



TESIS - TE142599

***ROBUST ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL
DENGAN PERMASALAHAN INCOMPLETE
INFORMATION PADA SUSPENSI SEMI AKTIF
SISTEM MOBIL BERODA EMPAT***

MAS NURUL ACHMADIAH
2214202202

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

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



TESIS - TE142599

***ROBUST ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL
DENGAN PERMASALAHAN *INCOMPLETE*
INFORMATION PADA SUSPENSI SEMI AKTIF
SISTEM MOBIL BERODA EMPAT***

MAS NURUL ACHMADIAH
2214202202

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
DEPARTEMEN 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:

Mas Nurul Achmadiyah
NRP. 2214202202


Tanggal Ujian : 8 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:


1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng. (Pembimbing I)
NIP: 19590219 198610 1 001


2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T. (Pembimbing II)
NIP: 19570424 198502 1 001


3. Prof. Dr. Ir. Mochammad Nuh, DEA. (Penguji)
NIP: 19590617 198403 1 002


4. Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., M.T. (Penguji)
NIP: 19680812 199403 2 001

Dekan Fakultas Teknologi Elektro


Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP: 19700212 199512 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul "**ROBUST ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL DENGAN PERMASALAHAN INCOMPLETE INFORMATION PADA SUSPENSI SEMI AKTIF SISTEM MOBIL BERODA EMPAT**" 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, 8 Juni 2017



Mas Nurul Achmadiyah
NRP. 2214202202

Halaman ini sengaja dikosongkan

ROBUST ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL DENGAN PERMASALAHAN *INCOMPLETE INFORMATION* PADA SUSPENSI SEMI AKTIF SISTEM MOBIL BERODA EMPAT

Nama mahasiswa : Mas Nurul Achmadiyah
NRP : 2214202202
Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng
2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dibidang otomotif sangatlah pesat. Penelitian mengenai *road holding* dan *road handling* pada kendaraan masih berlanjut untuk meningkatkan kenyamanan dan keamanan berkendara. Suspensi pada kendaraan memegang peranan yang sangat penting dalam memperoleh kenyamanan. Dari penelitian yang telah dilakukan kenyamanan berkendara dan pengemudian pada suspensi semi aktif lebih baik jika dibandingkan dengan suspensi pasif, dan lebih terjangkau jika dibandingkan suspensi aktif.

Penggunaan suspensi semi aktif yang dipasang pada keempat roda sebuah sistem kendaraan beroda empat tidak luput dari adanya kesalahan yang terjadi pada masing-masing sensor. Untuk mengatasi kesalahan pada sistem, maka perlu adanya sebuah metode untuk mengkompensasi kesalahan pada sistem sehingga sistem dapat memiliki performa yang baik. Metode ini disebut *Fault Tolerant Control* (FTC). Beberapa penelitian tentang FTC pada sistem kendaraan yang menggunakan suspensi semi aktif telah dilakukan, namun pembahasan tentang *incomplete information* tidak di kaji lebih lanjut. Sedangkan dalam beberapa situasi, terdapat beberapa data atau input kontrol hilang selama pengolahan data.

Tesis ini membahas mengenai FTC dengan permasalahan *incomplete information* yang diaplikasikan pada suspensi semi aktif sistem mobil beroda empat. FTC yang digunakan yaitu tipe *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). AFTC digunakan agar parameter dari kontroler dikonfigurasi ulang sesuai dengan informasi kesalahan yang didapatkan secara *online* guna meningkatkan stabilitas dan performa keseluruhan sistem saat terjadi kesalahan pada sistem. Dari empat simulasi yang dilakukan, penggunaan metode ini mampu mengurangi magnitude percepatan sistem akibat *fault* rata – rata sebesar 43%. Kontribusi dari penelitian ini adalah penggunaan AFTC terbukti dapat menyelesaikan permasalahan *Incomplete Information* dengan menggunakan metode Robust H_{∞} dengan pendekatan *Linier Matrix Inequality* (LMI).

Kata kunci: Suspensi semi aktif, *Linier Matrix Inequality*, saturasi sensor, *Active Fault Tolerant Control*, *Incomplete Information*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ROBUST ACTIVE FAULT TOLERANT CONTROL FOR INCOMPLETE INFORMATION PROBLEM IN A SEMI ACTIVE SUSPENSION OF A FULL CAR MODEL

By : Mas Nurul Achmadiyah
Student Identity Number : 2214202202
Supervisor(s) : 1. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng.
2. Ir. Rusdhianto Effendi AK., MT.

ABSTRACT

The development of technology in the field of automotive is so rapid. Research on road holding and road handling in vehicles aim to improve the comfort and safety of driving. Suspension on the vehicle is very important role in obtaining comfort and safety of driving. From existing literature, comfort and safety of driving in semi-active suspension is better than passive suspension, and more affordable then active suspension.

Semi active suspension in the vehicle system is not spared from the errors that occur in each sensor. To compensate error on the system, need a method to compensate errors on the system so the system can have good performance. This method is called Fault Tolerant Control (FTC). From existing literature, there are many literature about FTC on vehicle systems using semi active suspension, but discussion of incomplete information is not studied further. While in some situations, there are some data or input controls lost during data processing.

This thesis investigate about FTC with incomplete information problems applied to the semi-active suspension of the four-wheeled car system. This thesis use Active Fault Tolerant Control (AFTC). AFTC is used to allow the parameters of the controller to be reconfigured in accordance error information obtained online to improve the stability and overall performance of the system when an error occurs in the system. From the simuations performed, the method can reduce the magnitude of system acceleration average of 43%. The contribution of this research is AFTC proven to solve the problem of Incomplete Information by using Robust H_{∞} method with Linear Matrix Inequality (LMI) approach.

Keywords : Incomplete Information, Semi Active Suspension, Active Fault Tolerant Control, Linear Matrix Inequality

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil'alaminn, segala puji hanya bagi Allah, Rabb Semesta Alam dan semoga keselamatan senantiasa terlimpahkan atas seluruh Nabi dan Utusan Nya. Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan guna menyelesaikan Pendidikan Magister pada bidang studi Sistem Pengaturan, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul :

“Robust Active Fault Tolerant Control Dengan Permasalahan Incomplete Information Pada Suspensi Semi Aktif Sistem Mobil Beroda Empat”

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kedua orang tua atas kepercayaan dan doa – doanya, bapak Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M.Eng. dan Ir. Rusdhianto Effendi A.K., M.T. atas bimbingan, didikan dan motivasi pada penulis hingga terselesaikannya tesis ini, para dosen bidang keahlian Teknik Sistem Pengaturan yang selama ini telah membantu penulis dalam perkuliahan, para dosen penguji ibu Dr. Trihastuti Agustinah, S.T., MT. dan bapak Prof. Dr. Ir. Mochammad Nuh, DEA. atas nasehat dan saran yang diberikan pada penulis, kepada rekan – rekan seperjuangan penulis ucapkan terimakasih atas bantuan dan semangatnya. *And Last, but not least, I want to thank my husband for supporting me through the rough times, and encouraging me to forge ahead when I felt like giving up, you're a Godsend!*

Surabaya, 8 Juni 2016

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	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Kontribusi	5
1.6 Metodologi Penelitian	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait	7
2.1.1 H^∞ Filtering With Randomly Occurring Sensor Saturations and Missing Measurements [28]	7
2.1.2 Robust Fault Detection With Missing Measurements [29]	10
2.1.3 Reliable H-Infinity Filtering For Linear Systems With Sensor Saturation [30]	12
2.1.4 A LMI Approach To The Robust Fault Detection And Isolation Problem [31]	15
2.1.5 Robust Fault Detection Observer Design Using H^∞ Techniques For Uncertain Unmanned Aircraft [32]	17
2.2 Teori Dasar	18
2.2.1 Konsep Dasar Suspensi Semi Aktif [1]	19
2.2.2 Permodelan Sistem Mobil Beroda Empat [33]	22
2.2.3 Permasalahan Incomplete Information [34]	23
2.2.4 Fault Tolerant Control (FTC)	24

2.2.5	Performa H_{∞} [37].....	27
2.2.6	Linier Matrix Inequality (LMI) [44]	28
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		31
3.1	Perancangan Sistem Inner Loop	31
3.1.1	Permodelan Sistem.....	32
3.1.2	Permasalahan Incomplete Information	36
3.1.3	Desain Robust Fault Detection Filter dan Estimation.....	37
3.1.4	Desain Robust Fault Tolerant Control	43
3.1.5	Desain Fault Compensation	45
3.2	Perancangan Sistem Outer Loop	48
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Kontrol Nominal dengan Kondisi Awal tanpa Kesalahan (Fault-free Case).....	51
4.1.1	Pengujian pada sistem inner loop	51
4.1.2	Pengujian pada sistem outer loop	54
4.2	Kontrol Nominal dengan Kesalahan (Faulty Case) Bagian 1	56
4.2.1	Pengujian pada sistem inner loop	56
4.2.2	Pengujian pada sistem outer loop	59
4.3	Kontrol Nominal dengan Kesalahan (Faulty Case) Bagian 2	61
4.3.1	Pengujian pada sistem inner loop	61
4.3.2	Pengujian pada sistem outer loop	64
4.4	Kontrol Nominal dengan Kesalahan (Faulty Case) Bagian 3	67
4.4.1	Pengujian pada sistem inner loop	67
4.4.2	Pengujian pada sistem outer loop	69
4.5	Kontrol Nominal dengan Kesalahan (Faulty Case) Bagian 3	71
4.5.1	Pengujian pada sistem inner loop	71
4.5.2	Pengujian pada sistem outer loop	74
BAB 5 KESIMPULAN		77
5.1	Kesimpulan.....	77
5.2	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA.....		79
LAMPIRAN		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Error filter sensor 1	9
Gambar 2.2 Error filter sensor 2	9
Gambar 2.3 Respond Residual dengan $\alpha = 1$	11
Gambar 2.4 Residual Evaluation $\alpha = 1$	11
Gambar 2.5 Respond Residual dengan $\alpha = 0.9$	12
Gambar 2.6 Residual Evaluation $\alpha = 0.9$	12
Gambar 2.7 Respon Error Reliable H infinity Filter.....	14
Gambar 2.8 Respon Residual	16
Gambar 2.9 Sinyal Fault dan Sinyal Output Normal	18
Gambar 2.10 Residual Sinyal dengan γ minimum = 21.2.....	18
Gambar 2.11 Suspensi pasif [32]	20
Gambar 2.12 Suspensi semi aktif [32]	21
Gambar 2.13 Model seperempat kendaraan pada suspensi semi aktif [32]	21
Gambar 2.14 Permodelan Kendaraan Beroda 4 [33]	22
Gambar 2.15 Skema FTC Secara Umum [35]	25
Gambar 2.16 Skema Observer -Based Fault Diagnosis [36]	26
Gambar 2.17 Skema Fault Tolerant Control [36]	27
Gambar 3.1 Norm Grd	40
Gambar 3.2 Norm $G? f$	42
Gambar 3.3 Norm Gyd	45
Gambar 3.4 Norm Gyf	48
Gambar 4.1 Disturbance Pada Sistem.....	52
Gambar 4.2 Percepatan Pada Massa Unsprung.....	53
Gambar 4.3 Percepatan Pada Massa sprung	53
Gambar 4.4 Percepatan pada heave	54
Gambar 4.5 Percepatan sudut pitch.....	55
Gambar 4.6 Percepatan sudut roll	55
Gambar 4.7 Error Estimasi.....	56
Gambar 4.8 Percepatan Pada Roda Belakang Kanan.....	58
Gambar 4.9 Percepatan Pada Suspensi Belakang Kanan.....	58
Gambar 4.11 Percepatan Sudut Roll	59
Gambar 4.12 Percepatan Sudut Pitch.....	60
Gambar 4.13 Percepatan heave	60
Gambar 4.14 Error Estimasi.....	61
Gambar 4.15 Percepatan pada unsprung.....	63
Gambar 4.16 Percepatan pada sprung.....	63
Gambar 4.17 Percepatan sudut roll dengan dan tanpa kompensator	64
Gambar 4.18 Percepatan sudut pitch dengan dan tanpa kompensator	65
Gambar 4.19 Percepatan heave dengan dan tanpa kompensator	65
Gambar 4.20 Error Estimasi.....	66

Gambar 4.21 Percepatan pada unsprung dengan dan tanpa kompensator.....	68
Gambar 4.22 Percepatan pada sprung dengan dan tanpa kompensator.....	68
Gambar 4.23 Percepatan sudut roll dengan dan tanpa kompensator	69
Gambar 4.24 Percepatan sudut pitch dengan dan tanpa kompensator	70
Gambar 4.25 Percepatan heave dengan dan tanpa kompensator.....	70
Gambar 4.26 Error Estimasi	71

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Sistem Mobil Beroda Empat [40]	35
--	----

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi otomotif dewasa ini sangat pesat. Kenyamanan dan keamanan pengemudi menjadi faktor yang paling utama disamping kehandalan dari mesin mobil itu sendiri. Kenyamanan dan keamanan pengemudi kendaraan bermotor khususnya kendaraan roda empat harus terjamin. Hal ini dimaksudkan agar pengemudi tidak mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan cedera atau rasa sakit selama mengendarai kendaraan [1]. Perkembangan penelitian mengenai *road holding* dan *road handling* pada kendaraan tetap berlanjut untuk meningkatkan kenyamanan dan keamanan berkendara [2].

Sejalan dengan tuntutan kenyamanan dan keamanan yang semakin tinggi maka penelitian akan kenyamanan dan keamanan kendaraan dewasa ini banyak dikembangkan. Kondisi ideal yang ingin diperoleh dalam kenyamanan adalah kabin kendaraan diam ditempat walaupun ada gangguan yang berupa ketidakrataan jalan. Tetapi kondisi ini sulit dilakukan, sehingga pendekatan yang ditempuh adalah meminimumkan efek gangguan yang berupa ketidakrataan jalan dengan memasang suspensi diantara roda dan badan kendaraan [3].

Suspensi pada kendaraan memegang peranan yang sangat penting dalam memperoleh kenyamanan. Selain dapat mempengaruhi kestabilan kendaraan dan daya lekat roda pada jalan, suspensi juga berfungsi untuk mengurangi getaran pada kabin kendaraan yang disebabkan oleh ketidakrataan permukaan jalan. Umumnya suspensi kendaraan terdiri dari komponen pasif, yaitu komponen pegas dan komponen peredam (damper). Namun demikian masih terdapat beberapa kendala, antara lain suspensi tidak dapat menyesuaikan dengan keadaan jalan yang tidak rata. Untuk mengatasi hal tersebut dibutuhkan peredam getaran dengan menggunakan komponen aktif [3].

Ada dua jenis suspensi yang menggunakan komponen aktif, yaitu suspensi aktif dan suspensi semi-aktif. Pada suspensi aktif tidak digunakan komponen pasif sedangkan pada suspensi semi-aktif digunakan kedua komponen baik komponen pasif dan komponen aktif. Suspensi dengan komponen pasif akan mempunyai karakteristik yang tetap untuk berbagai permukaan jalan. Penggunaan komponen aktif dapat merubah karakteristik suspensi sesuai dengan permukaan jalan. Keuntungan menggunakan suspensi aktif adalah getaran yang timbul pada badan kendaraan akibat adanya ketidak rataan pada permukaan jalan dapat berkurang. Namun memiliki kekurangan yaitu harganya sangat mahal dan apabila terdapat kerusakan pada komponen aktif, suspensi tidak dapat digunakan.

Jenis yang kedua adalah suspensi semi-aktif. Suspensi semi-aktif masih menggunakan suspensi konvensional dengan menambah peredam yang dapat dikontrol. Keuntungan suspensi semi-aktif adalah masih dapat berfungsi pada waktu komponen aktif mengalami kerusakan. Kenyamanan berkendara dan pengemudian pada suspensi semi aktif lebih baik jika dibandingkan dengan suspensi pasif, dan lebih terjangkau jika dibandingkan suspensi aktif [4].

Suspensi semi aktif pertama kali diperkenalkan oleh [5] sebagai alternatif dari permasalahan mahalnya tuntutan komponen aktif pada suspensi. Penelitian yang sama yaitu [6] dan [7] tentang pengkategorian komponen aktif dan semi aktif pada suspensi. Studi komparatif mengenai suspensi semi aktif dan suspensi pasif telah dilakukan oleh [8] dan [9]. Penelitian mengenai strategi kontrol dan review tentang kecepatan relatif pada suspensi telah dilakukan oleh [10]. Pengaplikasian suspensi semi aktif tidak terbatas pada kendaraan penumpang, namun juga dilakukan pada berbagai tipe kendaraan. Pada [11] dilakukan percobaan aplikasi suspensi semi aktif pada truk, [12] melakukan penelitian semi aktif suspensi pada tank militer, dan sebuah studi tentang kendaraan *off-road* dilakukan oleh [13] untuk mengatur *heave* dan gerak roll.

Sebagai salah satu suspensi yang memiliki komponen aktif, beberapa skema kontrol telah dilakukan, yaitu pada [14] yang menggunakan pengaturan adaptif pada suspensi, penggunaan pengaturan optima [15], penggunaan Linear

Quadratic Gaussian (LQG) [16], dan juga penggunaan algoritma *robust* pada suspensi semi aktif [17]. Selain itu pada [18] telah dilakukan penelitian tentang kontroler multivariable untuk model sistem kendaraan penuh. Selama beberapa tahun terakhir, penelitian mengenai suspensi semi aktif diaplikasikan menggunakan metode *artificial intelligent*, seperti penggunaan neural network [19] dan penggunaan fuzzy logic control [20]. Hingga saat ini, penelitian terus berkembang untuk mendesain kontroler pada suspensi yang murah, dan handal untuk sistem kendaraan beroda empat sehingga meningkatkan kenyamanan dan keamanan pada sistem.

Saat ini, kendaraan modern menjadi lebih kompleks dengan adanya permintaan peningkatan kenyamanan dan keamanan dalam berkendara. Penggunaan suspensi semi aktif yang dipasang pada keempat roda sebuah sistem kendaraan beroda empat tidak luput dari adanya kesalahan yang terjadi pada masing-masing sensor. Hal ini terjadi karena masing-masing memiliki dinamika dan memungkinkan untuk mengalami kesalahan. Kontrol modern menjadi lebih kompleks dengan adanya tuntutan sistem dengan performa yang lebih baik, sehingga kesalahan pada sensor tidak dapat dihindari. Kesalahan pada sistem dapat mempengaruhi dinamika dan ketidak stabilan sistem [21].

Untuk mengatasi kesalahan pada sistem, maka perlu adanya sebuah metode untuk mengkompensasi kesalahan pada sistem sehingga sistem dapat memiliki performa yang baik. Metode ini disebut *Fault Tolerant Control* (FTC). Terdapat dua jenis metode dalam FTC, yaitu *Passive Fault Tolerant Control* (PFTC) dan *Active Fault Tolerant Control* (AFTC). Pada PFTC, parameter kontroler dibuat tetap dan didesain menggunakan kontrol *robust* untuk memastikan sistem kontrol tetap mampu mengatasi kesalahan dari komponen sistem. Pada metode PFTC, tidak diperlukan informasi kesalahan secara *online* maupun konfigurasi ulang kontroler, tapi memiliki batas kesalahan yang bisa ditangani. Sedangkan metode AFTC, parameter dari kontroler dikonfigurasi ulang sesuai dengan informasi kesalahan yang didapatkan secara *online* guna

meningkatkan stabilitas dan performa keseluruhan sistem saat terjadi kesalahan pada komponen [22].

Penelitian tentang *Fault Tolerant Control* (FTC) telah banyak dikembangkan dan diaplikasikan. FTC pada umumnya didesain untuk suspensi aktif. Pada [23] telah dilakukan sebuah penelitian menggunakan *Fault Tolerant Control* (FTC) yang didesain pada suspensi semi aktif dengan *sliding mode control*. Pada [27] sebuah FTC telah didesain dengan kontrol LPV untuk menjamin *road holding* dan kestabilan Roll. Pada [24] telah dilakukan penelitian mengenai kompensasi kesalahan sensor yang terjadi pada sistem suspensi kendaraan, dimana kesalahan diberikan dengan adanya penambahan percepatan pada damper. Pada [25] telah dibahas penggunaan FTC pada permasalahan terjadinya kesalahan pada sensor dan aktuator. Dari permasalahan yang telah dibahas, pembahasan tentang *incomplete information* tidak di kaji lebih lanjut. Sedangkan dalam dunia praktis, kemungkinan terjadinya penerimaan data yang tidak komplit mungkin terjadi. Dalam beberapa situasi, terdapat beberapa data atau input kontrol hilang selama pengolahan data. Ditinjau dari pentingnya ketidak handalan proses pengolahan data sensor pada sistem kontrol modern, perlu untuk mulai mempelajari bagaimana mendesain sistem kontrol dengan mempertimbangkan persoalan data yang hilang selama pengolahan data.

Penelitian desain filter H_{∞} dengan permasalahan *incomplete information* telah terselesaikan pada [26]. Permasalahan *incomplete information* meliputi data hasil pengukuran yang hilang, variasi sensor yang acak dan saturasi sensor. Hasil yang diperoleh dari makalah ini adalah penerapan performa filter H_{∞} dapat diterapkan dengan baik. Namun Permasalahan tersebut hanya diaplikasikan secara *illustrative example* dan terbatas pada permasalahan filtering dan tidak membahas mengenai permasalahan kontrol dan kompensasi kesalahan. Sedangkan permasalahan *incomplete information* memungkinkan dapat terjadi pada suatu sistem, dan membutuhkan suatu skema kontrol toleransi kesalahan, dan skema kompensasi kesalahan.

Dari uraian yang telah dijelaskan diatas, maka ide dari penelitian ini adalah merancang algoritma *Robust Active Fault Tolerant Control* dengan permasalahan *incomplete information* yang diaplikasikan pada suspensi semi aktif sistem mobil beroda empat.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana merancang algoritma *Robust Active Fault Tolerant* dengan permasalahan *Incomplete Information* pada sebuah suspensi semi aktif sistem kendaraan beroda empat.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan algoritma *Robust Active Fault Tolerant* dengan permasalahan *Incomplete Information* pada sebuah suspensi semi aktif sistem kendaraan beroda empat.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Gangguan pada jalan berupa *bump* yang nilainya sama antara roda kanan dan roda kiri
2. Kesalahan pada sensor hanya berupa permasalahan *incomplete information*.

1.5 Kontribusi

Kontribusi dari penelitian ini adalah dapat menghasilkan suatu algoritma *Robust Active Fault Tolerant Control* dengan permasalahan *Incomplete Information* pada sebuah suspensi semi aktif sistem kendaraan beroda empat.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan tesis ini sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Langkah pertama adalah melakukan kajian terhadap beberapa pustaka terkait penelitian yang dilakukan. Beberapa pustaka meliputi konsep suspensi semi aktif, model kendaraan beroda empat, konsep *Observer-Based Fault Detection Filter* (FDF), *Robust Active Fault Tolerant* (AFTC) dan *Fault Compensation*.

2. Permodelan Sistem

Langkah selanjutnya adalah permodelan sistem. dimana sistem merupakan kendaraan beroda empat dengan empat derajat kebebasan.

3. Perancangan *Robust Active Fault Tolerant* (FTC)

Perancangan *Robust Active Fault Tolerant* (FTC) terdiri dari perancangan filter berbasis observer menggunakan *Robust H_{∞} Filter* yang berfungsi untuk meminimalisir efek disturbance dan memaksimalkan sensitivitas terhadap *fault*, perancangan desain kontrol yang dapat mereduksi gangguan pada sistem, dan desain kompensasi *fault*.

4. Simulasi dan Analisa Sistem

Melakukan analisis hasil pengujian terhadap tujuan yang telah ditetapkan. Apabila telah memenuhi tujuan, maka dapat dibuktikan bahwa penelitian telah berhasil, dan apabila belum memenuhi maka perlu dikaji lebih lanjut solusi atau gagasan alternatif agar tujuan yang telah ditetapkan dapat dicapai

5. Penarikan kesimpulan

Kesimpulan diperoleh sesuai dengan hasil pengujian dan analisis hasil pengujian.

6. Penyusunan Buku Tesis

Penulisan laporan buku Tesis pada penelitian dilakukan sebagai dokumentasi dari hasil penelitian yang dilakukan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terkait yang dijadikan referensi maupun acuan penulisan tesis ini adalah sebagai berikut:

2.1.1 H_∞ Filtering With Randomly Occurring Sensor Saturations and Missing Measurements [28]

Pada penelitian ini, permasalahan filter untuk sistem nonlinier dengan permasalahan *incomplete information* telah terselesaikan. Permasalahan *incomplete information* terdiri dari permasalahan *randomly sensor*, saturasi sensor dan hilangnya hasil pengukuran sensor. Sistem dideskripsikan sebagai sebuah sistem nonlinier diskrit sebagai berikut:

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k) + Bw_k \\ z_k = Mx_k \end{cases} \quad (2.1)$$

dengan permasalahan *Incomplete Information* dideskripsikan sebagai berikut :

$$y_k^i = \alpha_k^i \sigma(C_i x_k) + (1 - \alpha_k^i) \beta_k^i C_i x_k + D_i v_k^i \quad (2.2)$$

dengan $i = 1, 2, \dots, m$, m adalah banyaknya sensor dalam sistem tersebut. $x_k \in \mathbb{R}^n$ adalah state sistem, $z_k \in \mathbb{R}^r$ adalah output sistem, $y_k^i \in \mathbb{R}$ adalah output sensor dengan $\alpha \in \mathbb{R}$, dan $\beta \in \mathbb{R}$ merupakan *Bernoulli distribution white sequences* dengan nilai 0 dan 1 dengan

$$\begin{cases} Prob\{\alpha_f = 1\} = u \\ Prob\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \end{cases} \quad (2.3)$$

dan

$$\begin{cases} Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases} \quad (2.4)$$

dengan u dan v bernilai konstan $[0,1]$.

Permasalahan saturasi didefinisikan sebagai permasalahan fungsi *sign* sebagai berikut :

$$\sigma(v) = \text{sign}(v)\min\{1, |v|\} \quad (2.5)$$

Penelitian ini bertujuan untuk mendesain H_∞ filter dengan bentuk :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_f \hat{x}_k + B_f \hat{y}_k \\ \hat{z}_k = M \hat{x}_k, \end{cases} \quad (2.6)$$

dimana $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ adalah state estimator, $\hat{z}_k \in \mathbb{R}^r$ output estimator. Dengan A_f dan B_f adalah parameter filter yang akan ditentukan. Filter didesain untuk menyelesaikan permasalahan *Incomplete information* pada persamaan (2.2).

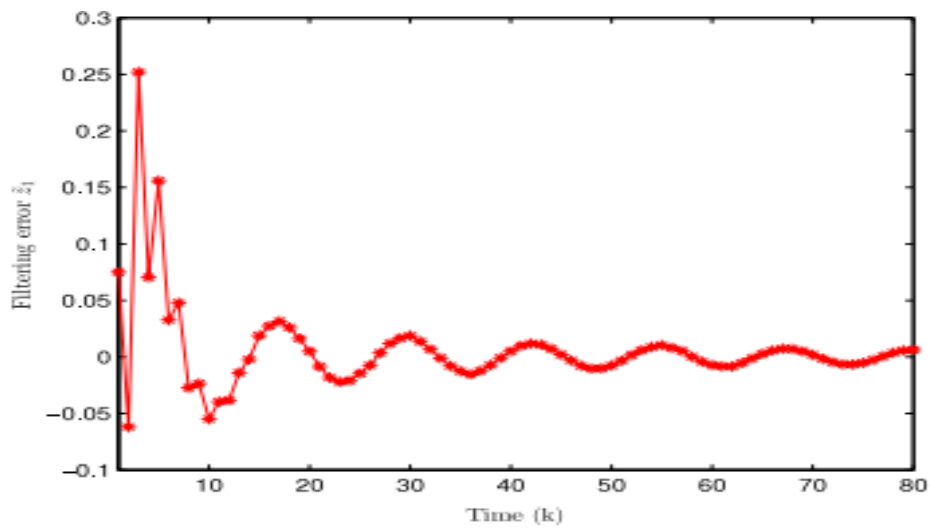
Tahapan penelitian ini untuk menyelesaikan permasalahan *incomplete information* dengan H_∞ filter adalah sebagai berikut :

1. Membuat system augmented $\eta = [x_k^T \quad \hat{x}^T]$ dan error filter didefinisikan $\tilde{z}_k = z_k - \hat{z}_k$.
2. Penyelesaian error filter \tilde{z}_k dengan menyelesaikan persamaan :

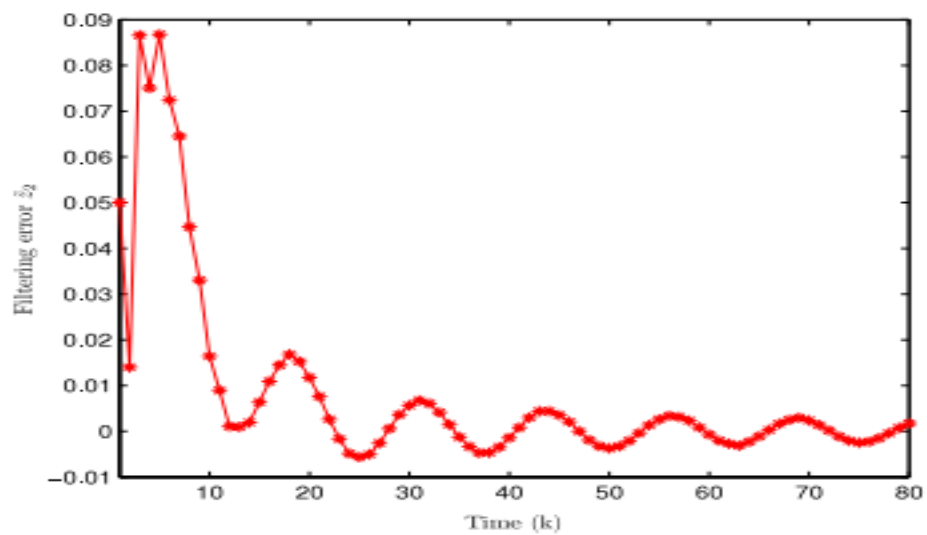
$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{E}\{\|\tilde{z}_k\|^2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} \|\tilde{\omega}_k\|^2 \quad (2.7)$$

Dengan kondisi awal bernilai nol, dan $\tilde{\omega}_k$ adalah disturbance, nilai $\omega \neq 0$, dimana $\gamma > 0$.

