



UIN SUSKA RIAU

# ANALISA PERFORMANSI ESTIMASI DAN SIMULASI SISTEM SUSPENSI SEPEREMPAT MOBIL MENGGUNAKAN KALMAN-BUCY SEBAGAI STATE OBSERVER

## TUGAS AKHIR

Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh:

**ALPIN ADRIANSYAH**

**12150510224**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU  
PEKANBARU  
2025**

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University Sultan Syarif Kasim Riau



UIN SUSKA RIAU

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## LEMBAR PERSETUJUAN

### ANALISA PERFORMANSI ESTIMASI DAN SIMULASI SISTEM SUSPENSI SEPEREMPAT MOBIL MENGGUNAKAN KALMAN-BUCY SEBAGAI STATE OBSERVER

#### TUGAS AKHIR

Oleh :

ALPIN ADRIANSYAH  
12150510224

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro  
di Pekanbaru, pada tanggal 28 Mei 2025

Ketua Program Studi Teknik Elektro  
Sekretaris Program Studi Teknik Elektro

Pembimbing

Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.  
NIP.19870906 201503 2 006

Sutovo, S.T., M.T.  
NIP.19841202 201903 1 004

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## LEMBAR PENGESAHAN

### ANALISA PERFORMANSI ESTIMASI DAN SIMULASI SISTEM SUSPENSI SEPEREMPAT MOBIL MENGGUNAKAN KALMAN-BUCY SEBAGAI STATE OBSERVER

#### TUGAS AKHIR

Oleh :

**ALPIN ADRIANSYAH**  
12150510224

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Pengaji  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik  
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau  
di Pekanbaru, pada tanggal 28 Mei 2025

Pekanbaru, 28 Mei 2025

Mengesahkan,

a.n Ketua Program Studi Teknik Elektro  
Sekretaris Program Studi Teknik Elektro

Plh. Dekan

Dr. Kurniafi, ST., PgDipEnSt., M.Sc  
NIP. 19760724 200710 1 003

Sutoyo, S.T., M.T.  
NIP. 19841202 201903 1 004

Dewan Pengaji :

Ketua : Ahmad Faizal, S.T., M.T.  
Sekretaris : Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.  
Anggota I : Hilman Zarory, S.T., M.Eng.  
Anggota II : Putut Son Maria, S.ST., M.T.



UIN SUSKA RIAU

## LEMBAR HAK ATAS KELAYAKAN INTELEKTUAL

© Hak Cipta UIN Sultan Syarif Kasim Riau  
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang lengkap ataupun sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

UIN SUSKA RIAU



## LEMBAR PERNYATAAN

© Hak cipta milik UIN Suska Riau  
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip seluruh atau sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

betanda tangan dibawah ini :

: Alpin Adriansyah  
: 12150510224  
: Sedinginan/ 10 Maret 2003  
: Teknik Elektro  
: Sains dan Teknologi

### Analisa Performansi Estimasi dan Simulasi Sistem Suspensi Seperempat Mobil

#### Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai State Observer

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulis Artikel dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada Karya Tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu Artikel saya ini sah, saya nyatakan bebas dari plagiasi.
4. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam Artikel saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Gemikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 28 Mei 2025

Yang membuat pernyataan,



Alpin Adriansyah  
NIM. 12150510224

## HALAMAN PERSEMPAHAN



Alhamdulillah Maha Besar Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya. Dengan penuh ketundukan, hamba haturkan sembah sujud dari lubuk hati yang paling dalam. Atas limpahan nikmat, kecukupan rezeki, serta kehidupan yang layak penuh keberkahan dan hidayah-Nya.

*"Man jadda wajada"*

*"barang siapa yang bersungguh-sungguh, maka ia akan berhasil"*

Tetes peluh yang membasahi, dan perjuangan yang pernah mewarnai hari-hari kini telah bertransformasi menjadi air mata syukur dan kebahagiaan, yang luruh dalam sujud panjang di hadapan Sang Maha Kuasa. Dengan penuh cinta dan kerendahan hati, karya ini penulis persembahkan untuk ayah panutan dalam hidup penulis, ayahanda Saharudin beliau memang tidak memiliki gelar sarjana, tetapi beliau mendidik dan mengantarkan penulis hingga meraih sarjana. Memberikan semangat yang tiada putus nya dan bekerja keras untuk penulis meraih sarjana. Terimakasih untuk ayah atas segala perjuangan dan pengorbanan yang telah diberikan, setiap tetesan keringatnya menjadi semangat penulis untuk meraih gelar sarjana kini. Teruntuk pintu surga penulis, pelita dalam langkah penulis, doa dalam nafas penulis. Ibu dan bapaknya, ibunda hasmi. Terimakasih sebesar-besarnya penulis ucapkan sudah selalu memberi semangat, motivasi serta doanya yang menembus langit hingga penulis berhasil menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih sudah menjadi penguat dan pengingat yang paling hebat. Terimakasih kasih sayang dan pengorbanan yang telah diberikan kepada penulis. Ayah dan ibu Segala pencapaian ini tidak akan pernah terwujud tanpa cinta, kesabaran, dan pengorbanan ayah dan ibu.

*"kado kecil ini persembahkan buat ayah dan ibu buah hasil atas segala perngorbanan yang telah diberikan. Penulis berusaha Setiap tetesan keringat atas perjuangannya akan penulis tukar dengan senyuman kebanggaan."*

**AlpIn Adriansyah**

**28 Mei 2025**



# ANALISA PERFORMANSI ESTIMASI DAN SIMULASI SISTEM SUSPENSI SEPEREMPAT MOBIL MENGGUNAKAN KALMAN- BUKY SEBAGAI STATE OBSERVER

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

© Pak cipta milik UIN Suska Riau

**ALPIN ADRIANSYAH**  
**12150510224**

Tanggal Sidang : 28 Mei 2025

Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Sains dan Teknologi  
UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas KM 15 No. 155 Pekanbaru

## ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performansi *observer* Kalman-Bucy dalam mengestimasi posisi kendaraan pada sistem suspensi seperempat mobil. Permasalahan utama yang diangkat adalah kerentanan sistem suspensi terhadap gangguan, khususnya ketidakrataan permukaan jalan, dan keterbatasan akurasi sensor. Untuk mengatasi hal tersebut, Kalman-Bucy diterapkan sebagai metode estimasi berbasis model *state-space* secara *open-loop* tanpa pengendali, yang sesuai untuk sistem yang rentan terhadap gangguan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Kalman-Bucy mampu mengestimasi posisi kendaraan secara akurat. Pada skenario gangguan berupa *speed hump* setinggi 10 cm pada detik ke 10 Kalman-Bucy mampu mengikuti hasil keluaran dan menghilangkan *noise* pada sistem. Kalman-Bucy juga menunjukkan kekokohan yang baik terhadap *noise* hingga 50%, dan tetap mampu menyaring *noise* dan hampir tidak memiliki *noise* lagi, serta mampu mengikuti dinamika sistem. Pada pengujian sensitivitas terhadap kondisi awal yang berbeda antara sistem dan *observer*, selisih estimasi menyatu kembali dalam waktu  $\pm 3$  detik. Untuk massa kendaraan 400 kg hingga 600 kg, Kalman-Bucy tetap memberikan estimasi yang stabil, dengan sistem yang lebih berat menunjukkan redaman getaran lebih cepat dan *noise* yang lebih kecil. Secara keseluruhan, Kalman-Bucy terbukti efektif dan kokoh sebagai *observer* pada sistem suspensi, memberikan estimasi presisi tinggi meskipun terdapat *noise* dan variasi kondisi sistem dapat membantu membantu kinerja sensor.

