian ke-4, sinyal error tidak berbeda dengan pengujian ke-3. Hal ini menunjukkan bahwa *disturbance* pada  $R_{F3}$  tidak berdampak pada  $R_L$ . Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 0.0179$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 0.0179$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 3.3791e - 08$  dan  $MSEe_y = 1.7798e - 08$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.36. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.37.



(a)

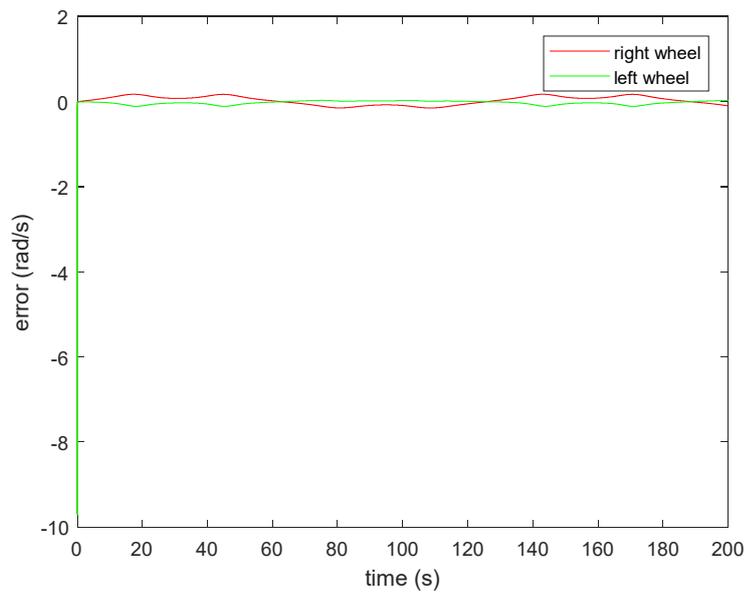


(b)

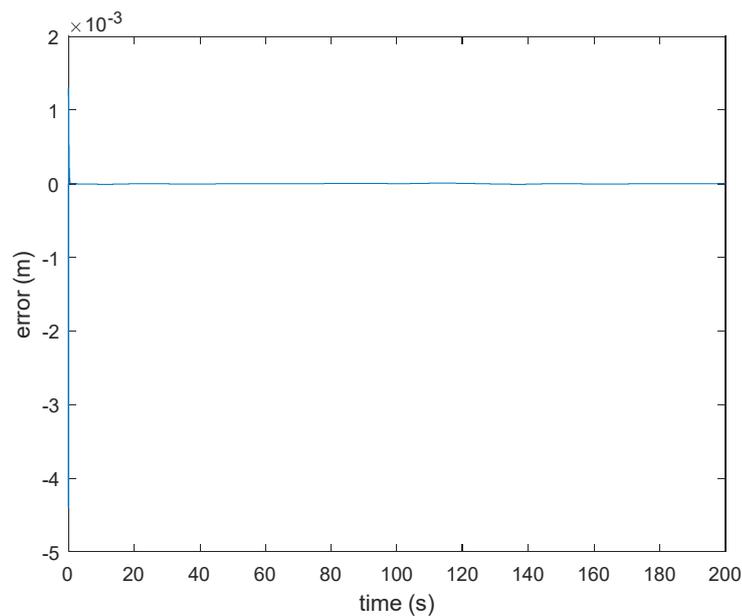
Gambar 4.37 Sinyal error  $e_{IF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-4

Dari Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian ke-4 sama dengan pada pengujian ke-3. Adapun  $MSE e_{\omega_{RF1}} = 0.0092$  dan  $MSE e_{\omega_{LF1}} = 0.0197$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE e_{l_{F1}} = 1.8155e - 09$  dan  $MSE e_{\beta_{F1}} = 5.4925e - 09$ . Dengan bertambahnya nilai  $MSE$  dan error maka kriteria yang telah ditetapkan tidak terpenuhi.

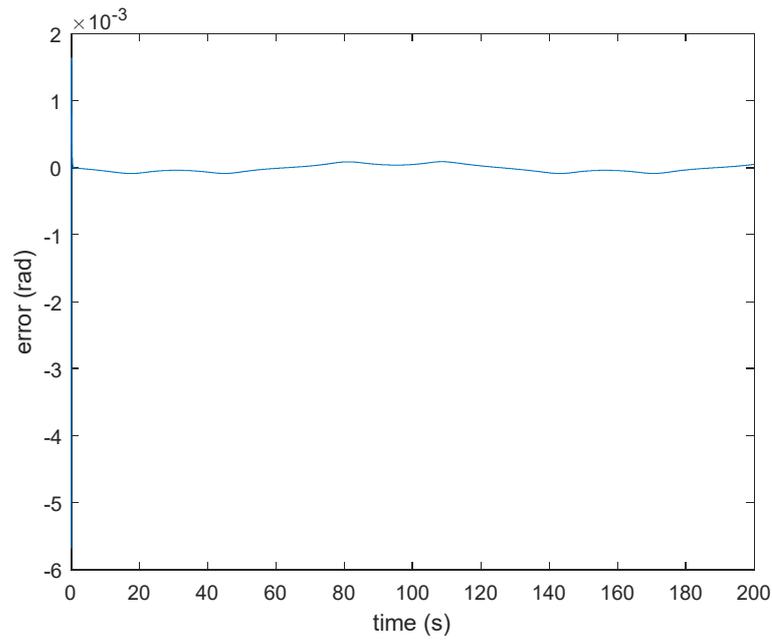
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.38. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.39.



Gambar 4.38 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-4



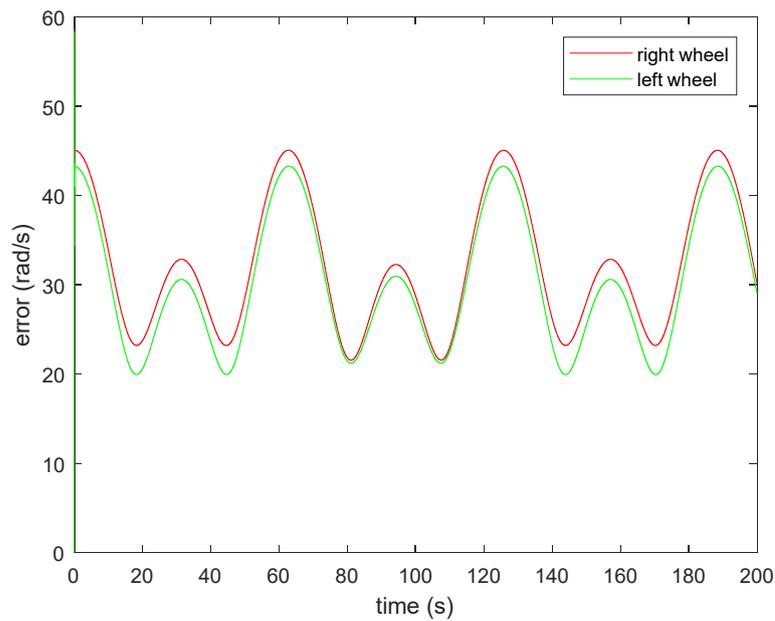
(a)



(b)

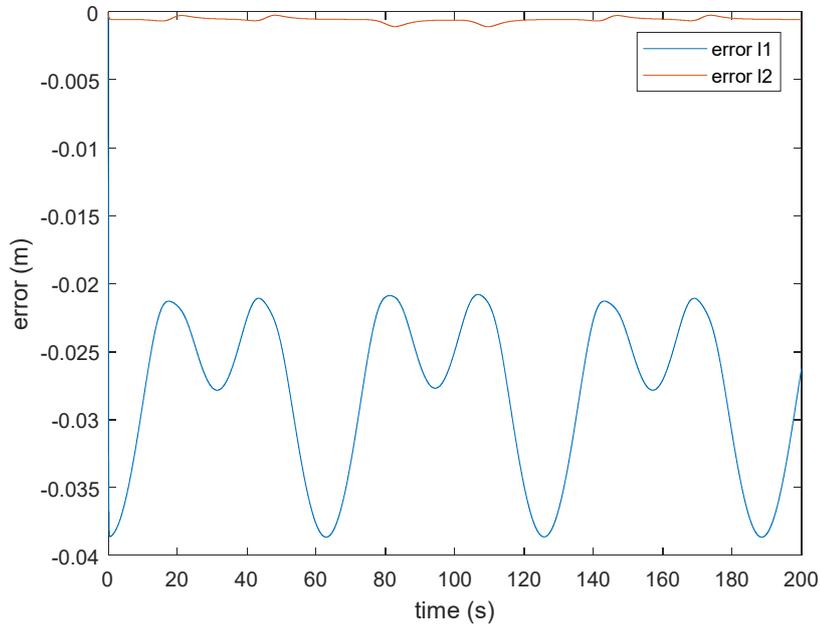
Gambar 4.39 Sinyal error  $e_{IF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-4

Gambar 4.38 dan Gambar 4.39 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  lebih kecil dibandingkan dengan pengujian ke-3 dengan  $MSE e_{\omega r F2} = 0.0206$  dan  $MSE e_{\omega l F2} = 0.0104$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{IF2} = 1.8116e - 09$  dan  $MSE e_{\beta F2} = 5.4245e - 09$ .



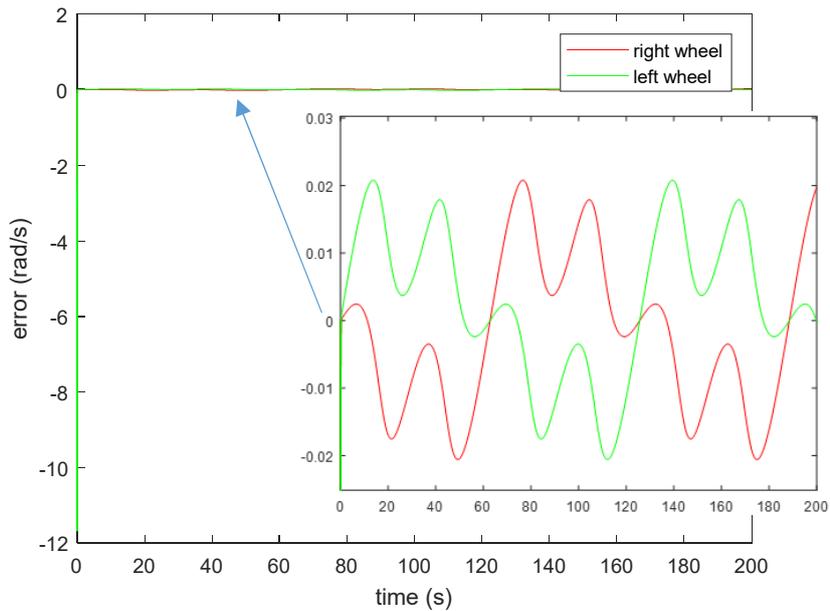
Gambar 4.40 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-4

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.40. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.41.



Gambar 4.41 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l2F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-4

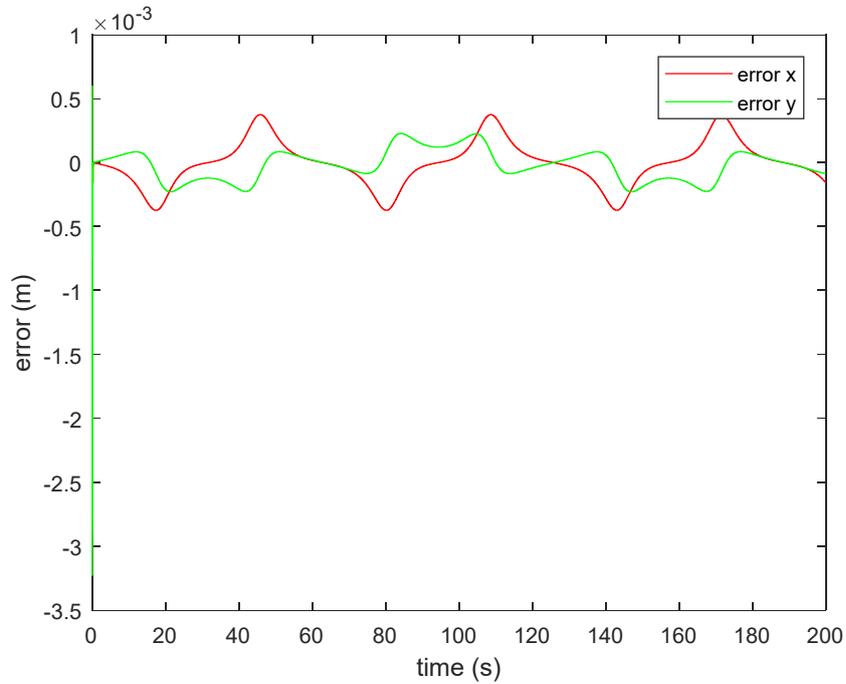
Dari Gambar 4.40 dan Gambar 4.41 terlihat bahwa sinyal error lebih besar dibandingkan dengan pengujian ke-3. Adapun  $MSEe_{\omega rF3} = 1.094e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lF3} = 9.7147e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 8.2068e - 04$  dan  $MSEe_{l2F3} = 3.5895e - 07$ .



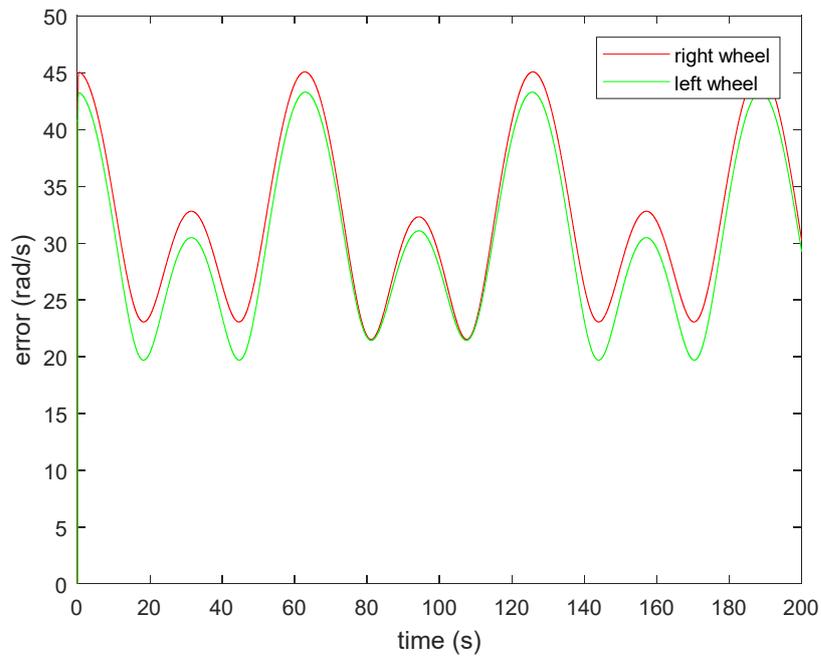
Gambar 4.42 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-5

e. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada Keseluruhan Follower

Pada pengujian ini *disturbance* akan dikenakan keseluruhan follower. Sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.42. Sedangkan error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.43.