Penelitian ini menggunakan pendekatan LMI untuk menyelesaikan permasalahan H_∞ filter. Untuk membuktikan bahwa metode yang diusulkan telah mampu menyelesaikan permasalahan dengan baik, diberikan contoh sebuah parameter matriks. Dengan nilai probability diberikan $\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.6, v_1 = 0.7$ dan $v_2 = 0.75$. Dengan $\gamma = 1.5$. hasil error filter disajikan pada gambar 1 dan 2.



Gambar 2.1. Error filter sensor 1



Gambar 2.2 Error filter sensor 2

Pada simulasi tersebut, gambar 2.1 dan 2.2 menunjukkan desain H_∞ filter menghasilkan performa yang baik pada masing masing sensor. Karena penelitian yang diajukan menggunakan permasalahan *Incomplete Information*, maka metode ini dapat dipergunakan.

Penelitian ini hanya berfokus pada filter, maka dapat diusulkan pengembangan berupa *Fault Tolerant Control* dan *Compensation* dengan permasalahan yang sama berupa *Incomplete Information*.

2.1.2 Robust Fault Detection With Missing Measurements [29]

Penelitian ini membahas mengenai *fault detection* pada permasalahan *missing measurement* yang diselesaikan menggunakan metode *robust*. Penyelesaian permasalahan *fault detection* menggunakan pendekatan *residual generating system*. Tujuan dari penelitian ini adalah mendesain filter yang dapat menyelesaikan permasalahan *missing measurement*. Penyelesaian dibagi menjadi dua tahapan. Pertama yaitu desain *residual generator*, kedua desain *residual evaluator*. Permasalahan *missing measurement* disajikan dalam persamaan :

$$\tilde{y}_k = \delta_k y_k \quad (2.8)$$

dimana variabel $\delta_k \in \mathbb{R}$ adalah *Bernoulli distributed white sequence* yang bernilai 0 dan 1 dengan

$$\begin{cases} Prob\{\delta_k = 1\} = \alpha \\ Prob\{\delta_k = 0\} = 1 - \alpha \end{cases} \quad (2.9)$$

dengan $\alpha \in \mathbb{R}$ adalah nilai positif skalar.

Tahapan penyelesaian penelitian ini adalah :

1. Desain augmented dan residual sistem atau *residual generator* dengan permasalahan *missing measurement*, persamaan sistem sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \xi_{k+1} &= \bar{A}\xi_k + \bar{B}d_k \\ e_k &= \bar{C}\xi_k + \bar{D}d_k \end{aligned} \quad (2.10)$$

dengan,

$$\begin{aligned} \xi_k &\triangleq [\bar{x}_k^T \quad x_k^T \quad \hat{x}_k^T] \\ e_k &\triangleq r_k - \hat{f}_k \\ d_k &\triangleq [u_k^T \quad w_k^T \quad f_k^T] \end{aligned} \quad (2.11)$$

2. Berikan nilai positif untuk $\gamma > 0$, sehingga persamaan residual sistem (2.10) *robustly stochastically stable*, dengan memenuhi kondisi :

$$\|e\|_E \leq \gamma \|d\|_2 \quad (2.12)$$

Persamaan (2.12) bertujuan untuk memastikan $\|e\|_E/\|d\|_2$ lebih kecil dari γ .

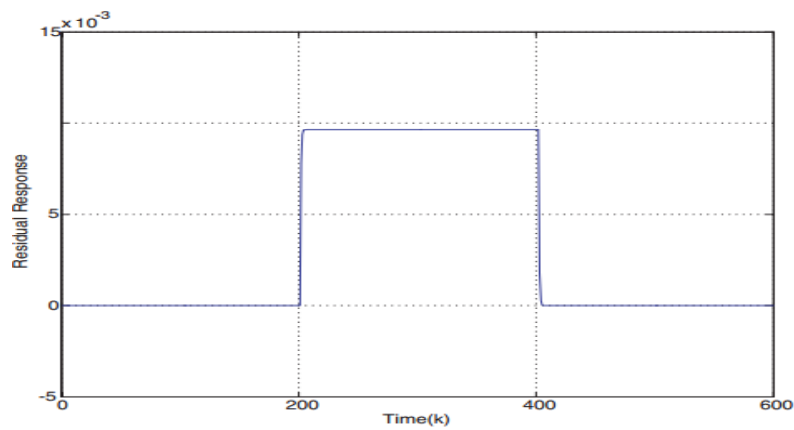
3. Desain residual evaluation dari hasil residual. Evaluasi dari hasil residual dilakukan dengan cara menggunakan variabel baru yang disebut

threshold $J_{th} > 0$. Dimana variabel tersebut berfungsi untuk mendeteksi ada atau tidaknya fault, dengan cara :

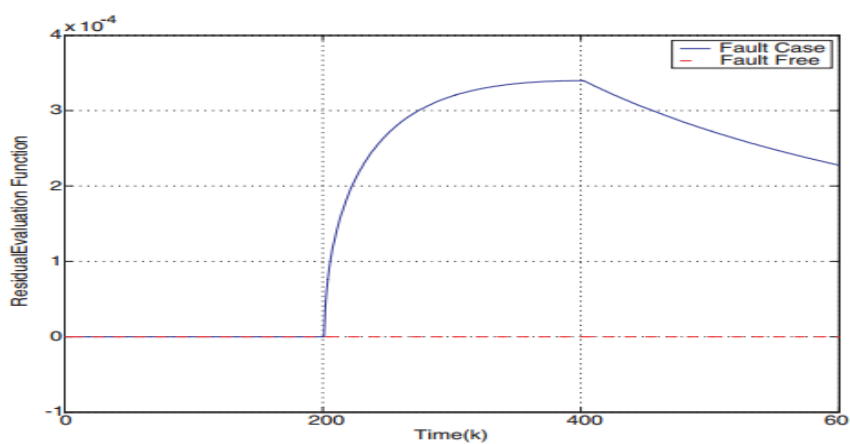
$$\|r\|_L > J_{th} \rightarrow \text{jika terjadi fault}$$

$$\|r\|_L \leq J_{th} \rightarrow \text{jika tidak terjadi fault}$$

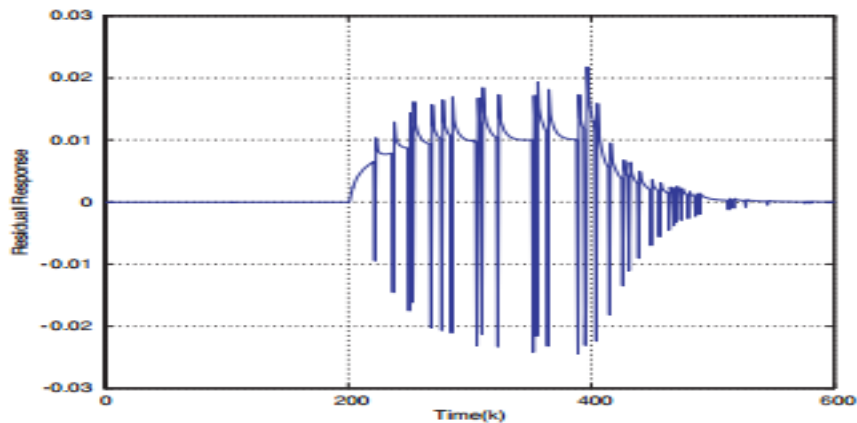
4. Penyelesaian untuk mendapatkan matriks filter dilakukan menggunakan metode LMI, diberikan sebuah teorema untuk membantu penyelesaian matriks pertidaksamaan LMI. Untuk menguji penggunaan metode, diberikan contoh secara ilustrasi sebuah CSTR (Continuous-stirred Tank Reactor). Dengan menyelesaikan permasalahan LMI yang disajikan dalam teorema, respon residual dan residual evaluation adalah,



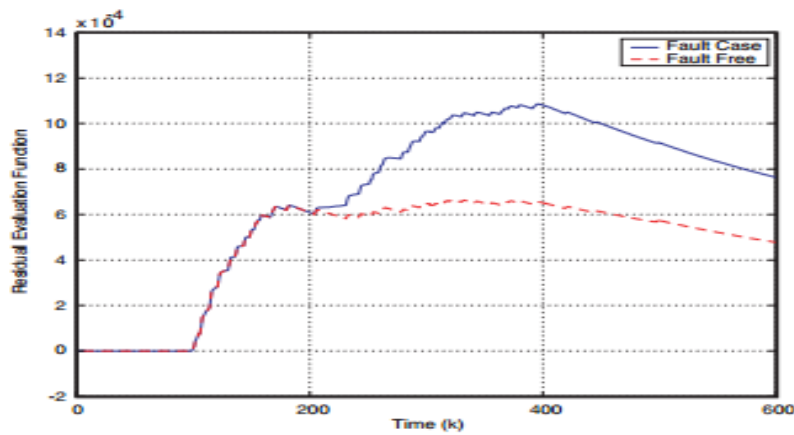
Gambar 2.3 Respond Residual dengan $\alpha = 1$



Gambar 2.4 Residual Evaluation $\alpha = 1$



Gambar 2.5 Respond Residual dengan $\alpha = 0.9$



Gambar 2.6 Residual Evaluation $\alpha = 0.9$

Dari hasil respon pada gambar (2.5)-(2.6) menunjukkan bahwa permasalahan *robust fault detection* pada permasalahan *incomplete information* dapat terselesaikan dengan baik. Penggunaan metode robust dengan pendekatan LMI terbukti dapat memberikan hasil residual generator yang baik dan stabil. Sehingga metode tersebut dapat digunakan untuk usulan penelitian ini.

2.1.3 *Reliable H-Infinity Filtering For Linear Systems With Sensor Saturation* [30]

Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan saturasi sensor dan kesalahan sensor pada sistem waktu kontinyu, permasalahan diselesaikan dengan menggunakan metode *Reliable H-Infinity*. Model sistem menggunakan pendekatan model linier dan penyelesaian metode *H-Infinity*

menggunakan pendekatan *Linear Matrix Inequality* (LMI). Efektivitas metode diuji dengan menggunakan contoh numerikal. Persamaan sistem diberikan pada persamaan (2.13)

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bw, x(0) = 0 \\ y^F(t) = (1 - \rho)[\text{sat}(Cx(t)) + Dw(t)] \\ z(t) = Lx(t) + Ew(t), \end{cases} \quad (2.13)$$

dimana $x(t) \in \mathbb{R}^n$ adalah state vector, $w(t) \in \mathbb{R}^p$ adalah input gangguan. Dengan persamaan output (y_i^F) dengan permasalahan saturasi didefinisikan dengan persamaan :

$$y_i^F = (1 - \rho_i^j)y_i(t) \quad (2.14)$$

dengan,

$$0 \leq \rho_{-i}^j \leq \rho_i^j \leq \rho_i^{-j}$$

dimana ρ_i^j merupakan konstanta yang tidak diketahui. Nilai ρ_{-i}^j merupakan nilai terendah dan ρ_i^{-j} nilai batas tertinggi. Tujuan permasalahan ini adalah mendesain filter dengan persamaan :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_f \hat{x}(t) + B_f y^F(t), \hat{x}(0) = 0 \\ \hat{z}(t) = L_f \hat{x}(t) \end{cases} \quad (2.15)$$

dimana $\hat{x}_k \in \mathbb{R}^n$ adalah state estimator.

Tahapan penyelesaian penelitian ini adalah:

1. Desain persamaan Error estimasi didefinisikan sebagai berikut,

$$e(t) = z(t) - \hat{z}(t) \quad (2.16)$$

Berdasarkan persamaan (2.13) dan (2.15), dengan diberikan vektor baru $\zeta = [x(t) \quad \hat{x}(t)]^T$ sistem augmented dideskripsikan sebagai berikut:

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = \tilde{A}\zeta(t) + \tilde{B}_1 \Psi(\tilde{C}\zeta(t)) + \tilde{B}_2 w \\ e(t) = \tilde{L}\zeta(t) + Ew(t) \end{cases} \quad (2.17)$$

dengan sistem diasumsikan stabil.

2. Desain filter *H infinity* dengan $\gamma > 0$, tentukan filter yang stabil asimtotik dengan memenuhi kondisi :

$$T_e = \sup \left\{ \frac{\|e\|_2}{\|w\|_2} \mid w \neq 0, \zeta(0) = 0 \right\} \quad (2.18)$$

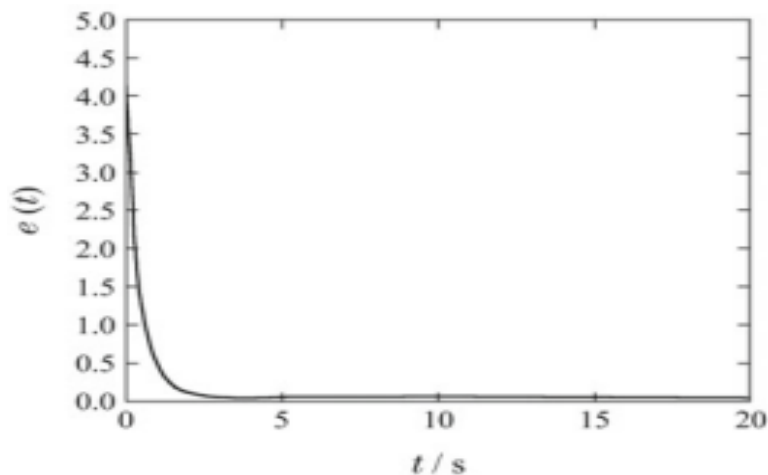
dan $\|T_e\|_\infty < 0$. Dengan menggunakan pendekatan LMI, maka permasalahan H infinity filter dapat diselesaikan.

3. Pengujian efektifitas metode dilakukan dengan contoh numerikal.

Diberikan tiga kemungkinan *fault* yaitu :

- a. Mode 1, kondisi normal : $\rho_i^j = 0$.
- b. Mode 2, sensor pertama mengalami *outage* dan sensor kedua memiliki kemungkinan mengalami *fault* $\rho_1^2 = 1, 0 \leq \rho_2^2 \leq 0.7$,
- c. Mode 3, sensor pertama dan kedua memiliki kemungkinan mengalami *faul* $\rho_1^3 = 0.6, \rho_2^3 = 0.8$

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah :



Gambar 2.7 Respon Error *Reliable H infinity Filter*

Dari gambar (2.7) efektifitas metode filter menggunakan *Reliable H infinity* memiliki hasil yang baik. Perbedaan antara metode *H infinity* konvensional dengan metode *Reliable H infinity Filter* adalah pada metode konvensional gangguan diberikan pada semua kemungkinan terjadinya *fault*. Sedangkan pada metode ini digunakan beberapa kemungkinan yang lebih spesifik, sehingga dapat dipastikan pada beberapa kemungkinan terjadinya kesalahan tersebut filter dapat bekerja maksimal.

Usulan penelitian ini salah satunya juga menggunakan permasalahan saturasi sensor, sehingga metode *H infinity Filter* ini dapat di jadikan acuan atau referensi penelitian.

2.1.4 *A LMI Approach To The Robust Fault Detection And Isolation Problem*
[31]

Penelitian ini membahas permasalahan *Fault Detection and Isolation* (FDI) untuk sebuah sistem LTI. Fungsi dari FDI adalah untuk meningkatkan sensitifitas sistem terhadap *fault* dan sekaligus meminimalkan sensitifitas sistem dari gangguan. Model merupakan sistem dinamik LTI yang di dalamnya terdapat permasalahan gangguan, error model dan proses, kesalahan sensor dan aktuator, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t) + B_d d(t) + B_f f(t) \\ y(t) = (C + \Delta C)x(t) + (D + \Delta D)u(t) + D_d d(t) + D_f f(t) \end{cases} \quad (2.19)$$

dimana $x(t) \in \mathbb{R}^n$ merupakan state sistem, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ merupakan input kontrol, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ merupakan output sistem, $d(t) \in \mathbb{R}^l$ merupakan gangguan sistem dan $f(t)$ merupakan *fault*.

Objektif penelitian ini adalah desain *Fault Detection and Isolation*. Tahap penelitiannya adalah sebagai berikut :

1. Desain observer/filter sebagai berikut :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + (B + LD)u(t) - L(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ r(t) = H(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)) \end{cases} \quad (2.20)$$

2. Definisikan error estimasi state dengan $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$. Sehingga didapatkan :

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = (A + LC)e(t) + (\Delta A + L\Delta C)x(t) + (B_d + LD_d)d(t) \\ \quad + (B_f + LD_f)f(t) + (\Delta B + L\Delta D)u(t) \\ r(t) = HCe(t) + H\Delta Cx(t) + H\Delta Du(t) + HD_d(t) + HD_f f(t) \end{cases} \quad (2.21)$$

3. Desain sistem augmented $z(t) = \begin{bmatrix} e(t) \\ x(t) \end{bmatrix}$ dan $w(t) = \begin{bmatrix} d(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$ sehingga didapatkan :

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \tilde{A}z(t) + \tilde{B}_f f(t) + \tilde{B}_w w(t) \\ r(t) = \tilde{H}z(t) + HD_f f(t) + \tilde{H}_w w(t) \end{cases} \quad (2.22)$$

4. Ubah persamaan (2.22) kedalam transformasi laplace, seperti berikut:

$$r(s) = \tilde{T}_{rf}(s)f(s) + \tilde{T}_{rw}(s)w(s) \quad (2.23)$$

dimana T_{rf} merupakan *transfer function* dari *fault* ke *residual*. Dan T_{rw} merupakan *transfer function* dari *disturbance* ke *residual*.

5. Menyelesaikan permasalahan optimisasi berikut, dengan asumsi \tilde{A} stabil asimtotik.

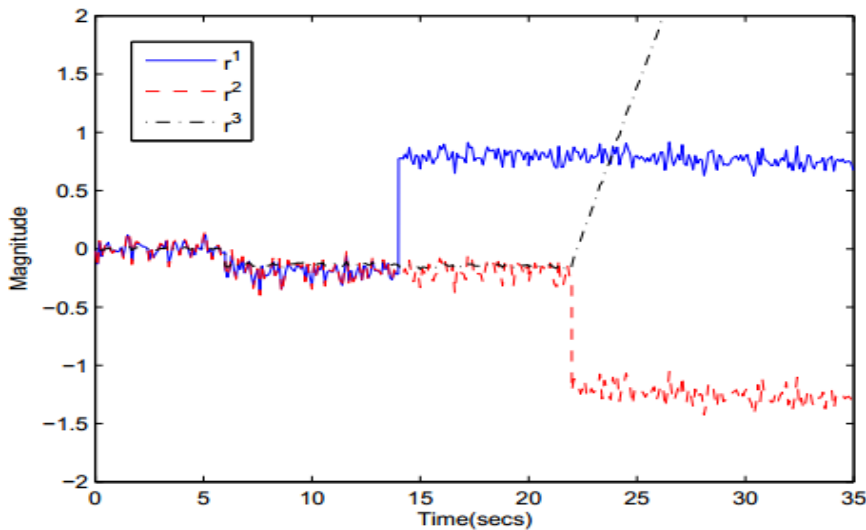
$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } \alpha\gamma_1 + (1 - \alpha)\gamma_2 \\
 & \|\tilde{T}_{rf} - T_o\|_{\infty} \leq \gamma_1 \\
 & \|\tilde{T}_{rw}\|_{\infty} \leq \gamma_2 \\
 & \|T_o\| \geq 1
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

dengan, $T_o(s) \in S$.

Efektifitas metode ini dibuktikan dengan menggunakan contoh secara numerikal. Diberikan sebuah model state mesin jet GE-21. Dengan metode *Robust Fault Detection and Isolation* menggunakan pendekatan LMI hasil matriks gain observer (L) dan gain residual (H) yang diperoleh adalah :

$$\begin{aligned}
 L &= \begin{bmatrix} -0.3084 & 0.8750 & -0.7369 \\ 0.5500 & 0.4118 & -0.3195 \end{bmatrix} \\
 H &= \begin{bmatrix} -0.2533 & 0.1212 & -0.3615 \\ -1.0278 & -0.3313 & 0.2542 \\ -0.1230 & 0.5671 & -0.1821 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Gambar Gambar 2.8 Respon Residual merupakan gambar respond residual yang dihasilkan dari masing – masing residual. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sinyal residual dapat mengikuti sinyal fault dan disturbance.



Gambar 2.8 Respon Residual

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan, bahwa penggunaan metode robust untuk aplikasi *Fault Detection and Isolation* (FDI) memperoleh hasil yang baik dengan penyelesaian menggunakan LMI. Sehingga penggunaan LMI dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan Fault Tolerant Control dengan metode *H infinity*.

2.1.5 Robust Fault Detection Observer Design Using H_∞ Techniques For Uncertain Unmanned Aircraft [32]

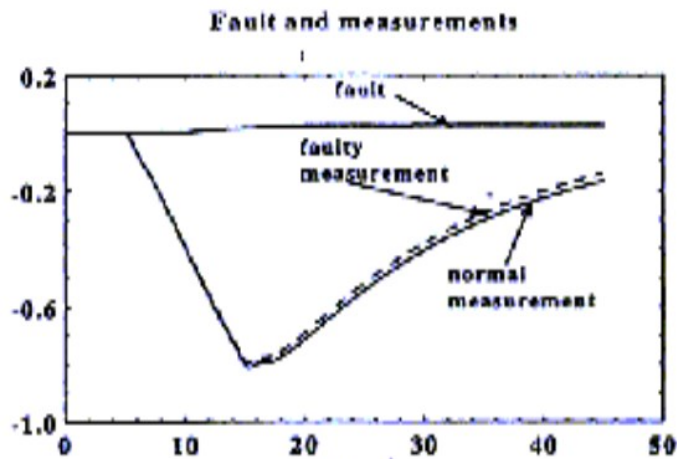
Penelitian ini mendesain *Robust Observer-based* untuk diagnosis *fault*, atau disebut juga H_∞ *Robust Fault Detection Observer* (RFDO). Metode ini menggunakan metode *Robust H_∞* yang mana meminimalkan efek gangguan dan meningkatkan sensitifitas *fault* pada sistem. Efektivitas metode ini akan diuji pada sebuah sistem kontrol penerbangan.

Kontribusi dari penelitian ini adalah memaksimalkan efek *fault* pada residual, selain juga meminimalkan efek gangguan pada sistem. Berbeda dengan FDI yang hanya meminimalkan efek gangguan pada sistem. Meminimalkan gangguan tanpa meningkatkan sensitivitas *fault* pada sistem dapat memperburuk efek *fault* pada sistem. Untuk mendesain H_∞ *Robust Fault Detection Observer* (RFDO), syarat yang harus dipenuhi adalah :

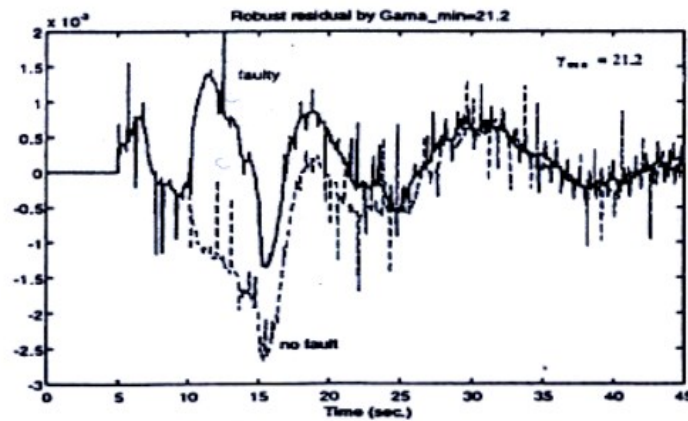
1. $A_c = A - L_\infty C$, stabil.
2. $\|G_{rd}\|_\infty := \sup_w \sigma_{max}[G_{rd}(jw)] \leq \gamma$
3. $\|G_{rf}(jw)\|_- := \inf_w \sigma_{min}[G_{rf}(jw)] \geq \beta$

Kondisi pertama merupakan syarat yang harus dipenuhi agar sistem stabil. Kondisi 1 dan 2 merupakan syarat untuk *Robust H_∞ Estimation* dan kondisi 2 merupakan syarat meminimalkan gangguan sistem. Kondisi 4 akan menjamin sensitifitas sistem terhadap *fault*.

Dengan disimulasikan menggunakan Matlab, maka hasil yang diperoleh di tunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sinyal *Fault* dan Sinyal Output Normal



Gambar 2.10 Residual Sinyal dengan γ minimum = 21.2

Dari hasil yang ditunjukkan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode H_∞ RFDO dapat diterapkan untuk permasalahan *Fault Detection*. Ditinjau dari kontribusi utama dalam penelitian ini, yaitu memaksimalkan efek *fault* pada residual, juga meminimalkan efek gangguan pada sistem, maka kondisi tersebut sangat dapat diterapkan pada tesis ini.

2.2 Teori Dasar

Untuk mendukung penelitian yang akan dilakukan, dibutuhkan beberapa dasar teori yang akan dipergunakan dalam subbab ini, akan dibahas beberapa teori yang dapat menunjang penelitian ini.

2.2.1 Konsep Dasar Suspensi Semi Aktif [1]

Suspensi adalah suatu sistem yang berfungsi meredam getaran yang terjadi pada kendaraan akibat permukaan jalan yang tidak rata. Kenyamanan kendaraan sangat erat hubungannya dengan suspensi kendaraan. Suspensi kendaraan harus mampu mengisolasi atau mengurangi getaran yang terjadi pada badan kendaraan akibat ketidakrataan dari permukaan jalan. Secara umum fungsi dari suspensi adalah sebagai berikut :

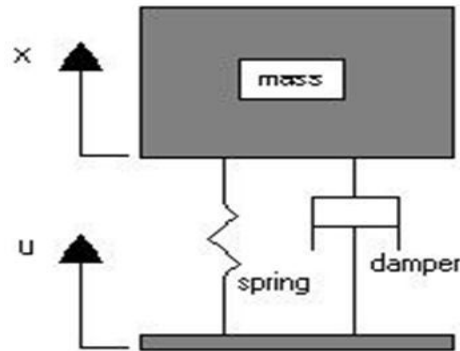
1. Menyerap dan mengurangi bermacam-macam getaran, dan guncangan yang diterima oleh kendaraan karena ketidak teraturan pada permukaan jalan, untuk melindungi penumpang, dan menambah kestabilan pengemudian.
2. Sebagai penyangga badan kendaraan antara badan kendaraan dan roda.

Berdasarkan pada sistem konfigurasinya, suspensi dibagi menjadi dua jenis, yaitu suspensi *dependent* dan *independent*. Suspensi *dependent* memiliki poros penghubung roda kiri dan kanan yang merupakan satu kesatuan utuh serta kaku (*rigid*). Pada umumnya, suspensi *dependent* digunakan pada kendaraan barang (truk). Pegas yang digunakan untuk menumpu beban kendaraan biasanya dari jenis pegas daun (*leaf spring*). Suspensi *independen* umumnya digunakan di roda depan pada kendaraan jenis sedan atau kendaraan penumpang. Dari konstruksinya, suspensi *independent* memungkinkan roda kiri untuk bergerak bebas terhadap roda kanan meski hanya untuk kisaran gerak yang terbatas. Pada penelitian ini suspensi yang digunakan merupakan suspensi independen.

Berdasarkan sistem kontrolnya, terdapat tiga jenis suspensi yaitu suspensi pasif, semi aktif dan suspensi aktif. Pada suspensi pasif (sistem yang umum diterapkan pada kendaraan saat ini) konstanta pegas dan konstanta redamannya bernilai konstan. Pada suspensi aktif, pengontrolan konstanta pegas dan redaman dapat diatur, sehingga dapat menambah kenyamanan penumpangnya. Namun pada suspensi semi aktif terdapat komponen aktif dan

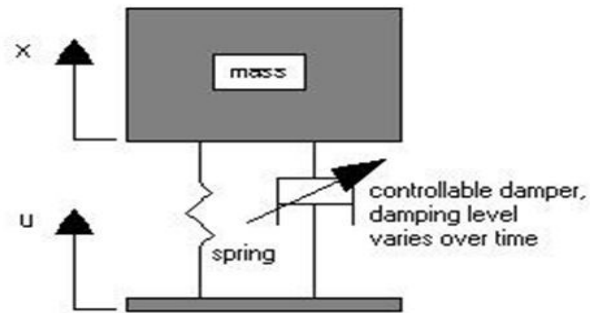
pasif, sehingga pada saat terjadi kerusakan pada komponen aktif, suspensi masih dapat digunakan dengan memanfaatkan komponen pasif. [32]

Pada sistem kendaraan beroda empat, kenyamanan berkendara digunakan untuk parameter untuk mengetahui performa dari suspensi sistem. Gambar 2.11 merupakan gambar suspensi pasif.