**Kata Kunci:** Kalman-Bucy, Sistem Suspensi, *State Observer*, *Noise*, Estimasi, *Open Loop*, MATLAB, Sensitivitas, Kekokohan.



# ***ANALYSIS OF ESTIMATION PERFORMANCE AND SIMULATION OF A QUARTER-CAR SUSPENSION SYSTEM USING KALMAN-BUCY AS A STATE OBSERVER***

**ALPIN ADRIANSYAH**  
**12150510224**

*Hearing Date: May 28, 2025*

*Program of Electrical Engineering*

*Faculty of Science and Technology*

*UIN Sultan Syarif Kasim Riau*

*Jl. Soebrantas KM 15 No. 155, Pekanbaru*

## ***ABSTRACT***

*This study aims to analyze the performance of the Kalman-Bucy observer in estimating vehicle position in a quarter-car suspension system. The main issues addressed are the vulnerability of suspension systems to disturbances, particularly road surface irregularities, and the limited accuracy of sensors. To address these challenges, Kalman-Bucy is applied as a model-based state-space estimation method in an open-loop configuration without a controller, making it suitable for systems sensitive to disturbances. Simulation results show that Kalman-Bucy is capable of accurately estimating vehicle position. In a scenario involving a 10 cm speed hump, the Kalman-Bucy estimation required approximately 10 seconds to return to the zero position. The observer demonstrated strong robustness against noise up to 50%, successfully filtering out disturbances and tracking the system dynamics. In sensitivity tests involving different initial conditions between the system and the observer, the estimation error converged within approximately  $\pm 3$  seconds, highlighting the algorithm's adaptability. For variations in vehicle mass from 400 kg to 600 kg, Kalman-Bucy continued to provide stable estimations, with heavier systems exhibiting faster vibration damping and reduced noise effects. Overall, Kalman-Bucy proves to be an effective and robust observer for suspension systems, delivering high-precision estimations despite the presence of noise and varying system conditions.*

***Keywords:*** *Kalman-Bucy, Suspension System, State Observer, Noise, Estimation, Open Loop, MATLAB, Sensitivity, Robustness.*

*Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menanyakan izin.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.*

## KATA PENGANTAR



*Assalamu'alaikum wr.wb*

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia serta hidayahnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan waktu. Atas karunia Allah SWT, Tugas Akhir dengan judul **“Analisa Performansi Estimasi dan Simulasi Sistem Suspensi Seperempat Mobil Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai State Observer”** dapat diselesaikan penulis tepat waktu

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, bimbingan dan pengarahan diberikan oleh orang-orang yang memiliki pengetahuan, wawasan, dan pengalaman luar biasa, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menerima banyak bantuan, dorongan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih yang tak terhingga disampaikan kepada :

1. Allah SWT, dengan rahmat-Nya dan hidayah-Nya, telah memberikan segala yang terbaik dan petunjuk sehingga penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kepada kedua orang tua ayahanda Saharudin dan ibunda Hasmi. Terimakasih telah selalu mendoakan dan semua pengorbanan, kepercayaan, dan nasehat yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Kepada ketujuh saudara kandung kakak dan abang, Nurianti, Yurnida, Lestari, Afrizal, Wawan Saputra, dan Wela Asfariza. Terimakasih atas segala doa, motivasi, dan semangat nya dalam proses penulisan Tugas Akhir ini. Serta ponakan-ponakan yang lucu Hadi, Azam, Rayan, dan Nadif yang selalu menghibur penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Hairunas, M.Ag. selaku Rektor Uin Suska Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya..
5. Bapak Dr. Hartono, M.Pd selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau beserta kepada seluruh Staf dan jajarannya.
6. Ibu Dr. Zulfatri Aini ST.,MT, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

**Hak Cipta milik UIN SUSKA RIAU**

7. Bapak Sutoyo, ST.,MT selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Uin Suska Riau.
8. Ibu Dr. Dian Mursyitah, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Bapak Hilman Zarory, ST., M.Eng selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari awal semester hingga akhir semester.
10. Kepada Adrina Dzahabiyyah terimakasih sudah selalu menemanin dan memberi semangat penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
11. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada diri sendiri, atas usaha keras dan keteguhan untuk menyelesaikan apa yang sudah dimulai, serta senantiasa menikmati setiap posesnya yang bisa dibilang tidak mudah. Kemampuan dalam mengatur waktu, tenaga, dan pikiran memungkinkan penyelesaian Tugas Akhir ini tepat waktu.
12. Teman-Teman seperjuangan dalam Konsentrasi Instrumentasi 2021, serta teman-teman teknik elektro angkatan 2021 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan jauh dari kata sempurna karena keterbatasan ilmu pengetahuan, kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan.

*Wassalamu 'alaikum wr.wb*

Pekanbaru, 15 Januari 2025

Penulis

Alpin Adriansyah

NIM.12150510224



	Halaman
<b>LEMBAR PERSETUJUAN</b>	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	iii
<b>LEMBAR HAK ATAS KELAYAKAN INTELEKTUAL</b>	iv
<b>SURAT PERNYATAAN</b>	v
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	vi
<b>ABSTRAK</b>	vii
<b>KATA PENGANTAR</b>	ix
<b>DAFTAR ISI</b>	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xiii
<b>DAFTAR RUMUS</b>	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b>	xv
<b>DAFTAR SINGKATAN</b>	xvi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Penelitian	I-3
1.4 Batasan Penelitian	I-3
1.5 Manfaat Penelitian	I-3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori	II-2
2.2.1 Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan	II-2
2.2.2 Model Matematis Sistem Suspensi Seperempat Mobil	II-3
2.3 Estimasi <i>Observer</i>	II-6
2.4 Kalman-Bucy	II-7
2.5 <i>Gaussian White Noise</i>	II-9
2.6 Sensitivitas dan Kekokohan	II-9
2.7 <i>Software Matlab</i>	II-10
2.7.1 Ruang Lingkup Matlab	II-11
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	III-1



3.1	Proses Alur Penelitian.....	III-1
3.2	Tahap Penelitian .....	III-2
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>IV-1</b>
4.1	Pemaparan Umum Hasil Analisa Pengujian .....	IV-1
4.2	Analisa Hasil Sistem Suspensi <i>Open Loop</i> dengan <i>Noise</i> .....	IV-1
4.3	Analisa Performansi Kalman-Bucy Dalam Mengestimasi Posisi Mobil.....	IV-2
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>		<b>V-1</b>
5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran .....	V-1