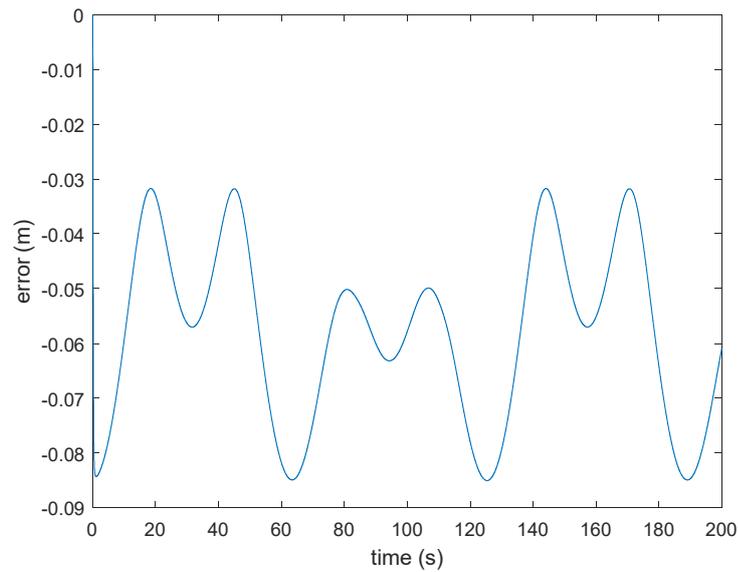
Gambar 4.43 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-5



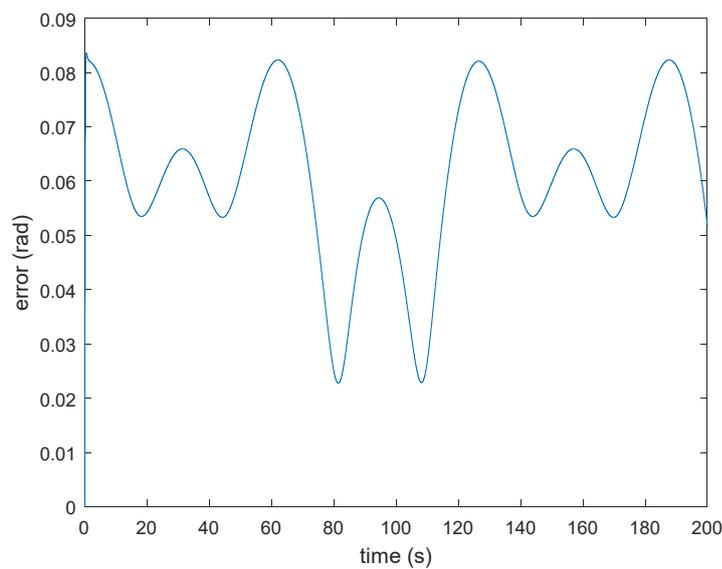
Gambar 4.44 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-5

Pada pengujian ke-5, sinyal error tidak berbeda dengan pengujian ke-4. Hal ini menunjukkan bahwa *disturbance* pada keseluruhan follower tidak berdampak pada  $R_L$ . Adapun  $MSE e_{\omega rL} = 0.0179$  dan  $MSE e_{\omega lL} = 0.0179$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSE e_x = 3.3791e - 08$  dan  $MSE e_y = 1.7798e - 08$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.44. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.45.



(a)

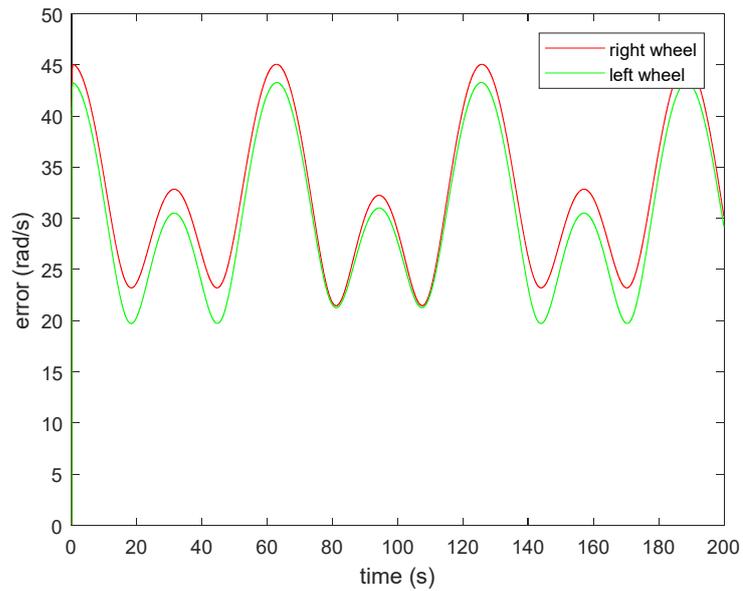


(b)

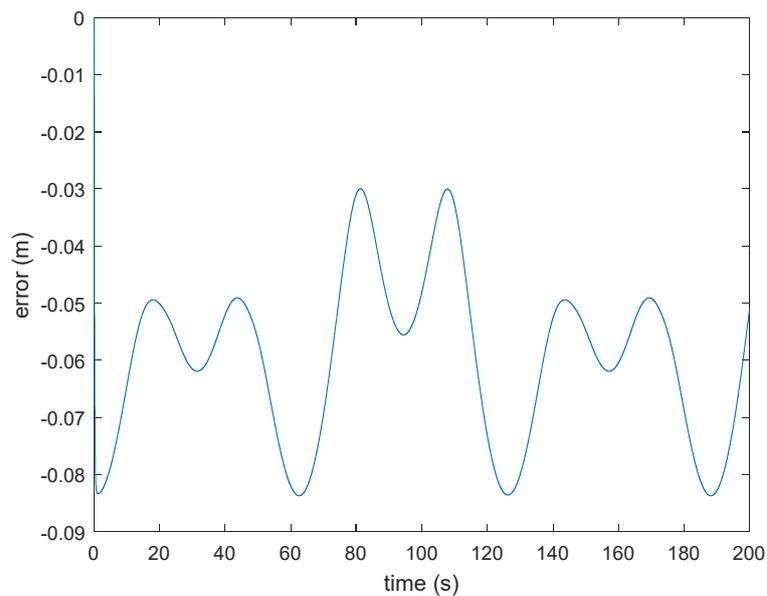
Gambar 4.45 Sinyal error  $e_{lF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-5

Dari Gambar 4.44 dan Gambar 4.45 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian ke-5 lebih dari pengujian ke-4. Adapun  $MSE e_{\omega r_{F1}} = 1.0911e + 03$  dan  $MSE e_{\omega l_{F1}} = 9.689e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE e_{l_{F1}} = 0.0036$  dan  $MSE e_{\beta_{F1}} = 0.0034$ . Dengan bertambahnya nilai  $MSE$  dan error maka kriteria yang telah ditetapkan tidak terpenuhi.

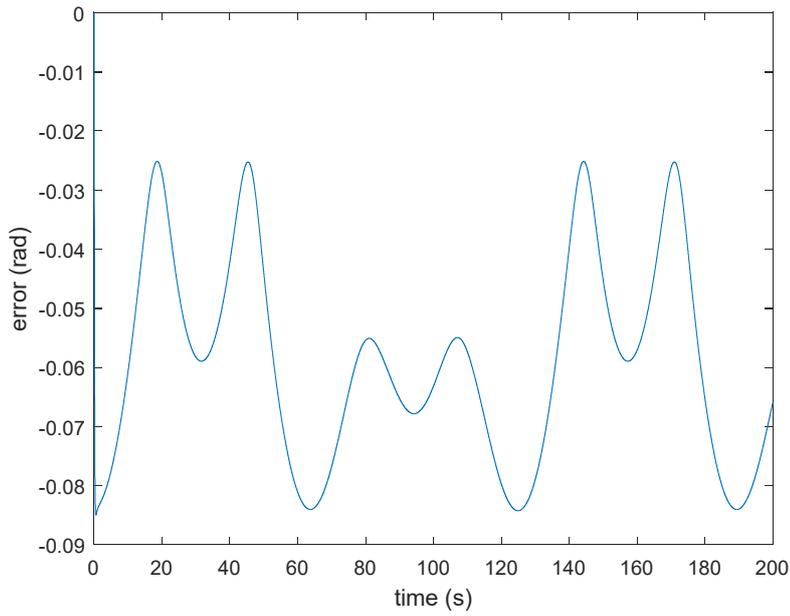
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.46. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.47.



Gambar 4.46 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-5



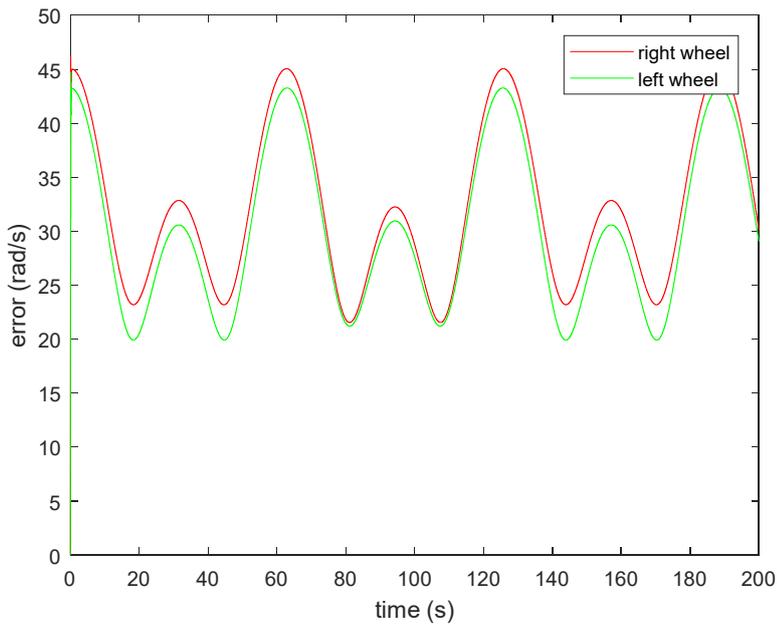
(a)



(b)

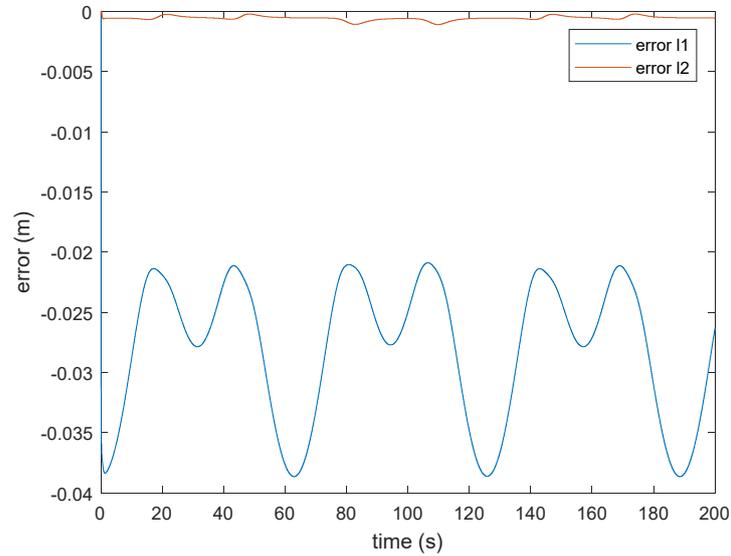
Gambar 4.47 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-5

Gambar 4.46 dan Gambar 4.47 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  lebih besar dibandingkan dengan pengujian ke-4 dengan  $MSE e_{\omega r F2} = 1.0934e + 03$  dan  $MSE e_{\omega l F2} = 9.6884e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{l F2} = 0.0037$  dan  $MSE e_{\beta F2} = 0.0032$ .



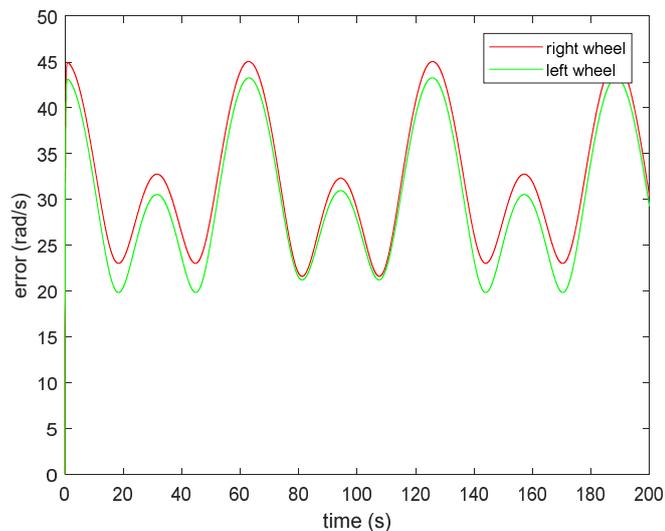
Gambar 4.48 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-5

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.48. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.49.