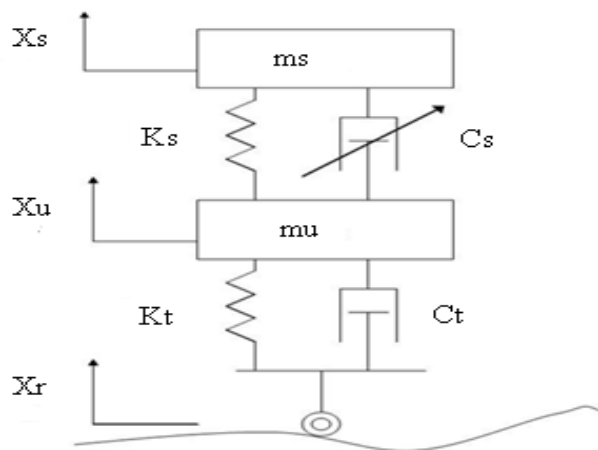
Gambar 2.11 Suspensi pasif [32]

Suspensi semi aktif hanya dapat merubah koefisien atau gaya peredam pada damper dan tidak dapat menambah energi pada sistem. Semi aktif suspensi sedikit lebih mahal dalam perancangannya dibandingkan dengan suspensi pasif dan membutuhkan energi yang lebih sedikit. Suspensi semi aktif lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan suspensi aktif yang membutuhkan daya lebih besar, dan juga lebih kompleks, lebih mahal, dan berat. Pada (Sandage, 2013) peneliti memprediksikan bahwa suspensi semi aktif memungkinkan untuk mencapai performa sebanding dengan suspensi aktif. Gambar 2.12 merupakan gambar suspensi semi-aktif.



Gambar 2.12 Suspensi semi aktif [32]

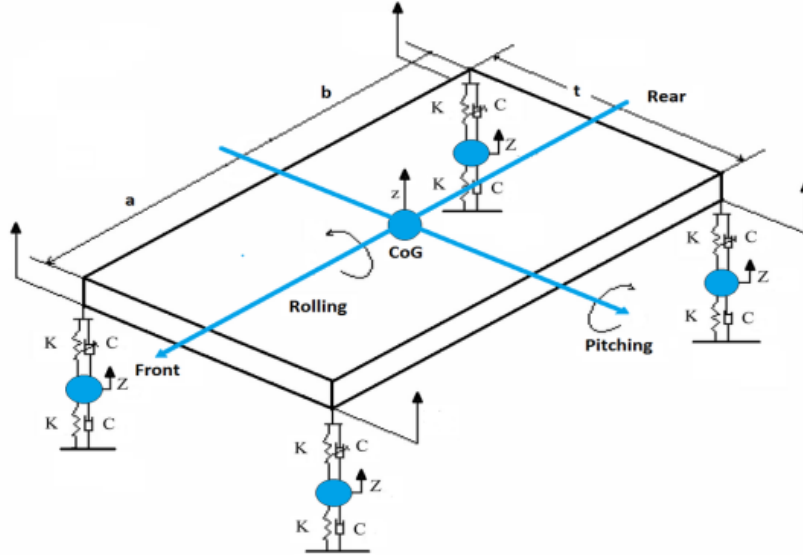
Gambar 2.13 merupakan model seperempat kendaraan pada suspensi semi aktif. Dari Gambar 2.13 dapat diklasifikasikan menjadi massa *sprung* dan massa *unsprung*. Massa *sprung* terdiri dari massa pada badan kendaraan (damper). Massa *unsprung* terdiri dari massa dari roda, rem, komponen suspensi, dsb.



Gambar 2.13 Model seperempat kendaraan pada suspensi semi aktif [32]

2.2.2 Permodelan Sistem Mobil Beroda Empat [33]

Gambar 2.14 merupakan gambar model kendaraan.



Gambar 2.14 Permodelan Kendaraan Beroda 4 [33]

Berdasarkan pada Gambar 2.14. Permodelan matematika percepatan pada *sprung mass* sistem ditunjukkan pada persamaan (2.26).

$$\ddot{z} = \frac{1}{M} (-F_{sfl} - F_{sfr} - F_{srl} - F_{srr} - F_{dfl} - F_{dfr} - F_{drl} - F_{drr}) \quad (2.26)$$

dengan M merupakan massa kendaraan pada *Central of Gravity* (COG), \ddot{z} merupakan percepatan badan kendaraan, dan F_{sij} merupakan gaya pada masing-masing suspensi dan F_{dij} gaya pada masing-masing damper (*fl* untuk *front left*, *fr* untuk *front right*, *rl* untuk *rear left*, *rr* untuk *rear right*). Percepatan pada masing-masing suspensi dirumuskan pada persamaan (2.27).

$$\ddot{z}_{ij} = -\frac{F_{sij}}{m_{ij}} \quad (2.27)$$

dengan m_{ij} merupakan massa bodi kendaraan pada masing-masing suspensi. Dan \ddot{z}_{ij} merupakan percepatan pada masing-masing suspensi. Perumusan pada gaya pada *spring* pada persamaan (2.28).

$$F_{sij} = k_{ij}(z_{ij} - z_{tij}) + c_{ij}(\dot{z}_{ij} - \dot{z}_{tij}) \quad (2.28)$$

dengan z_{ij} merupakan perpindahan vertikal pada massa *sprung*, z_{tij} perpindahan vertikal pada massa *unsprung*, k_{ij} merupakan konstanta pegas pada masing – masing suspensi. Percepatan pada *unsprung mass* sistem pada persamaan (2.29)

$$\ddot{z}_{tij} = \frac{1}{m_{tij}}(F_{sij} + F_{dij} - F_{tij}) \quad (2.29)$$

dengan m_{tij} merupakan merupakan massa *unsprung* (massa roda), \ddot{z}_{tij} percepatan vertikal pada massa *unsprung*, F_{tij} merupakan dinamika pada ban. F_{tij} didefinisikan pada persamaan (2.30).

$$F_{tij} = k_{tij}(z_{tij} - z_{rij}) \quad (2.30)$$

dengan k_{tij} merupakan konstanta pegas pada masing masing ban, dan z_{rij} adalah profil jalan akibat kondisi jalan yang tidak rata. Gerak pitch pada gendaraan dimodelkan pada persamaan (2.31)

$$J_y \ddot{\theta} = -(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr})a + (F_{sfl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr})b \quad (2.31)$$

dengan J_y merupakan inersia terhadap sumbu x, $\ddot{\theta}$ merupakan percepatan pada gerak pitch, dengan a merupakan panjang kendaraan dari pusat massa ke bagian depan kendaraan, dan b merupakan jarak dari pusat massa kendaraan ke bagian belakang kendaraan. Gerak roll pada gendaraan dimodelkan pada persamaan (2.32).

$$J_x \ddot{\phi} = -(F_{sfl} + F_{dfl} + F_{sfr} + F_{dfr})c + (F_{sfl} + F_{drl} + F_{srr} + F_{drr})d \quad (2.32)$$

dengan J_x merupakan inersia terhadap sumbu y, $\ddot{\phi}$ merupakan percepatan pada gerak roll, dengan c merupakan panjang kendaraan dari pusat massa ke bagian kanan kendaraan, dan d merupakan jarak dari pusat massa kendaraan ke bagian kiri kendaraan.

Pada penelitian ini, persamaan (2.26) - (2.32) akan dirubah dalam bentuk state space. Dan parameter state space diberikan pada [40]

2.2.3 Permasalahan *Incomplete Information* [34]

Saat sistem sedang berjalan, sensor akan mendeteksi perubahan nilai pada sistem. Pada kondisi tertentu, kesalahan pada sensor tidak akan bisa dihindari.

Kesalahan yang akan diujikan pada penelitian ini yaitu kesalahan sensor yang mengakibatkan adanya *incomplete information*. Permodelan output sensor dengan permasalahan *incomplete information* adalah sebagai berikut :

$$y_k^i = \alpha_k^i \sigma(C_i x_k) + (1 - \alpha_k^i) \beta_k^i C_i x_k + D_i v_k^i \quad (2.33)$$

dengan i merupakan sensor ke- i , $y_k \in \mathbb{R}$ adalah nilai yang diterima sensor dan $v_k^i \in \mathbb{R}$ mempresentasikan noise sensor.

Fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan sebagai berikut :

$$\sigma(v) = \text{sign}(v) \min\{1, |v|\} \quad (2.34)$$

dimana notasi “sign” merupakan fungsi signum dan $\alpha_k^i \in \mathbb{R}$ dan $\beta_k^i \in \mathbb{R}$ adalah distribusi bernouli yang bernilai 0 dan 1 dengan :

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\alpha_k^i = 1\} = \mu_i \\ \text{Prob}\{\alpha_k^i = 0\} = 1 - \mu_i \end{cases} \quad (2.35)$$

dan,

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\beta_k^i = 1\} = v_i \\ \text{Prob}\{\beta_k^i = 0\} = 1 - v_i \end{cases} \quad (2.36)$$

dimana $\mu_i, v_i \in (0,1)$ konstan, α_k^i, β_k^i merupakan variabel stokastik.

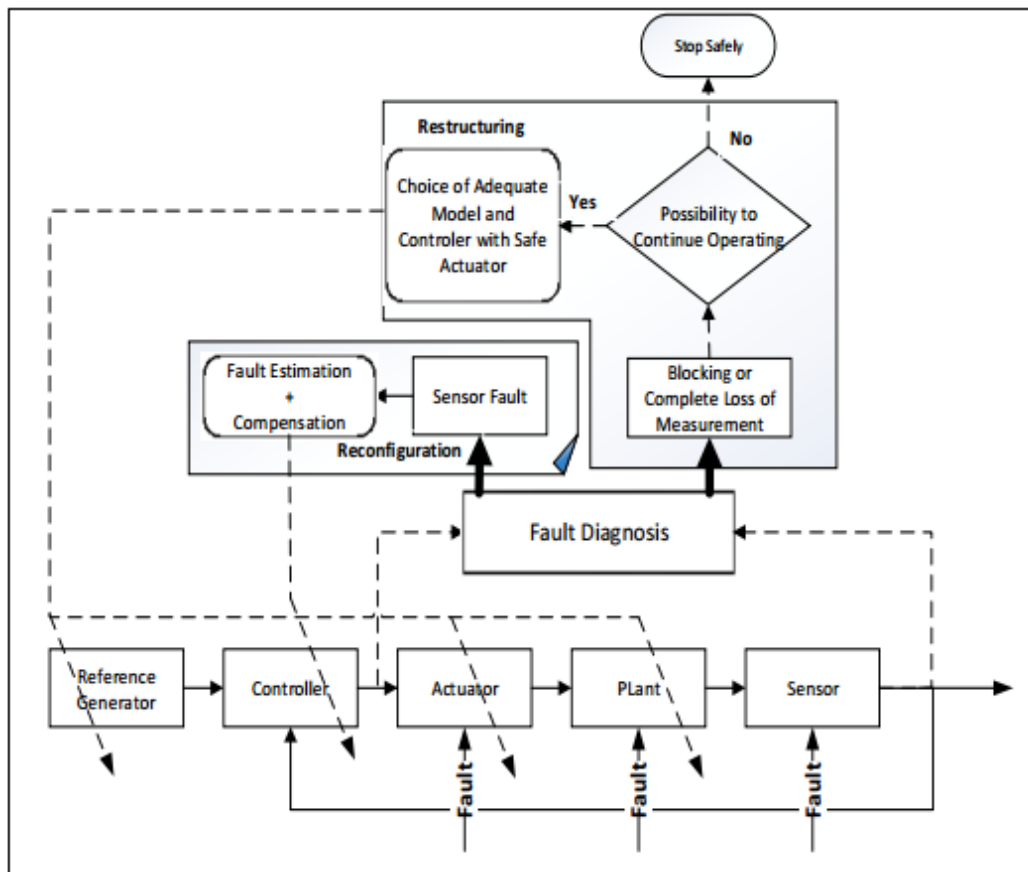
Beberapa kondisi yang mungkin terjadi pada permasalahan *Incomplete Information* adalah :

1. Jika $\alpha_k^i = 1$ maka sensor ke i mengalami saturasi
2. Jika $\alpha_k^i = 0$ dan $\beta_k^i = 1$ maka sensor ke i berjalan normal
3. Jika $\alpha_k^i = 0$ dan $\beta_k^i = 0$ maka data pengukuran sensor hilang.

2.2.4 *Fault Tolerant Control (FTC)*

Kesalahan sensor pada suatu sistem dapat mempengaruhi performa dan stabilitas sistem. Beberapa metode telah diterapkan, salah satunya metode *Fault Tolerant Control (FTC)*. Metode FTC dapat dibagi menjadi dua, yaitu *Passive Fault Tolerant Control (PFTCs)* dan *Active Fault Tolerant Control (AFTCs)*. Prinsip kerja dari PFTCs adalah menggunakan kontroler yang berfungsi untuk melemahkan efek kesalahan sensor agar kontroler menjadi kokoh terhadap kesalahan pada sistem, dalam hal ini kesalahan sensor. Sehingga saat terjadi

kesalahan sensor, kontroler mampu untuk mengkompensasinya. PFTCs memiliki kelemahan yaitu tingkat pelemahan efek kesalahan sensor terbatas pada tingkat pelemahan tertentu. Sehingga kesalahan sensor masih bisa dirasakan sistem, meskipun dengan amplitudo yang berkurang. Secara umum skema dari FTC dapat di sajikan pada Gambar 2.15. [35]



Gambar 2.15 Skema FTC Secara Umum [35]

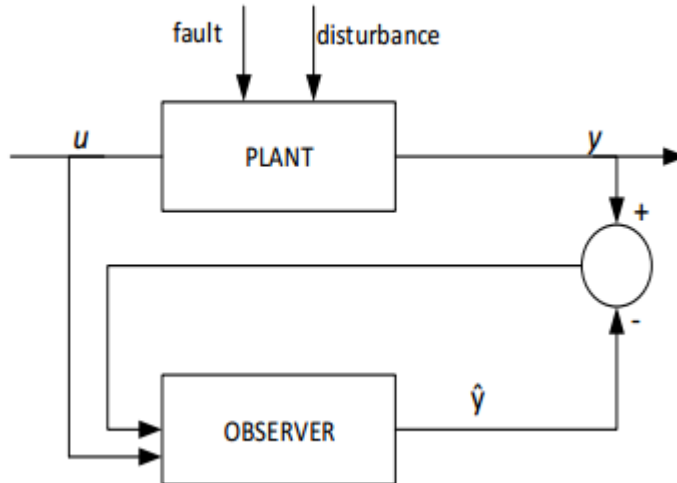
Prinsip kerja AFTCs adalah melibatkan algoritma dinamis yang mampu mengestimasi *state* sistem sekaligus dan magnitudo kesalahan sensor secara simultan. Estimasi terhadap magnitudo kesalahan sensor disebut dengan metode *fault detection*. Karena magnitudo kesalahan sensor dapat diketahui, maka kompensasi dilakukan dengan cara mengurangi keluaran sistem yang memiliki kesalahan sensor dengan hasil estimasi kesalahan sensor. Metode ini disebut sebagai *fault hiding* [35].

a. Fault Diagnosis [36]

Sebelum implementasi *Fault Tolerant Control* (FTC), terlebih dahulu dilakukan *fault diagnosis* pada sistem. *Fault diagnosis* terdiri dari *fault detection* dan *fault estimation*. Beberapa tahapan perancangan *Fault Diagnosis* adalah sbagai berikut :

1. *Fault detection* : mendeteksi terjadinya *fault* dan memberikan peringatan ketika *fault* terjadi pada sistem.
2. *Fault Isolation* : mengklasifikasikan *fault* yang terjadi pada sistem.
3. *Fault analysis* atau *identification* : menentukan tipe, ukuran dan penyebab *fault*.

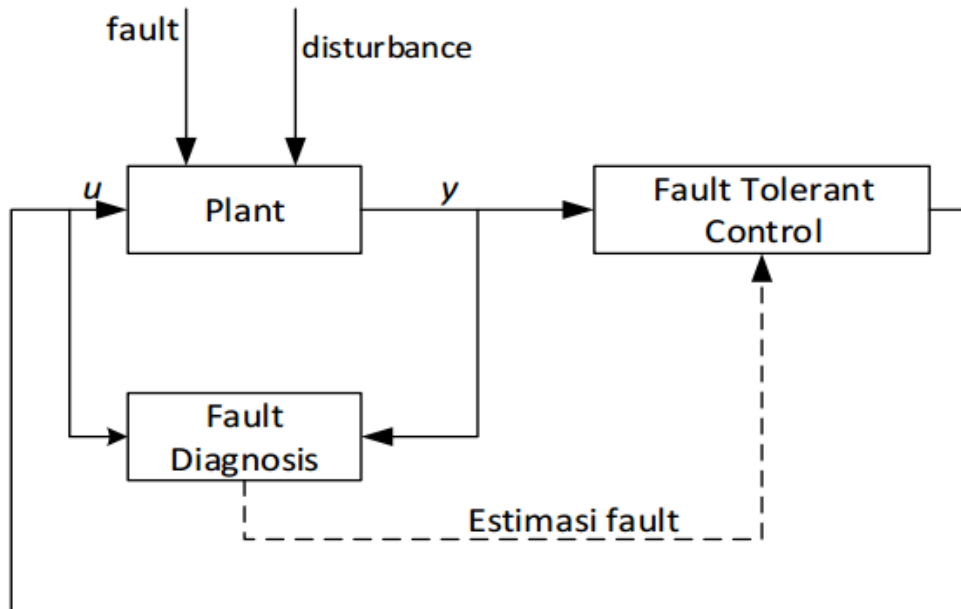
Pada penelitian ini akan digunakan metode *observer-based fault diagnosis technique*, dimana akan digunakan metode *robust linear fault diagnosis*. Secara umum konsep desain *observer-based* terdiri dari dua bagian, yaitu desain *observer* dan desain *residual generation*. Gambar 2.16 merupakan Skema *Observer-Based Fault Diagnosis*.



Gambar 2.16 Skema *Observer-Based Fault Diagnosis* [36]

b. *Fault Tolerant Control (FTC)*[36]

Skema dari *Fault Tolerant Control (FTC)* ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Skema *Fault Tolerant Control* [36]

Beberapa tahapan untuk mendesain FTC adalah sebagai berikut :

1. Desain *observer-based fault detection filter (FDF)* yang digunakan untuk mendeteksi fault dan meminimalisir gangguan.
2. Residual sinyal yang didapatkan dari FDF didapatkan dengan menyelesaikan permasalahan Performa H_{∞} , yang mana akan meminimalkan sensitifitas terhadap gangguan, dan memaksimalkan sensitifitas terhadap *fault*.
3. Desain fault tolerant control yang berfungsi untuk menstabilkan sistem dari gangguan dan mengkompensasi sistem dari *fault*.

2.2.5 Performa H_{∞} [37]

Tujuan utama dalam perancangan kontroler adalah sistem dapat stabil dengan performa yang diinginkan. Performa itu sendiri berarti ketahanan sistem terhadap gangguan dari luar yang diberikan pada sistem. Metode kontrol *robust* yang biasa digunakan adalah *Robust H_{∞}* . Pada metode ini, pengaruh gangguan buruk dari luar akan dilemahkan hingga mencapai nilai pelemahan yang telah

ditentukan. Pengaruh terburuk suatu gangguan pada sistem dengan *transfer function* $G(s)$ dapat diketahui dengan menghitung ∞ – *norm* atau menghitung nilai maksimum dari *magnitude* respond frekuensinya didefinisikan pada persamaan (2.17).

$$\|G(s)\|_{\infty} = \sup_{\omega} |G(j\omega)| \quad (2.37)$$

Fungsi performa H_{∞} dalam sistem kontrol pada penelitian ini adalah untuk melemahkan pengaruh buruk yang disebabkan oleh kesalahan sensor, yaitu melemahkan efek gangguan pada sistem sehingga error estimasi stabil secara robust dalam performa H_{∞} dengan tingkat pelemahan $\gamma \geq 0$.

Pada penelitian, akan digunakan metode *Robust* H_{∞} untuk melemahkan *disturbance*, *noise* dan juga *fault* pada sistem. Sehingga akan digunakan beberapa pertidaksamaan sesuai dengan variabel yang akan dilemahkan.

2.2.6 *Linier Matrix Inequality (LMI)* [44]

Linear Matrix Inequality atau LMI merupakan metode untuk menyelesaikan permasalahan kontrol dan optimasi. Sistem stabil jika dan hanya jika matriks P definit positif. Syarat $P > 0$ dan $A^T P + P A < 0$ merupakan pertidaksamaan Lyapunov pada P dan bentuk khusus dari LMI. Untuk sebuah sistem sederhana pertidaksamaan tersebut dapat diselesaikan menggunakan cara analitis. Namun untuk orde tinggi sangat sulit untuk dilakukan. Sehingga diperlukan metode tambahan untuk menyelesaikan, yaitu metode LMI.

Bentuk umum LMI disajikan pada persamaan (2.38)

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0 \quad (2.38)$$

dengan $x \in R^m$ adalah variabel LMI F_i adalah matriks simetris. Permasalahan (2.38) merupakan fungsi kendala x , sehingga tujuan optimisasi adalah mencari nilai x sehingga $F(x) > 0$.

Keuntungan penggunaan LMI adalah mampu menggabungkan beberapa fungsi kendala dalam satu LMI. Sebagai contoh terdapat n fungsi kendala seperti pada persamaan (2.39).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{x})_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{F}(\mathbf{x})_n \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Untuk menyelesaikan permasalahan LMI akan digunakan toolbox LMI pada MATLAB.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

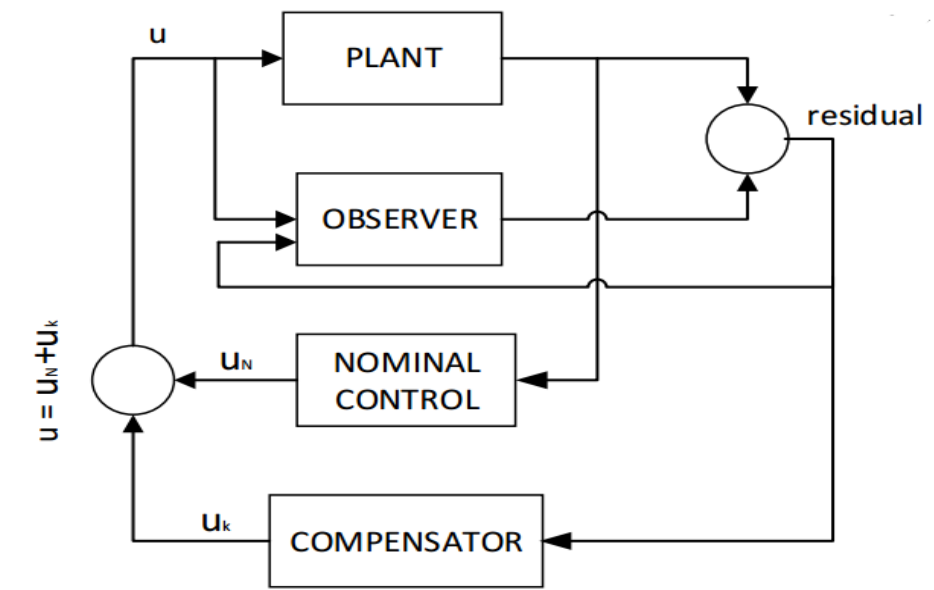
BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Sistem yang dibahas pada penelitian ini merupakan sistem kendaraan beroda empat dengan menggunakan suspensi semi aktif. Persamaan sistem telah diberikan pada (2.26) - (2.32). Untuk memudahkan pengendalian pada sistem, maka representasi sistem dibuat dalam bentuk *cascade*. Dimana terdapat dua sistem loop yaitu *inner loop* dan *outer loop*. *Inner loop* merupakan sistem suspensi dan *outer loop* merupakan pergerakan pada bodi kendaraan.

3.1 Perancangan Sistem *Inner Loop*

Secara umum, skema sistem kontrol *inner loop* adalah sebagai berikut :



Gambar 3.1 Skema Sistem Kontrol *Inner Loop*

Pada subbab ini akan dibahas perancangan sistem kontrol *inner loop* meliputi, permodelan sistem plant, permasalahan *incomplete information*, desain *robust observer – based Fault Detection Filter (FDF)*, desain *Fault Tolerant Control (FTC)*, dan desain *Fault Compensator*.

3.1.1 Permodelan Sistem

Perancangan sistem *inner loop* pada penelitian ini merupakan perancangan sistem suspensi kendaraan pada keempat rodanya. Pada penelitian ini massa badan kendaraan diasumsikan terdistribusi merata pada masing-masing suspensi. Sehingga massa badan kendaraan pada masing – masing suspensi bernilai sama. Model dinamika sistem terdapat pada persamaan (2.26) - (2.32). Dengan mensubtitusikan persamaan (2.28) dan (2.30) ke persamaan (2.27) dan (2.29). Didapatkan persamaan (3.1)-(3.8).

$$\ddot{z}_{fl} = -\frac{k_f}{m_{fl}}z_{fl} + \frac{k_f}{m_{fl}}z_{tfl} - \frac{c_{fl}}{m_{fl}}\dot{z}_{fl} + \frac{c_{fl}}{m_{fl}}\dot{z}_{tfl} - \frac{F_{dfl}}{m_{fl}} \quad (3.1)$$

$$\ddot{z}_{fr} = -\frac{k_f}{m_{fr}}z_{fr} + \frac{k_f}{m_{fr}}z_{tfr} - \frac{c_{fr}}{m_{fr}}\dot{z}_{fr} + \frac{c_{fr}}{m_{fr}}\dot{z}_{tfr} - \frac{F_{dfr}}{m_{fr}} \quad (3.2)$$

$$\ddot{z}_{rl} = -\frac{k_r}{m_{rl}}z_{rl} + \frac{k_r}{m_{rl}}z_{trl} - \frac{c_{rl}}{m_{rl}}\dot{z}_{rl} + \frac{c_{rl}}{m_{rl}}\dot{z}_{trl} - \frac{F_{drl}}{m_{rl}} \quad (3.3)$$

$$\ddot{z}_{rr} = -\frac{k_r}{m_{rr}}z_{rr} + \frac{k_r}{m_{rr}}z_{trr} - \frac{c_{rr}}{m_{rr}}\dot{z}_{rr} + \frac{c_{rr}}{m_{rr}}\dot{z}_{trr} - \frac{F_{drr}}{m_{rr}} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{tfl} = & \frac{k_{fl}}{m_{tfl}}z_{fl} - \frac{k_{fl}}{m_{tfl}}z_{tfl} + \frac{c_{fl}}{m_{tfl}}\dot{z}_{fl} - \frac{c_{fl}}{m_{tfl}}\dot{z}_{tfl} + \frac{F_{dfl}}{m_{tfl}} - \frac{k_{tfl}}{m_{tfl}}z_{tfl} \\ & + \frac{k_{tfl}}{m_{tfl}}z_{rfl} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{tfr} = & \frac{k_{fr}}{m_{tfr}}z_{fr} - \frac{k_{fr}}{m_{tfr}}z_{tfr} + \frac{c_{fr}}{m_{tfr}}\dot{z}_{fr} - \frac{c_{fr}}{m_{tfr}}\dot{z}_{tfr} + \frac{F_{dfr}}{m_{tfr}} - \frac{k_{tfr}}{m_{tfr}}z_{tfr} \\ & + \frac{k_{tfr}}{m_{tfr}}z_{rfr} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{trl} = & \frac{k_{rl}}{m_{trl}}z_{rl} - \frac{k_{rl}}{m_{trl}}z_{trl} + \frac{c_{rl}}{m_{trl}}\dot{z}_{rl} - \frac{c_{rl}}{m_{trl}}\dot{z}_{trl} + \frac{F_{drl}}{m_{trl}} - \frac{k_{trl}}{m_{trl}}z_{trl} \\ & + \frac{k_{trl}}{m_{trl}}z_{rrl} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z}_{trr} = & \frac{k_{rr}}{m_{trr}} z_{rr} - \frac{k_{rr}}{m_{trr}} z_{t_{rr}} + \frac{c_{rr}}{m_{trr}} \dot{z}_{rr} - \frac{c_{rr}}{m_{trr}} \dot{z}_{t_{rr}} + \frac{F_{drr}}{m_{trr}} - \frac{k_{trr}}{m_{trr}} z_{trr} \\ & + \frac{k_{trr}}{m_{trr}} z_{r_{rr}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

dengan (3.1) merupakan persamaan percepatan pada suspensi depan kiri, persamaan (3.2) percepatan pada suspensi depan kanan, persamaan (3.3) percepatan pada suspensi belakang kiri, persamaan (3.4) percepatan pada suspensi belakang kanan, persamaan (3.5) percepatan pada roda depan kiri, persamaan (3.6) percepatan pada roda depan kanan, persamaan (3.7) percepatan pada roda belakang kiri, persamaan (3.8) percepatan pada roda belakang kanan. Sehingga *state space* pada *inner loop*, yaitu pada persamaan suspensi sistem.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) \quad (3.9)$$

dengan,

$$\dot{x}(t) = [\ddot{z}_{fr} \quad \ddot{z}_{fl} \quad \ddot{z}_{rr} \quad \ddot{z}_{rl} \quad \ddot{z}_{t_{fr}} \quad \ddot{z}_{t_{fl}} \quad \ddot{z}_{t_{rr}} \quad \ddot{z}_{t_{rl}}]^T$$

$$x(t) = [\dot{z}_{fr} \quad \dot{z}_{fl} \quad \dot{z}_{rr} \quad \dot{z}_{rl} \quad \dot{z}_{t_{fr}} \quad \dot{z}_{t_{fl}} \quad \dot{z}_{t_{rr}} \quad \dot{z}_{t_{rl}}]^T$$

$$u(t) = [F_{dfl} \quad F_{dfr} \quad F_{drl} \quad F_{drr}]^T$$

$$d(t) = [z_{rfl} \quad z_{rfr} \quad z_{rrl} \quad z_{rrr}]^T$$

dimana z_{rij} merupakan gangguan jalan pada masing masing suspensi. Nilai gangguan jalan pada masing masing suspensi kanan dan kiri bernilai sama, sehingga $z_{rfl} = z_{rfr} = z_{rrl} = z_{rrr}$. \dot{z}_{fr} , \dot{z}_{fl} , \dot{z}_{rr} , \dot{z}_{rl} merupakan kecepatan pada masing – masing suspensi, F_{dij} merupakan input gaya pada damper dengan nilai setiap gaya damper bernilai sama, sehingga $F_{dfl} = F_{dfr} = F_{drl} = F_{drr}$. Dari persamaan (3.1)-(3.8), didapatkan matriks system