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN A

## LAMPIRAN B

## LAMPIRAN C

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Hak Cipta Dindingsida  
© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.	Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.	© Hak Cipta dilindungi Undang-Undang
3. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.	UIN Sultan Syarif Kasim Riau
4. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.	Sarana dan Prasarana
2.1 (a) Model Suspensi Pasif (b) Model Suspensi Aktif [3] .....	II-2
2.2 Sistem Suspensi Seperempat Mobil [7] .....	II-3
2.3 Blok Diagram Sistem dengan Kalman-Bucy .....	II-8
2.4 Matlab R2023a .....	II-11
2.5 Tampilan Window Matlab .....	II-12
2.6 Tampilan Simulink Matlab .....	II-13
3.1 Flowchart Alur Penelitian .....	III-2
3.2 Rangkaian Simulink Sistem Suspensi dengan <i>Open Loop</i> .....	III-6
3.3 Simulink Matlab Kalman-Bucy Sebagai <i>State Observer</i> .....	III-11
3.4 Kondisi Awal Sistem [0.1 0 0 0] .....	III-14
4.1 Hasil Keluaran Sistem Suspensi Mobil <i>Open Loop</i> Terdapat <i>Noise</i> .....	IV-2
4.2 Hasil Keluaran Kalman-Bucy Sebagai <i>Observer</i> .....	IV-3
4.3 Hasil Respon Kalman-Bucy dengan Melewati Lubang 10 cm .....	IV-4
4.4 Sinyal <i>Noise</i> W Sebesar 10% .....	IV-5
4.5 Sinyal <i>Noise</i> V Sebesar 10% .....	IV-6
4.6 Hasil Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan <i>Noise</i> 10% .....	IV-7
4.7 Hasil Keluaran Perbedaan Kondisi Awal I_C Sistem [0;0;0;0] .....	IV-8
4.8 Hasil Perbedaan Kondisi Awal I_C Sistem [0.1:0:0:0] .....	IV-9
4.9 Hasil Keluaran Massa Mobil 400 Kg .....	IV-10
4.10 Hasil Keluaran dengan Massa Mobil 500 Kg .....	IV-11

UIN SUSKA RIAU



UIN SUSKA RIAU

## DAFTAR RUMUS

© Hak cipta termaktub di UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
2.1 Dilarang mengalih bagikan seluruh karya tulis ini tanpa izin

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

### Rumus

	Halaman
2.1 Hukum Newton II .....	II-4
2.2 Persamaan Difrensial m1 .....	II-4
2.3 Persamaan Diferensial m2 .....	II-4
2.4 Persamaan Umum <i>State Observer</i> .....	II-4
2.5 Persamaan Umum Keluaran <i>Observer</i> .....	II-4
2.14 Persamaan <i>State Kalman-Bucy</i> .....	II-7
2.15 Persamaan Keluaran Kalman-Bucy .....	II-7
2.16 Algoritma Kalman-Bucy .....	II-7
2.18 Persamaan <i>Riccati Equation</i> .....	II-7
2.21 Rumus <i>Gaussian White Noise</i> .....	II-9
3.5 Persamaan <i>Noise w</i> .....	III-4
3.7 Persamaan <i>Noise v</i> .....	III-4
3.13 Persamaan <i>State Kalman-Bucy</i> .....	III-9
3.18 Persamaan <i>Gain Kalman</i> .....	III-9

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Parameter Sistem Suspensi Seperempat Mobil [7].....	II-6
2.2 Parameter Gangguan Jalan [21].....	II-6
3.1 Blok-Blok <i>Simulink</i> .....	III-5
3.2 Algoritma Pemrograman Sistem Suspensi Secara <i>Open Loop</i> .....	III-6
3.3 Algoritma Pemograman <i>Noise</i> .....	III-7
3.4 Algoritma Program Sistem <i>Open Loop</i> Ditambah <i>Noise</i> .....	III-8
3.5 Pengujian Performansi Kalman-Bucy .....	III-11
3.6 Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan <i>Noise</i> .....	III-12
3.7 Algoritma Kalman-Bucy Sebagai <i>Observer</i> .....	III-12
3.8 Pengujian Sensitivitas Kalman-Bucy dengan Perbedaan Kondisi Awal.....	III-13
3.9 Pengujian Sensitivitas Terhadap Perbedaan Kondisi Awal .....	III-14
3.10 Pengujian Perubahan Massa Mobil .....	III-15
3.11 Algoritma Pengujian Terhadap Perubahan Massa Mobil .....	III-15



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
FLC LQR MAE MATLAB PID SMC

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

## DAFTAR SINGKATAN

- = *Fuzzy Logic Controller*  
= *Linear Quadratic Regulator*  
= *Mean Absolute Error*  
= *MATrix LABoratory*  
= *Proposional Integral Derivative*  
= *Sliding Mode Controller*

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Mobil adalah sarana transportasi yang menjadi kebutuhan penting masyarakat dalam perjalanan dari satu lokasi ke lokasi lain [1]. Kondisi ideal untuk kenyamanan berkendara adalah ketika mobil tetap stabil dan minimum guncangan, meskipun melewati jalan yang berlubang atau rusak. Sistem suspensi adalah komponen utama mobil yang berfungsi untuk menstabilkan kondisi mobil, menjaga kenyamanan berkendara, dan meredamkan getaran [1, 2]. Pada sistem suspensi, terdapat dua kategori utama: suspensi pasif dan suspensi aktif. Suspensi pasif hanya menggunakan komponen mekanis, seperti pegas dan peredam sebagai pengendali getaran. Sedangkan suspensi aktif memanfaatkan teknologi canggih seperti aktuator dan sensor untuk menyesuaikan respons suspensi secara *real-time* [3].

Berbagai penelitian tentang pengendalian suspensi mobil telah banyak dilakukan seperti desain metode pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) [2], *Full State Feedback* dan *Proposional Integral Derivative* (PID) [3], *Sliding Mode Controller* (SMC) dengan PID [4], penggunaan *Magnetorheological* sebagai peredam [5], *Fuzzy Logic Controller* [6], dan penggunaan Kendali Optimal [7]. Beberapa hasil dari penelitian tersebut menunjukkan performasi yang baik. Namun masih disebutkan kekurangan seperti respon yang kurang cepat, gangguan *noise* dan terdapat *overshoot*, yang disebabkan oleh sensor memiliki keterbatasan pengukuran [3, 6, 7]. Seperti pada penelitian menggunakan PID dan FLC. *Overshoot* sebesar 2,09% masih terjadi pada PID, dan *overshoot* sebesar 2,78% terjadi pada FLC [6]. Selain itu kombinasi pengendali banyak ditemukan, dilakukan dengan menggabungkan dua pengendali [3, 5]. Secara matematis metode kombinasi ini menghasilkan model yang kompleks. Kompleksitas model matematis ini dapat menyebabkan masalah numerik saat mengembangkan algoritma pemrograman. Model yang lebih sederhana diperlukan agar tetap dapat mendukung kinerja pengendali, bahkan dengan menggunakan pengendali yang sederhana sekalipun.

Selain itu, penggunaan pengendali bergantung pada sensor. Sementara, sensor memiliki kelemahan yang timbul akibat ketidakakuratan pengukuran [8, 9]. Ditambah lagi akurasi yang terbatas dan rentan terhadap gangguan yang dapat menurunkan ketepatan hasil pengukuran. Penggunaan banyak sensor juga dapat meningkatkan biaya dan meningkatkan

*noise* yang mempengaruhi akurasi pengukuran. Selain itu, dalam kenyataannya tidak semua *state* dalam sistem kendali dapat diukur secara langsung oleh sensor [10, 11].