Gambar 4.49 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l2F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-5

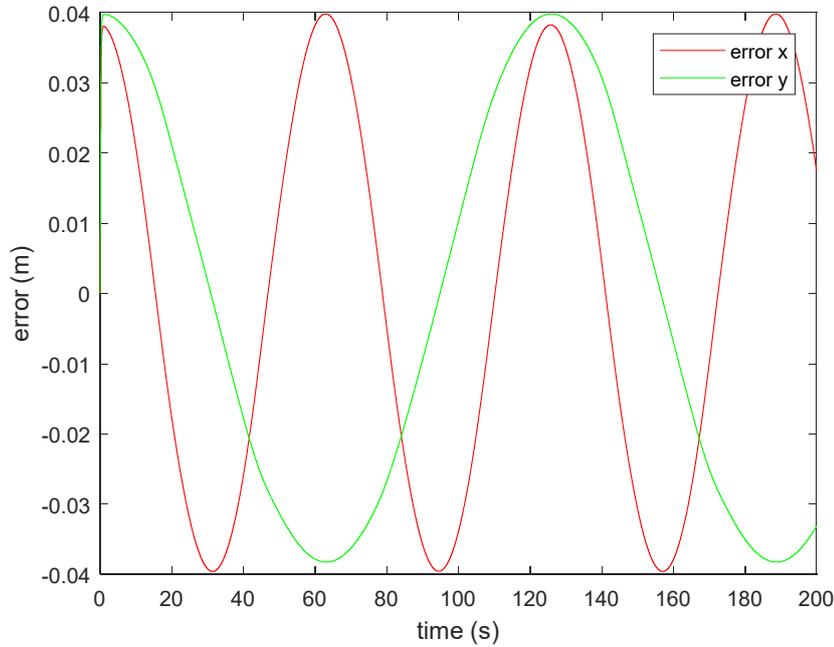
Dari Gambar 4.48 dan Gambar 4.49 terlihat bahwa sinyal error mendekati nilai pengujian ke-4. Adapun  $MSEe_{\omega rF3} = 1.0941e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lF3} = 9.714e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 8.2396e - 04$  dan  $MSEe_{l2F3} = 3.6139e - 07$ . Dari pengujian ke-5 dapat diketahui bahwa ketika keseluruhan follower terkena *disturbance*, maka formasi tidak dapat dibentuk dengan baik dengan indikator bertambahnya *MSE* untuk masing-masing follower dan nilai error yang melebihi kriteria.



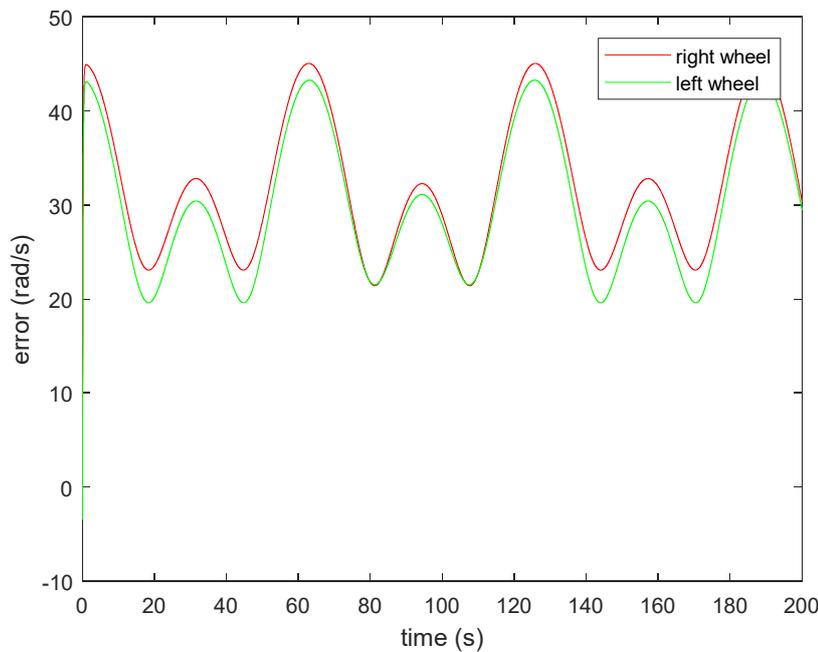
Gambar 4.50 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-6

f. Pengujian CTC dengan *Disturbance* pada Keseluruhan Robot

Pada pengujian ini *disturbance* akan dikenakan keseluruhan follower. Sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.50. Sedangkan error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.51.



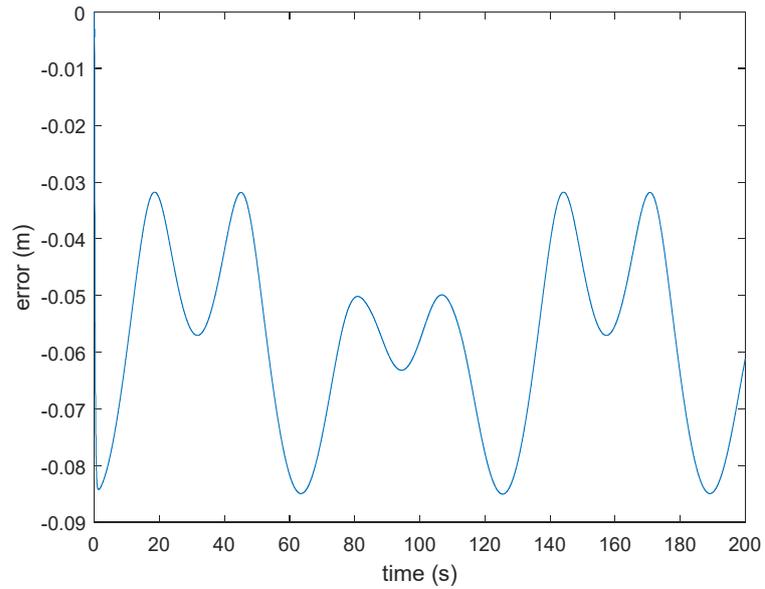
Gambar 4.51 Sinyal error kinematika  $R_L$  dengan *disturbance* pengujian ke-6



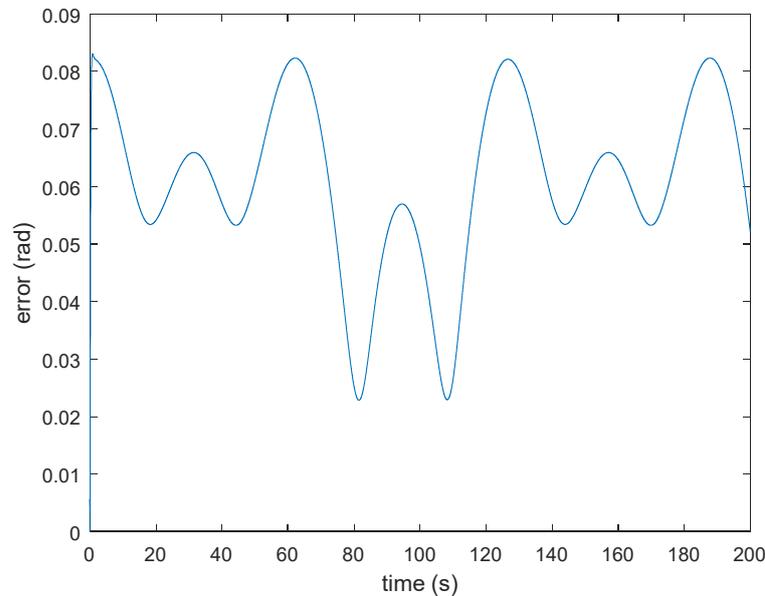
Gambar 4.52 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan *disturbance* pengujian ke-6

Pada pengujian ke-6, lebih besar dibandingkan dengan pengujian ke-4. Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 1.0906e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 9.6942e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 7.962e - 04$  dan  $MSEe_y = 8.1305e - 04$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.52. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.53.



(a)

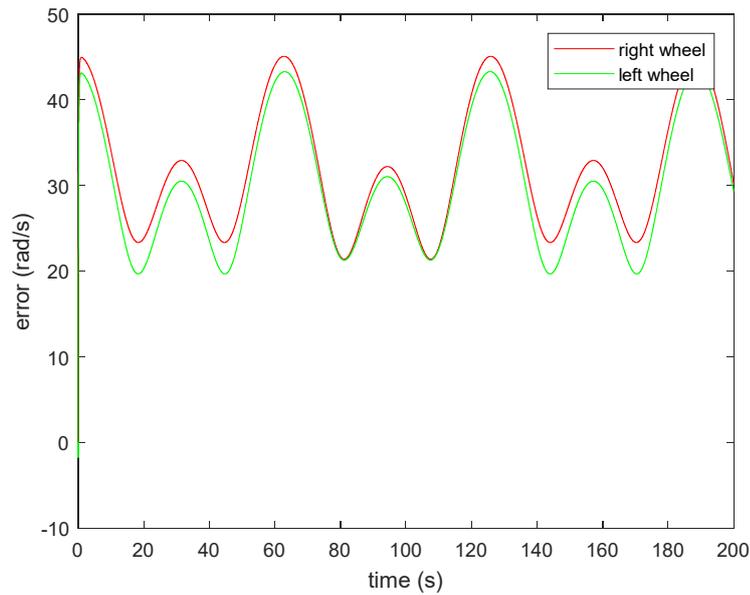


(b)

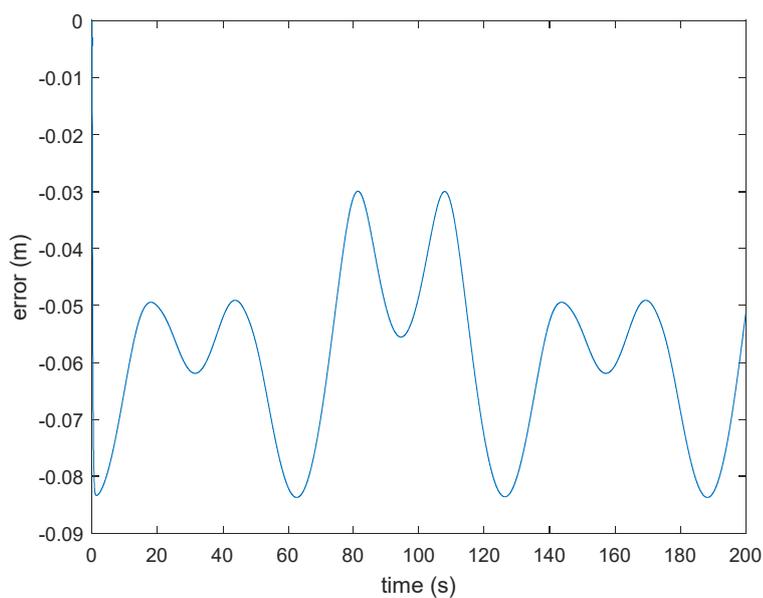
Gambar 4.53 Sinyal error  $e_{IF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-6

Dari Gambar 4.52 dan Gambar 4.53 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian ke-6 mendekati sinyal pada pengujian ke-5. Adapun  $MSE_{e_{\omega r F1}} = 1.0903e + 03$  dan  $MSE_{e_{\omega l F1}} = 9.6739e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE_{e_{l F1}} = 0.0036$  dan  $MSE_{e_{\beta F1}} = 0.0034$ . Dengan bertambahnya nilai  $MSE$  dan error maka kriteria yang telah ditetapkan tidak terpenuhi.

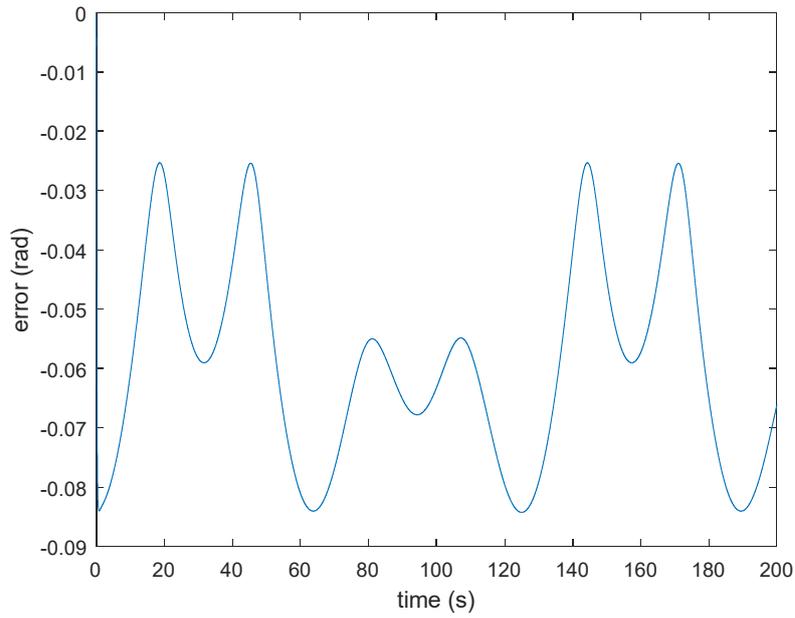
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.54. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.55.