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_{fr}}{m_{fr}} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{fr}}{m_{fr}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{c_{fl}}{m_{fl}} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{fl}}{m_{fl}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c_{rr}}{m_{rr}} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{rr}}{m_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{rl}}{m_{rl}} & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{rl}}{m_{rl}} \\ \frac{c_{fr}}{m_{t_{fr}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{fr}}{m_{t_{fr}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_{fl}}{m_{t_{fl}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{fl}}{m_{t_{fl}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_{rr}}{m_{t_{rr}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{rr}}{m_{t_{rr}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{rl}}{m_{t_{rl}}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{rl}}{m_{t_{rl}}} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_{fr}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{fl}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{m_{rr}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{m_{rl}} \\ -\frac{1}{m_{t_{fr}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{t_{fl}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{m_{t_{rr}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{m_{t_{rl}}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_t}{m_{t_{fr}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_t}{m_{t_{fl}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_t}{m_{t_{rr}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_t}{m_{t_{rl}}} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Nilai parameter plant diperoleh pada [40], dan dituliskan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Sistem Mobil Beroda Empat [40]

Parameter	Notasi	Nilai
Massa bodi pada COG	M	2160 kg
Konstanta pegas suspensi bagian depan	k_f	75 kN
Konstanta pegas suspensi bagian belakang	k_r	32 kN
Koefisien damper bagian depan	c_{fl}, c_{fr}	3kNs/m
Koefisien damper bagian belakang	c_{rl}, c_{rr}	3kNs/m
Massa bodi pada suspensi ke i	$m_{fl}, m_{fr}, m_{rl}, m_{rr}$	540 kg
Massa ban bagian depan	m_{tfl}, m_{tfr}	85 kg
Massa ban bagian belakang	m_{trl}, m_{trr}	60 kg
Konstanta pegas ban	k_t	200 kN
Inersia pada sumbu x	I_x	946 kgm ⁻²
Inersia pada sumbu y	I_y	4140 kgm ⁻²
Jarak depan kendaraan ke COG	a	1524 m
Jarak belakang kendaraan ke COG	b	1156 m
Jarak dari COG ke bagian kanan kendaraan	c	725 kgm ⁻²
Jarak dari COG ke bagian kiri kendaraan	d	725 kgm ⁻²

Parameter sistem pada Tabel 3.1 disubstitusikan pada persamaan (3.10)-(3.12). Maka didapatkan nilai masing – masing matriks sistem sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0.005 & 0 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.005 & 0 & 0 & 0 & 0.005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.005 & 0 & 0 & 0 & 0.005 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.005 & 0 & 0 & 0 & 0.005 \\ 0.035 & 0 & 0 & 0 & -0.035 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.035 & 0 & 0 & 0 & -0.035 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.035 & 0 & 0 & 0 & -0.035 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.035 & 0 & 0 & 0 & -0.035 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.0018 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0018 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0018 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0018 \\ -0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.02 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.35 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.1.2 Permasalahan *Incomplete Information*

Permasalahan *Incomplete Information* merupakan permasalahan yang terdiri dari permasalahan *randomly sensor*, sensor saturasi dan *missing measurement*. Permasalahan *incomplete information* terletak pada output sistem. Permodelan output sensor dengan permasalahan *incomplete information* adalah sebagai berikut :

$$y(t) = Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t) \quad (3.16)$$

dengan persamaan permasalahan *incomplete information* didefinisikan sebagai berikut [28],

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t) \quad (3.17)$$

untuk setiap $\alpha_f \in \mathbb{R}$ dan $\beta_f \in \mathbb{R}$ adalah *Bernoulli distributed white sequence* yang bernilai 0 and 1 dengan

$$\begin{cases} Prob\{\alpha_f = 1\} = u \\ Prob\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \end{cases} \quad (3.18)$$

dan

$$\begin{cases} Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases} \quad (3.19)$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(w) = sign(w) \min\{1, |w|\} \quad (3.20)$$

dimana f merupakan *fault*, w merupakan *noise* sensor, $u, v \in [0,1]$ bernilai konstan.

3.1.3 Desain *Robust Fault Detection Filter dan Estimation*

Pada subbab ini, akan didesain *Observer-Based Fault Detection Filter* (FDF) untuk permasalahan *incomplete information*. *Observer-Based Fault Detection Filter* (FDF) bertujuan untuk meminimalisir efek gangguan pada sistem, sekaligus memaksimalkan sensitivitas sistem terhadap *fault*. Syarat yang harus dipenuhi adalah terlebih dahulu harus dipastikan matriks (A, C) *detectable*. Pertama definisikan observer Luenberger sebagai berikut :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y - \hat{y})(t) \quad (3.21)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (3.22)$$

dimana $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ dan $\hat{y} \in \mathbb{R}^n$ merepresentasikan vektor output estimasi, L merupakan gain observer.

Kemudian definisikan persamaan residual (r), dimana merupakan selisih dari output state dengan output observer. Persamaan residual (r) didefinisikan sebagai berikut :

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.23)$$

Jika persamaan (3.23) disubstitusikan dengan persamaan (3.22) dan (3.16), maka didapatkan :

$$r(t) = (Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)) - (C\hat{x}(t)) \quad (3.24)$$

$$r(t) = C(x(t) - \hat{x}(t)) + D_f f(t) + D_v w(t) \quad (3.25)$$

Definisikan persamaan error yang merupakan selisih dari state sistem dengan state observer sebagai berikut :

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.26)$$

dengan turunan pertama persamaan error (3.26) adalah

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (3.27)$$

sehingga persamaan (3.25) akan menjadi :

$$r(t) = Ce(t) + D_f f(t) + D_v w(t) \quad (3.28)$$

substitusi persamaan (3.9) dan (3.21) ke persamaan (3.27). Didapatkan :

$$\dot{e}(t) = (Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t)) - (A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y - \hat{y})(t)) \quad (3.29)$$

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + B_d d(t) - LD_f f(t) \quad (3.30)$$

Syarat yang harus dipenuhi untuk mendesain *Observer-Based Fault Detection Filter* (FDF) adalah [32] :

1. $A_c = A - L_\infty C$, stabil.
2. $\|G_{rd}\|_\infty := \sup_w \sigma_{max}[G_{rd}(jw)] \leq \gamma$
3. $\|G_{rf}(jw)\|_- := \inf_w \sigma_{min}[G_{rf}(jw)] \geq \beta$

Untuk memenuhi syarat kondisi 2 $\|G_{rd}\|_\infty := \sup_w \sigma_{max}[G_{rd}(jw)] \leq \gamma$

terlebih dahulu definisikan persamaan performa H_∞ sebagai berikut :

$$\|G_{rd}(jw)\|_\infty \leq \gamma \quad (3.31)$$

$$\frac{\|r(t)\|_\infty}{\|d(t)\|_\infty} = \frac{\sqrt{\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt}}{\sqrt{\int_0^{T_f} d(t)^T d(t) dt}} \leq \gamma \quad (3.32)$$

dengan mengkuadratkan kedua sisi diperoleh.

$$\frac{\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt}{\int_0^{T_f} d(t)^T d(t) dt} \leq \gamma^2 \quad (3.33)$$

atau

$$\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt \leq \gamma^2 \int_0^{T_f} d(t)^T d(t) dt \quad (3.34)$$

dengan γ merupakan tingkat pelemahan yang diinginkan dan d merupakan gangguan pada sistem. Selanjutnya definisikan fungsi Lyapunov sebagai berikut.

$$V(e) = e^T(t)Pe(t) \quad (3.35)$$

dengan turunan pertama fungsi Lyapunov didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{V}(e) = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) \quad (3.36)$$

fungsi hamiltonian didefinisikan sebagai berikut.

$$H = \dot{V}(e) + g(r, d) \quad (3.37)$$

substitusi persamaan (3.35) ke persamaan (3.37), didapatkan.

$$H = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) + r^T(t)r(t) - \gamma d^T(t)d(t) \quad (3.38)$$

Berdasarkan persamaan (3.31), maka persamaan (3.38) dapat diubah menjadi.

$$\dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) + r^T(t)r(t) - \gamma d^T(t)d(t) \leq 0 \quad (3.39)$$

Substitusi persamaan (3.39) dengan persamaan (3.30) dan (3.28). Maka didapatkan:

$$\begin{aligned} & ((A - LC)e(t) + B_d d(t))^T Pe(t) + e^T(t)P((A - LC)e(t) + B_d d(t)) \\ & + (Ce(t) + D_v w(t))^T (Ce(t) + D_v w(t)) \\ & - \gamma (B_d d(t))^T (B_d d(t)) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

persamaan (3.40) dapat diubah menjadi

$$[e^T \quad d^T \quad w^T] \begin{bmatrix} A^T P + PA - PLC - C^T L^T P^T & -PB_d & C^T \\ * & -\gamma I & 0 \\ * & * & -\gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ d \\ w \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.41)$$

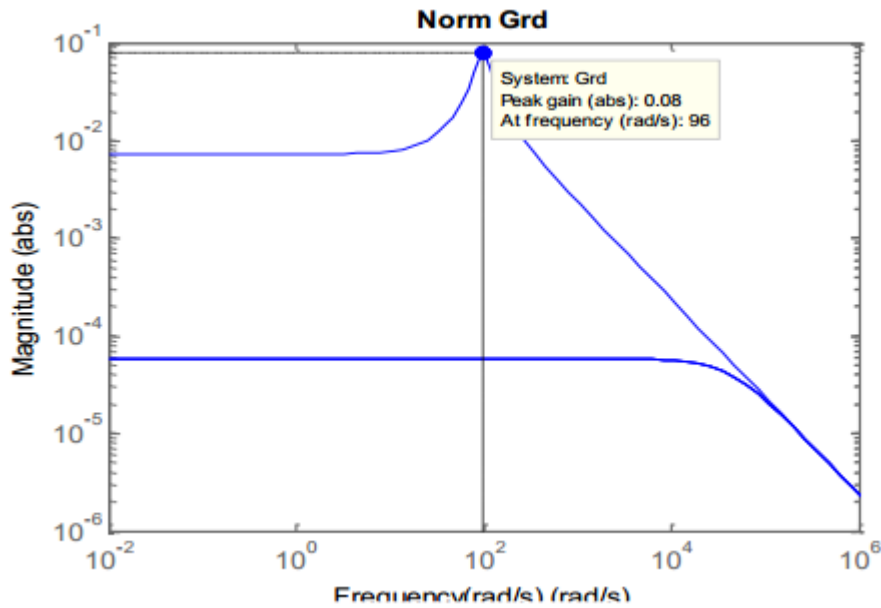
dengan menggunakan pendekatan Bounded Real Lemma [38], maka didapatkan bentuk iteratif LMI sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA - PLC - C^T L^T P^T & PB_d & -PLD_v + C^T D_v & C^T \\ * & -\gamma I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & D_v^T \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.42)$$

Dengan menyelesaikan pertidaksamaan pada (3.42), maka didapatkan nilai gain L . Dimana pada penelitian ini diberikan nilai :

$$\gamma = 0.1$$

Maka nilai $\|G_{rd}\|_{\infty} = 0.08$ dimana terbukti jika $\|G_{rd}\|_{\infty} \leq \gamma$. Gambar 3.1 merupakan gambar dari $\|G_{rd}\|_{\infty}$.



Gambar 3.1 Norm G_{rd}

Dengan terselesaikannya kondisi 2, maka system dapat meminimalisir efek gangguan pada sistem, namun tidak dengan permasalahan *fault*. Selain meminimalisir efek gangguan sistem harus sekaligus mampu memaksimalkan sensitivitas sistem terhadap *fault*. Untuk menyelesaikan permasalahan *fault*, maka kondisi 3 harus terpenuhi. Untuk memenuhi syarat kondisi 3 terlebih dahulu definisikan :

$$\|G_{rf(jw)}\|_{-} \geq \beta \quad (3.43)$$

$$\frac{\|r(t)\|_{-}}{\|f(t)\|_{-}} = \frac{\sqrt{\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt}}{\sqrt{\int_0^{T_f} f(t)^T f(t) dt}} \geq \beta \quad (3.44)$$

dengan mengkuadratkan kedua sisi diperoleh persamaan (3.45)

$$\frac{\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt}{\int_0^{T_f} f(t)^T f(t) dt} \geq \beta^2 \quad (3.45)$$

persamaan (3.45) dapat dirubah menjadi,

$$\int_0^{T_f} r(t)^T r(t) dt \geq \beta^2 \int_0^{T_f} f(t)^T f(t) dt \quad (3.46)$$

dengan γ merupakan tingkat pelemahan yang diinginkan dan f merupakan *fault* pada sistem.

Definisikan kembali fungsi Lyapunov pada persamaan (3.35) sebagai berikut.

$$V(e) = e^T(t)Pe(t)$$

dengan turunan pertama fungsi Lyapunov didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{V}(e) = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t)$$

dan fungsi hamiltonian,

$$H = \dot{V}(e) + g(r, f) \quad (3.47)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (3.47) ke persamaan (3.37), didapatkan:

$$H = \dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) + r^T(t)r(t) - \gamma f^T(t)f(t) \quad (3.48)$$

Berdasarkan persamaan (3.43), maka persamaan (3.48) dapat diubah menjadi.

$$\dot{e}^T(t)Pe(t) + e^T(t)P\dot{e}(t) + r^T(t)r(t) - \gamma f^T(t)f(t) \geq 0 \quad (3.49)$$

Substitusi persamaan (3.49) dengan persamaan (3.30) dan (3.28). Maka didapatkan:

$$\begin{aligned} & \left((A - LC)e(t) - LD_f f(t) \right)^T Pe(t) \\ & + e^T(t)P \left((A - LC)e(t) - LD_f f(t) \right) \\ & + \left(Ce(t) + D_f f(t) \right)^T \left(Ce(t) + D_f f(t) \right) \\ & - \beta (D_f f)^T(t) (D_f f)(t) \geq 0 \end{aligned} \quad (3.50)$$

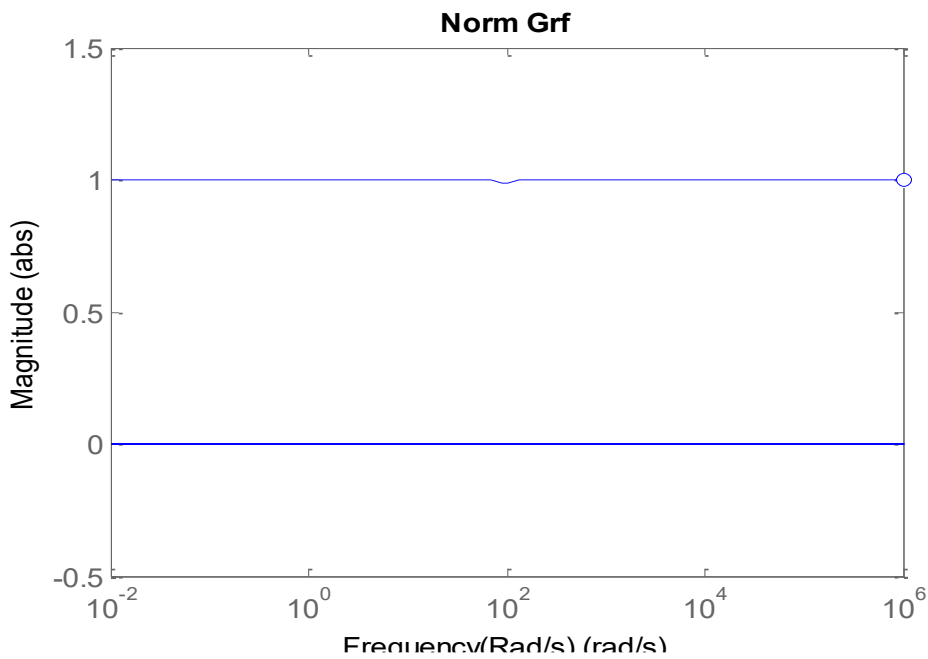
persamaan (3.50) diubah menjadi bentuk sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} f^T & e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_f^T D_f (I - \beta) & -D_f^T P^T L^T + D_f^T C \\ * & \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ e \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3.51)$$

maka didapatkan bentuk iteratif LMI sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} D_f^T D_f (I - \beta) & -D_f^T P^T L^T + D_f^T C \\ * & A^T P + PA - PLC - C^T L^T P^T + C^T C \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3.52)$$

Pertidaksamaan pada (3.42) dan (3.52) bertujuan untuk meminimalkan nilai $\|G_{rd}(jw)\|_\infty$ sehingga $\|G_{rd}(jw)\|_\infty \leq \gamma$. Dan memaksimalkan nilai $\|G_{rf}(jw)\|_-$ sehingga $\|G_{rf}(jw)\|_- \geq \beta$. Dengan diberikan nilai $\gamma = 0.1$, didapatkan nilai maksimum $\beta = 1$. Gambar 3.2 membuktikan bahwa syarat kondisi 3 $\|G_{rf}(jw)\|_- \geq \beta$ terpenuhi.



Gambar 3.2 Norm G_{rf}

Dengan menyelesaikan pertidaksamaan pada (3.42) dan (3.52), maka dapat ditentukan nilai gain observer (L). Nilai dari Gain L di tunjukkan pada lampiran A. Sehingga didapatkan nilai *eigen value* $A_c = A - L_\infty C$ pada persamaan (3.50).

$$1.0e+04 * \begin{bmatrix} -0.0000 + 0.0000i \\ -0.0015 + 0.0097i \\ -0.0015 - 0.0097i \\ -4.0614 + 0.0000i \\ -4.0614 + 0.0000i \\ -4.0614 + 0.0000i \\ -0.0000 + 0.0000i \\ -0.0000 + 0.0000i \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Dari persamaan (3.50) maka terbukti eigen value $A_c = A - L_\infty C$ pada kondisi 1, stabil.

3.1.4 Desain *Robust Fault Tolerant Control*

Untuk mendesain desain kontrol pada *Fault Tolerant Control*, maka terlebih dahulu definisikan sistem yang mengabaikan adanya *fault*. Perlu diketahui, jika fungsi dari kontroler yang akan didesain pada subbab ini adalah untuk menghilangkan efek gangguan pada sistem. Sedangkan untuk meningkatkan sensitivitas *fault* pada sistem adalah fungsi dari kompensator (akan dibahas di subbab setelah ini). Model sistem tanpa *fault* didefinisikan sebagai berikut :

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + B_u u(t) + B_d d(t) \quad (3.54)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_v w(t) \quad (3.55)$$

dengan $w \in \mathbb{R}$ mempresentasikan noise sensor.

Syarat yang harus dipenuhi untuk desain kontroler adalah [36] :

1. (A, B) controllable dan (A, C) observable
2. (A, B_d) controllable

Untuk memenuhi syarat diatas, terlebih dahulu uji *observability* dan *controllability* matriks sistem, didapatkan *rank* dari $(A, B) = 8$ (full rank) sehingga terbukti bahwa sistem *controllable*, dan *observability* (A, C) memiliki *rank* = 8 (full rank) sehingga (A, C) observable. Selanjutnya pengujian syarat kondisi 2 yaitu (A, B_d) *controllable*, didapatkan *rank* $(A, B_d) = 8$ atau (full rank) sehingga terbukti bahwa system *controllable*.

Dengan memenuhi dua kondisi diatas, maka dapat ditentukan gain kontroler (K_c) dan dapat mendesain kontroler yang mampu meminimalkan efek disturbance pada sistem. Diketahui performa H_∞ ,

$$\|G_{yd(jw)}\|_\infty \leq \gamma \quad (3.56)$$

definiskan fungsi Lyapunov sebagai berikut.

$$V(x) = x^T(t)Px(t) \quad (3.57)$$

dengan turunan pertama fungsi Lyapunov didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T P\dot{x}(t) \quad (3.58)$$

sedangkan fungsi hamiltonian,

$$H = \dot{V}(x) + g(y, d) \quad (3.59)$$

maka dengan substitusi persamaan (3.59) ke persamaan (3.58), didapatkan:

$$H = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + y^T(t)y(t) - \beta d^T(t)d(t) \quad (3.60)$$

Berdasarkan persamaan (3.56), maka persamaan (3.60) dapat diubah menjadi.

$$\dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + y^T(t)y(t) - \beta d^T(t)d(t) \leq 0 \quad (3.61)$$

Substitusi persamaan (3.61) dengan persamaan (3.54) dan (3.55).

Didapatkan:

$$\begin{aligned} & x^T A^T P x(t) - x^T C^T K_c^T B^T P x(t) + d^T B_d^T P x(t) + x^T P A x(t) \\ & - x^T P B K_c C x(t) + x^T P B_d d(t) + x^T C^T C x(t) \\ & - x^T C^T D_v w(t) + w^T D_v^T C x(t) + w^T D_v^T D_v w(t) \\ & - \gamma d^T(t)d(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.62)$$

persamaan (3.62) dapat diubah menjadi.

$$\begin{bmatrix} x^T & d^T & w^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta & P B_d & C^T D_v \\ * & -\gamma I & 0 \\ * & * & D_v^T D_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.63)$$

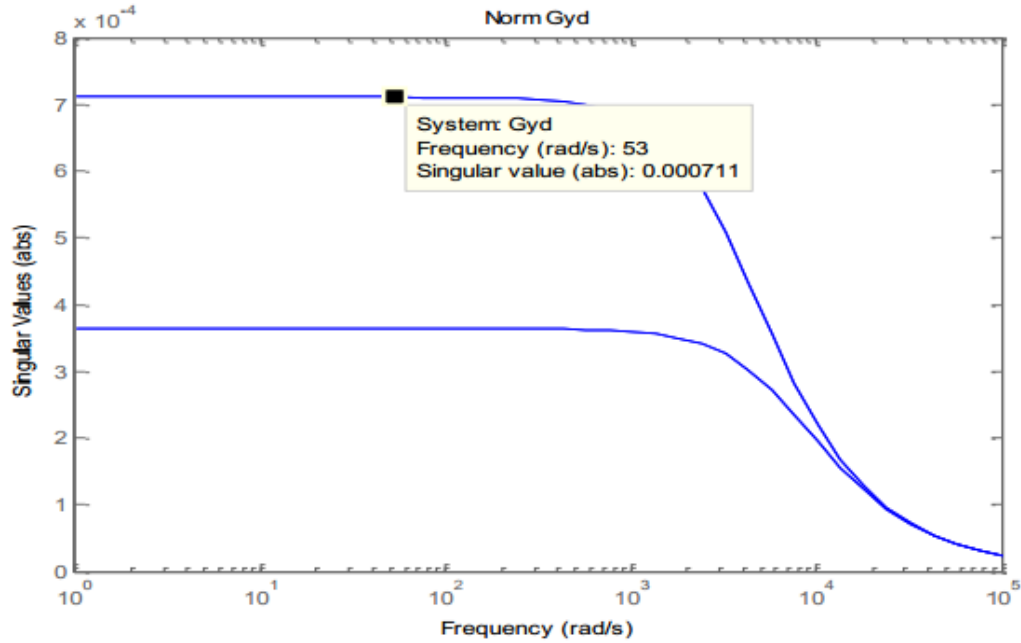
dengan $\theta = A^T P + P A - C^T K_c^T B^T P + P B K C + C^T C$, maka didapatkan bentuk iteratif LMI sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} A^T P + P A - C^T K_c^T B^T P + P B K C & P B_d & C^T D_v & C^T \\ * & -\gamma I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & D_v^T \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.64)$$

Dengan menyelesaikan pertidaksamaan pada (3.64), maka dapat ditentukan nilai gain kontroler (K_c). Dimana pada penelitian ini diberikan nilai :

$$\gamma = 0.1$$

Maka didapatkan nilai gain kontroler (K_c) pada Lampiran A. Gambar 3.1 merupakan perolehan $\|G_{yd(jw)}\|_\infty$, dimana nilai $\|G_{yd(jw)}\|_\infty$ puncak terbesar bernilai 0.0007111. sehingga $\|G_{yd(jw)}\|_\infty \leq \gamma$



Gambar 3.3 Norm G_{yd}

3.1.5 Desain *Fault Compensation*

Pada subbab ini, akan didesain kompensator yang dapat meminimalkan efek *fault* pada sistem. Kompensator bekerja dengan cara menambahkan u_c dengan kontrol nominal (u_N) pada sinyal kontrol (u) untuk meminimalkan efek *fault* pada sistem. Persamaan rekonfigurasi kontroler yang digunakan untuk mengkompensasi *fault* adalah sebagai berikut:

$$u(t) = u_N(t) + u_c(t) \quad (3.65)$$

$$u(t) = K_c y(t) + V \hat{f}(t) \quad (3.66)$$

Definisikan sistem tanpa *disturbance* dan *noise*, dengan $\hat{f}(t) = f(t) - \tilde{f}(t)$. didapatkan

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.67)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_f f(t) \quad (3.68)$$

substitusi persamaan (3.66) dengan (3.68)

$$u(t) = -K(Cx + D_f f)(t) + V(f - \tilde{f})(t) \quad (3.69)$$

atau persamaan (3.69) dapat dibentuk seperti persamaan (3.70)

$$u = -(KCx + V\tilde{f})(t) + (V - KD_f)f(t) \quad (3.70)$$

sehingga model sistem akan menjadi,

$$\dot{x} = (A - BKC)x(t) + (BV - BKD_f)f(t) - BV\tilde{f}(t) \quad (3.71)$$

$$y = Cx(t) + D_f f(t) \quad (3.72)$$

jika $\xi = [f \ \tilde{f}]^T$. Maka persamaan (3.71) dan (3.72) menjadi.

$$\dot{x} = (A - BKC)x(t) + [(BV - BKD_f) \ -BV]\xi(t) \quad (3.3.73)$$

$$y = Cx(t) + [D_f \ 0]\xi(t) \quad (3.74)$$

Tujuan dari subbab ini adalah mendesain kompensator yang dapat meminimalkan efek *fault* pada sistem yang memenuhi $\|G_{y\xi(jw)}\|_\infty < \gamma$, dan menjamin kestabilan sistem ketika $d = 0$. Definisikan kembali fungsi Lyapunov pada (3.57) sebagai berikut.

$$V(x) = x^T(t)Px(t)$$

dengan turunan pertama fungsi Lyapunov didefinisikan sebagai berikut:

$$\dot{V}(x) = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t)$$

sedangkan fungsi hamiltoniannya didefinisikan sebagai berikut,

$$H = \dot{V}(x) + g(y, \xi) \quad (3.75)$$

maka dengan substitusi persamaan (3.75) ke persamaan (3.58), didapatkan:

$$H = \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + y^T(t)y(t) - \gamma\xi^T(t)\xi(t) \quad (3.76)$$

maka persamaan (3.76) dapat diubah menjadi.

$$\dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + y^T(t)y(t) - \gamma\xi^T(t)\xi(t) \leq 0 \quad (3.77)$$

Substitusi persamaan (3.77) dengan persamaan (3.54) dan (3.67)

Didapatkan:

$$\begin{aligned} & x^T(A - BKC)^T Px(t) + \xi^T(t)[(BV - BKD_f)(t) \quad -BV(t)]^T Px(t) \\ & + x^T(t)PA_k x(t) - x^T PBKCx(t) \\ & + x^T(t)P[(BV - BKD_f) \quad -BV]\xi(t) + x^T C^T Cx(t) \\ & + \xi^T [D_f \quad 0]^T Cx(t) + x^T C^T [D_f \quad 0]\xi(t) \\ & + \xi^T(t)[D_f \quad 0]^T [D_f \quad 0]\xi(t) \\ & - \gamma\xi^T(t)[D_f \quad 0]^T [D_f \quad 0]\xi(t) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.78)$$

Persamaan (3.78) dapat dirubah menjadi.

$$\begin{bmatrix} x^T & \xi^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} \\ \eta_{21} & \eta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.79)$$

dengan,

$$\eta_{11} = A_k^T P + PA_k - PBKC - C^T K^T B^T P + C^T C$$

$$\eta_{12} = P[(BV - BKD_f) \quad -BV] + C^T [D_f \quad 0]$$

$$\eta_{21} = [(BV - BKD_f) \quad -BV]^T P + [D_f \quad 0]^T C$$

$$\eta_{22} = [D_f \quad 0]^T [D_f \quad 0] - \gamma [D_f \quad 0]^T [D_f \quad 0]$$

maka didapatkan bentuk iteratif LMI sebagai berikut:

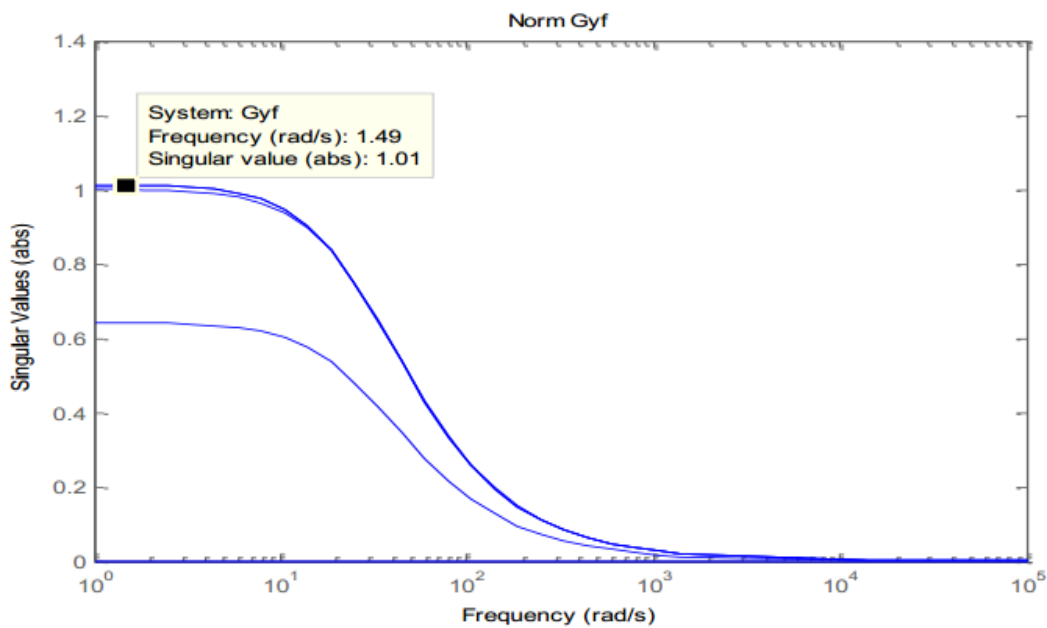
$$\begin{bmatrix} \emptyset & PBV - PBKD_f + C^T D_f & -PBV & C^T \\ * & -\gamma I & 0 & D_f^T \\ * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3.80)$$

dengan $\emptyset = A_k^T P + PA_k - C^T K^T B^T P - PBKC$

Dengan menyelesaikan pertidaksamaan pada (3.80), maka dapat ditentukan nilai gain kompensator (V), diberikan nilai :

$$\gamma = 1.5$$

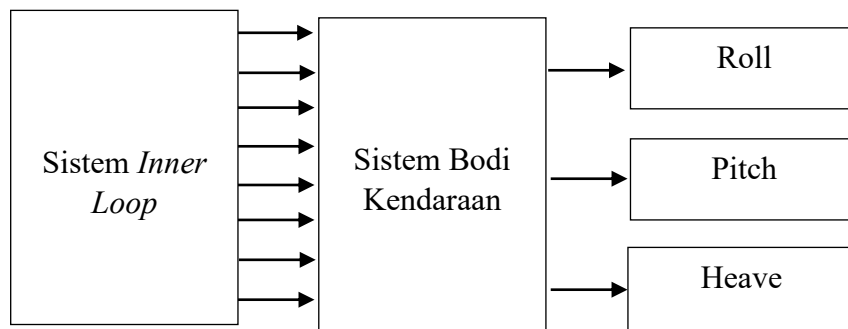
Maka didapatkan nilai gain kompensator (V) pada Lampiran A. Gambar 3.4 merupakan perolehan $\|G_{yf}(jw)\|_{\infty}$, dimana nilai $\|G_{yf}(jw)\|_{\infty}$ puncak terbesar bernilai 1.01 sehingga $\|G_{yf}(jw)\|_{\infty} \leq \gamma$. Dimana dapat menyelesaikan permasalahan *Fault Compensator* yang dapat meminimalkan efek *Fault* pada sistem



Gambar 3.4 Norm G_{yf}

3.2 Perancangan Sistem *Outer Loop*

Pada subbab ini akan dibahas perancangan sistem kontrol *outer loop*. Skema secara umum sistem *outer loop* sebagai berikut.



Gambar 3.5 Blok Diagram Sistem *Outer Loop*

Output dari sistem *inner loop* adalah $\dot{z}_{fr}, \dot{z}_{fl}, \dot{z}_{rr}, \dot{z}_{rl}$ yaitu kecepatan pada masing – masing suspensi dan $\dot{z}_{tfr}, \dot{z}_{tfl}, \dot{z}_{trr}, \dot{z}_{trl}$ yaitu kecepatan pada masing – masing roda. Sistem bodi kendaraan merupakan persamaan gerak pada bodi kendaraan yaitu gerak *roll*, *pitch*, dan *heave*. Persamaan diberikan pada (2.26), (2.31) dan (2.32). Persamaan *roll*, *pitch*, dan *heave* disimulasikan menggunakan Matlab Simulink dan disajikan dalam bentuk blok diagram Simulink pada Lampiran B.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kontrol Nominal dengan Kondisi Awal tanpa Kesalahan (*Fault-free Case*)

Pada subbab ini pengujian dilakukan dengan kondisi awal tanpa adanya *fault*. Tahapan pengujian akan dijelaskan sebagai berikut.

4.1.1 Pengujian pada sistem *inner loop*

Definisikan persamaan sistem pada (3.13) dan (3.18) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)\end{aligned}$$

dengan,

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t)$$

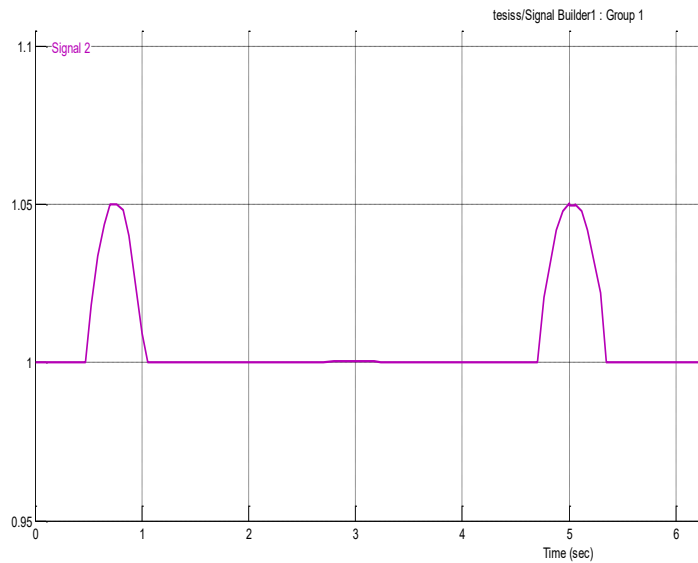
dan

$$\begin{cases} Prob\{\alpha_f = 1\} = u \\ Prob\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \\ Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases}$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(w) = sign(w) \min\{1, |w|\}$$

dengan diberikan noise (w) dengan varian 1×10^{-9} dan diberikan disturbance pada detik $t_1 = 0.5$ s dan $t_2 = 4.75$ s dengan magnitude 0.05 meter seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Disturbance* Pada Sistem

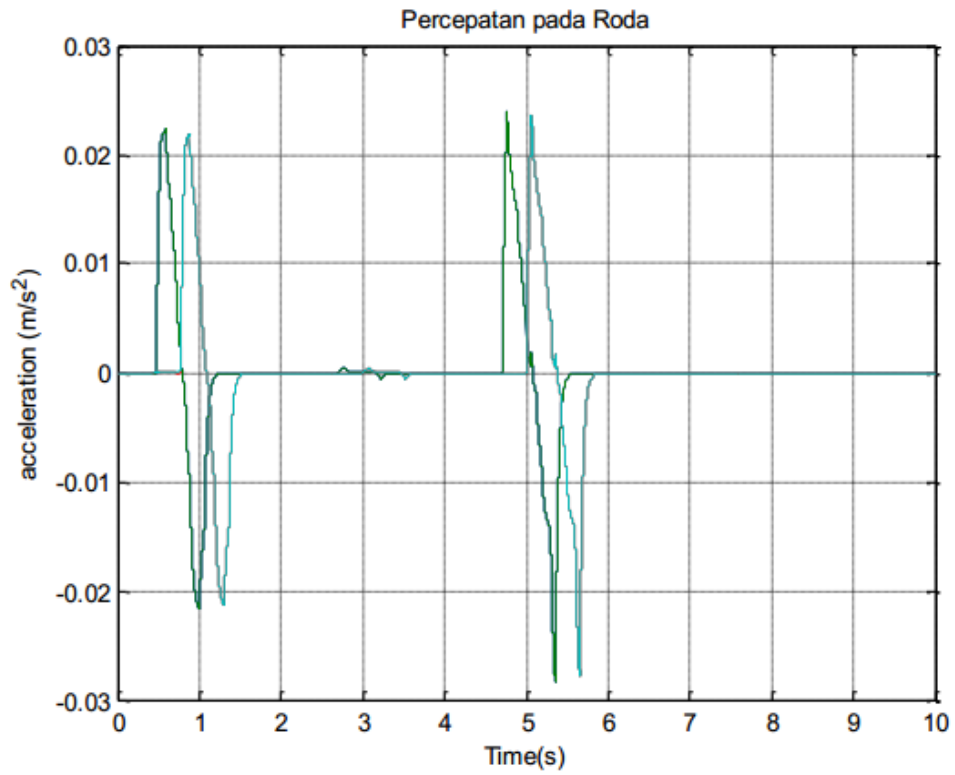
Gangguan bernilai sama antara roda kanan dan roda kiri. Kelajuan sistem diasumsikan bernilai konstan dengan nilai $v = 30 \text{ km/jam}$ dengan perumusan *time delay* antara roda depan dan belakang sebagai berikut :

$$\text{waktu (s)} = \frac{\text{jarak antara roda (m)}}{\text{kelajuan (m/s)}} \quad (4.1)$$

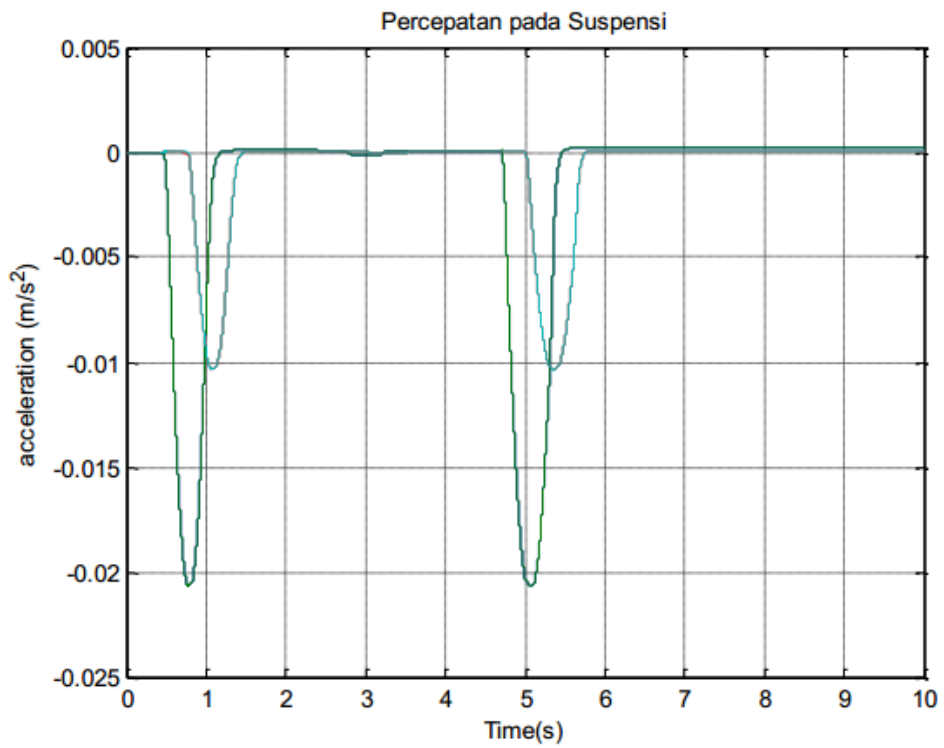
dengan jarak antar roda bernilai 2.68 meter sehingga didapatkan,

$$\text{waktu (s)} = \frac{2.68 \text{ m}}{8.33 \text{ (m/s)}} = 0.3 \text{ s} \quad (4.2)$$

Hasil gain observer L , gain kontroler K_c dan gain pada kompensator V yang diperoleh diberikan pada lampiran. Dan hasil percepatan sistem pada *unsprung* dan *sprung* dengan atau tanpa kompensator di berikan pada gambar 4.2-4.4.



Gambar 4.2 Percepatan Pada Massa *Unsprung*

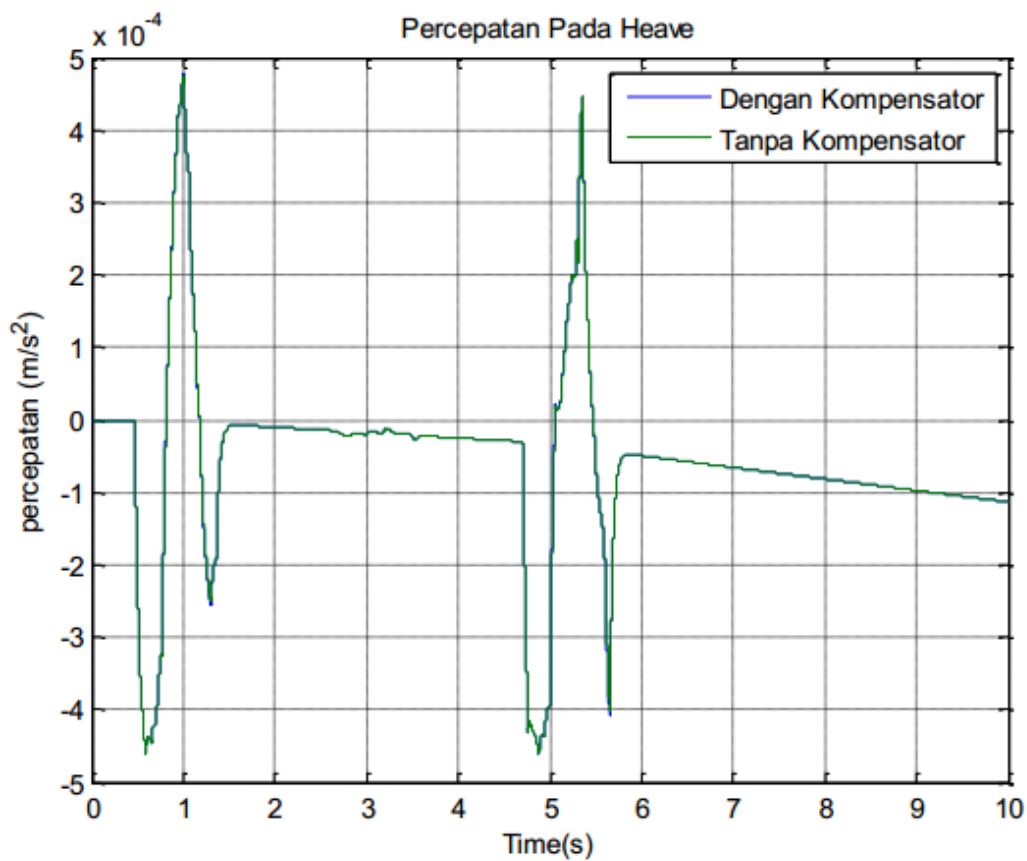


Gambar 4.3 Percepatan Pada Massa *sprung*

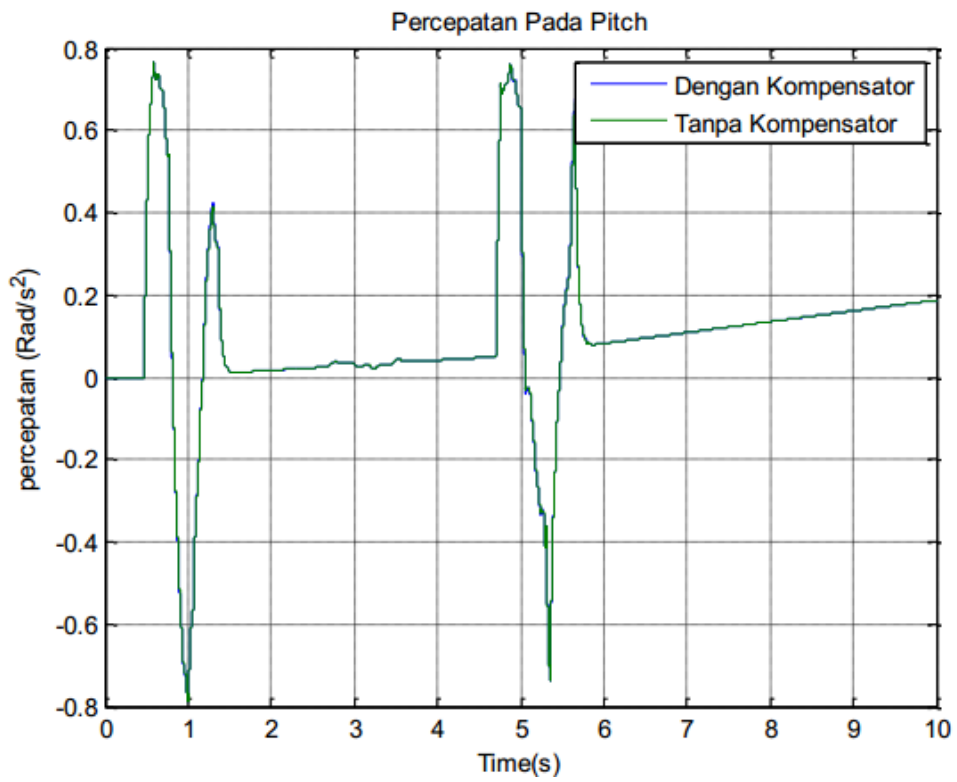
Dari gambar 4.2 – 4.4, dapat dianalisa bahwa pada kondisi *free fault*, respon percepatan dengan atau tanpa kompesator pada *unsprung* dan *sprung* bernilai sama.

4.1.2 Pengujian pada sistem *outer loop*

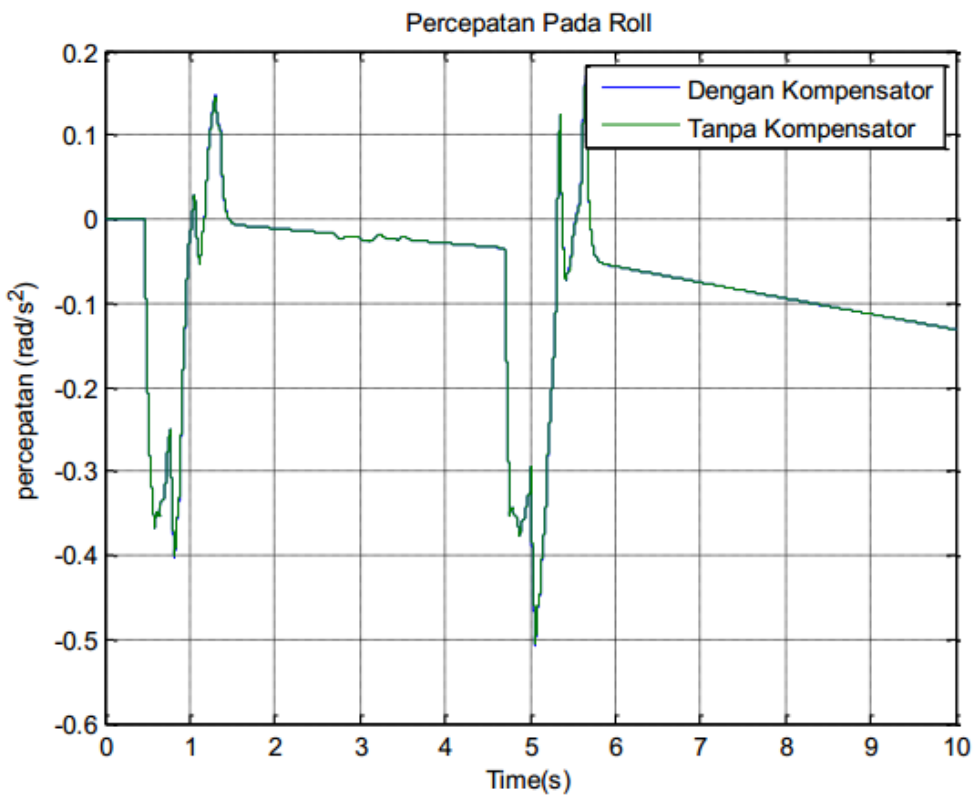
Pada pengujian *outer loop* hasil yang diperoleh untuk percepatan pada *heave*, percepatan sudut pada *roll* dan *pitch* dengan atau tanpa kompensator diberikan pada gambar 4.4-4.6



Gambar 4.4 Percepatan pada heave

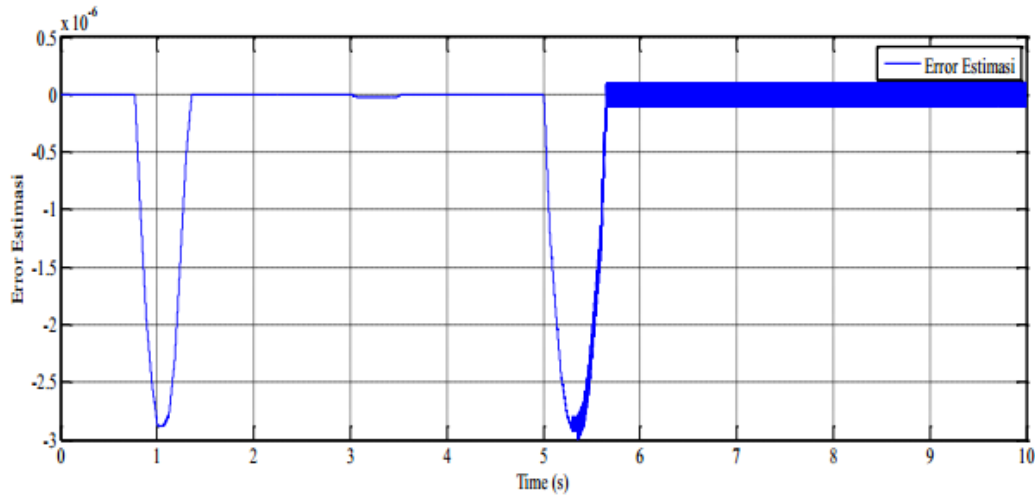


Gambar 4.5 Percepatan sudut pitch



Gambar 4.6 Percepatan sudut roll

Dari, dapat dianalisa bahwa pada kondisi *free fault*, respon percepatan pada *heave*, *roll* dan *pitch* bernilai sama dengan atau tanpa kompensator. Dengan error estimasi diberikan pada Gambar 4.7 .



Gambar 4.7 Error Estimasi

4.2 Kontrol Nominal dengan Kesalahan (*Faulty Case*) Bagian 1

Pada subbab ini pengujian dilakukan dengan memberikan *fault* dengan konfigurasi nilai tertentu. Tahapan pengujian akan dijelaskan sebagai berikut.

4.2.1 Pengujian pada sistem *inner loop*

Definisikan persamaan sistem pada (3.13) dan (3.18) sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)$$

dengan,

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t)$$

dan

$$\begin{cases} Prob\{\alpha_f = 1\} = u \\ Prob\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \end{cases}$$

$$\begin{cases} Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases}$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(v) = \text{sign}(v) \min\{1, |v|\}$$

pada pengujian ini, diberikan nilai

$$u = 0.3$$

$$v = 0.7$$

sehingga persamaan *fault* menjadi.

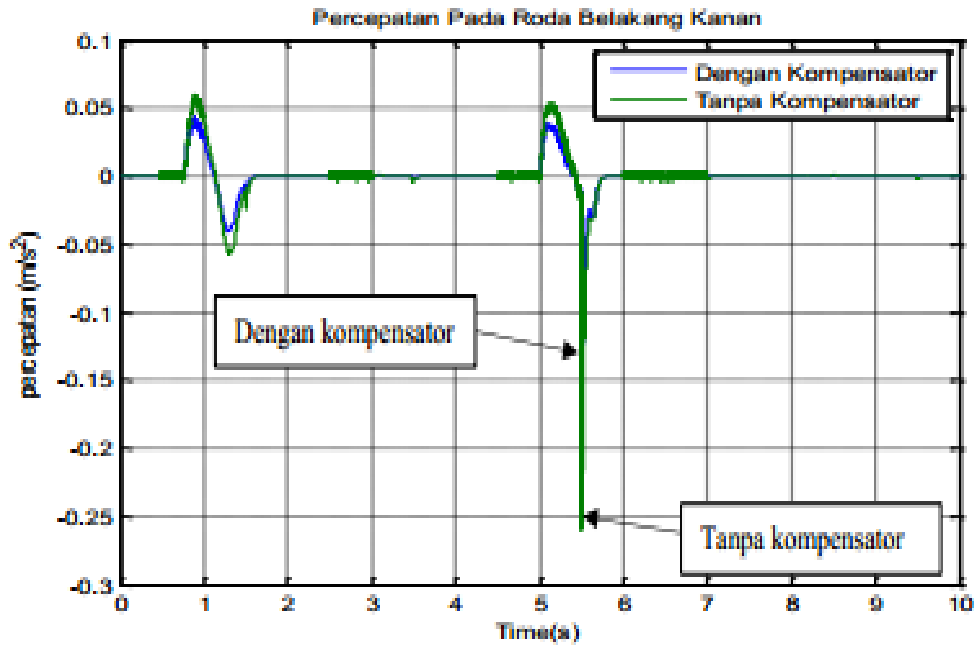
$$f(t) = ((0.3\sigma + (1 - 0.3)0.7) - I)Cx(t) \quad (4.3)$$

sehingga persamaan (3.18) diubah menjadi.

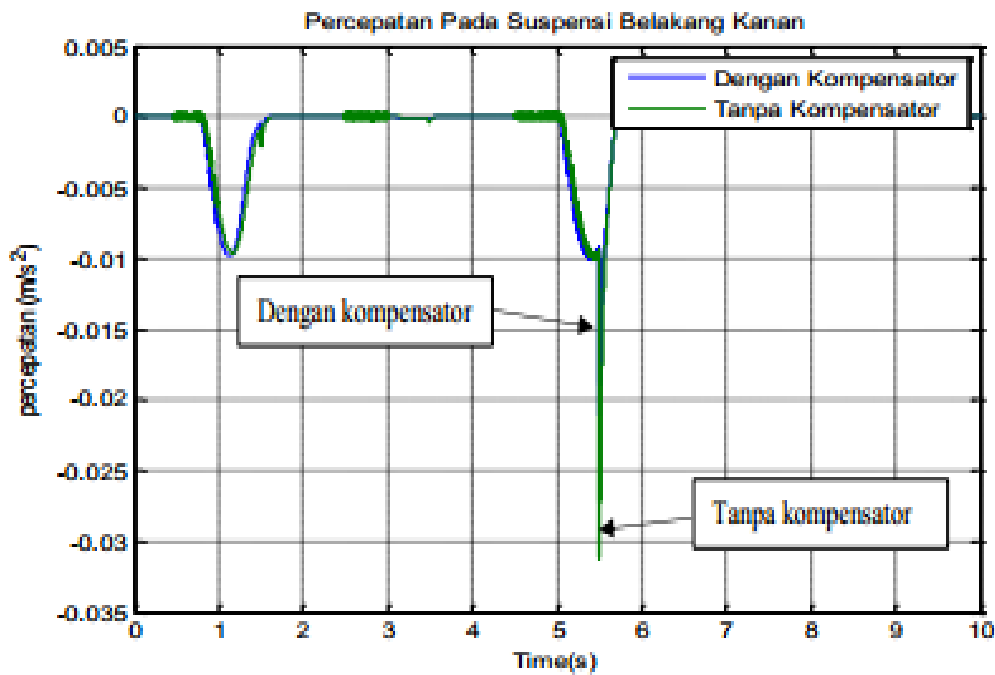
$$y(t) = Cx(t) + D_v w(t) \quad (4.4)$$

Dengan diberikan noise (w) dengan varian 1×10^{-9} dan diberikan disturbance pada detik $t_1 = 0.5 \text{ s}$ dan $t_2 = 4.75 \text{ s}$ dengan magnitude 0.05 meter seperti pada Gambar 4.1. *Fault* diberikan pada sensor pada roda (*unsprung*) kanan belakang dengan perumusan pada persamaan (4.5) dimulai pada $t = 0.5 \text{ s}$.

Gangguan bernilai sama antara roda kanan dan roda kiri. Kelajuan sistem diasumsikan bernilai konstan dengan nilai $v = 30 \text{ km/jam}$ dengan perumusan *time delay* antara roda depan dan belakang seperti pada persamaan (4.3) dan (4.4). Hasil gain observer L , gain kontroler K_c dan gain pada kompensator V yang diperoleh diberikan pada lampiran A. Dan hasil percepatan sistem pada *unsprung* dan *sprung* dengan atau tanpa kompensator di berikan pada gambar (4.11)-(4.12).