Oleh karena itu, untuk mendukung atau bahkan mengganti kinerja sensor dan mengakomodasi *state* yang tidak dapat diukur langsung oleh sensor, digunakan estimasi *state* yang mengikuti dinamika sistem. Estimasi ini biasanya dikenal sebagai *observer* [12].

Fungsi utama dari *observer* adalah memperkirakan nilai *state* dari sistem berdasarkan keluaran yang diukur, meskipun pengukuran tersebut terdapat *noise*. Selain itu, *observer* juga mampu perbaiki kinerja sistem secara menyeluruh karena mampu mengecilkan *error* dan *noise* pada sistem [12, 13].

Terdapat beberapa jenis *observer*, di antaranya *Luenberger Observer*, *Kalman Filter*, *Extended Kalman Filter*, dan *High-Gain Observer*. Dari berbagai jenis *observer*, *Kalman Filter* adalah salah satu yang dikembangkan dalam waktu diskrit untuk menghasilkan estimasi terbaik dari sistem linier. Sementara itu, untuk sistem linier dalam waktu kontinu, pendekatan ini dikembangkan menjadi *Kalman-Bucy Filter* [14]. *Kalman-Bucy Filter* adalah filter yang dirancang untuk memperkirakan keadaan sistem linier dalam waktu kontinu, dan digunakan untuk memproses pengukuran yang mengandung *noise*. *Kalman-Bucy* juga dapat berfungsi sebagai *observer*, untuk memperkirakan keadaan suatu sistem berdasarkan pengukuran yang tersedia. Implementasinya dapat ditemukan pada berbagai aplikasi yang rentan terhadap *noise* [9].

Aplikasi pada motor DC menunjukkan bahwa saat diberikan gangguan dengan variasi mulai dari 10% hingga 100% hasil estimasi motor DC bebas dari *noise*, di mana *noise* telah disaring menggunakan *Kalman-Bucy* [9]. Pada penelitian lain menggunakan metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Kalman-Bucy Filter* menunjukkan *noise* sebesar 1,241 berkurang menjadi 0,489. Hal ini menunjukkan *Kalman Filter* secara efektif mengurangi dampak *noise*, meningkatkan akurasi pengukuran, dan menstabilkan respons sistem sesuai yang diharapkan [15]. Penelitian lain penggunaan *Kalman-Bucy* diterapkan pada baterai *lithium-ion* untuk memperkirakan status pengisian daya. Hasil menunjukkan pada suhu 20°C nilai *mean absolute error* (MAE) sebesar 0.72%. Selain itu, pada pengujian eksperimen dengan berbagai kisaran suhu, rata-rata *error* yang diperoleh adalah 0,71% [16].

Berdasarkan studi pustaka, *Kalman-Bucy* mampu mengestimasi keadaan sistem dengan adanya *noise*. Berkaitan dengan sistem suspensi yang rentan terhadap gangguan berupa guncangan. *Kalman-Bucy* menjadi metode yang dipilih karena kemampuannya menyaring *noise* atau pada sistem suspensi disebut guncangan. Oleh karena itu, dalam

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa izin dan menyebutkan sumber.
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

penelitian ini, penulis mengangkat metode Kalman-Bucy sebagai *observer* untuk mengestimasi *output* dari sistem suspensi dan membantu meningkat hasil pengukuran untuk mendukung kinerja pengendali. Dengan judul tugas akhir **“Analisa Performansi Estimasi dan Simulasi Sistem Suspensi Seperempat Mobil Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai State Observer”**.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Bagaimana performansi Kalman-Bucy dalam mengestimasi posisi pada sistem suspensi mobil, dengan kekokohan dan sensitivitas sebagai indikator pengujinya?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performansi Kalman-Bucy dalam mengestimasi posisi pada sistem suspensi seperempat mobil, dengan kekokohan dan sensitivitas sebagai indikator pengujinya.

## **1.4 Batasan Penelitian**

Batasan masalah pada penelitian yaitu:

1. Pemodelan sistem suspensi mobil berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Fahrul Arifin [7]
2. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah suspensi atau pegas yang mempengaruhi posisi mobil.
3. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *simulink* MATLAB R2023a
4. Penelitian ini tidak menggunakan kendali

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Berikut adalah manfaat dari penelitian yang dilakukan sebagai berikut :

1. Dapat dijadikan referensi pendukung untuk pengembangan bagi penelitian-penelitian berikutnya
2. Dapat memberi pengatahan tentang estimasi pada sistem suspensi mobil menggunakan kalman bucy sebagai *state observer*
3. Diharapkan pengendalian suspensi mobil ini nantinya dapat diterapkan pada sistem yang sesungguhnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### Penelitian Terkait

Penelitian tugas akhir ini diawali dengan studi literatur yang mencakup teori dan referensi terkait permasalahan yang diteliti. Adapun penelitian terkait dengan pengendalian suspensi mobil telah banyak dilaksanakan, seperti Simulasi Kendali Sistem Suspensi Aktif Kendaraan Roda Empat Menggunakan Metode *Full State Feedback* dan PID, hasilnya mampu memperbaiki performasi. Dibuktikan respon *close loop system* dari *Full State Feedback* diberi gangguan sebesar 0.1 m membuat mobil mengalami osilasi dan *settling time* menuju stabil yaitu 2 detik. sedangkan pengendali PID mendapatkan hasil yang maksimal dalam memperbaiki kinerja performansi. Ini dibuktikan oleh respon *close loop system* dengan gangguan 0.1 m menunjukkan kendaraan mengalami osilasi kecil dan *settling time* menuju stabil lebih cepat yaitu 1.7 s. Jadi PID menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan skema kendali *Full State Feedback*, yaitu waktu meredam kejutan lebih cepat. Namun pada penelitian ini belum sepenuhnya memenuhi performansi yang dibutuhkan karena masih terdapat osilasi [3].

Penelitian selanjutnya menggunakan pengendali PID dan *Fuzzy Logic*, pengendali PID dilakukan dengan metode PID tuning secara berulang-ulang sampai mendapatkan hasil yang optimal. Pemberian  $kp = 9558.3589$ ,  $ki = 57244.9325$ ,  $kd = 22.9008$  dan mendapatkan hasil *settling time* = 1.7 detik, *peak time* = 1.02, *rise time* = 1.02 detik, dan kendali PID mengalami *overshoot* sebesar 2,09%. Sedangkan kendali *Fuzzy Logic* dengan 49 aturan *Fuzzy* mendapatkan *settling time* = 1.05 detik, *peak time* = 0.51 detik, *rise time* = 0.4 detik dan *overshoot* = 2.78%. jadi disimpulkan kendali PID mampu meningkat kinerja dari pada kendali *Fuzzy Logic*, sedangkan Kendali PID juga mampu menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil dari pada *Fuzzy Logic*. Masih terdapat *overshoot* pada kedua kendali [6].