Gambar 4.54 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan *disturbance* pengujian ke-6



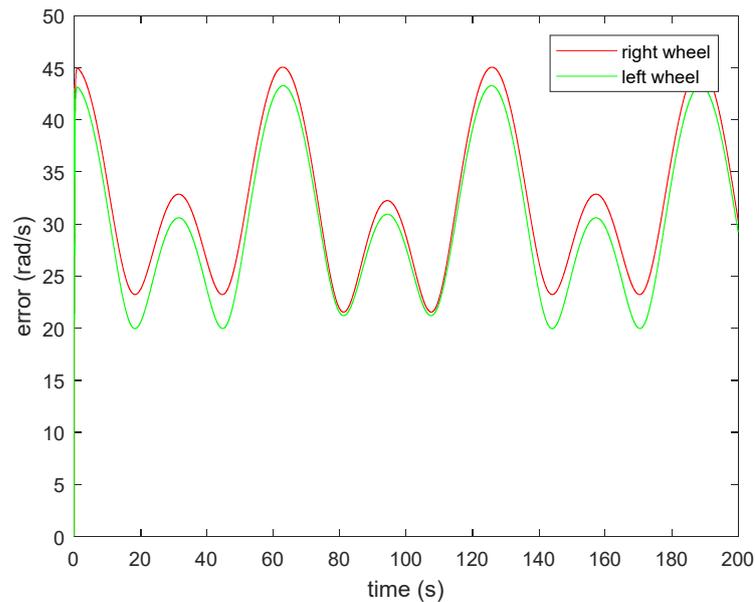
(a)



(b)

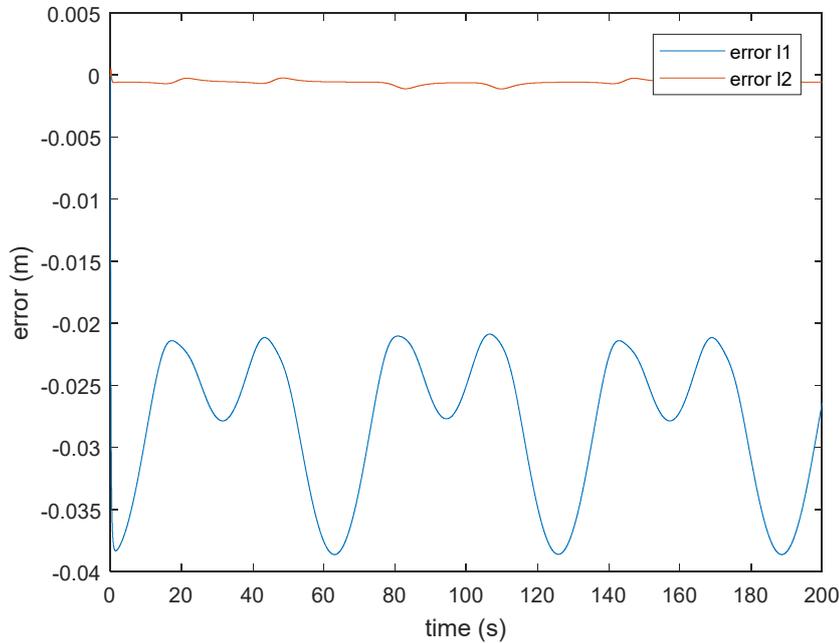
Gambar 4.55 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan *disturbance* pengujian ke-6

Gambar 4.54 dan Gambar 4.55 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  mendekati sinyal error pada pengujian ke-5 dengan  $MSEe_{\omega rF2} = 1.0939e + 03$  dan  $MSEe_{\omega lF2} = 9.672e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSEe_{lF2} = 0.0037$  dan  $MSEe_{\beta F2} = 0.0032$ .



Gambar 4.56 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-6

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.56. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.57.



Gambar 4.57 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{\omega lF3}$  dengan *disturbance* pengujian ke-6

Dari Gambar 4.56 dan Gambar 4.57 terlihat bahwa sinyal error mendekati nilai pengujian ke-5. Adapun  $MSE e_{\omega rF3} = 1.0935e + 03$  dan  $MSE e_{\omega lF3} = 9.7076e + 02$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSE e_{l1F3} = 8.236e - 04$  dan  $MSE e_{l2F3} = 3.6143e - 07$ . Dari pengujian ke-6 dapat diketahui bahwa ketika keseluruhan robot terkena *disturbance*, maka formasi tidak dapat dibentuk dengan baik dengan indikator bertambahnya *MSE* untuk masing-masing robot dan nilai error yang melebihi kriteria. Selain itu dengan adanya *disturbance* pada leader tidak terlalu berdampak besar pada formasi yang dibentuk oleh follower. Untuk mengurangi pengaruh *disturbance* pada robot, pada tahap selanjutnya dilakukan pengujian dengan tambahan NDO pada CTC untuk masing-masing robot.

#### 4.2. Pengujian CTC dengan NDO

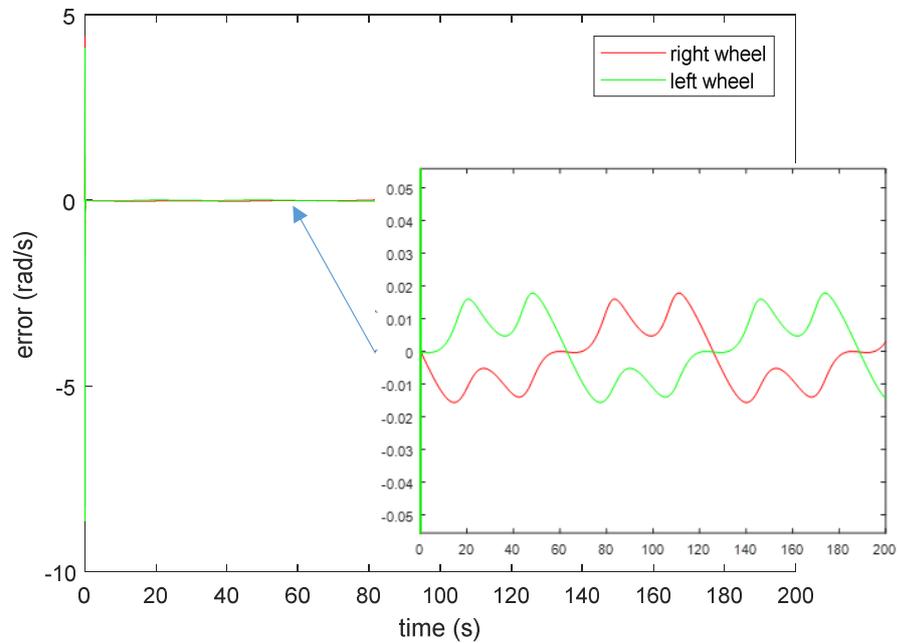
Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap NDO yang telah didesain. Seperti pada penelitian [15], persamaan 3.30 dan persamaan 3.31 dapat diketahui dengan persamaan berikut

$$C = YI_2 \quad (4.3)$$

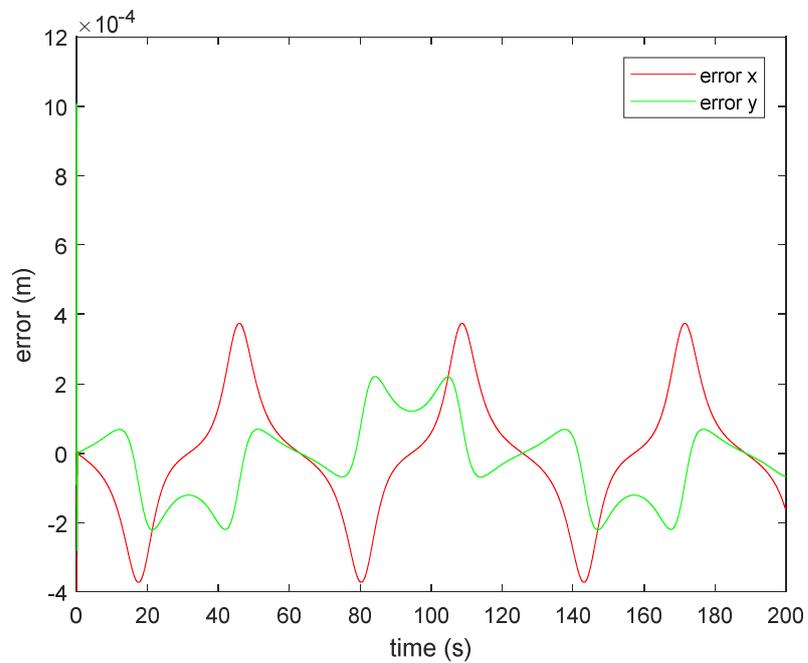
dimana  $Y = 0.125$ .

Pada tahap ini, *disturbance* dikenakan pada masing-masing robot seperti pada pengujian ke-6 sekaligus masing-masing robot diberikan NDO.

Sinyal error dinamika  $R_L$  ditunjukkan pada Gambar 4.58. Sinyal error kinematika ditunjukkan pada Gambar 4.59.



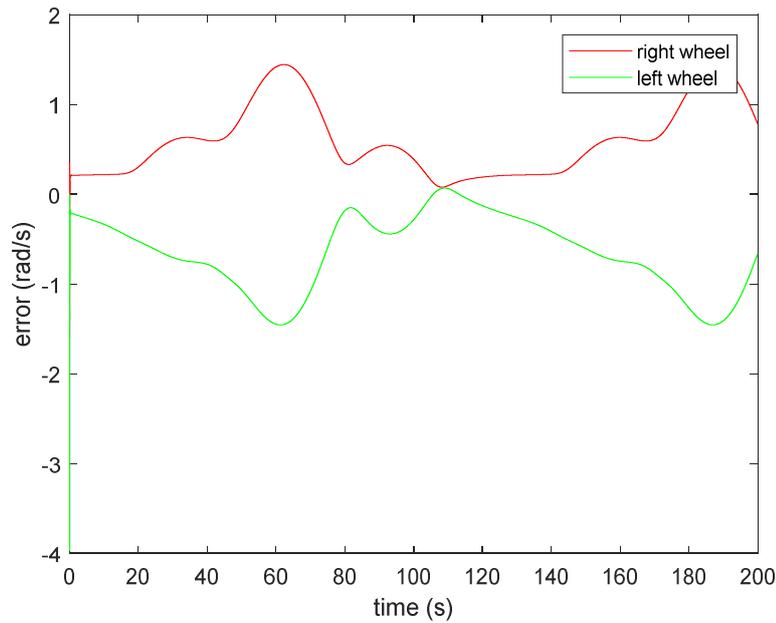
Gambar 4.58 Sinyal error dinamika  $R_L$  dengan NDO



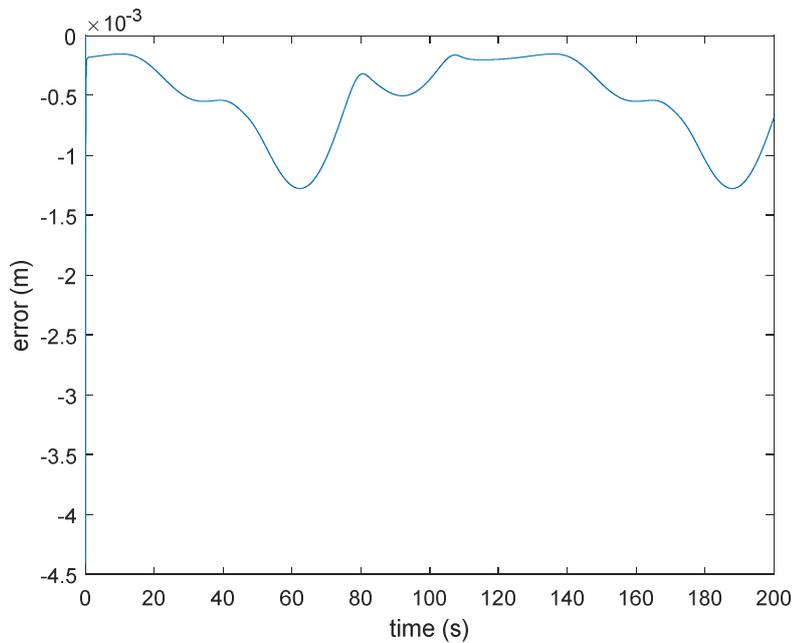
Gambar 4.59 Sinyal error kinematika  $R_L$  dengan NDO

Pada pengujian dengan NDO, sinyal error lebih kecil dibandingkan dengan pengujian ke-6. Adapun  $MSEe_{\omega rL} = 0.0047$  dan  $MSEe_{\omega lL} = 0.0049$ . Sedangkan pada kinematika  $R_L$ ,  $MSEe_x = 3.1565e - 08$  dan  $MSEe_y = 1.3384e - 08$ .

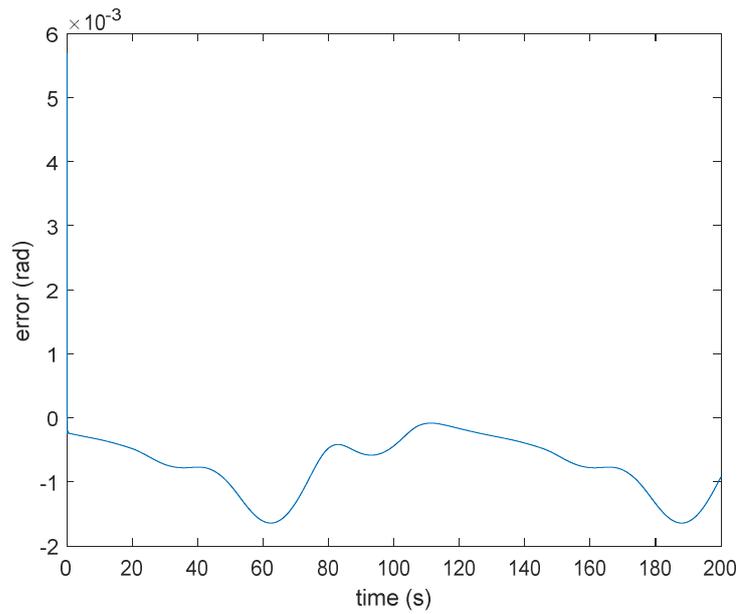
Sinyal error pada dinamika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.60. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F1}$  ditunjukkan pada Gambar 4.61.