Gambar 4.8 Percepatan Pada Roda Belakang Kanan



Gambar 4.9 Percepatan Pada Suspensi Belakang Kanan

Dari gambar 4.8 dan 4.9, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *sprung* dan *unsprung* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada gambar 4.8 terjadi pengurangan

percepatan sebesar $\pm 0.13 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar.

$$\left| \frac{(0.11 - 0.25)}{0.11} \right| \times 100\% = 127\%$$

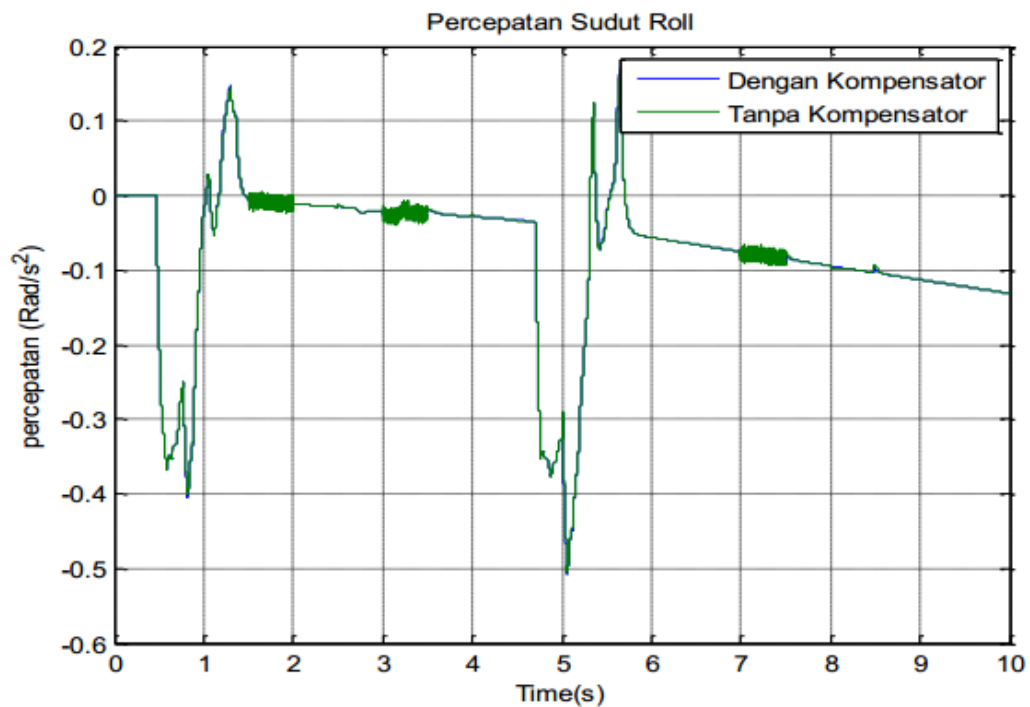
Pada gambar 4.9 terjadi pengurangan percepatan sebesar $\pm 0.14 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.03 - 0.017)}{0.03} \right| \times 100\% = 43,3\%$$

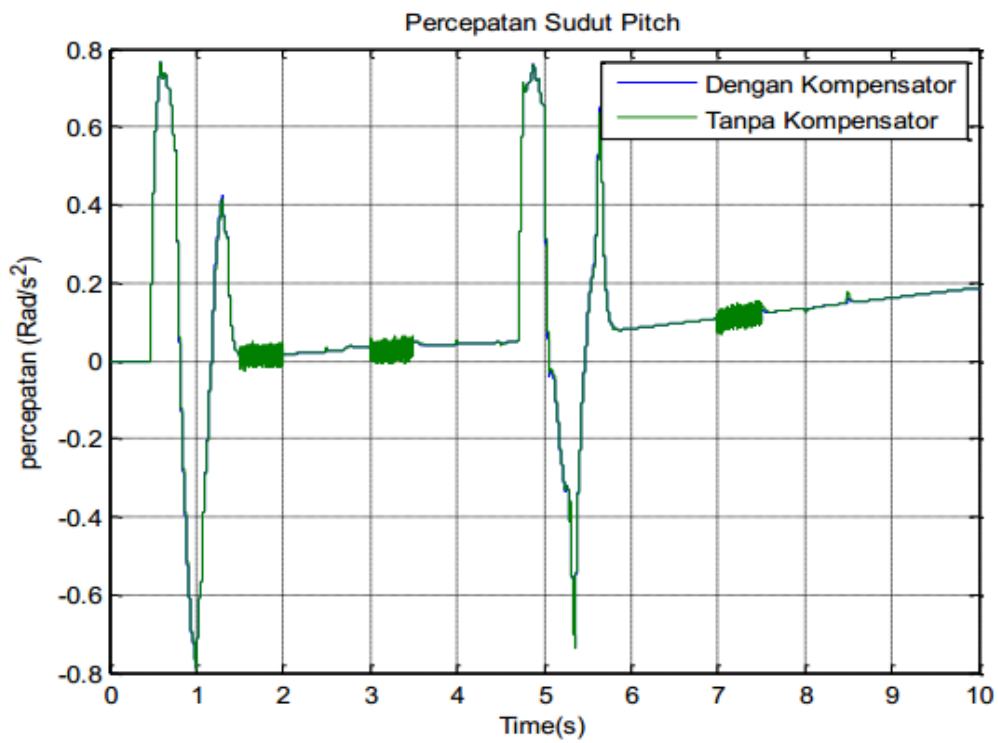
Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem.

4.2.2 Pengujian pada sistem *outer loop*

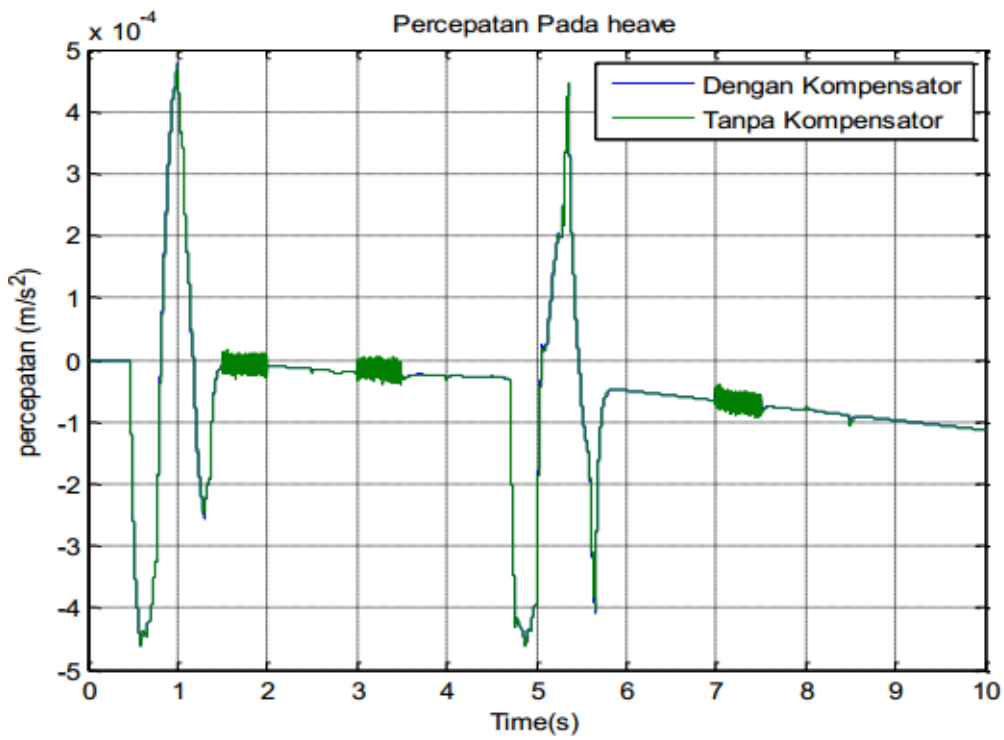
Pada pengujian *outer loop* hasil yang diperoleh untuk percepatan pada *heave*, percepatan sudut pada *roll* dan *pitch* dengan atau tanpa kompensator diberikan pada gambar 4.10 – 4.12.



Gambar 4.10 Percepatan Sudut Roll

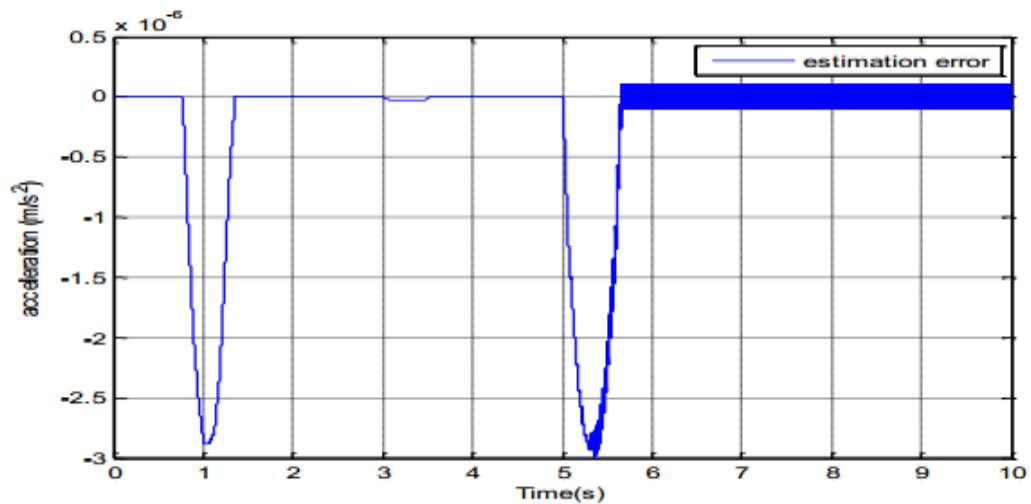


Gambar 4.11 Percepatan Sudut Pitch



Gambar 4.12 Percepatan heave

Dari gambar 4.10 dan 4.12, dapat dianalisa bahwa *fault* yang terjadi tidak memberikan banyak pengaruh pada percepatan *outer loop*. Hal ini disebabkan karena probabilitas terjadinya *fault* bernilai kecil dan *fault* terjadi pada roda kanan belakang. Dengan error estimasi diberikan pada Gambar 4.13 .



Gambar 4.13 Error Estimasi

4.3 Kontrol Nominal dengan Kesalahan (*Faulty Case*) Bagian 2

Pada subbab ini pengujian dilakukan dengan memberikan *fault* dengan konfigurasi nilai tertentu. Tahapan pengujian akan dijelaskan sebagai berikut.

4.3.1 Pengujian pada sistem *inner loop*

Definisikan persamaan sistem pada (3.13) dan (3.18) sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)$$

dengan,

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t)$$

dan

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\alpha_f = 1\} = u \\ \text{Prob}\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \end{cases}$$

$$\begin{cases} Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases}$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(v) = \text{sign}(v) \min\{1, |v|\}$$

pada pengujian ini, diberikan nilai

$$u = 0.8$$

$$v = 0.2$$

sehingga persamaan *fault* menjadi.

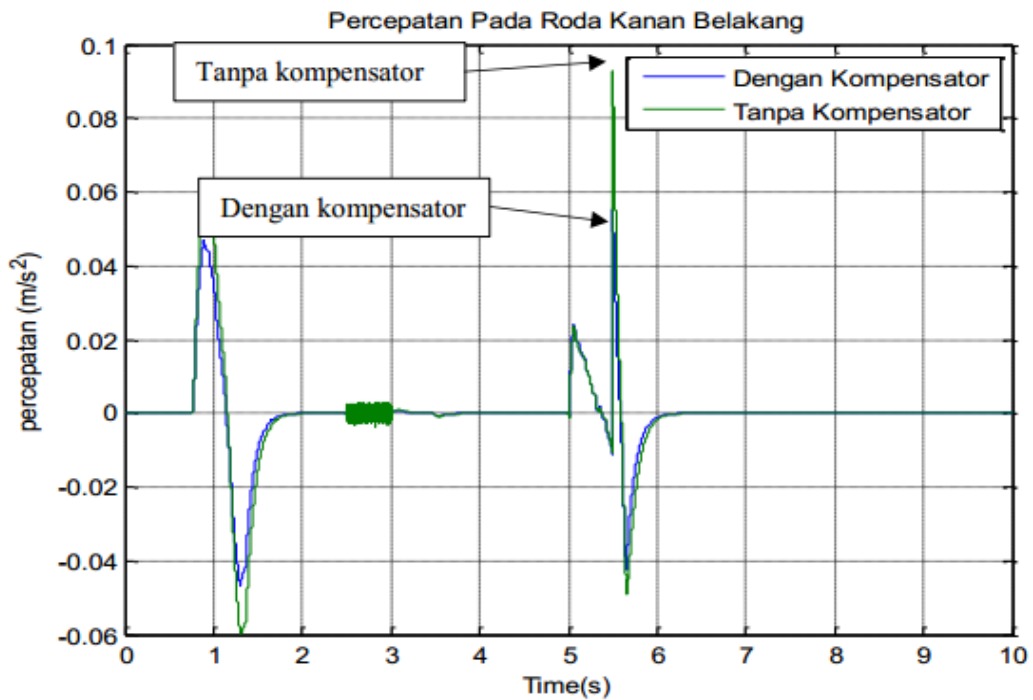
$$f(t) = ((0.8\sigma + (1 - 0.2)0.8) - I)Cx(t) \quad (4.5)$$

persamaan (3.18) diubah menjadi.

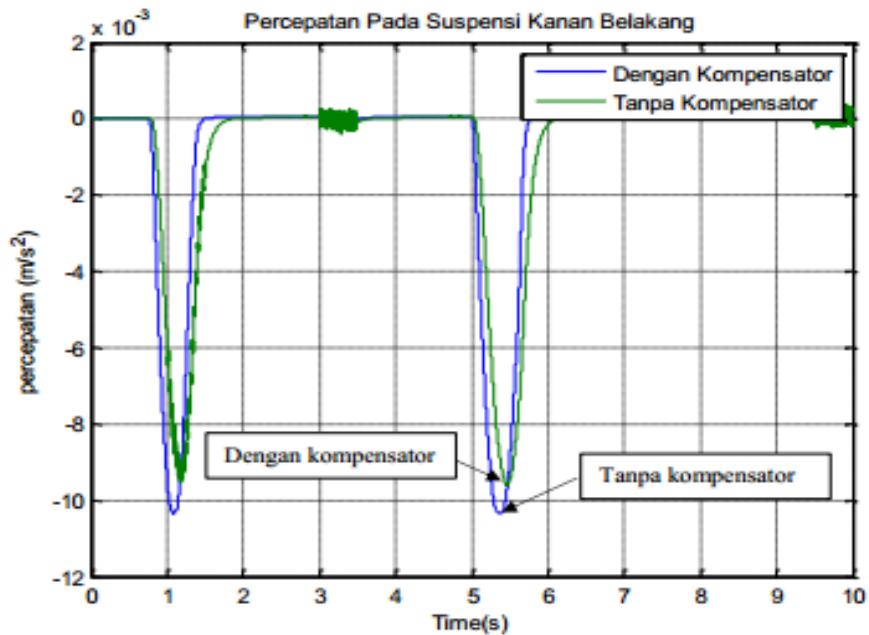
$$y(t) = Cx(t) + D_v w(t) \quad (4.6)$$

Dengan diberikan noise (w) dengan varian 1×10^{-9} dan diberikan disturbance pada detik $t_1 = 0.5 \text{ s}$ dan $t_2 = 4.75 \text{ s}$ dengan magnitude 0.05 meter seperti pada Gambar 4.1. *fault* diberikan pada sensor pada roda (*unsprung*) kanan belakang dengan perumusan pada persamaan (4.7) dimulai pada $t = 0.5 \text{ s}$.

Gangguan bernilai sama antara roda kanan dan roda kiri. Kelajuan sistem diasumsikan bernilai konstan dengan nilai $v = 30 \text{ km/jam}$ dengan perumusan *time delay* antara roda depan dan belakang seperti pada persamaan (4.3) dan (4.4). Hasil gain observer L , gain kontroler K_c dan gain pada kompensator V yang diperoleh diberikan pada lampiran A. Dan hasil percepatan sistem pada *unsprung* dan *sprung* dengan atau tanpa kompensator di berikan pada gambar (4.14)-(4.15)



Gambar 4.14 Percepatan pada *unsprung*



Gambar 4.15 Percepatan pada *sprung*

Dari gambar 4.14 dan 4.15, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *sprung* dan *unsprung* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada gambar 4.14 terjadi pengurangan

magnitude percepatan sebesar $\pm 0.04 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan *magnitude fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.05 - 0.09)}{0.05} \right| \times 100\% = 80\%$$

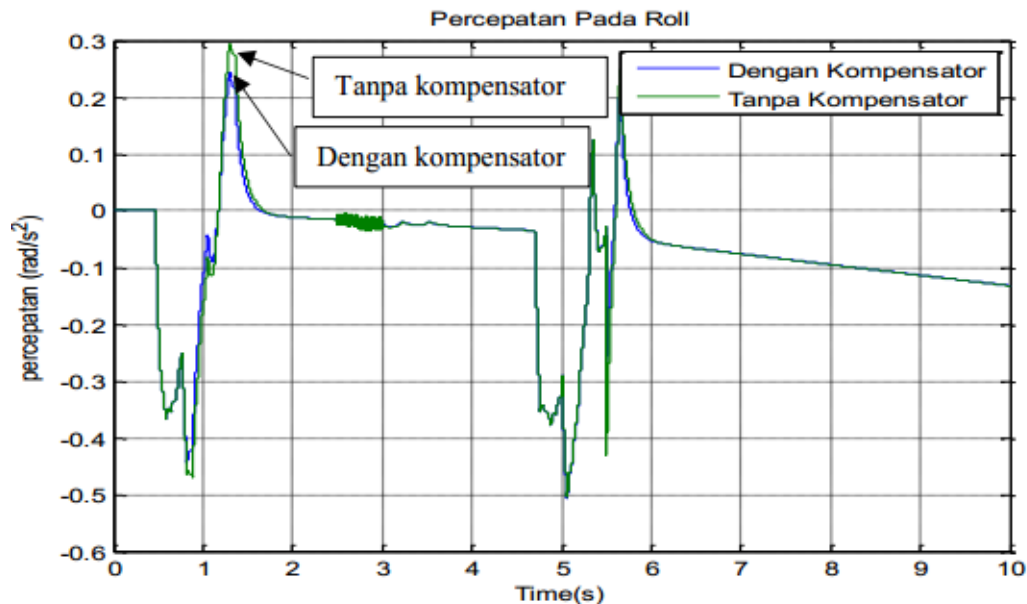
Pada gambar 4.15 terjadi pengurangan *magnitude* percepatan sebesar $\pm 0.001 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan *magnitude fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.01 - 0.009)}{0.01} \right| \times 100\% = 100\%$$

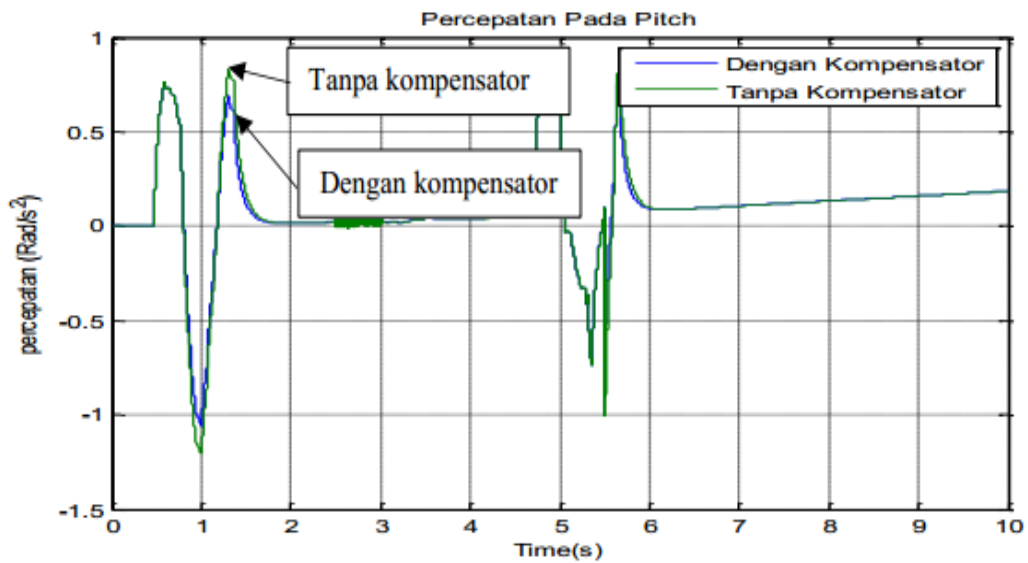
Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem.

4.3.2 Pengujian pada sistem *outer loop*

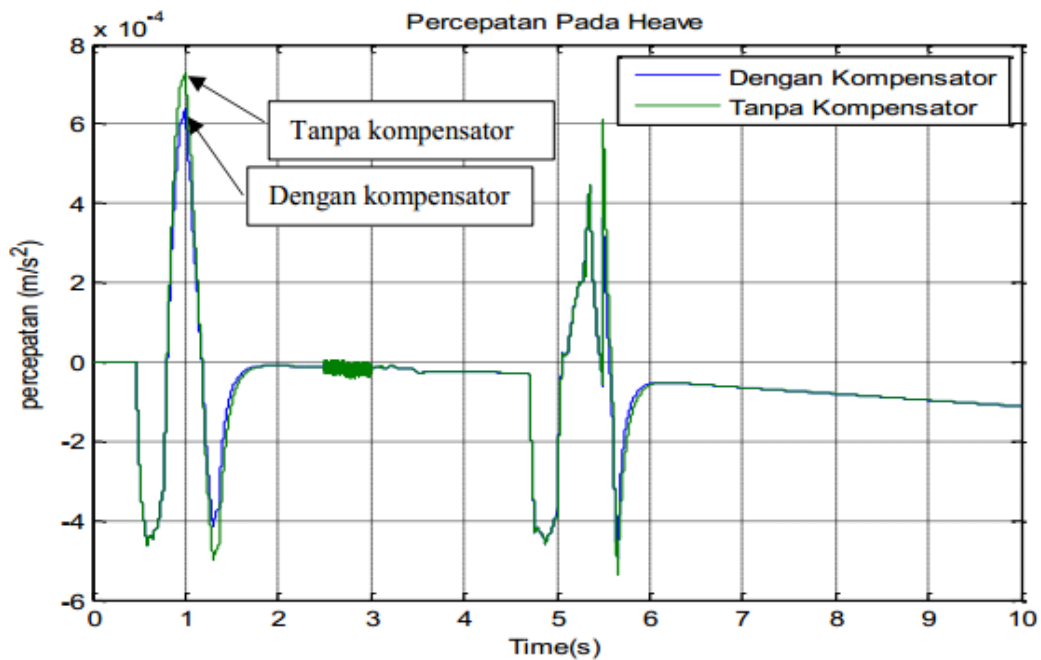
Pada pengujian *outer loop* hasil yang diperoleh untuk percepatan pada *heave*, percepatan sudut pada *roll* dan *pitch* dengan atau tanpa kompensator diberikan pada gambar (4.16)-(4.18).



Gambar 4.16 Percepatan sudut roll



Gambar 4.17 Percepatan sudut pitch



Gambar 4.18 Percepatan heave

Dari gambar 4.16 - 4.18, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *roll pitch dan heave* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada gambar 4.16 terjadi pengurangan magnitude *fault* sebesar $\pm 0.05 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitude *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.24 - 0.29)}{0.24} \right| \times 100\% = 20\%$$

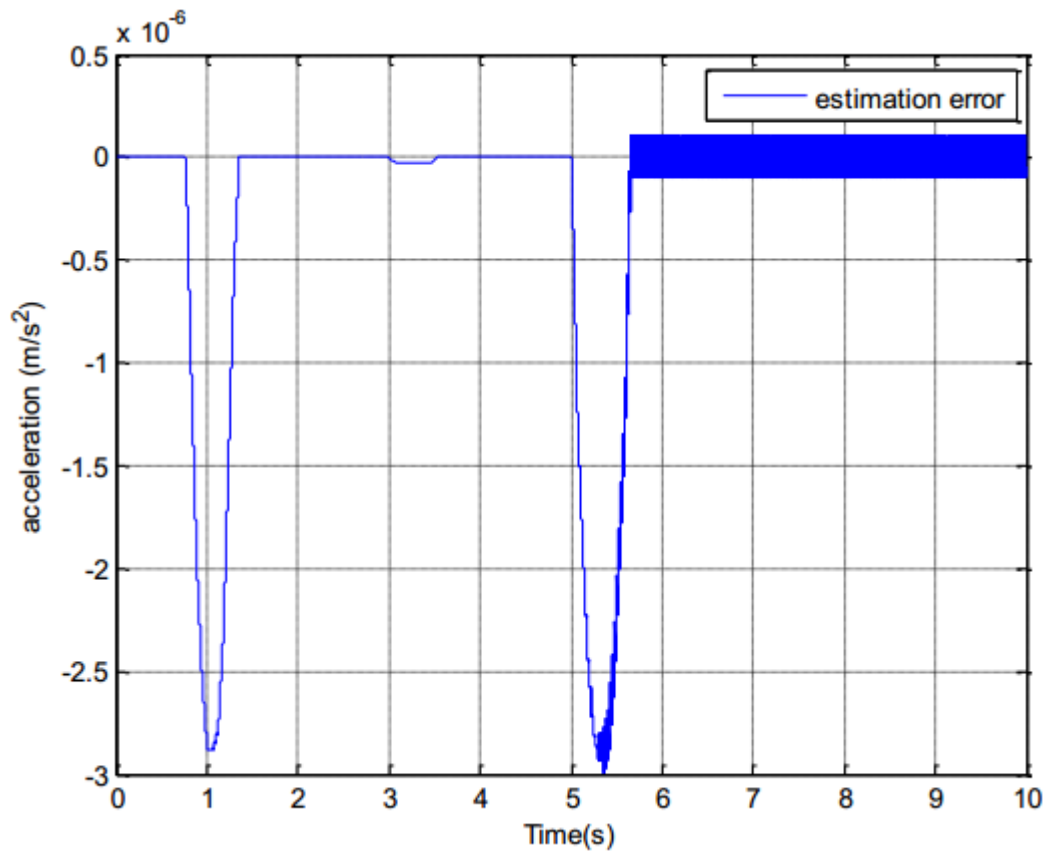
Pada gambar 4.17 terjadi pengurangan magnitudo *fault* sebesar $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.7 - 0.8)}{0.7} \right| \times 100\% = 14.3\%$$

Pada gambar 4.18 terjadi pengurangan magnitudo *fault* sebesar $\pm 10^{-4} \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.0006 - 0.0007)}{0.0006} \right| \times 100\% = 16.7\%$$

. Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem. Dengan error estimasi diberikan pada Gambar 4.19 .



Gambar 4.19 Error Estimasi

4.4 Kontrol Nominal dengan Kesalahan (*Faulty Case*) Bagian 3

Pada subbab ini pengujian dilakukan dengan memberikan *fault* dengan konfigurasi nilai tertentu. Tahapan pengujian akan dijelaskan sebagai berikut.

4.4.1 Pengujian pada sistem *inner loop*

Definisikan persamaan sistem pada (3.13) dan (3.18) sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)\end{aligned}$$

dengan,

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t)$$

dan

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\alpha_f = 1\} = u \\ \text{Prob}\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \\ \text{Prob}\{\beta_f = 1\} = v \\ \text{Prob}\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases}$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(v) = \text{sign}(v) \min\{1, |v|\}$$

pada pengujian ini, diberikan nilai

$$u = 0.8$$

$$v = 0.2$$

sehingga persamaan *fault* menjadi.

$$f(t) = \left((0.8\sigma + (1 - 0.2)0.8) - I \right) Cx(t) \quad (4.7)$$

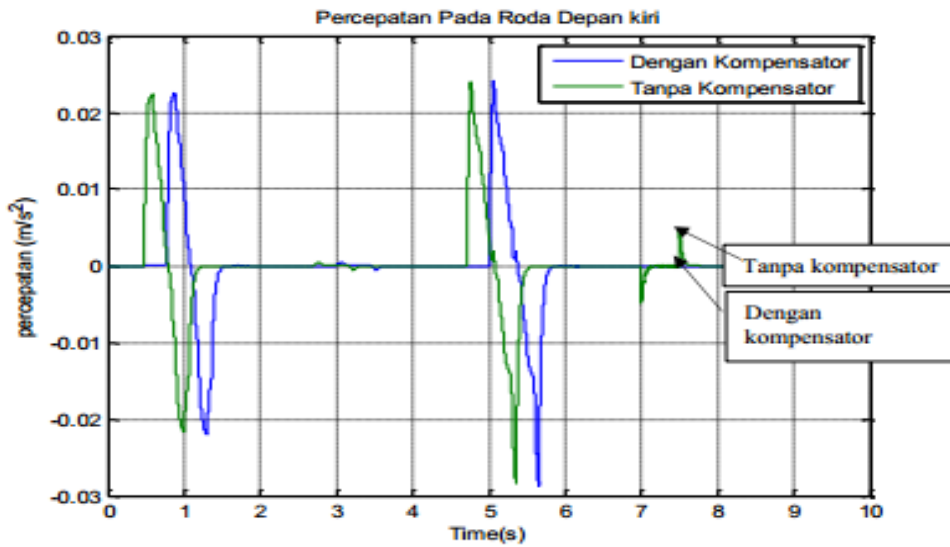
sehingga persamaan (3.18) diubah menjadi.

$$y(t) = Cx(t) + D_v w(t) \quad (4.8)$$

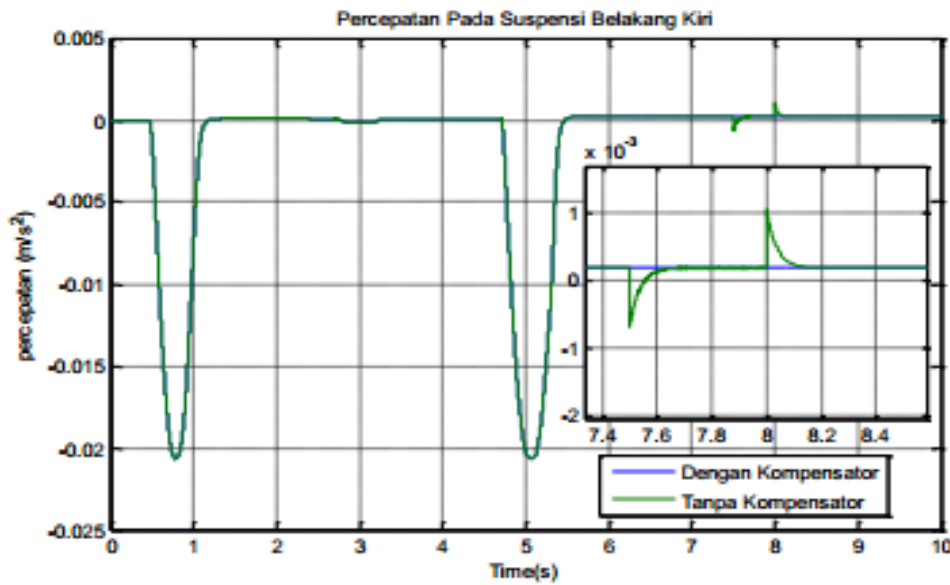
Dengan diberikan noise (w) dengan varian 1×10^{-9} dan diberikan disturbance pada detik $t_1 = 0.5$ s dan $t_2 = 4.75$ s dengan magnitudo 0.05 meter seperti pada Gambar 4.1. *fault* diberikan pada sensor suspensi depan kiri dengan perumusan pada persamaan (4.11) dimulai pada $t = 0.5$ s.