Penelitian menggunakan metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan Kalman Filter menunjukkan *noise* sebesar 1,241 berkurang menjadi 0,489. Hal ini menunjukkan Kalman Filter secara efektif mengurangi dampak *noise*, meningkatkan akurasi pengukuran, dan menstabilkan respons sistem sesuai yang diharapkan[15] .

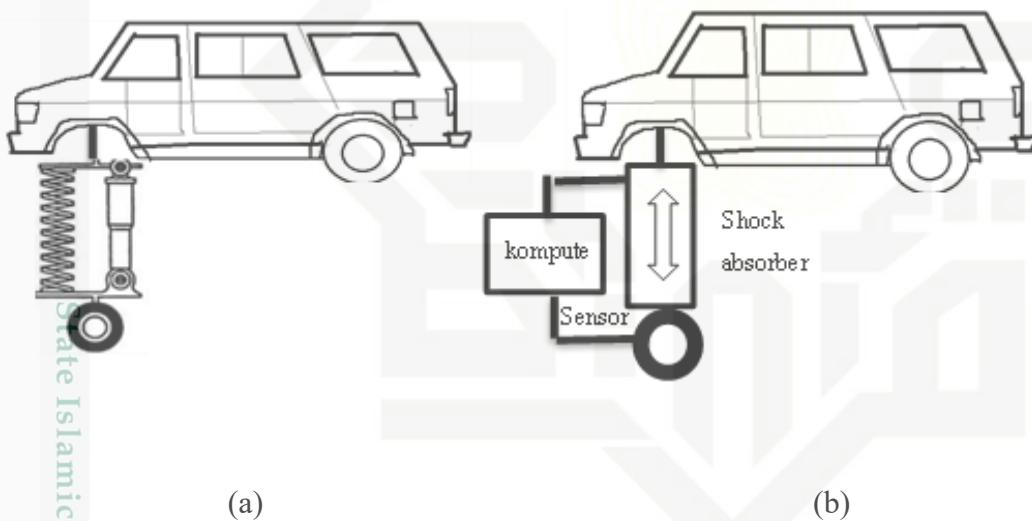
Aplikasi Kalman-Bucy juga dilakukan pada Motor DC, menunjukkan bahwa saat diberikan gangguan dengan variasi mulai dari 10% hingga 100% hasil estimasi Motor DC mampu bebas dari *noise*, di mana *noise* telah disaring menggunakan Kalman Bucy [9].

Penelitian lainnya dilakukan pada baterai *lithium-ion* dengan menggunakan Kalman-Bucy. Kalman-Bucy diterapkan untuk memperkirakan status pengisian daya. Berbagai simulasi dilakukan untuk menguji kinerja Kalman-Bucy, dengan hasil menunjukkan nilai *mean absolute error* (MAE) sebesar 1%. Selain itu, pada pengujian eksperimen dengan berbagai kisaran suhu, rata-rata *error* yang diperoleh adalah 0,4%. Berdasarkan hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa Kalman-Bucy merupakan solusi yang layak untuk estimasi status daya baterai litium-ion [16].

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan

Sistem suspensi merupakan komponen yang menghubungkan badan kendaraan dengan rodanya[17]. Kenyamanan kendaraan sangat berkaitan dengan efektivitas sistem suspensi. Sistem ini perlu mampu mengurangi atau mengisolasi getaran pada badan kendaraan yang disebabkan oleh ketidakrataan permukaan jalan [18].



Gambar 2. 1(a) Model Suspensi Pasif (b) Model Suspensi Aktif [3]

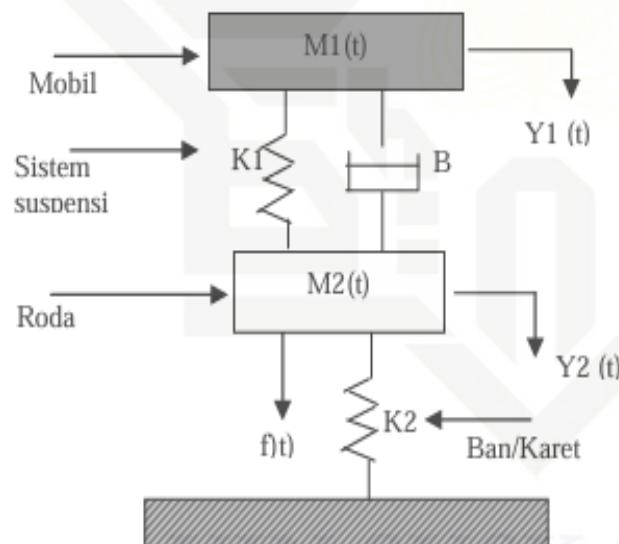
Berdasarkan Gambar 2.1, terdapat sistem suspensi pasif dan aktif. Pada sistem suspensi aktif, terdapat aktuator hidrolik yang dipasang secara seri (frekuensi rendah) atau paralel (frekuensi tinggi) bersama pegas dan peredam. Pegas dan peredam ini merupakan komponen utama sistem suspensi, berfungsi untuk menopang badan kendaraan serta meredam getaran yang dihasilkan dari kontak dengan permukaan jalan. Sistem suspensi aktif sepenuhnya terdiri dari komponen aktif dan tidak menggunakan komponen pasif. Pada

sistem suspensi pasif, hanya terdapat komponen pasif seperti pegas dan peredam, tanpa adanya energi eksternal yang mempengaruhinya [19].

Model seperempat kendaraan digunakan sebagai penyederhanaan untuk memudahkan menganalisis karakteristik suspensi pada kendaraan. Dalam model ini, hanya seperempat bagian kendaraan yang dipertimbangkan, yaitu satu roda beserta suspensinya dan sebagian massa bodi kendaraan yang ditopang oleh roda tersebut. Diasumsikan bahwa sistem suspensi pada setiap roda bersifat simetris atau seragam, sehingga satu bagian seperempat ini cukup untuk menggambarkan perilaku suspensi pada keempat roda kendaraan [20].

### 2.2.2 Model Matematis Sistem Suspensi Seperempat Mobil

Mobil biasa umumnya belum dilengkapi dengan sistem suspensi yang baik. Ketika terjadi guncangan, guncangan tersebut akan sangat terasa oleh penumpang. Bahkan, guncangan ini terkadang menyebabkan mobil bergerak bergelombang-gelombang dan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai kondisi stabil kembali. Model sistem suspensi mobil ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Sistem Suspensi Seperempat Mobil [7]