Gambar 4.60 Sinyal error dinamika  $R_{F1}$  dengan NDO



(a)

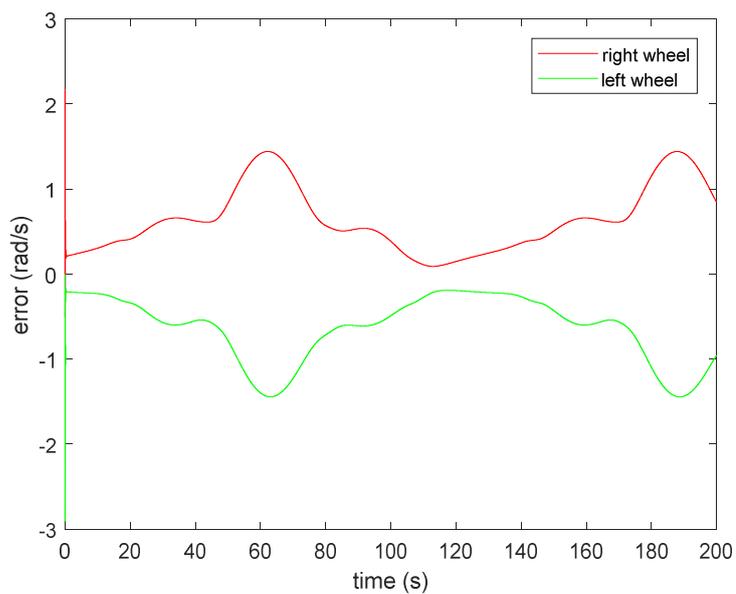


(b)

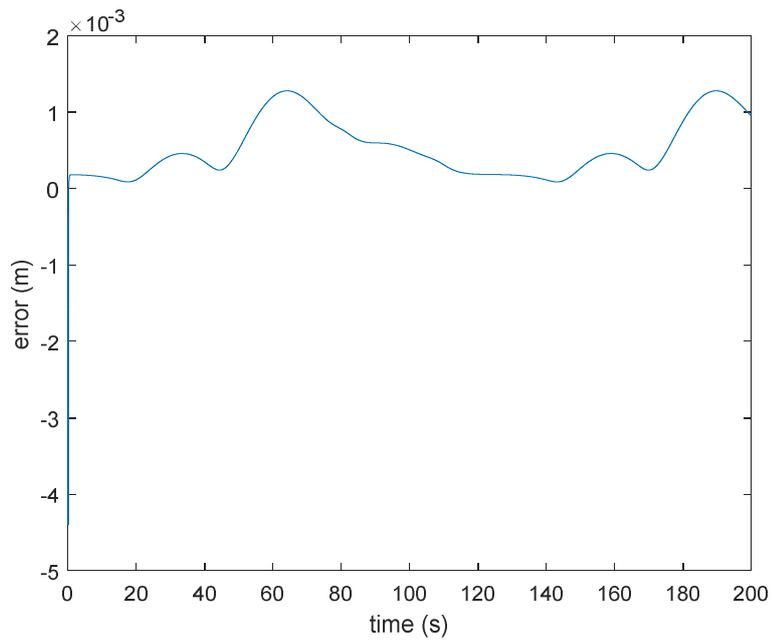
Gambar 4.61 Sinyal error  $e_{lF1}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F1}$  (b) dengan NDO

Dari Gambar 4.60 dan Gambar 4.60 diketahui bahwa sinyal error pada pengujian dengan NDO lebih kecil dibandingkan pada pengujian ke-6. Adapun  $MSE e_{\omega rF1} = 0.5221$  dan  $MSE e_{\omega lF1} = 0.6178$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F1}$ ,  $MSE e_{lF1} = 4.2269e - 07$  dan  $MSE e_{\beta F1} = 6.1432e - 07$ .

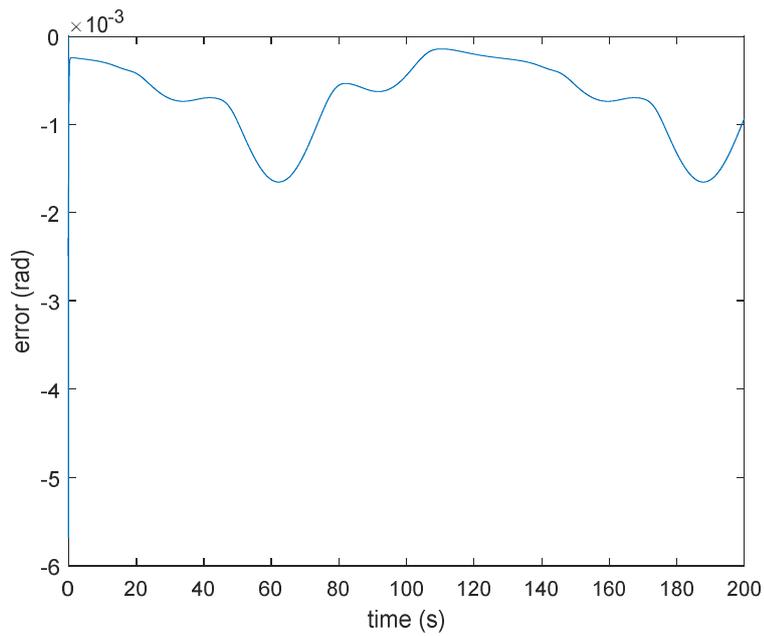
Sinyal error pada dinamika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.62. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F2}$  ditunjukkan pada Gambar 4.63.



Gambar 4.62 Sinyal error dinamika  $R_{F2}$  dengan NDO



(a)

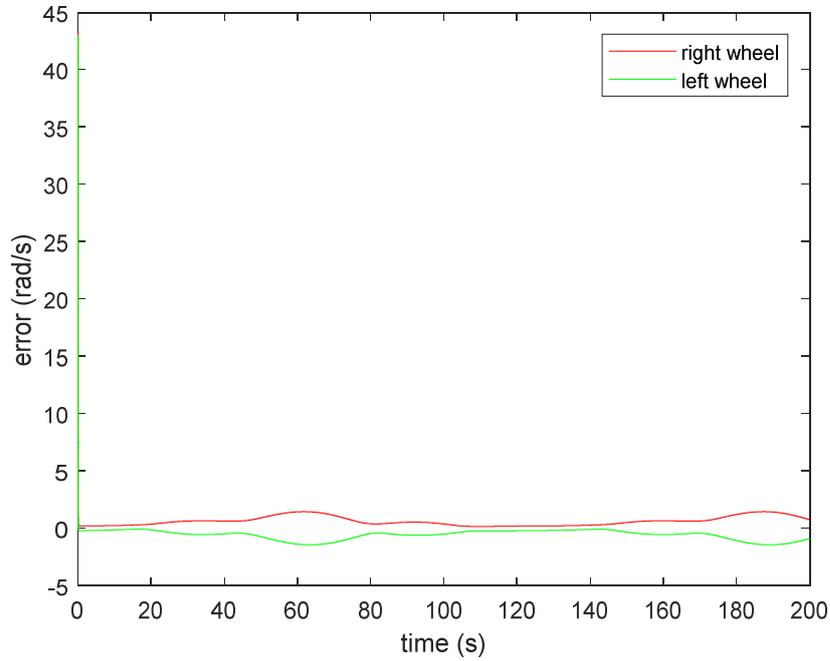


(b)

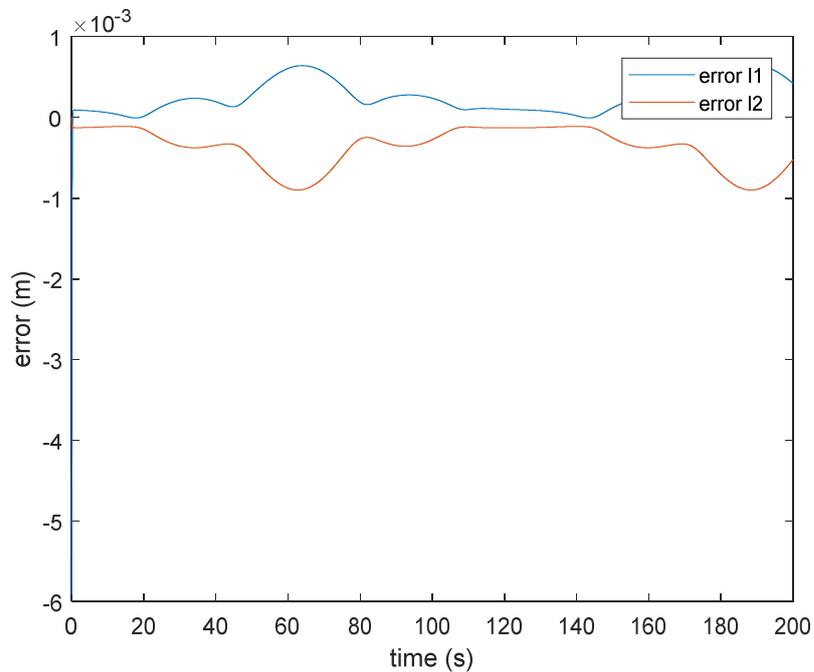
Gambar 4.63 Sinyal error  $e_{lF2}$  (a) dan Sinyal error  $e_{\beta F2}$  (b) dengan NDO

Gambar 4.62 dan Gambar 4.63 terlihat bahwa sinyal error dinamika  $R_{F2}$  lebih kecil dibandingkan sinyal error pada pengujian ke-6 dengan  $MSE e_{\omega rF2} = 0.5551$  dan  $MSE e_{\omega lF2} = 0.5496$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F2}$ ,  $MSE e_{lF2} = 4.0460e - 07$  dan  $MSE e_{\beta F2} = 5.9126e - 07$ .

Sinyal error pada dinamika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.64. Sedangkan sinyal error pada kinematika  $R_{F3}$  ditunjukkan pada Gambar 4.65.



Gambar 4.64 Sinyal error dinamika  $R_{F3}$  dengan NDO



Gambar 4.65 Sinyal error  $e_{l2F3}$  dan  $e_{l2F3}$  dengan NDO

Dari Gambar 4.64 dan Gambar 4.65 terlihat bahwa sinyal error lebih kecil dibandingkan dengan sinyal error pada pengujian ke-6. Adapun  $MSE_{e_{\omega rF3}} =$

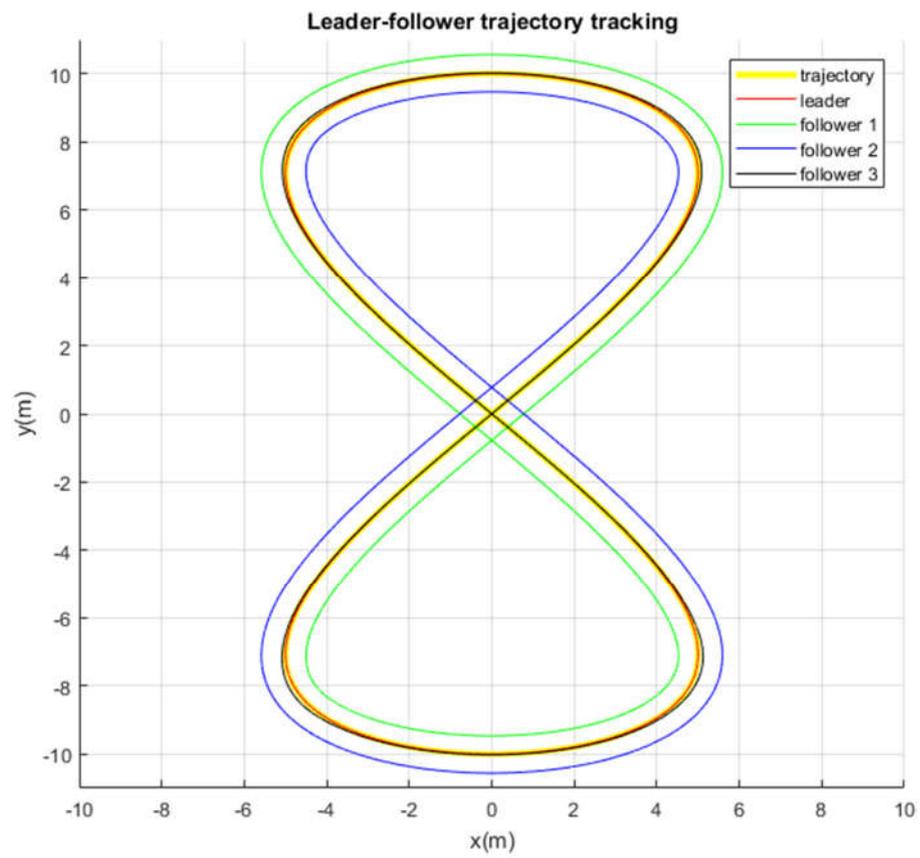
0.6433 dan  $MSEe_{\omega lF3} = 0.5918$ . Sedangkan pada kinematika  $R_{F3}$ ,  $MSEe_{l1F3} = 1.01e - 07$  dan  $MSEe_{l2F3} = 1.993e - 07$ .

Dari keseluruhan pengujian diketahui bahwa dengan adanya NDO yang ditambahkan pada CTC mampu mengurangi error pada dinamika dan kinematika sistem masing-masing robot. Adapun Perbandingan nilai  $MSE$  pengujian ke-6 dengan  $MSE$  saat menggunakan NDO ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan  $MSE$

| Robot    | MSE                 | Pengujian ke-6 | Pengujian dengan NDO |
|----------|---------------------|----------------|----------------------|
| $R_L$    | $MSEe_{\omega rL}$  | $1.0906e + 03$ | 0.0047               |
|          | $MSEe_{\omega lL}$  | $9.6942e + 02$ | 0.0049               |
|          | $MSEe_x$            | $7.962e - 04$  | $3.1565e - 08$       |
|          | $MSEe_y$            | $8.1305e - 04$ | $1.3384e - 08$       |
| $R_{F1}$ | $MSEe_{\omega rF1}$ | $1.0903e + 03$ | 0.5221               |
|          | $MSEe_{\omega lF1}$ | $9.6739e + 02$ | 0.6178               |
|          | $MSEe_{lF1}$        | 0.0036         | $4.2269e - 07$       |
|          | $MSEe_{\beta F1}$   | 0.0034         | $6.1432e - 07$       |
| $R_{F2}$ | $MSEe_{\omega rF2}$ | $1.0939e + 03$ | 0.5551               |
|          | $MSEe_{\omega lF2}$ | $9.672e + 02$  | 0.5496               |
|          | $MSEe_{lF2}$        | 0.0037         | $4.0460e - 07$       |
|          | $MSEe_{\beta F2}$   | 0.0032         | $5.9126e - 07$       |
| $R_{F3}$ | $MSEe_{\omega rF3}$ | $1.0935e + 03$ | 0.6433               |
|          | $MSEe_{\omega lF3}$ | $9.7076e + 02$ | 0.5918               |
|          | $MSEe_{l1F3}$       | $8.236e - 04$  | $1.01e - 07$         |
|          | $MSEe_{l2F3}$       | $3.6143e - 07$ | $1.993e - 07$        |

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa nilai  $MSE$  pengujian ke-6 lebih besar dari  $MSE$  saat menggunakan NDO. Hal ini menunjukkan bahwa NDO yang telah didesain mampu mengurangi error yang diakibatkan oleh *disturbance*. Adapun fromasi robot pada bidang  $x$  dan  $y$  ketika mengikuti trayektori ditunjukkan pada Gambar 4.66.