Gangguan bernilai sama antara roda kanan dan roda kiri. Kelajuan sistem diasumsikan bernilai konstan dengan nilai $v = 30$ km/jam dengan perumusan

time delay antara roda depan dan belakang seperti pada persamaan (4.3) dan (4.4). Hasil gain observer L , gain kontroler K_c dan gain pada kompensator V yang diperoleh diberikan pada lampiran A. Dan hasil percepatan sistem pada *unsprung* dan *sprung* dengan atau tanpa kompensator di berikan pada gambar (4.20)-(4.21)



Gambar 4.20 Percepatan pada *unsprung*



Gambar 4.21 Percepatan pada *sprung*

Dari gambar 4.20 dan 4.21, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *sprung* dan *unsprung* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada Gambar 4.20 terdapat selisih

magnitudo dari percepatan dengan dan tanpa kompensator sebesar $\pm 0.005 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\frac{(0.005 - 0.0001)}{0.005} \times 100\% = 14.3\%$$

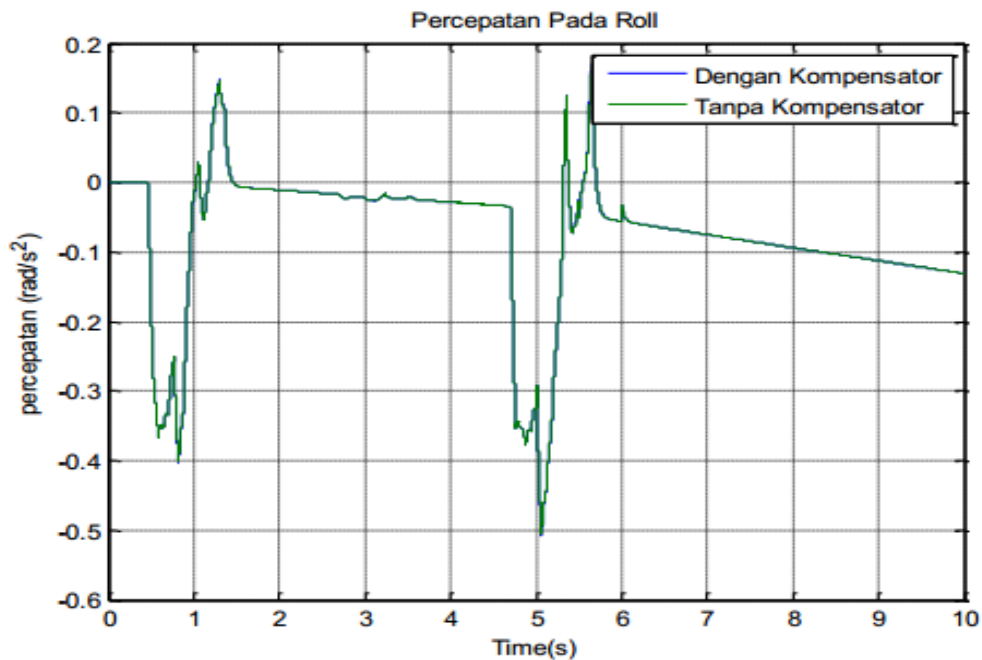
Pada Gambar 4.21 terdapat selisih magnitudo dari percepatan dengan dan tanpa kompensator sebesar $\pm 0.0009 \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitudo *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\frac{(0.001 - 0.0001)}{0.001} \times 100\% = 90\%$$

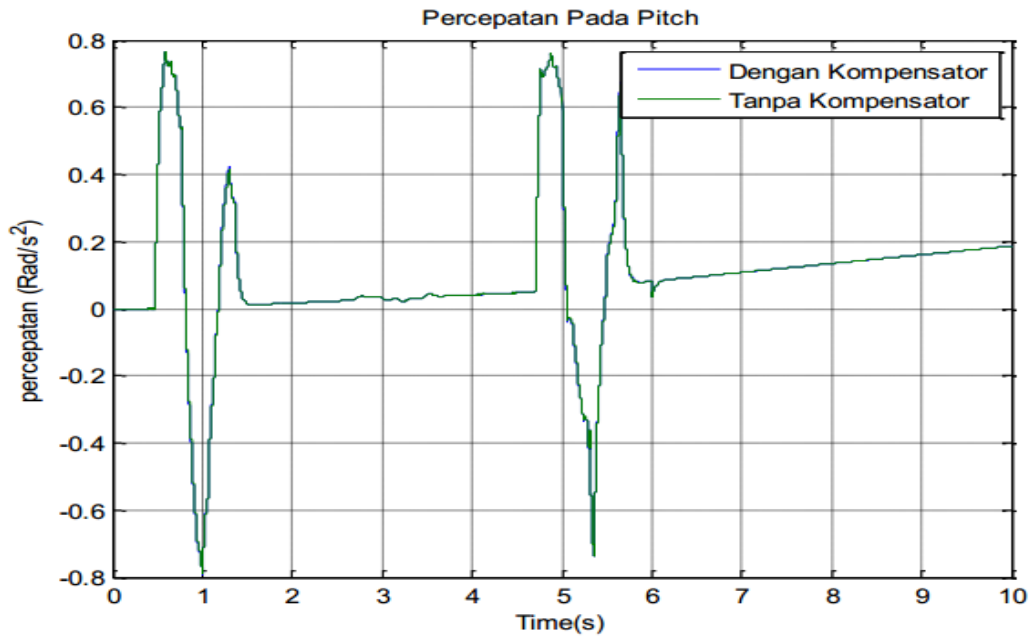
Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem.

4.4.2 Pengujian pada sistem *outer loop*

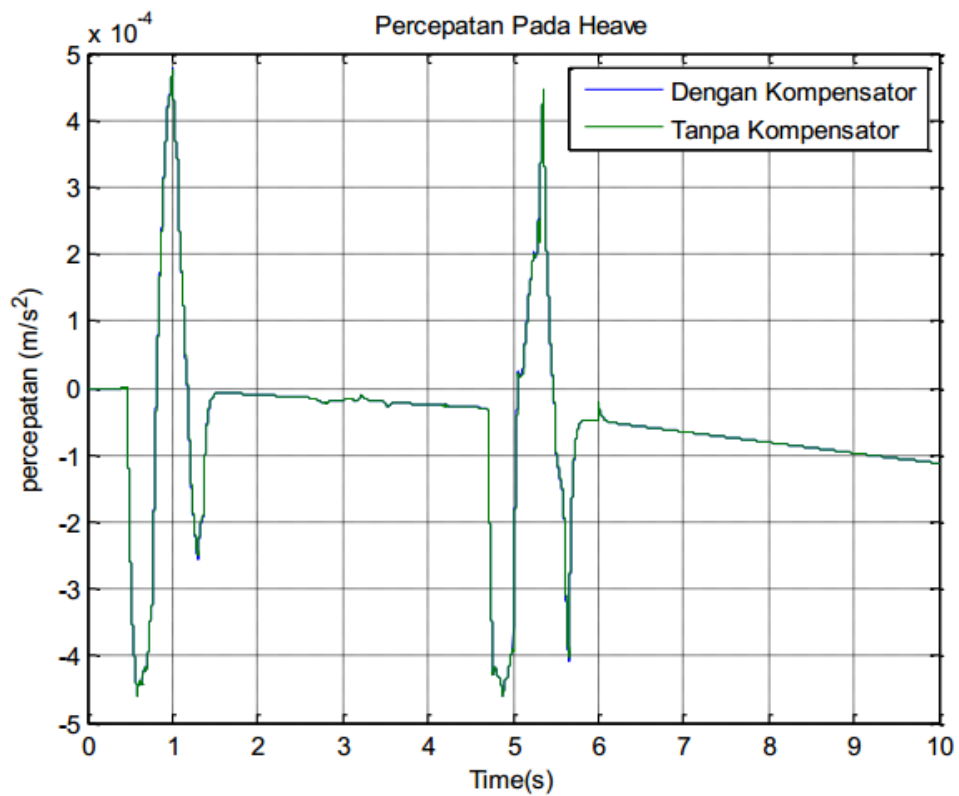
Pada pengujian *outer loop* hasil yang diperoleh untuk percepatan pada *heave*, percepatan sudut pada *roll* dan *pitch* dengan atau tanpa kompensator diberikan pada gambar (4.28)-(4.30).



Gambar 4.22 Percepatan sudut roll



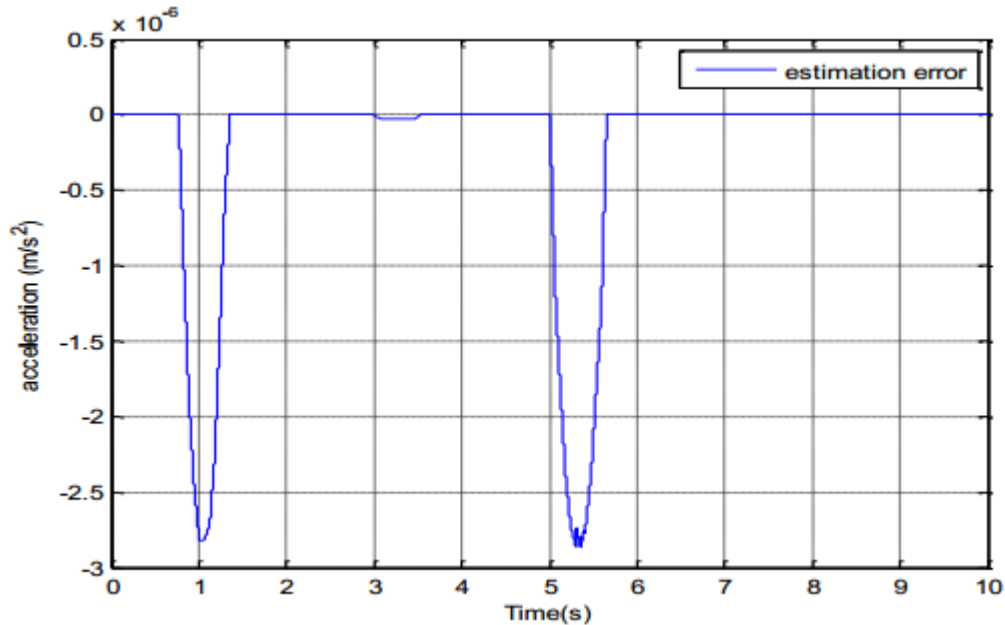
Gambar 4.23 Percepatan sudut pitch



Gambar 4.24 Percepatan heave

Dari gambar 4.28 dan 4.30, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *roll pitch dan heave* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik

dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada percepatan *roll*, *pitch* dan *heave* respon sistem dengan kompensator dan tanpa kompensator memiliki perbedaan yang terletak pada magnitude fault yang terletak di beberapa waktu. Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem. Dengan error estimasi diberikan pada Gambar 4.25 .



Gambar 4.25 Error Estimasi

4.5 Kontrol Nominal dengan Kesalahan (*Faulty Case*) Bagian 3

Pada subbab ini pengujian dilakukan dengan memberikan *fault* dengan konfigurasi nilai tertentu. Tahapan pengujian akan dijelaskan sebagai berikut.

4.5.1 Pengujian pada sistem *inner loop*

Definisikan persamaan sistem pada (3.13) dan (3.18) sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_u u(t) + B_d d(t)$$

$$y(t) = Cx(t) + D_f f(t) + D_v w(t)$$

dengan,

$$f(t) = \left((\alpha_f \sigma + (1 - \alpha_f) \beta_f) - I \right) Cx(t)$$

dan

$$\begin{cases} Prob\{\alpha_f = 1\} = u \\ Prob\{\alpha_f = 0\} = 1 - u \end{cases}$$

$$\begin{cases} Prob\{\beta_f = 1\} = v \\ Prob\{\beta_f = 0\} = 1 - v \end{cases}$$

dan fungsi saturasi $\sigma: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ didefinisikan [28]:

$$\sigma(v) = \text{sign}(v)\min\{1, |v|\}$$

pada pengujian ini, diberikan nilai

$$u = 0.8$$

$$v = 0.2$$

sehingga persamaan *fault* menjadi.

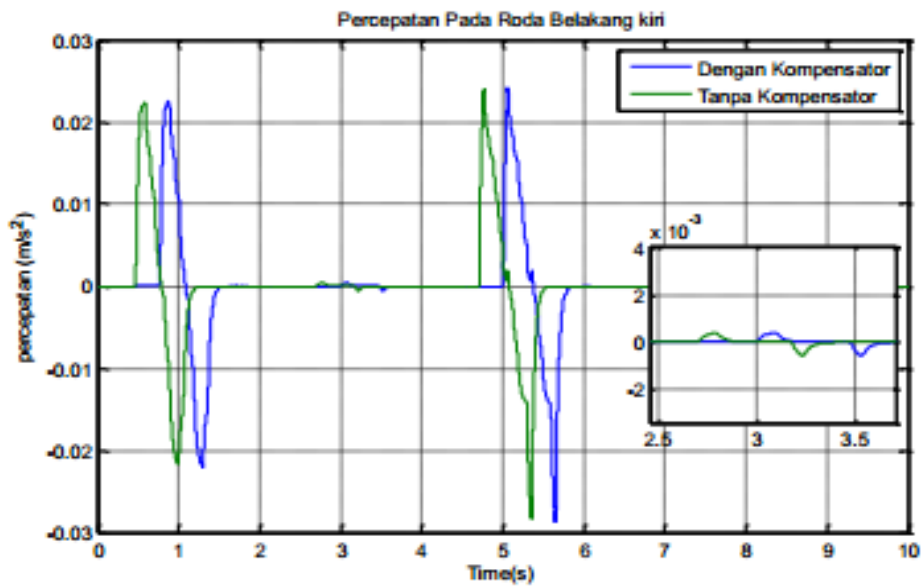
$$f(t) = ((0.8\sigma + (1 - 0.2)0.8) - I)Cx(t) \quad (4.9)$$

persamaan (3.18) diubah menjadi.

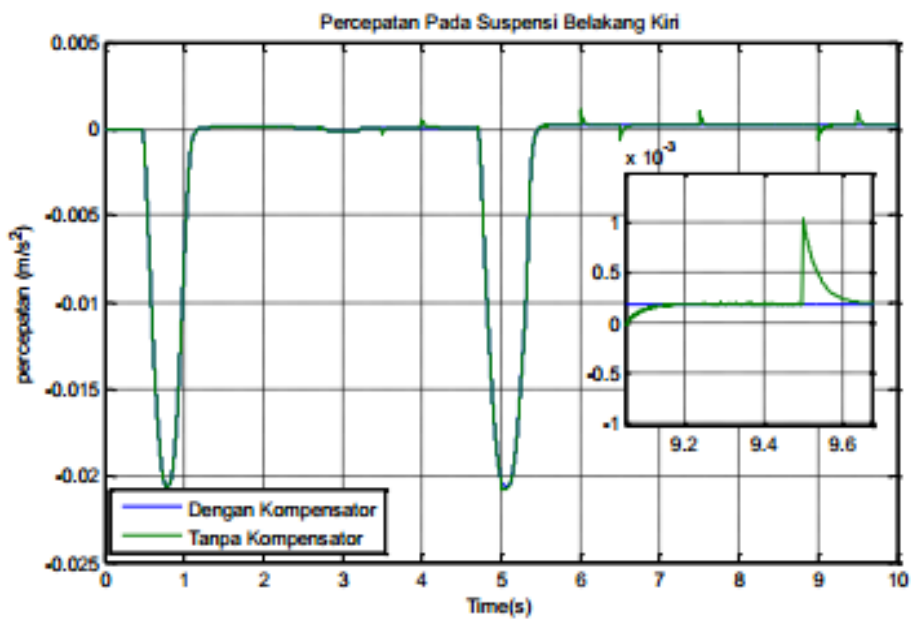
$$y(t) = Cx(t) + D_v w(t) \quad (4.10)$$

Dengan diberikan noise (w) dengan varian 1×10^{-9} dan diberikan disturbance pada detik $t_1 = 0.5$ s dan $t_2 = 4.75$ s dengan magnitude 0.05 meter seperti pada Gambar 4.1. *fault* diberikan pada sensor suspensi depan kiri dengan perumusan pada persamaan (4.11) dimulai pada $t = 0.5$ s.

Gangguan bernilai sama antara roda kanan dan roda kiri. Kelajuan sistem diasumsikan bernilai konstan dengan nilai $v = 30$ km/jam dengan perumusan *time delay* antara roda depan dan belakang seperti pada persamaan (4.3) dan (4.4). Hasil gain observer L , gain kontroler K_c dan gain pada kompensator V yang diperoleh diberikan pada lampiran A. Dan hasil percepatan sistem pada *unsprung* dan *sprung* dengan atau tanpa kompensator di berikan pada gambar (4.26)-(4.27)



Gambar 4.26 Percepatan pada *unsprung*



Gambar 4.27 Percepatan pada *sprung*

Dari gambar 4.26 dan 4.27, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *sprung* dan *unsprung* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Pada Gambar 4.26 terdapat selisih magnitude dari percepatan dengan dan tanpa kompensator sebesar $\pm 0.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitude *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.001 - 0.0001)}{0.001} \right| \times 100\% = 90\%$$

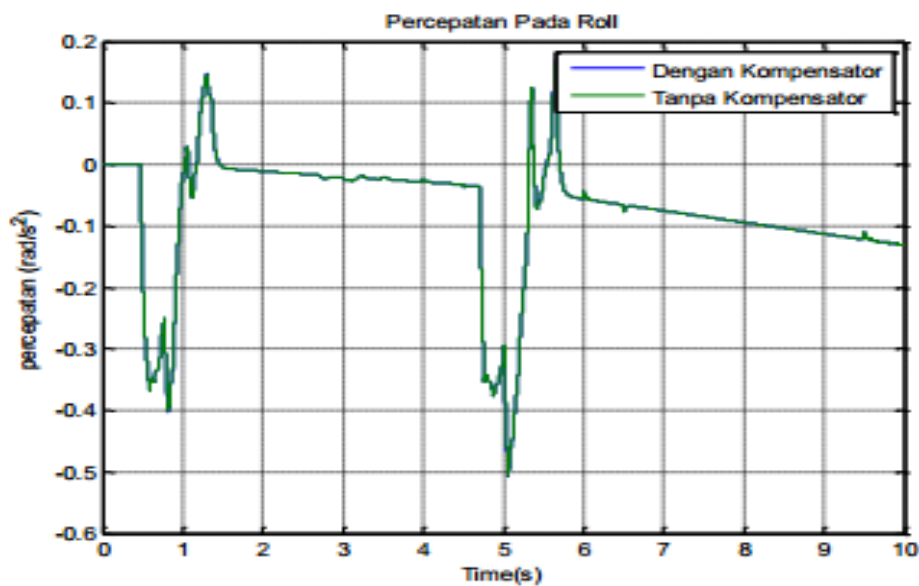
Pada Gambar 4.26 terdapat selisih magnitude dari percepatan dengan dan tanpa kompensator sebesar $\pm 10^{-3} \text{ m/s}^2$ persentase pengurangan magnitude *fault* yang dihasilkan sebesar,

$$\left| \frac{(0.001 - 0.0001)}{0.001} \right| \times 100\% = 90\%$$

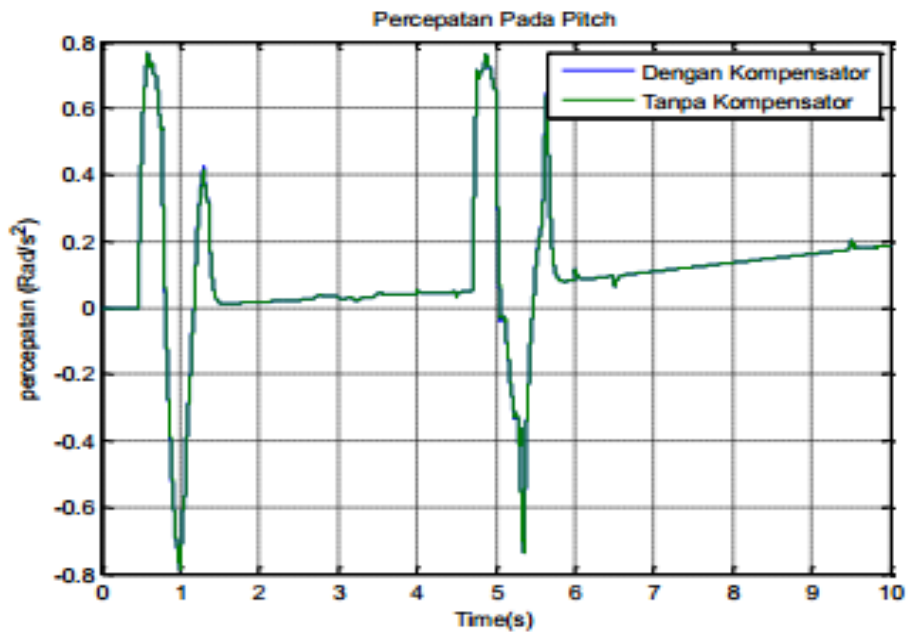
Dari perolehan hasil tersebut, maka terbukti *fault compensator* dapat mengurangi efek *fault* pada sistem.

4.5.2 Pengujian pada sistem *outer loop*

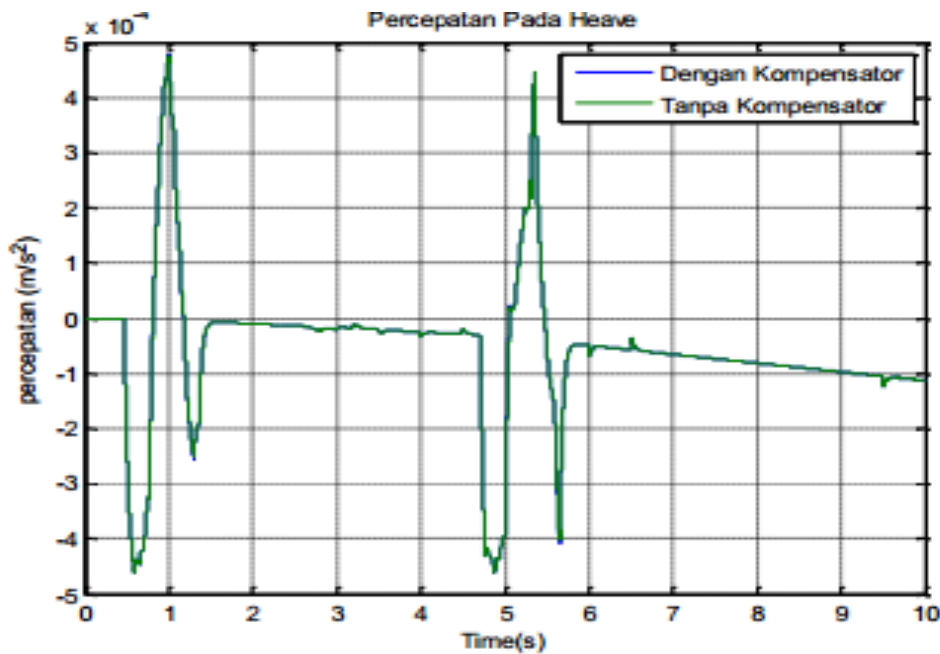
Pada pengujian *outer loop* hasil yang diperoleh untuk percepatan pada *heave*, percepatan sudut pada *roll* dan *pitch* dengan atau tanpa kompensator diberikan pada gambar (4.28)-(4.30).



Gambar 4.28 Percepatan sudut roll

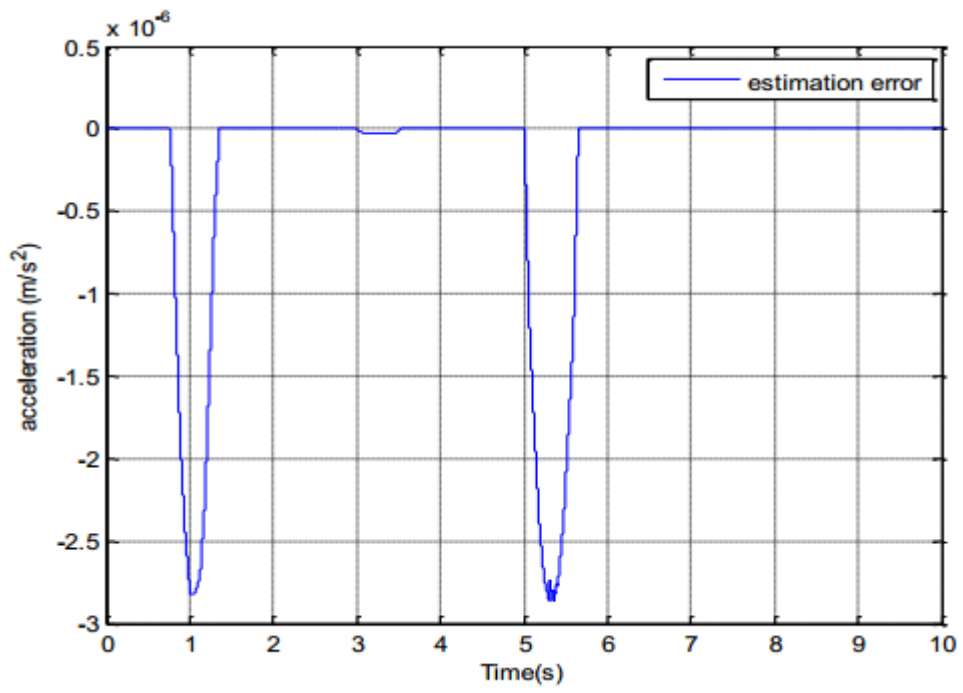


Gambar 4.29 Percepatan sudut pitch



Gambar 4.30 Percepatan heave

Dari gambar 4.28 dan 4.30, dapat dianalisa bahwa perolehan percepatan pada *roll pitch dan heave* dengan kompensator memperoleh hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa kompensator. Dengan error estimasi diberikan pada Gambar 4.31 .



Gambar 4.31 Error Estimasi

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Tesis ini membahas mengenai *Robust Active Fault Tolerant Control* dengan permasalahan *incomplete information* yang diaplikasikan pada suspensi semi aktif sistem mobil beroda empat. Dari empat simulasi yang dilakukan, penggunaan metode ini mampu mengurangi magnitudo percepatan sistem akibat *fault* rata – rata sebesar 43%. Kontribusi dari penelitian ini adalah penggunaan *Robust active fault tolerant control* terbukti dapat menyelesaikan permasalahan *Incomplete Information* dengan menggunakan metode Robust H_{∞} dengan pendekatan *Linier Matrix Inequality* (LMI).