Model matematis dari *plant* dapat didapatkan dengan menurunkan hubungan antar komponen penyusunnya. Untuk menyederhanakan *plant*, Sistem suspensi pada salah satu roda mobil ditunjukkan pada Gambar 2.2. Berdasarkan tersebut, dua persamaan muncul dari

sistem ini karena terdapat dua pergeseran (*displacement*) yang saling bebas. Sistem suspensi diturunkan dengan menggunakan persamaan Hukum Newton II yaitu :

$$\sum f = m.a \quad (2.1)$$

Dengan

$f$  = gaya

$m$  = massa

$a$  = percepatan

Persamaan pertama, pada massa  $m_1$ , karena tidak ada gaya yang bekerja padanya, sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} &= -B \left( \frac{dy_1(t)}{dt} - \frac{dy_2(t)}{dt} \right) - k_1 (y_1(t) - y_2(t)) \\ m_1 \ddot{y}_1(t) &= -B (\dot{y}_1(t) - \dot{y}_2(t)) - k_1 (y_1(t) - y_2(t)) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Selanjut pada  $m_2$  dianggap ada gaya yang diberikan sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} &= f(t) - B \left( \frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) - k_1 (y_2(t) - y_1(t)) - k_2 y_1(t) \\ m_2 \ddot{y}_2(t) &= f(t) - B (\dot{y}_2(t) - \dot{y}_1(t)) - k_1 (y_2(t) - y_1(t)) - k_2 y_1(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Model matematis persamaan diferensial diubah ke model matematis *state space*, dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.4)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.5)$$

persamaan (2.2) dapat dituliskan yaitu sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_1 \dot{x}_2(t) &= -B (x_2(t) - x_4(t)) - k_1 (x_1(t) - x_3(t)) \\ m_1 \dot{x}_2(t) &= -k_1 x_1(t) - Bx_2(t) + k_1 x_3(t) + Bx_4(t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Sedangkan persamaan (2.3) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} m_2 \dot{x}_4(t) &= f(t) - B(x_4(t) - x_2(t)) - k_1(x_3(t) - x_1(t)) - k_2 x_3(t) \\ m_2 \dot{x}_4(t) &= k_1 x_1(t) + B x_2(t) - (k_1 + k_2) x_3(t) - B x_4(t) + f(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Sehingga dari persamaan (2.4) dan (2.5) didapatkan model *state space* dari sistem suspensi sebagai berikut :

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{B}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{B}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{B}{m_2} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} & -\frac{B}{m_2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$y = (1 \ 0 \ 0 \ 0) + (0) \quad (2.9)$$

Dengan matrix A, B, C dan D adalah sebagai berikut:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{B}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{B}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{B}{m_2} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} & -\frac{B}{m_2} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$C = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (2.12)$$

$$D = 0 \quad (2.13)$$

Data parameter yang digunakan merujuk pada penelitian yang telah dilakukan oleh Fahrul Arifin, dimana mobil yang akan dikendalikan adalah Toyota kijang GRAND, dengan massa mobil kosong 1600kg, kapasitas penumpang dan begasi 800kg, sehingga mobil maksimum  $\pm 2400\text{ kg}$  (massa mobil + penumpang penuh + begasi penuh). Sedangkan 2000 kg (massa mobil +  $\frac{1}{2}$  pemumpang dan Bekasi). Pada penelitian ini hanya menggunakan seperempat mobil maka parameter seperti berikut:

Tabel 2.1 Parameter Sistem Suspensi Seperempat Mobil [7][21][22]

Notasi	Keterangan	Nilai
$m_1$	Massa $\frac{1}{4}$ mobil (kosong)	400 kg
$m_2$	Massa roda ban	15 kg
$k_1$	Konstanta pegas	2500 N/m
$k_2$	Elastisitas ban	3250 N/m
B	Konstanta redaman	1250 N/m

Selain parameter sistem suspensi diatas adapun parameter gangguan jalan yang akan diuji ke simulasi sistem suspensi yaitu berdasarkan peraturan menteri perhubungan republik indonesia nomor PM 14 tahun 2021 tentang perubahan atas peraturan menteri perhubungan nomor PM 48 tahun 2018 tentang alat pengendali dan pengaman pengguna jalan.

Tabel 2.2 Parameter Gangguan Jalan [23]

Jenis Pembatas Kecepatan	Ketinggian
Speed Bump	5-9 cm
Speed Hump	8-15 cm
Lubang	-10 cm

Tabel 2.2 adalah parameter yang akan digunakan untuk gangguan jalan. Parameter sesuai dengan pembatasan kecepatan yang ditetapkan peraturan kementerian perhubungan.

### 2.3 Estimasi *Observer*

Estimasi dilakukan dengan memperkirakan nilai variabel yang tidak dapat diukur secara langsung berdasarkan informasi yang tersedia dari sistem dan model matematis yang

1. Dilarang mengutip sebagai acuan atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

digunakan. Estimasi ini dilakukan secara berkelanjutan berdasarkan pengukuran terbaru yang diterima. Dengan demikian, *observer* dapat menyesuaikan diri untuk mengikuti perubahan kondisi secara terus menerus [14].

Keberadaan sensor digunakan sebagai dasar konsep teori kendali untuk mengukur kuantitas yang dikendalikan. Namun, asumsi ini tidak sepenuhnya benar karena kinerja sistem kendali dipengaruhi oleh keterbatasan yang dimiliki sensor. Seperti akurasi sensor yang rendah, serta banyaknya sensor yang digunakan dapat menyebabkan *noise* dan penurunan kinerja sistem,[24]. Oleh karena diperlukan metode baru dengan menggunakan *observer*, yang mampu mendukung sensor bahkan mengganti sensor dalam sistem kendali.

*Observer* yang dikembangkan oleh Luenberger (1966) digunakan tidak hanya untuk memonitor dan mengatur sistem, tetapi juga mendekripsi kesalahan dalam identifikasi dinamika sistem. *Observer* ini dirancang berdasarkan model matematis dari *plant*, dengan mempertimbangkan gangguan, ketidakpastian dinamis, yang muncul dalam berbagai aplikasi kendali sistem [12].

#### 2.4 Kalman-Bucy

Kalman-Bucy merupakan pengembangan Kalman filter dalam versi waktu kontinu yang dirancang oleh Rudolf E. Kalman dan Richard S. Bucy pada tahun 1961 [9]. Sama seperti Kalman filter, Kalman-Bucy digunakan untuk memperkirakan keadaan proses yang tidak terukur, dengan asumsi bahwa keadaan tersebut dapat diamati, serta untuk memperkirakan keluaran dari proses yang sesungguhnya [11].

Sebagai versi waktu kontinu dari Kalman filter, yang sebelumnya dikembangkan untuk waktu diskrit, metode ini memungkinkan pencarian perkiraan terbaik dari sistem linier. Kalman-Bucy digunakan untuk menyelesaikan masalah estimasi keadaan pada sistem yang dipengaruhi oleh gangguan. Pengaruh besar telah diberikan oleh teknik ini terhadap teori kontrol, pemrosesan sinyal, serta analisis deret waktu [25]. Berikut persamaan umum dari *observer* sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (2.14)$$

$$y(t) = Cx(t) + v(t) \quad (2.15)$$

Untuk merancang kalman-bucy sebagai *observer*, dituliskan algoritma sebagai berikut

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.
2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber.