Gambar 4.66 Formasi robot ketika mengikuti trayektori

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa NDO mampu menurunkan nilai  $MSE$  error dinamika dan kinematika yang ditimbulkan karena pengaruh *disturbance* sebesar 99.9%, sedangkan untuk persentase  $MSE e_{l2F3}$  adalah 45%. Selain itu NDO mampu menurunkan error masing-masing robot sehingga formasi dipertahankan sesuai kriteria  $|e_{lF1}| < 0.038m$  dan error bearing  $|e_{\beta F1}| < 0.19rad$ ,  $|e_{lF2}| < 0.038m$  dan error bearing  $|e_{\beta F2}| < 0.19rad$ ,  $|e_{l1F3}| < 0.038m$  dan  $|e_{l2F3}| < 0.038m$ .

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa formasi robot tetap dapat terbentuk dengan baik ketika leader robot terkena *disturbance* sebelum diberikan NDO. Namun, formasi tidak dapat terbentuk sesuai kriteria ketika salah satu maupun keseluruhan follower terkena *disturbance*. Ketika terdapat error pada  $R_{F1}$  dan  $R_{F2}$  maka error pada  $R_{F3}$  juga akan meningkat. Namun tidak sebaliknya, error pada  $R_{F3}$  tidak mempengaruhi kondisi  $R_{F1}$  dan  $R_{F2}$ .

#### 5.2. Saran

Untuk mengembangkan penelitian selanjutnya, penulis menyarankan untuk menambahkan pengujian terhadap *noise* sensor pada output *inner-loop* maupun *outer-loop*. Perlunya ditambahkan strategi untuk *leader* robot mengetahui posisi dari *follower*, sehingga jika terjadi kesalahan maupun gangguan yang menyebabkan *follower* tertinggal, leader robot dapat menyesuaikan dengan tetap mempertahankan formasi dan tracking trayektori yang diberikan. Selain itu, agar pengetahuan tentang pengaturan formasi DDMR dapat disajikan dengan utuh, perlunya dilakukan implementasi terhadap metode yang telah didesain pada sistem yang nyata.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

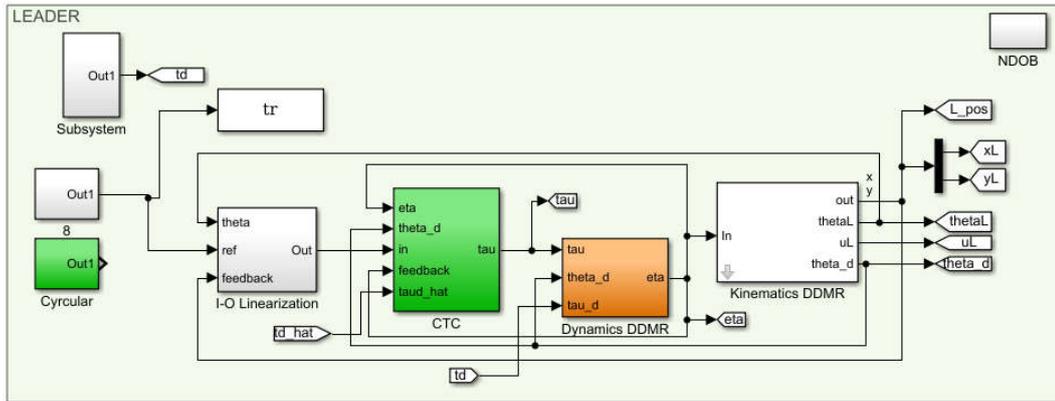
- [1] K.-K. Oh, M.-C. Park, and H.-S. Ahn, “A survey of multi-agent formation control,” *Automatica*, vol. 53, pp. 424–440, Mar. 2015.
- [2] E. Pruner, D. Neculescu, J. Sasiadek, and B. Kim, “Control of decentralized geometric formations of mobile robots,” in *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012 17th International Conference on*, 2012, pp. 627–632.
- [3] M. Ghiasvand and K. Alipour, “Formation control of wheeled mobile robots based on fuzzy logic and system dynamics,” in *Fuzzy Systems (IFSC), 2013 13th Iranian Conference on*, 2013, pp. 1–6.
- [4] K.-H. Bae, Y.-B. Kim, and Y.-K. Choi, “A fuzzy compensated PID controller for formation control of mobile robots,” in *Modelling, Identification & Control (ICMIC), 2014 Proceedings of the 6th International Conference on*, 2014, pp. 123–128.
- [5] S. Ahmed, M. Noh, and R. N. K. Loh, “Control Analysis and Feedback Techniques for Multi Agent Robots,” in *Multiagent Systems*, S. Ahmed and M. Noh, Eds. I-Tech Education and Publishing, 2009.
- [6] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J. P. Ostrowski, J. Spletzer, and C. J. Taylor, “A vision-based formation control framework,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, no. 5, pp. 813–825, Oct. 2002.
- [7] W.-H. Chen, “Disturbance Observer Based Control for Nonlinear Systems,” *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 9, no. 4, pp. 706–710, Dec. 2004.
- [8] M. H. Amoozgar, K. Alipour, S. H. Sadati, and M. Dehsara, “Position control of multiple wheeled mobile robots using fuzzy logic,” in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2010 IEEE/ASME International Conference on*, 2010, pp. 587–592.
- [9] J. W. Cheung and Y. S. Hung, “Modelling and control of a 2-DOF planar parallel manipulator for semiconductor packaging systems,” in *Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on*, 2005, pp. 717–722.
- [10] R. D. A. A. Hatab, “Dynamic Modelling of Differential-Drive Mobile Robots using Lagrange and Newton-Euler Methodologies: A Unified Framework,” *Adv. Robot. Autom.*, vol. 02, no. 02, 2013.
- [11] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, and F. L. Lewis, *Robot manipulator control: theory and practice*, 2nd ed., And expanded. New York: Marcel Dekker, 2004.

- [12] D. Neculescu, E. Pruner, J. Sasiadek, and B. Kim, "Control of nonholonomic autonomous vehicles and their formations," in *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2010 15th International Conference on*, 2010, pp. 37–42.
- [13] J. P. Desai, J. Ostrowski, and V. Kumar, "Controlling formations of multiple mobile robots," in *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, 1998, vol. 4, pp. 2864–2869.
- [14] D. Phaoharuhansa and A. Shimada, "Friction Compensation for Two Wheeled Inverted Pendulum Robot Using System Identification," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*
- [15] A. Mohammadi, M. Tavakoli, H. J. Marquez, and F. Hashemzadeh, "Nonlinear disturbance observer design for robotic manipulators," *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 3, pp. 253–267, Mar. 2013.

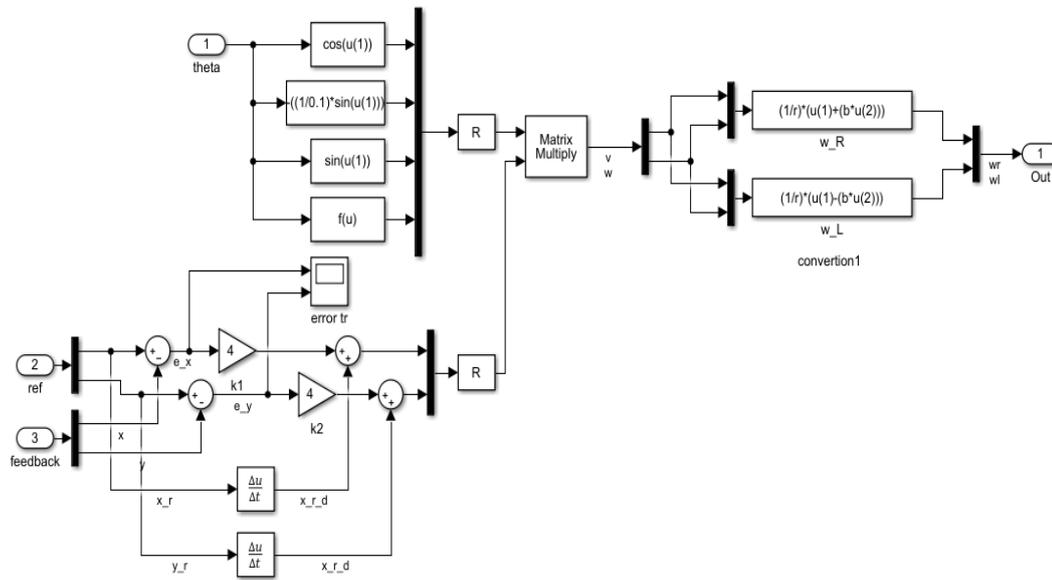
# LAMPIRAN

## LAMPIRAN A

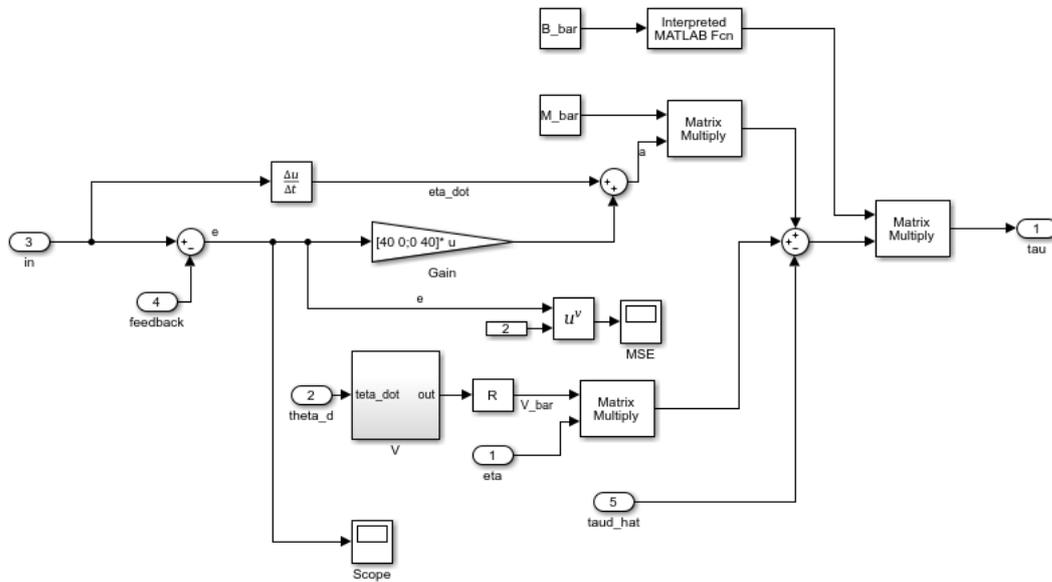
### A.1. Blok Simulink untuk *leader* robot



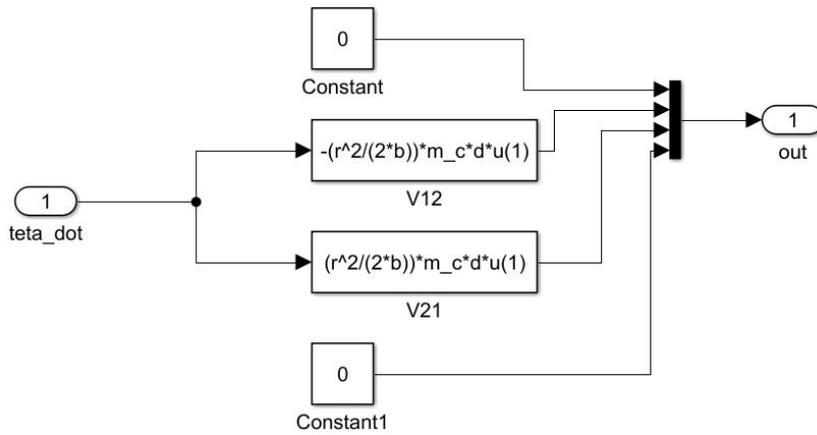
### A.2. Blok Simulink IOFL untuk *leader*