5.2 Saran

Seperti halnya penelitian pada umumnya, penelitian ini juga memilikibanyak kekurangan yang mana dapat dijadikan usulah penelitian selanjutnya, beberapa saran yang dapat dijadikan usulan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut :

1. Penggunaan analisa diskrit pada sistem, yang mana pada penelitian ini masih menggunakan analisa kontinyu.
2. Sistem kendaraan beroda empat merupakan sistem yang *uncontrollable* dan *unobservable*. Sehingga pada penelitian ini digunakan penyederhanaan dengan cara menggunakan dua sistem *loop*. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat mengembangkan menggunakan analisa *partially observable system* dan *partially controllable system*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Susatio, Y., Biyanto, T., R., “Perancangan Sistem Suspensi Aktif pada Kendaraan Roda Empat Menggunakan Pengendali Jenis *Robust* Proporsional, Integral dan Derivatif”, *JURNAL TEKNIK MESIN Vol. 8, No. 2, Oktober 2006: 44 – 48.*
- [2] Guglielmino, E., Sireteanu, T., Stammers, C.W., Ghita, G., Giuclea, “Semi active Suspension Control”, Springer, 2008.
- [3] Sumardi, “Perancangan sistem suspensi semi-aktif dengan peredam nonlinear menggunakan pengontrol Fuzzy”, Institute Teknologi Bandung. 1998.
- [4] Savaresi, S., M., Vassal., C., P., Spelta, C., Sename, O., Dugard, L., “Semi Active Suspension Control Design For Vehicle”, elsevier 2010.
- [5] Crosby MJ, Karnopp DC (1973) The active damper - a new concept for shock and vibration control. *Shock Vib Bull* 43; 4:119–133
- [6] Rakheja S, Sankar S (1985) Vibration and shock isolation performance of a semiactive “onoff” damper. *ASME J Vib, Acoust, Stress Reliab Des* 107:398–403
- [7] Alanoly J, Sankar S (1987) A new concept in semi-active vibration isolation. *J Mech Transmissions Autom Des* 109:242–247
- [8] Margolis DL, Nobles CM (1991) Semi-active heave and roll control for large off-road vehicles. *SAE paper 91267*
- [9] Ahmadian M, Marjoram RH (1989) Effects of passive and semi-active suspension on body and wheel-hop control. *SAE paper 892487*
- [10] Crolla DA, Abdel Hady MBA (1988) Semi-active suspension control for a full vehicle model. *SAE paper 911904*
- [11] Besinger FH, Cebon D, Cole DJ (1991) An experimental investigation into the use of semiactive dampers on heavy lorries. *Proc 12th IAVSD Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and on Railways Tracks*, pp 26–30
- [12] Miller LR, Nobes CM (1988) The design and development of a semi-active suspension for a military tank. *SAE paper 881133*
- [13] Margolis DL (1982) The response of active and semi-active suspensions to realistic feedback signals. *Vehicle Syst Dyn* 11; 5–6:267–282
- [14] Bellizzi S, Bouc R (1989) Adaptive control for semi-active isolators. *Proc ASME-DED Conf on Machinery Dynamics — Applications and Vibration Control Problems, Montreal, Canada* 18; 2: 317–323
- [15] Tseng HE, Hedrick JK (1994) Semi-active control laws - optimal and sub-optimal. *Vehicle Syst Dyn* 23:545–569

- [16] Barak P, Hrovat H (1988) Application of the LQG approach to the design of an automotive suspension for three-dimensional vehicle model. Proc IMechE Advanced Suspensions Conference, London, UK, pp 11–26
- [17] Titli A, Roukieh S, Dayre E (1993) Three control approaches for the design of car semiactive suspension (optimal control, variable structure control, fuzzy control). Proc IEEE Conf Decis Control 3:2962–2963
- [18] Crolla DA, (1995) Vehicle dynamics — theory into practice. J Automobile Eng 209:1–12
- [19] Vemuri V (1993) Artificial neural networks in control applications. Adv Comput 36:203–254
- [20] Agarwal M (1997) A systemic classification of neural-network-based control. IEEE Control Syst Mag 17, 2:75–93
- [21] Sun, S., Dong, L., Li, L., Gu, S., “Fault Tolerant Control For Constrained Linier System Based On MPC and FDI”, International Journal of Information and System Sciences, March 2008.
- [22] Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J., Chamseddine, A., “Fault Tolerant Control System”, Springer 2009
- [23] A. Chamseddine and H. Noura, “Control and Sensor Fault Tolerance of Vehicle Active Suspension”, IEEE Trans. on Control Systems Tech., vol. 16(3), 2008, pp. 416-433.
- [24] Varrier S., et al., "Applicative Fault Tolerant Control for Semi Active Suspension System : Preliminary Result", European Control Conference, 2013.
- [25] Chen, R., H., Speyer, J., “Sensor dan Aktuator Fault Reconstruction”, Journal Guidance Control and Dinamic. Vol. 27, No. 2, March-April 2004
- [26] Gao, H., Zhao, Y., and Chen, T., “ H_{∞} Fuzzy Control of Nonlinier Systems Under Unreliable Communication Links”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 17, No. 2, April 2009.
- [27] Gasp´ ar, Z. Szab´ o and J. Bokor, “LPV Design of Fault-tolerant ´ Control for Road Vehicles”, SysTol’10, France, Oct. 2010, pp. 807-812.
- [28] Wang, Z., Shen, Bo., Liu, X., “ H_{∞} Filtering with randomly occuring sensor saturation and missing measurement”, Automatica 48 556-562, 2102
- [29] Gao, H., Chen, T., Wang, L., “Robust Fault Detection With Missing Measurements”, International Journal of Control, 2014
- [30] Shi, T., SU, H., CHU, J., “Reliable H-infinity filtering for linier system with sensor saturation”, Journal Control Theory Application 11 (1) 80-85, 2013.
- [31] Mazars, E., Jaimoukha, I., M.,m Li, Z., “A LMI Approach To The Robust Fault Detection And Isolation Problem”,
- [32] Dou, L., Zong, Q., Wang, W., “Robust Fault Detection Observer Design Using H_{∞} Techniques For Uncertain Unmanned Aircraft”, Proceedings of the

6th world congress on intelligent control and automatica, 2006

- [33] Y. Sulaiman, S., Samin, P. M., Jamaludin, H., Rahman, R. A., Burhaumudin, M. S., “Modelling and Validation of 7-DOF Ride Mode for Heavy Vehicle”, International Conference on Automotive, Mechanical and Materials Engineering (ICAMME’2012), 2012
- [34] Shen, B., Wang, Z., Shu, H., “Nonlinier Stochastic System With Incomplete Information”, Springer, 2013.
- [35] Witczak, M., “Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Strategies for Non-Linear System”, Springer, 2014
- [36] Dian, S., “H-infinity Filtering Based Fault Detection, Estimation and Fault Tolerant Control”, University of Alberta, 2016.
- [37] Dullerud, G., E., Paganini, F., “A Course in Robust Control Theory”, Springer, 2005
- [38] H. Yong, M. Wu, and J. She, "Improved Bounded-Real- Lemma Representation and H_∞ Control of Systems With Polytopic Uncertainties," IEEE transactions on Circuit and System, Vol. 52, No. 7, pp. 380-383, July, 2015.
- [39] Boyd, S., Ghaoui, L., Feron, E., Balakrishnan, V., “Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory”, society for industrial and applied mathematics, 1994.
- [40] Shirahatt, A., Prasad, P., S., S., Panzade, P., Kulkarni, M., M., “Optimal Design of Passenger Car Suspension for Ride and Road Holding”, Journal of the brazillian society of mechanical science and engineering, 2008.
- [41] Adli, A., D., "Hubungan Getaran Seluruh Tubuh Dengan Gejala Gastrointestinal dan Upaya Penanggulangannya Pada Pekerja Penjualan dan Pendukung PT. X Bottling Indonesia", Master Tesis Universitas Sumatra Utara, 2008

Halaman Ini Sngaja Dikosongkan

LAMPIRAN

Lampiran A

Dari hasil pertidaksamaan LMI pada persamaan (3.44), (3.54), (3.65) dan (3.81). maka perolehan gain observer (L), gain kontroler (K_c) dan gain kompensator (V) adalah :

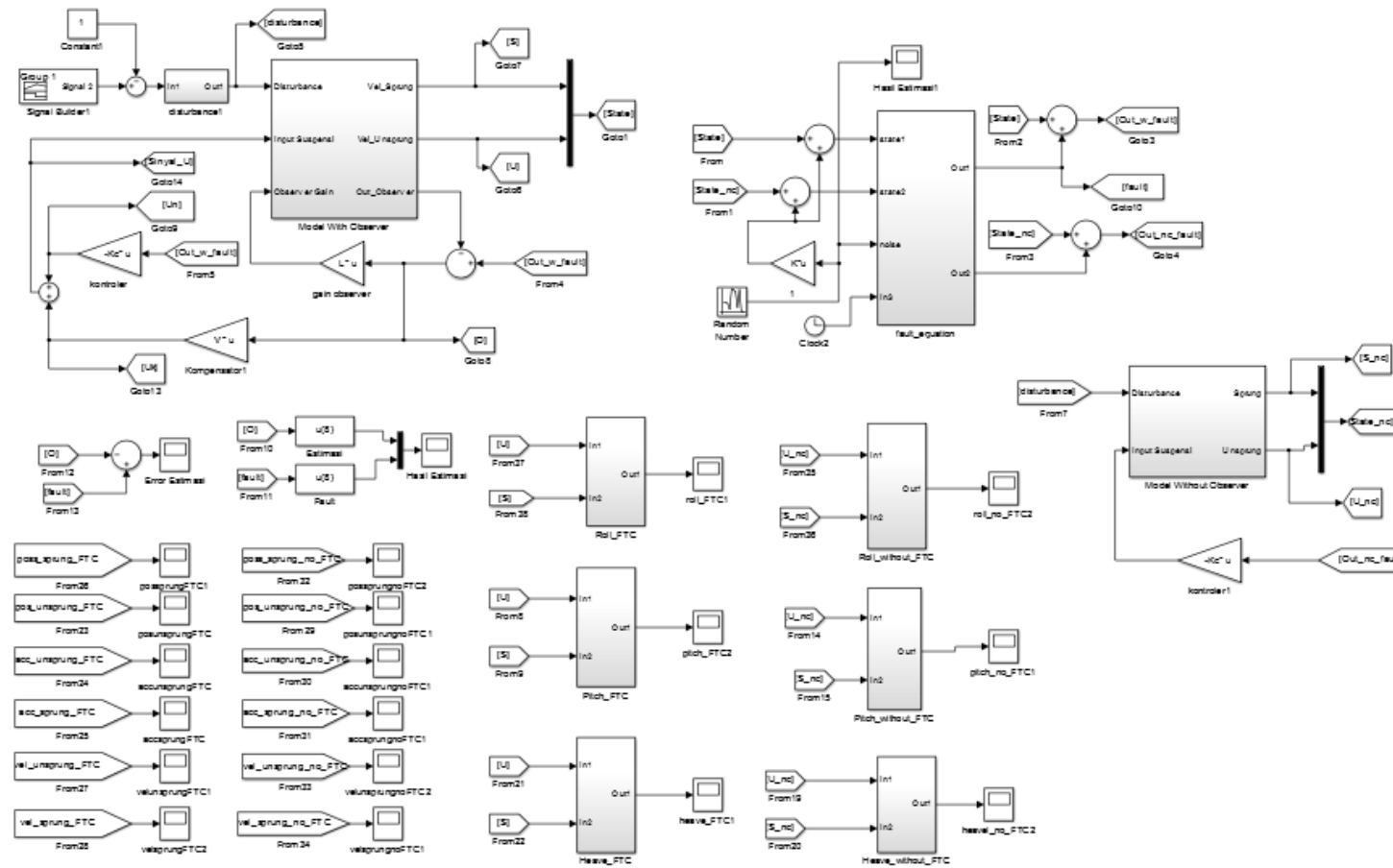
$$L = \begin{bmatrix} 0.4947 & -1.12 \cdot 10^{-15} & 3.38 \cdot 10^{-16} & 9.01 \cdot 10^{-15} & 0.0025 & -7.37 \cdot 10^{-17} & 8.01 \cdot 10^{-16} & 5.10 \cdot 10^{-21} \\ -1.13 \cdot 10^{-15} & 0.4947 & 4.13 \cdot 10^{-16} & -2.12 \cdot 10^{-14} & -1.16 \cdot 10^{-15} & 0.0025 & -1.78 \cdot 10^{-16} & -3.18 \cdot 10^{-21} \\ 3.331 \cdot 10^{-16} & 4.06 \cdot 10^{-16} & 0.4947 & 8.07 \cdot 10^{-14} & -5.78 \cdot 10^{-16} & -1.35 \cdot 10^{-15} & 0.0025 & -6.15 \cdot 10^{-21} \\ -5.87 \cdot 10^{-15} & 1.30 \cdot 10^{-15} & -5.31 \cdot 10^{14} & 29.93 & -1.75 \cdot 10^{-15} & -4.12 \cdot 10^{-16} & -3.26 \cdot 10^{-16} & 5.12 \cdot 10^{-6} \\ 164.48 & -3.52 \cdot 10^{-11} & 1.45 \cdot 10^{-12} & -5.21 \cdot 10^{-11} & 4.06 \cdot 10^4 & -1.86 \cdot 10^{-10} & 6.96 \cdot 10^{-11} & -1.01 \cdot 10^{-15} \\ -3.56 \cdot 10^{-12} & 164.48 & 4.29 \cdot 10^{-11} & -3.14 \cdot 10^{-11} & -1.86 \cdot 10^{-10} & 4.06 \cdot 10^4 & 9.25 \cdot 10^{-11} & 2.24 \cdot 10^{-15} \\ -2.16 \cdot 10^{-11} & 1.35 \cdot 10^{-11} & 164.48 & -7.78 \cdot 10^{-12} & 6.95 \cdot 10^{11} & 9.25 \cdot 10^{-11} & 4.06 \cdot 10^4 & -1.89 \cdot 10^{-15} \\ -4.16 \cdot 10^{-10} & 1.14 \cdot 10^{-10} & -3.60 \cdot 10^{-9} & 1.93 \cdot 10^6 & 9.86 \cdot 10^{11} & -7.53 \cdot 10^{-12} & -5.29 \cdot 10^{-11} & 0.4053 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} -6.39 \cdot 10^{-6} & 3.37 \cdot 10^{-5} & 1.08 \cdot 10^{-5} & 2.14 \cdot 10^{-6} & 2.28 \cdot 10^{-6} & 1.03 \cdot 10^{-6} & -7.36 \cdot 10^{-6} & -3.64 \cdot 10^{-6} \\ 1.15 \cdot 10^{-5} & -2.47 \cdot 10^{-5} & 1.41 \cdot 10^{-5} & 3.83 \cdot 10^{-5} & 7.65 \cdot 10^{-6} & 4.95 \cdot 10^{-6} & 3.84 \cdot 10^{-5} & -1.40 \cdot 10^{-5} \\ -4.53 \cdot 10^{-6} & 5.81 \cdot 10^{-6} & 1.18 \cdot 10^{-5} & 8.52 \cdot 10^{-7} & 1.15 \cdot 10^{-5} & -1.244 \cdot 10^{-6} & 4.92 \cdot 10^{-6} & 3.49 \cdot 10^{-6} \\ -6.02 \cdot 10^{-6} & -1.42 \cdot 10^{-6} & -7.39 \cdot 10^{-6} & -7.39 \cdot 10^{-6} & 8.81 \cdot 10^{-6} & -9.82 \cdot 10^{-6} & -1.31 \cdot 10^{-6} & -505.03 \end{bmatrix}$$

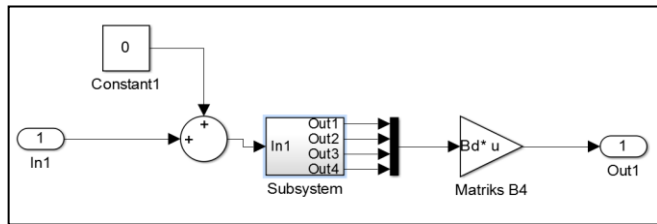
$$K_c = \begin{bmatrix} -28.81 & -8.73 \cdot 10^{-7} & -1.76 \cdot 10^{-6} & 1.08 \cdot 10^{-6} & -2.75 \cdot 10^3 & 4.05 \cdot 10^{-8} & 5.19 \cdot 10^{-8} & 2.40 \cdot 10^{-7} \\ 5.74 \cdot 10^{-7} & -28.81 & -1.30 \cdot 10^{-6} & 4.37 \cdot 10^{-8} & 2.96 \cdot 10^{-8} & -2.74 \cdot 10^3 & 9.97 \cdot 10^{-7} & 3.5 \cdot 10^{-7} \\ 4.15 \cdot 10^{-7} & -1.02 \cdot 10^{-7} & -9.1322 & 4.16 \cdot 10^{-7} & 3.22 \cdot 10^{-8} & 5.17 \cdot 10^{-7} & -1.40 \cdot 10^3 & -2.60 \cdot 10^{-8} \\ -2.32 \cdot 10^{-8} & -3.98 \cdot 10^{-7} & -2.87 \cdot 10^{-7} & -9.13 & 11.83 \cdot 10^{-7} & 1.77 \cdot 10^{-7} & -2.57 \cdot 10^{-8} & -1.40 \cdot 10^3 \end{bmatrix}$$

Lampiran B

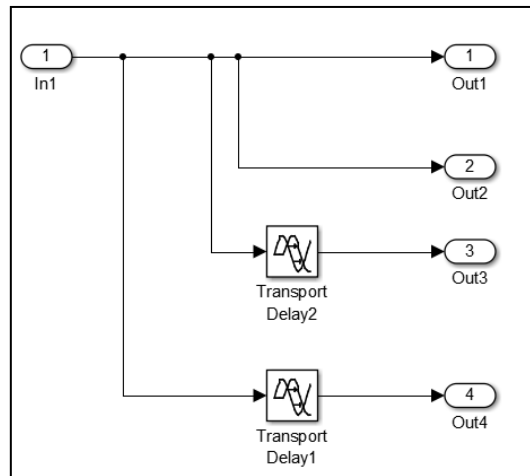
Blok Diagram Simulink



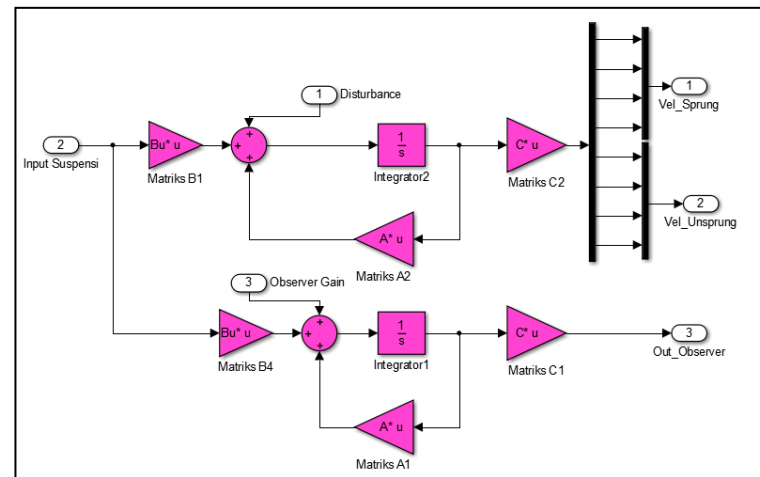
Blok *Disturbance*



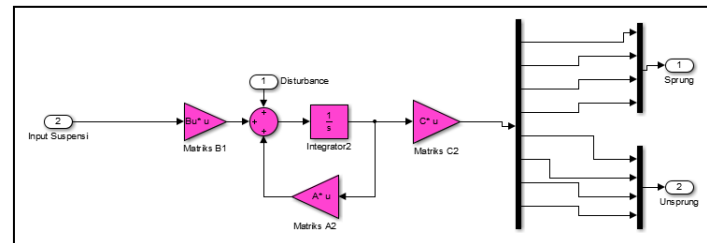
Blok *Disturbance – subsystem*



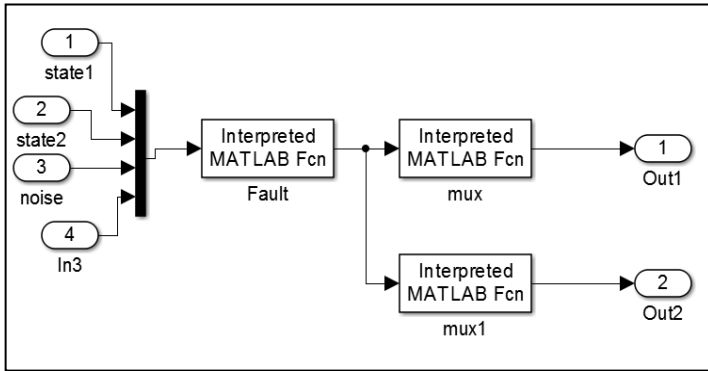
Blok Model with observer



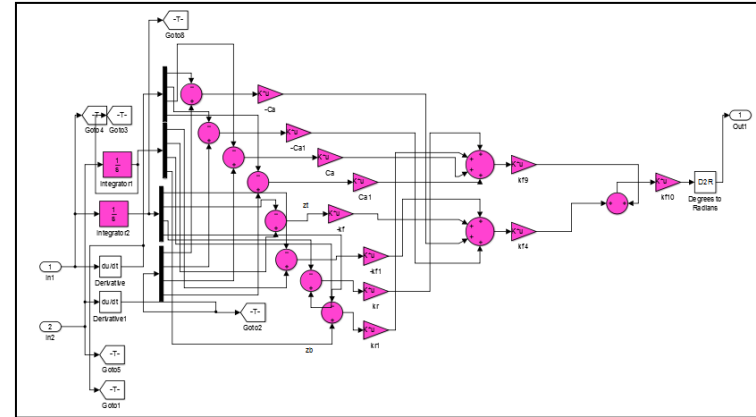
Blok Model without observer



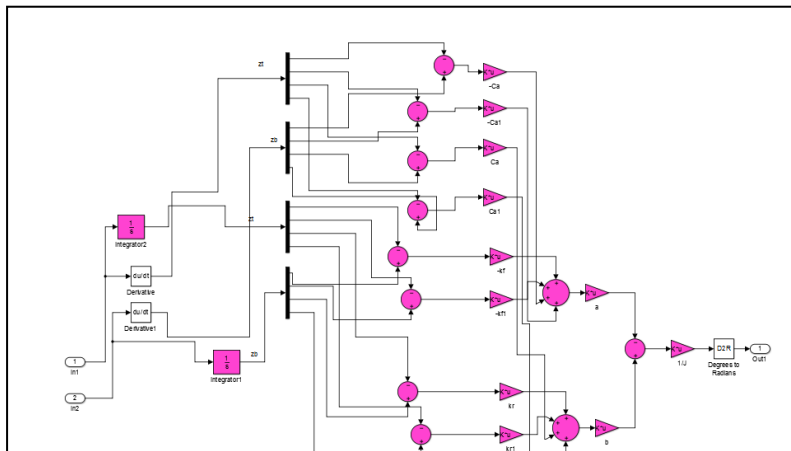
Blok Fault Equation



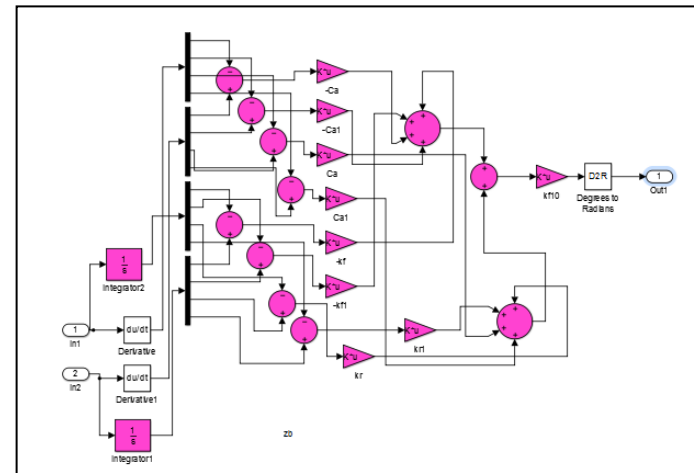
Blok Pitch



Blok Roll



Blok Heave



Lampiran C

Listing program

```
clear all
clc

%-----PARAMETER-----%
M=2160;%massa bodi kendaraan (kg)
m=540;%massa bodi pd suspensi(kg)
Mtf=85;%massa ban depan(kg)
Mtr=60;%massa ban belakang(kg)
Ca=3; %konstanta damper (kN)
kt=200;%konstanta ban (kN/m)
kf=75;%Konstanta pegas - depan (kN)
kr=32;%Konstanta pegas - belakang (kN)
a=1524;%jarak depan - COG (m)
b=1156;%jarak belakang - COG (m)
Jy=4140;%inersia sb - y
Jx=946;%inersia sb - x
c=725;%jarak kanan - COG (m)
d=725;%jarak kiri - COG (m)

%-----PLANT-----%
A=[ -Ca/m 0 0 0 Ca/m 0 0 0;...%bodi depan kanan
    0 -Ca/m 0 0 0 Ca/m 0 0;...%bodi depan kiri
    0 0 -Ca/m 0 0 0 Ca/m 0;...%bodi blk kanan
    0 0 0 -Ca/m 0 0 0 Ca/m;...%bodi blk kiri
    Ca/Mtf 0 0 0 -Ca/Mtf 0 0 0;...%ban depan kanan
    0 Ca/Mtf 0 0 0 -Ca/Mtf 0 0;...%ban depan kiri
    0 0 Ca/Mtr 0 0 0 -Ca/Mtr 0;...%ban blk kanan
    0 0 0 Ca/Mtr 0 0 0 -Ca/Mtr];%ban blk kiri
Bu=[-1/m 0 0 0;
    0 -1/m 0 0;
    0 0 -1/m 0;
    0 0 0 -1/m;
    -1/Mtf 0 0 0;
    0 -1/Mtf 0 0;
    0 0 -1/Mtr 0;
    0 0 0 -1/Mtr];
Bd=[0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    0 0 0 0;
    kt/Mtf 0 0 0;
    0 kt/Mtf 0 0;
    0 0 kt/Mtr 0;
    0 0 0 kt/Mtr];
C=diag([1 1 1 1 1 1 1 1]);
Du=zeros(8,4);
Df=diag([0 0 0 0 0 0 0 0]);%matriks fault
Dv=diag([0 0 0 0 0 0 0 0]);% matriks noise

%-----OBSERVER-----%
gama=0.1;
cvx_begin sdp
cvx_solver SeDuMi;
```

```

variable P(8,8) symmetric;
variable W(8,8);
variable beta_2;
maximize beta_2;
subject to:
P > 0 ;
[A'*P+P*A-C'*W'-W*C -P*Bd          W*Dv+C'*Dv          C';
 -Bd'*P          -gama*eye(4,4) zeros(4,8)          zeros(4,8);
 (W*Dv)'+(C'*Dv)'          zeros(8,4)          -gama*eye(8,8)          Dv';
 C          zeros(8,4)          Dv          -gama*eye(8,8);]
< 0;

[Df'*Df-beta_2          Df'*W'+Df'*C;
 (Df'*W'+Df'*C)' A'*P+P*A-W*C-C'*W'+C'*C;] > 0;

cvx_end

L=inv(P)*W; beta=beta_2^0.5;

eigobsv = eig(A-L*C)%membuktikan kestabilan observer

%-----KONTROLER-----%
cvx_begin sdp
cvx_solver SeDuMi;
variable X(8,8);
variable F(8,8);
rho=0.1;
subject to:
X > 0 ;
[A'*X+X'*A+F*C-C'*F' X*Bd          C'*Dv          C';
 Bd'*X'          -rho*eye(4,4) zeros(4,8) zeros(4,8);
 (C'*Dv)'          zeros(8,4)          -rho*eye(8,8)          Dv';
 C          zeros(8,4)          Dv          -rho*eye(8,8);]
< 0;
cvx_end

Kc=pinv(Bu)*inv(X)*F;

eigcont = eig(A-Bu*Kc*C)%membuktikan kestabilan kontroler

%-----KOMPENSATOR-----%
Ak=(A-Bu*Kc*C);
cvx_begin sdp
cvx_solver SeDuMi;
variable Q(8,8) symmetric;
variable T(8,8);
gamal=1.5;
subject to:
Q > 0 ;
[Ak'*Q+Q'*Ak          T-Q*Bu*Kc*Df+C'*Df          -T          C';
 (T-Q*Bu*Kc*Df+C'*Df)' -gamal*eye(8)          zeros(8,8)          Df';
 (-T)'          zeros(8,8)          -gamal*eye(8) zeros(8,8);
 C          Df          zeros(8,8)          -gamal*eye(8);]
< 0;

cvx_end

```

```
V=pinv(Bu)*inv(Q)*T;
```

```
L %gain observer  
V %gain kompensator  
Kc %gain kontroler
```

```
%-----END-----%
```




DATA PRIBADI PENULIS

Penulis bernama lengkap Mas Nurul Achmadiyah, dilahirkan di Surabaya, 17 Februari 1993. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Muhammadiyah 08 Dau - Malang, SMP Negeri 1 Kutorejo - Mojokerto, SMA Negeri 1 Sooko - Mojokerto dan kemudian melanjutkan studi di Teknik Mekatronika Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis melanjutkan studi untuk program Magister di Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan bidang keahlian Teknik Sistem Pengaturan. Penulis telah mengikuti sidang tesis pada tanggal 8 juni 2017 sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar **Magister Teknik (M.T)**. Penulis menyukai hal – hal yang berbau sains dan teknologi, traveling, kuliner, musik, kegiatan - kegiatan organisasi serta kemanusiaan. Selama menempuh studi, penulis mengikuti kegiatan berbau sosial, baik itu kegiatan kemahasiswaan maupun non kemahasiswaan. Motto hidup penulis yaitu *“All the impossible is possible for those who believe”*. Penulis sangat menerima kritik dan saran dari pembaca, guna pengembangan penelitian ini kedepannya. Harapan dari penulis, buku ini dapat bermanfaat bagi semua.

Penulis

nurul.achmadiyah.mas@gmail.com