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t) + Bu(t) + k_f(t)(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.16)$$

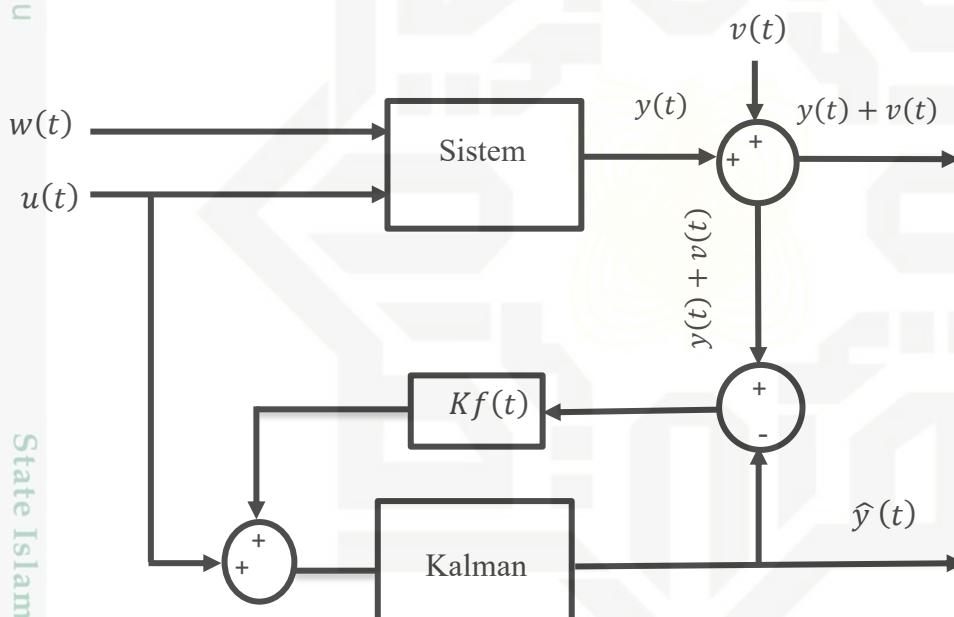
Untuk mendapatkan nilai  $k_f(t)$ , dapat diselesaikan dengan persamaan berikut:

$$k_f(t) = P(t)C^T R^{-1}(t) \quad (2.17)$$

Dimana  $P(t)$  dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan *riccati equation*

$$\dot{P}(t) = A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C^T R^{-1}(t)CP(t) + Q(t) \quad (2.18)$$

Berikut adalah blok diagram dari Kalman-Bucy sebagai *state observer* berdasarkan persamaan (2.14) dan (2.15)



Gambar 2.3 Blok Diagram Sistem dengan Kalman-Bucy

Gambar 2.3 adalah gambar diagram sistem suspensi yang telah ditambah kalman-bucy sebagai *observer*. Pada sistem suspensi terdapat *noise*  $w$  pada *state* dan *noise*  $v$  pada pengukuran. Dan terdapat  $Kf$  sebagai *gain* kalman dan  $\hat{y}$  keluaran dari kalman. Diagram tersebut dapat dibentuk menggunakan *Simulink* matlab untuk melakukan simulasi.

## 2.5 Gaussian White Noise

Noise merupakan gangguan yang memengaruhi suatu sistem, baik yang berasal dari dalam maupun luar sistem. Gangguan ini dapat berupa *error* (kesalahan) atau sinyal acak yang membawa informasi yang tidak relevan. Kehadiran *noise* menyebabkan hasil pengukuran menjadi tidak akurat. Dalam sistem yang akan dibahas, *noise* dapat muncul dari plant seperti sistem suspensi atau dari ketidakakuratan sensor dalam melakukan pembacaan.

Sinyal gangguan atau *noise* memiliki berbagai jenis, salah satunya adalah *Gaussian White Noise*. *Noise gaussian* menggunakan bilangan acak yang terdistribusi normal dengan nilai berkisar dari antara 0 dan 1. *Gaussian White Noise* memiliki karakteristik *zero mean*, yaitu nilai rata-rata keseluruhannya adalah 0 dan varian sebesar 1 [26]. Berikut adalah rumus mendapatkan noise gaussian yang acak dengan deviasi standar sebesar  $\sigma$  dan rata-rata sama dengan  $\mu$  adalah sebagai berikut [26]:

$$d = \text{rand} * \sigma + \mu \quad (2.19)$$

Jika  $\mu$  adalah nol maka rumus diatas dapat disederhanakan menjadi

$$d = \text{rand} * \sigma \quad (2.20)$$

Berikut rumus untuk *gaussian white noise* dengan rata-rata 0 dan varian 1

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.21)$$

Keterangan :

$p(x)$  = variabel acak (*random variable*)

$\mu$  = Rata-rata (*mean*)

$\sigma$  = *standard deviation*

$\sigma^2$  = varians dari distribusi

$\pi$  = konstanta untuk normalisasi sama dengan nol

## 2.6 Sensitivitas dan Kekokohan

Analisis sensitivitas dan kekokohan merupakan bagian penting dalam pengendalian proses industri, karena memungkinkan pemahaman tentang bagaimana sistem merespons

terhadap variasi parameter dan gangguan eksternal. Berikut ini adalah konsep kedua analisis tersebut:

#### Analisis Sensitivitas

Pada analisis ini, perubahan dalam *output* sistem dipelajari sebagai respons terhadap perubahan parameter atau kondisi *input* tertentu. Parameter kunci dalam sistem dapat diidentifikasi melalui analisis sensitivitas, sehingga dapat diatur dengan hati-hati untuk mencapai kinerja yang diinginkan. Selain itu, pemahaman tentang stabilitas sistem terhadap variasi parameter diperoleh melalui pengujian sensitivitas yang dilakukan dengan mengubah *input* atau kondisi awal pada sistem [27].

#### Analisis Kekokohan

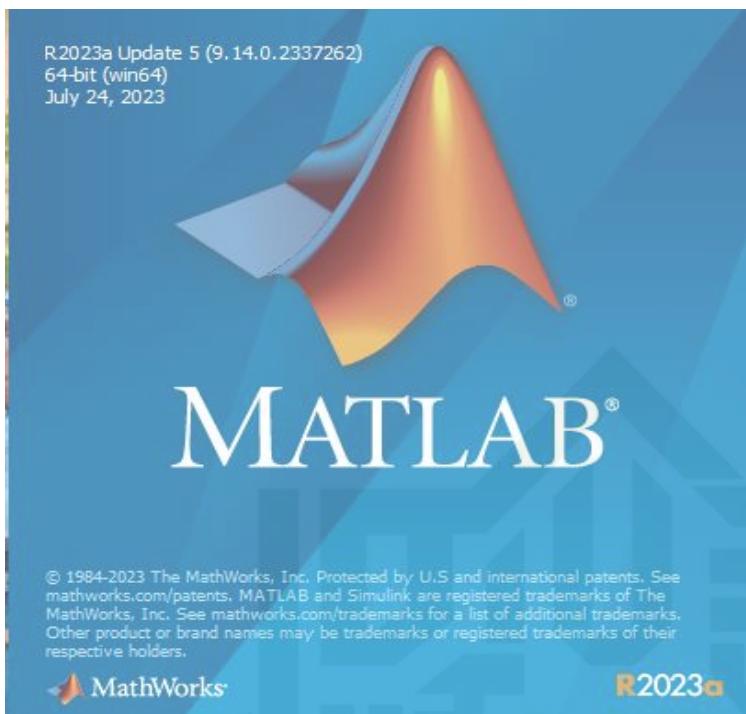
Kekokohan didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk menjaga kinerjanya tetap baik meskipun terdapat gangguan eksternal. Respons sistem terhadap gangguan diuji melalui teknik simulasi atau eksperimen [28]. Sistem dianggap kokoh jika kinerjanya tetap stabil atau sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan, meskipun ada gangguan. Sebaliknya, sistem dinilai tidak kokoh apabila gangguan tersebut menyebabkan perubahan signifikan dalam kinerjanya. Melalui analisis kekokohan, perancangan sistem kendali dapat dilakukan untuk memastikan fungsinya tetap efektif di berbagai kondisi operasional dan mengurangi risiko kegagalan sistem akibat gangguan [29].