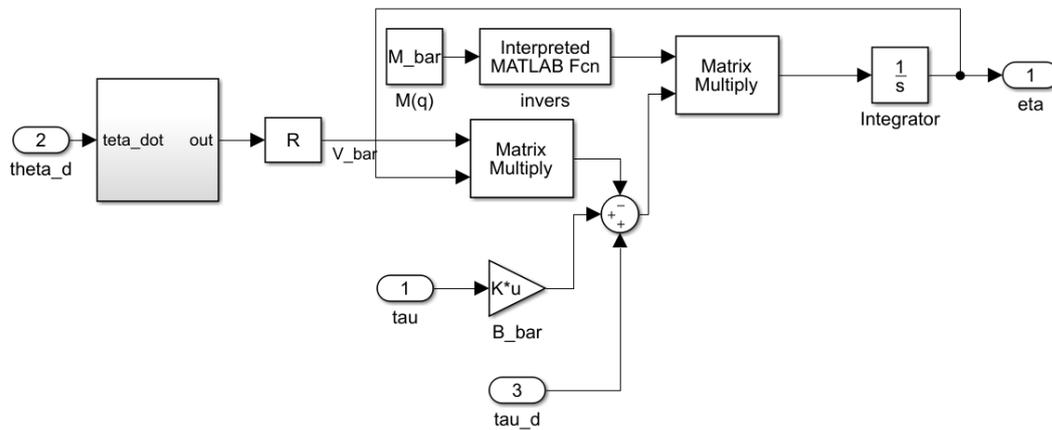
### A.3. Blok CTC



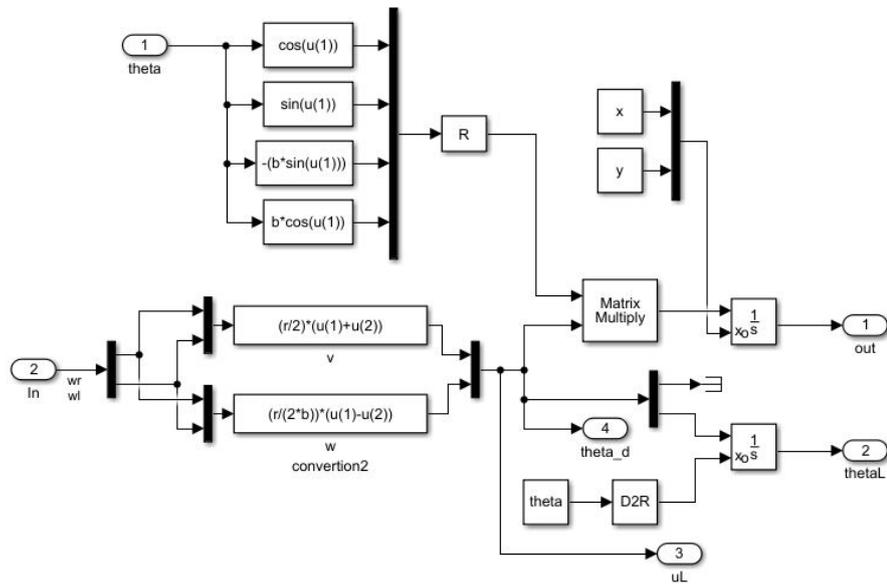
### A.4. Matriks V



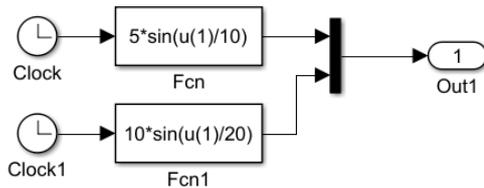
### A.5. Blok model dinamika



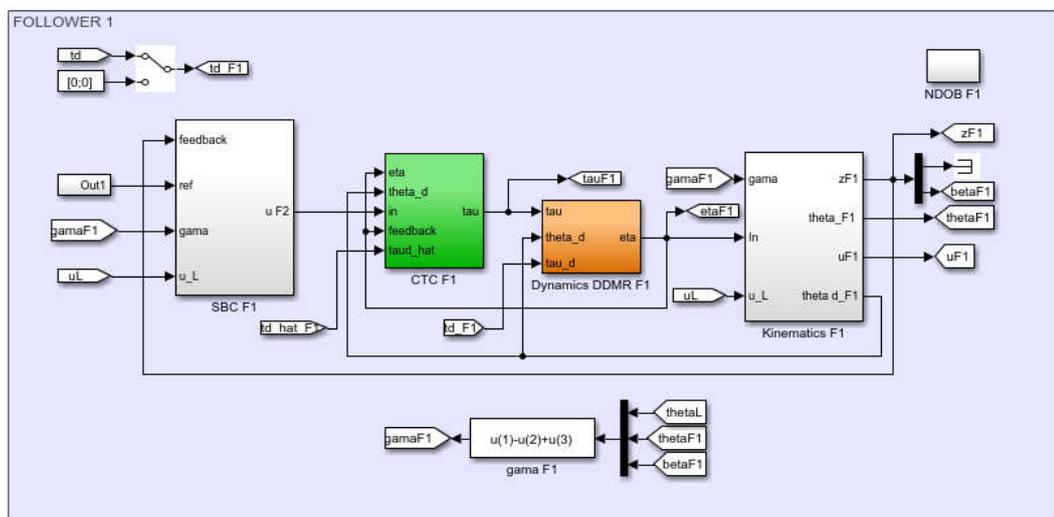
### A.6. Blok model kinematika *leader*



### A.7. Blok trayektori generator



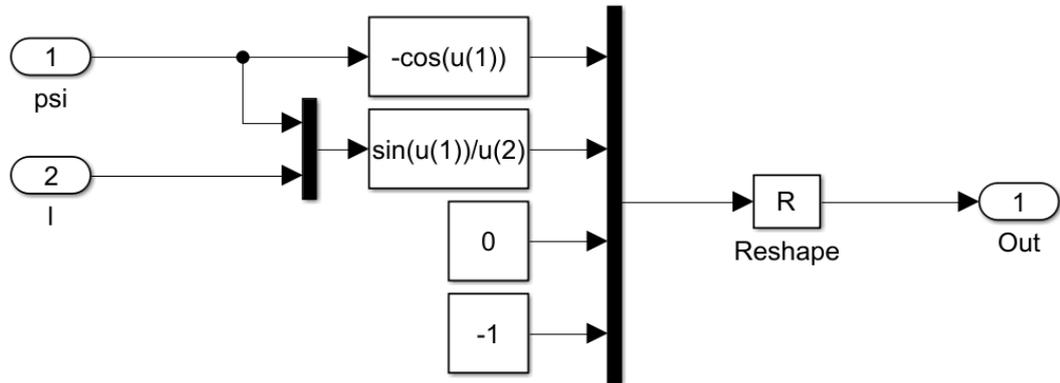
### A.8. Blok Simulink untuk follower 1



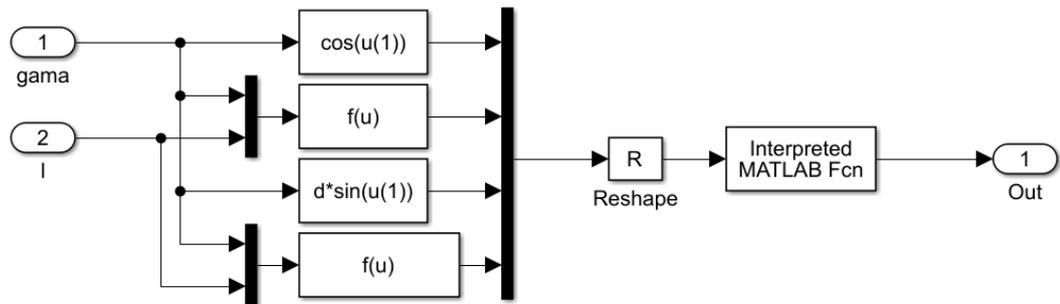
### A.9. Blok SBC Follower 1



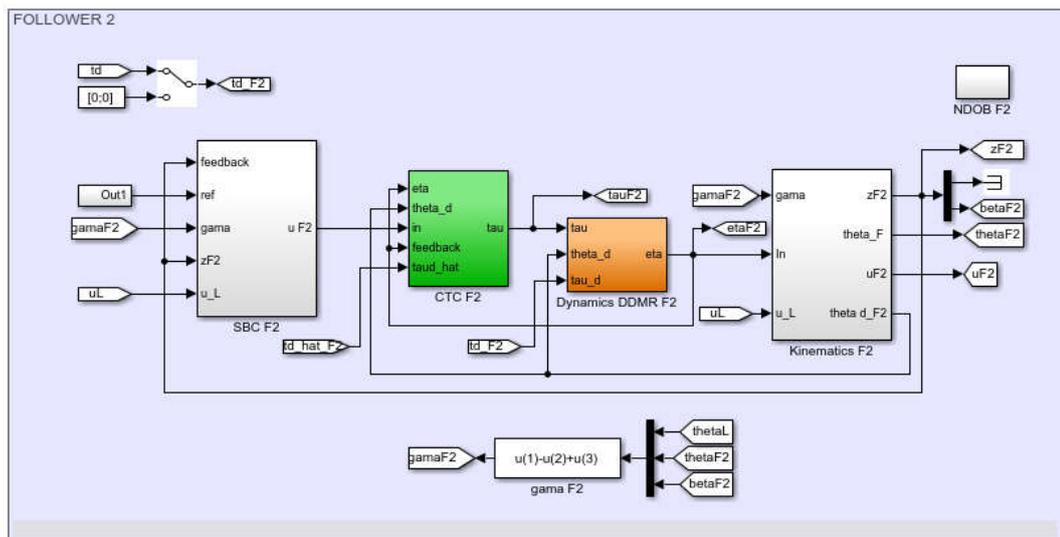
### A.12. Blok Matriks $F$



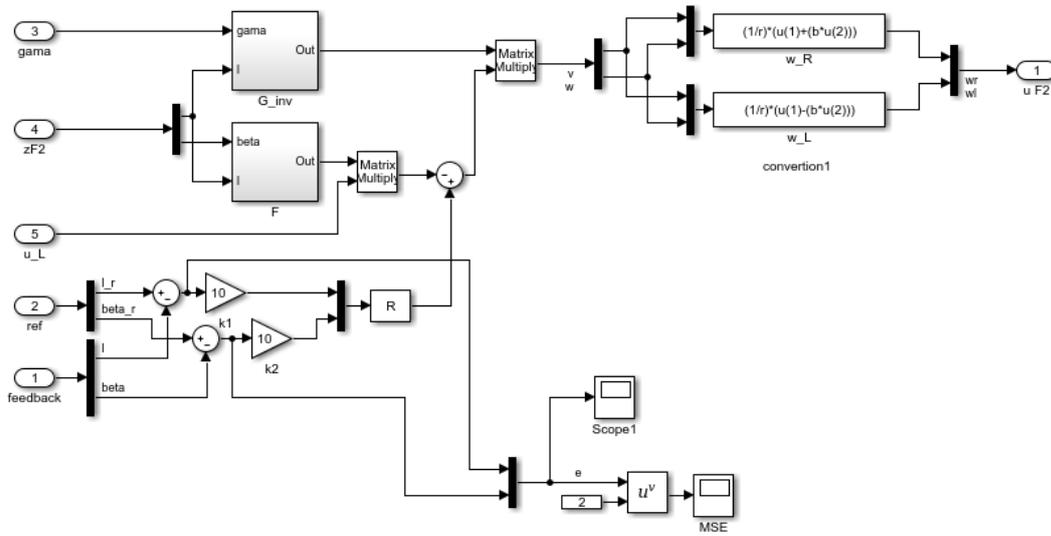
### A.13. Blok Matriks $G^{-1}$



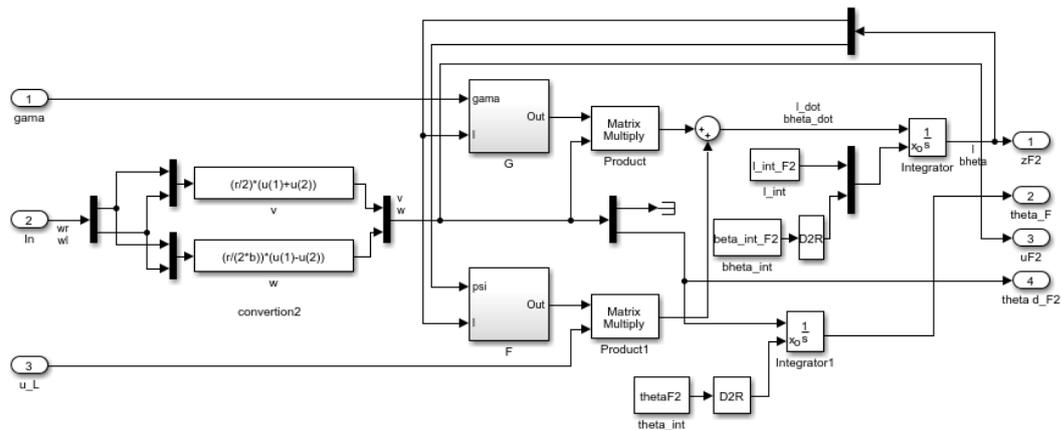
### A.14. Blok Simulink untuk follower 2



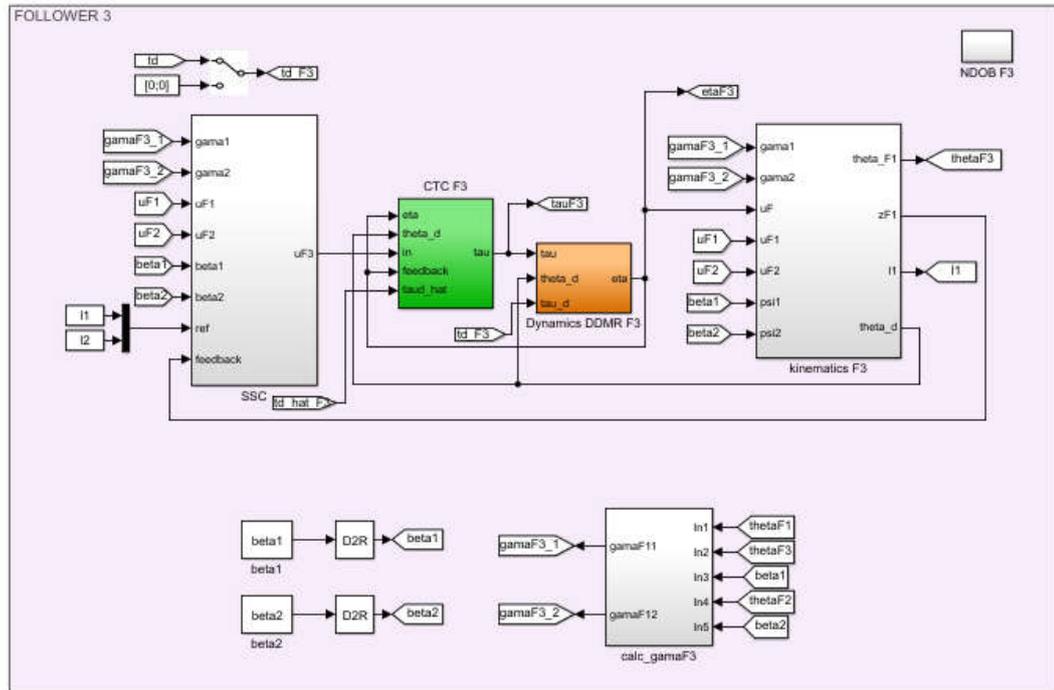
### A.15. Blok SBC Follower 2



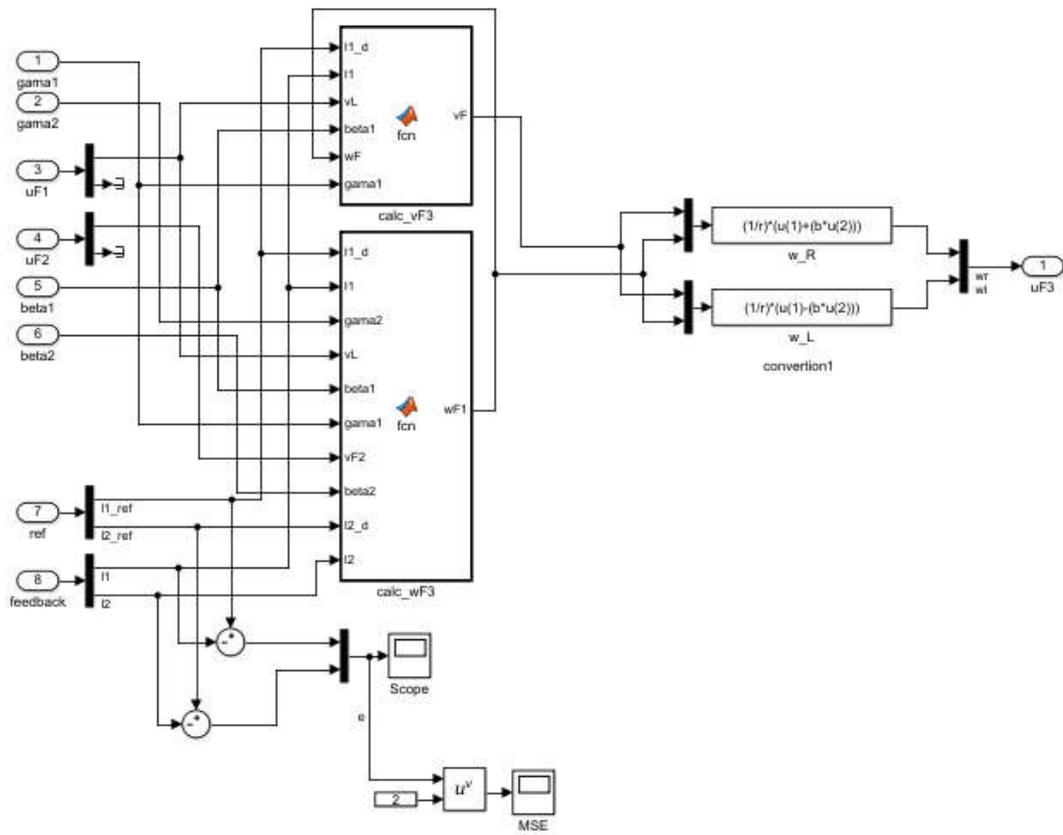
### A.16. Blok Model Kinematika Follower 2



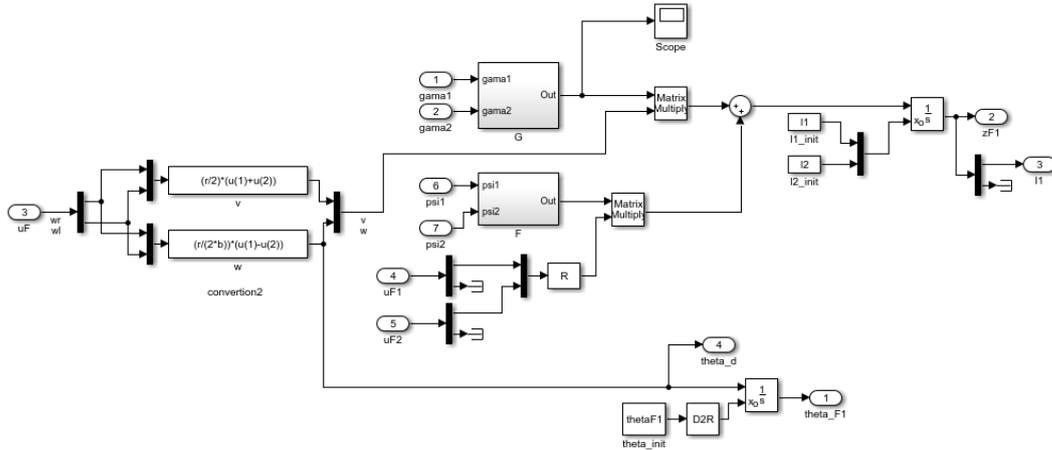
### A.17. Blok Simulink untuk follower 3



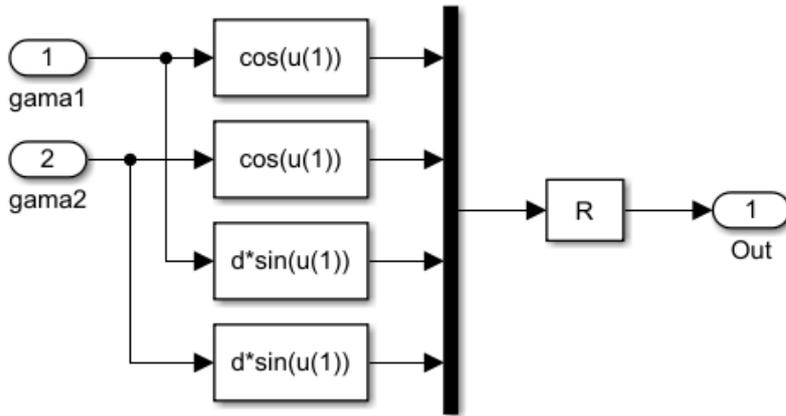
### A.18. Blok SSC Follower 3



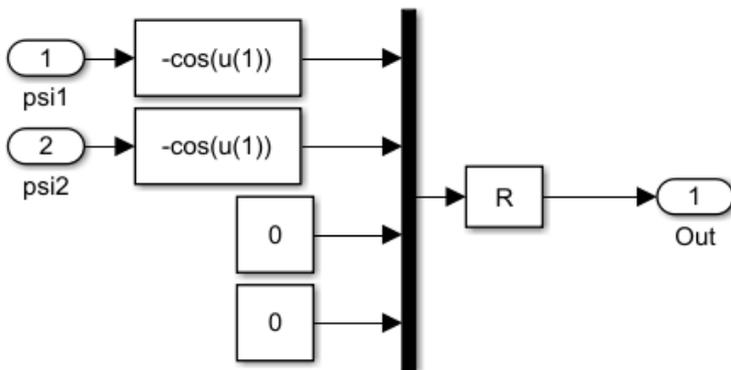
A.19. Blok Model Kinematika Follower 3



A.20. Blok Matriks G Follower 3



A.21. Blok Matriks F Follower 3



## LAMPIRAN B

### B.1. Script untuk calc\_vF1

```
function vF = fcn(l1_d,l1,vL,beta1,wF,gama1)
k1=20;
vF=((k1*(l1_d-l1))+(vL*cos(beta1))-(
(0.05*wF*sin(gama1)))/cos(gama1);
```

### B.2. Script untuk calc\_wF1

```
function wF1 = fcn(l1_d,l1,gama2,vL,beta1,gama1,vF2,beta2,l2_d,l2)
k1 = 20;
k2 = 20;
a = ((k1*(l1_d-
l1)*cos(gama2))+(vL*cos(beta1)*cos(gama2)))/(0.05*sin(gama1-
gama2));
b = ((vF2*cos(beta2)*cos(gama1))-(k2*(l2_d-
l2)*cos(gama1)))/(0.05*sin(gama1-gama2));
wF1 = a+b;
```

### B.3. Script untuk parameter

```
clc
%inisialisasi
%a=0.3; %m panjang robot
r = 0.025; %m jari jari roda
b = 0.1; %m lebar robot dari roda ke titik tengah
d = 0.05; %m jarak titik pusat robot dengan titik tengah kedua
roda
m_c = 3; %kg massa robot
m_w = 0.01; %kg massa roda
I_c = 0.0327; %kg-m.^2 inersia body (1/12)*m*(a^2+(2*b)^2) old
value=1.5625
I_w = 3.1250e-06; %kg-m.^2 moment of inertia of each driving wheel
with a motor about the wheel axis 1/2*m_w*r^2 old value=0.0005
I_m = 1.5750e-06; %kg-m.^2 moment of inertia of each driving wheel
with a motor about the wheel diameter old value=0.00025

m = m_c+(2*m_w);
I = (m_c*d.^2)+(2*m_w*b.^2)+I_c+(2*I_m);

%matriks M_bar(q)
M_bar = ((r/(2*b)).^2)*[ (m*b.^2+I)+I_w (m*b.^2-I)
(m*b.^2-I) (m*b.^2+I)+I_w];

%matriks B_bar(q)
B_bar = [1 0
0 1];

%ref F1
lref_F1 = sqrt(0.6); %distance from leader sqrt(0.6)
beta_ref_F1 = 225; %beraing angle in deg
```

```

thetaF1 = 45; %initial orientation F2 in deg
beta_int_F1 = beta_ref_F1; %initial bearing to obtain initial
position in deg
l_int_F1 = lref_F1; %initial distance from leader

%ref F2
lref_F2 = sqrt(0.6); %distance from leader sqrt(0.6)
beta_ref_F2 = 135; %bearing angle in deg
thetaF2 = 45; %initial orientation F2 in deg
beta_int_F2 = beta_ref_F2; %initial bearing to obtain initial
position in deg
l_int_F2 = lref_F2; %initial distance from leader

%ref F3
l1=sqrt(0.6); %distance from F1
l2=sqrt(0.6); %distance from F2
thetaF3=45; %initial orientation in deg
beta1=135;
beta2=270;

%koef of friction
Ccu=[0.1 0
      0 0.01];
Cv=[0.057 0
     0 0.057];

%check M_bar properties
E = eig(M_bar);

%obatin L :
sigma2 = 0.01;

%obtain Y or X^-1
Y = 0.5*((0.0013*100)+2*6*sigma2)*eye(2);

%L matrix
L = Y*inv(M_bar)

```

#### B.4. Script untuk plot trayektori

```

clc
%run parameter_n_ref file
parameter_n_ref;
%run Simulink full_formation2
sim('full_formation2');

figure(1)
axis([-10 10 -11 11]);
title('Leader-follower trajectory tracking')
ylabel('y(m)')
xlabel('x(m)')
grid on

tra=animatedline('color','y','linewidth',3);

```

```

rob=animatedline('color','r');
fol1=animatedline('color','g');
fol2=animatedline('color','b');
fol3=animatedline('color','k');
legend('trajectory','leader','follower 1','follower 2','follower
3')
%for i=1:length(xy_leader)
%   addpoints(tra,tr(i,1),tr(i,2))
%end
for i=1:length(xy_leader)
    addpoints(tra,tr(i,1),tr(i,2))
    addpoints(rob,xy_leader(i,1),xy_leader(i,2))
    addpoints(fol1,xy_fol1(i,1),xy_fol1(i,2))
    addpoints(fol2,xy_fol2(i,1),xy_fol2(i,2))
    addpoints(fol3,xy_fol3(i,1),xy_fol3(i,2))
drawnow
end

```

## B.5. Script untuk plot sinyal error

```

clc

%plot error dynamics leader
figure(1)
plot(errord_L(:,1),errord_L(:,2),'r',errord_L(:,1),errord_L(:,3),'
g')
ylabel('error (rad/s)')
xlabel('time (s)')
legend('right wheel','left wheel')
grid on

%plot error kinametaics leader
t = errork_L.time;
ex = errork_L.signals(1).values;
ey = errork_L.signals(2).values;
figure(2)
plot(t,ex,'r',t,ey,'g')
ylabel('m')
xlabel('time (s)')
legend('error x','error y')
grid on

%plot error dynamics F1
figure(3)
plot(errord_F1(:,1),errord_F1(:,2),'r',errord_F1(:,1),errord_F1(:,
3),'g')
ylabel('error (rad/s)')
xlabel('time (s)')
legend('right wheel','left wheel')
grid on

%plot error kinematics F1
%plot error l F1
figure(4)
plot(errork_F1(:,1),errork_F1(:,2))
ylabel('error (m)')

```

```

xlabel('time (s)')
grid on
%plot error b F1
figure(5)
plot(errork_F1(:,1),errork_F1(:,3))
ylabel('error (rad)')
xlabel('time (s)')
grid on

%plot error dynamics F2
figure(6)
plot(errord_F2(:,1),errord_F2(:,2),'r',errord_F2(:,1),errord_F2(:,3),'g')
ylabel('error (rad/s)')
xlabel('time (s)')
legend('right wheel','left wheel')
grid on

%plot error kinematics F2
%plot error l F2
figure(7)
plot(errork_F2(:,1),errork_F2(:,2))
ylabel('error (m)')
xlabel('time (s)')
grid on
%plot error b F2
figure(8)
plot(errork_F2(:,1),errork_F2(:,3))
ylabel('error (rad)')
xlabel('time (s)')
grid on

%plot error dynamics F3
figure(9)
plot(errord_F3(:,1),errord_F3(:,2),'r',errord_F3(:,1),errord_F3(:,3),'g')
ylabel('error (rad/s)')
xlabel('time (s)')
legend('right wheel','left wheel')
grid on

%plot error kinematics F3
%plot error l1 dan l2
figure(10)
plot(errork_F3(:,1),errork_F3(:,2),errork_F3(:,1),errork_F3(:,3))
ylabel('error (m)')
xlabel('time (s)')
legend('error l1','error l2')
grid on

```

## B.6. Script untuk MSE

```

clc

%MSE dinamika leader
MSE_rL = sum(sqrt(ed_L(:,2)))/20001;

```

```

MSE_lL = sum(sqrt_ed_L(:,3))/20001;
%MSE kinematika leader
MSE_ex = sum(sqrt_ek_L(:,2))/20001;
MSE_ey = sum(sqrt_ek_L(:,3))/20001;

%MSE dinamika F1
MSE_rF1 = sum(sqrt_ed_F1(:,2))/20001;
MSE_lF1 = sum(sqrt_ed_F1(:,3))/20001;
%MSE kinematika F1
MSE_leF1 = sum(sqrt_ek_F1(:,2))/20001;
MSE_bF1 = sum(sqrt_ek_F1(:,3))/20001;

%MSE dinamika F2
MSE_rF2 = sum(sqrt_ed_F2(:,2))/20001;
MSE_lF2 = sum(sqrt_ed_F2(:,3))/20001;
%MSE kinematika F2
MSE_leF2 = sum(sqrt_ek_F2(:,2))/20001;
MSE_bF2 = sum(sqrt_ek_F2(:,3))/20001;

%MSE dinamika F3
MSE_rF3 = sum(sqrt_ed_F3(:,2))/20001;
MSE_lF3 = sum(sqrt_ed_F3(:,3))/20001;
%MSE kinematika F3
MSE_l1F3 = sum(sqrt_ek_F3(:,2))/20001;
MSE_l2F3 = sum(sqrt_ek_F3(:,3))/20001;

```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT PENULIS



**Arya Kusumawardana** dilahirkan pada tahun 1993 di Kediri, Indonesia. Pendidikan tingginya ditempuh dari jenjang S1 di Universitas Negeri Malang, Jurusan Teknik Elektro dan mendapatkan gelar Sarjana Pendidikan pada tahun 2015. Pada Tahun 2016 penulis melanjutkan studi di Departmen Teknik Eektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bidang keahlian Teknik Sistem Pengaturan. Pada saat ini penulis sedang menyelesaikan program magisternya pada bulan Desember 2017.