Berdasarkan analisis ini, penting untuk memastikan bahwa observer dapat merespons perubahan parameter atau gangguan tanpa mengganggu kinerja maupun kestabilan sistem. Analisis sensitivitas dan kekokohan dilakukan untuk memastikan performa observer tetap baik dan akurat [28].

### 2.7 Software Matlab

MATLAB merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk pemrograman, analisis, serta komputasi teknis dan matematis berbasis matriks. Nama MATLAB berasal dari singkatan *MATrix LABoratory*, karena perangkat ini digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah perhitungan atau analisis komputasi yang didasarkan pada sifat dan bentuk matriks. Bahasa pemrograman ini dikembangkan oleh MathWorks Inc., dengan tujuan untuk menggabungkan proses pemrograman, komputasi, dan visualisasi ke dalam satu lingkungan yang ramah pengguna [30].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.4 Matlab R2023a

MATLAB memiliki berbagai manfaat, di antaranya adalah data dianalisis dan dieksplorasi, algoritma dikembangkan, model dan simulasi dibuat, plot divisualisasikan dalam bentuk 2D dan 3D, serta aplikasi antarmuka grafis dirancang. MATLAB dapat dijalankan pada sistem operasi Windows, Linux, dan macOS [28]. Selain itu, MATLAB dapat dihubungkan dengan berbagai aplikasi atau bahasa pemrograman eksternal, seperti C, Java, .NET, dan Microsoft Excel. Tersedia pula kotak kertas (toolbox) dalam MATLAB yang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi khusus, seperti pengolahan sinyal, sistem kontrol, logika fuzzy, jaringan saraf tiruan, optimasi, pengolahan citra digital, bioinformatika, simulasi, dan berbagai teknologi lainnya [30].

### 2.7.1 Ruang Lingkup Matlab

Pada MATLAB, terdapat beberapa ruang lingkup kerja yang digunakan untuk pemrograman, pemodelan, dan lainnya. Berikut adalah beberapa ruang lingkup kerja MATLAB:

#### *Command Window / Editor*

*Command window/editor* adalah jendela pertama yang muncul saat MATLAB dijalankan, yang memberikan akses langsung ke perintah-perintah MATLAB.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumbernya.
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan dan lainnya.
    - b. Pengutipan tidak mengikuti kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa izin.

Pengguna dapat mengetikkan ekspresi MATLAB, seperti mengakses *help window* dan lainnya. *Command window* digunakan untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variabel, melaksanakan proses, dan melihat isi variabel [30].

### *Current Directory*

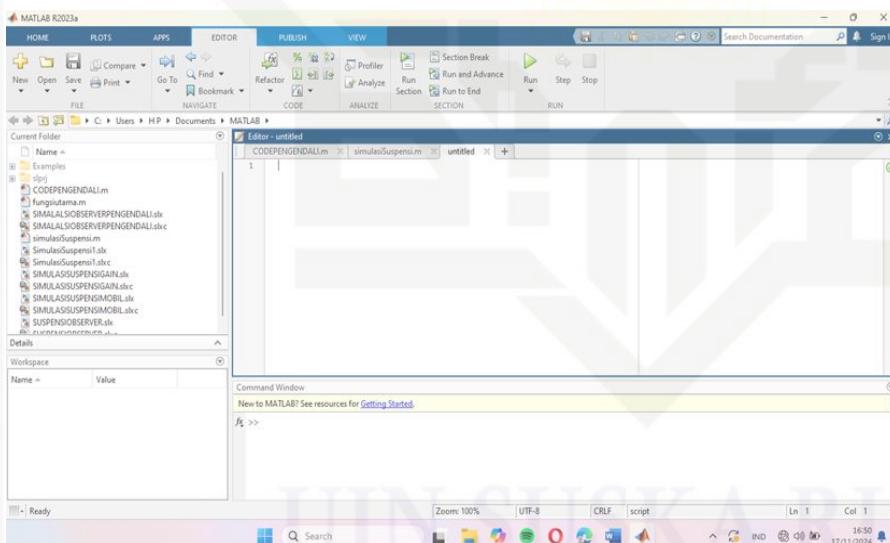
*Current Directory* adalah jendela yang menampilkan isi dari direktori kerja saat MATLAB digunakan. Direktori ini dapat diganti sesuai keinginan pengguna. Alamat direktori default terletak di dalam folder kerja tempat program file berada.

## *Command History*

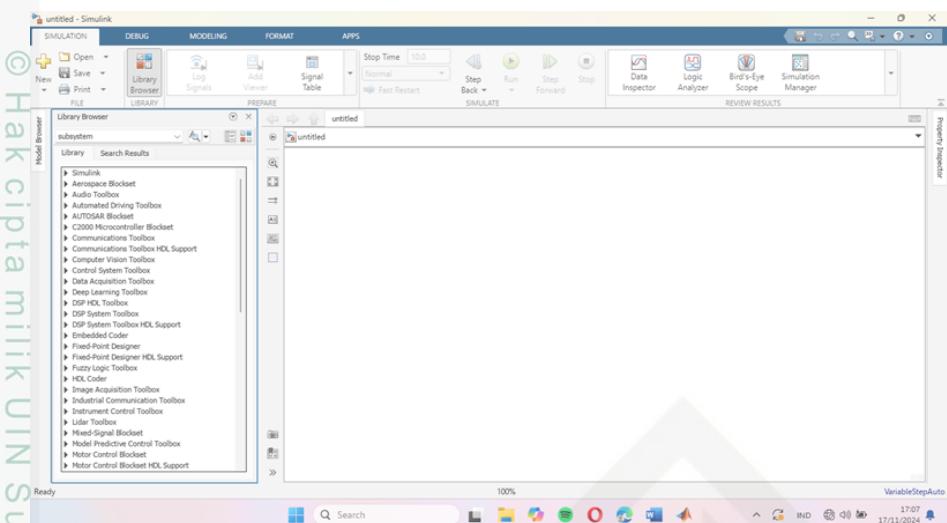
*Command History* adalah jendela yang berfungsi menyimpan perintah-perintah yang telah dijalankan sebelumnya oleh pengguna dalam MATLAB.

## Workspace

*Workspace* berfungsi untuk menampilkan semua variabel yang sedang aktif saat MATLAB digunakan. Jika terdapat variabel berupa data matriks besar, pengguna dapat melihat isi data tersebut dengan cara mengklik dua kali pada variabel tersebut. MATLAB secara otomatis akan menampilkan jendela "*Array Editor*" yang berisi data dari variabel yang dipilih[30].



Gambar 2.5 Tampilan *Window Matlab*



Gambar 2.6 Tampilan Simulink Matlab

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menambahkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang  
masalah

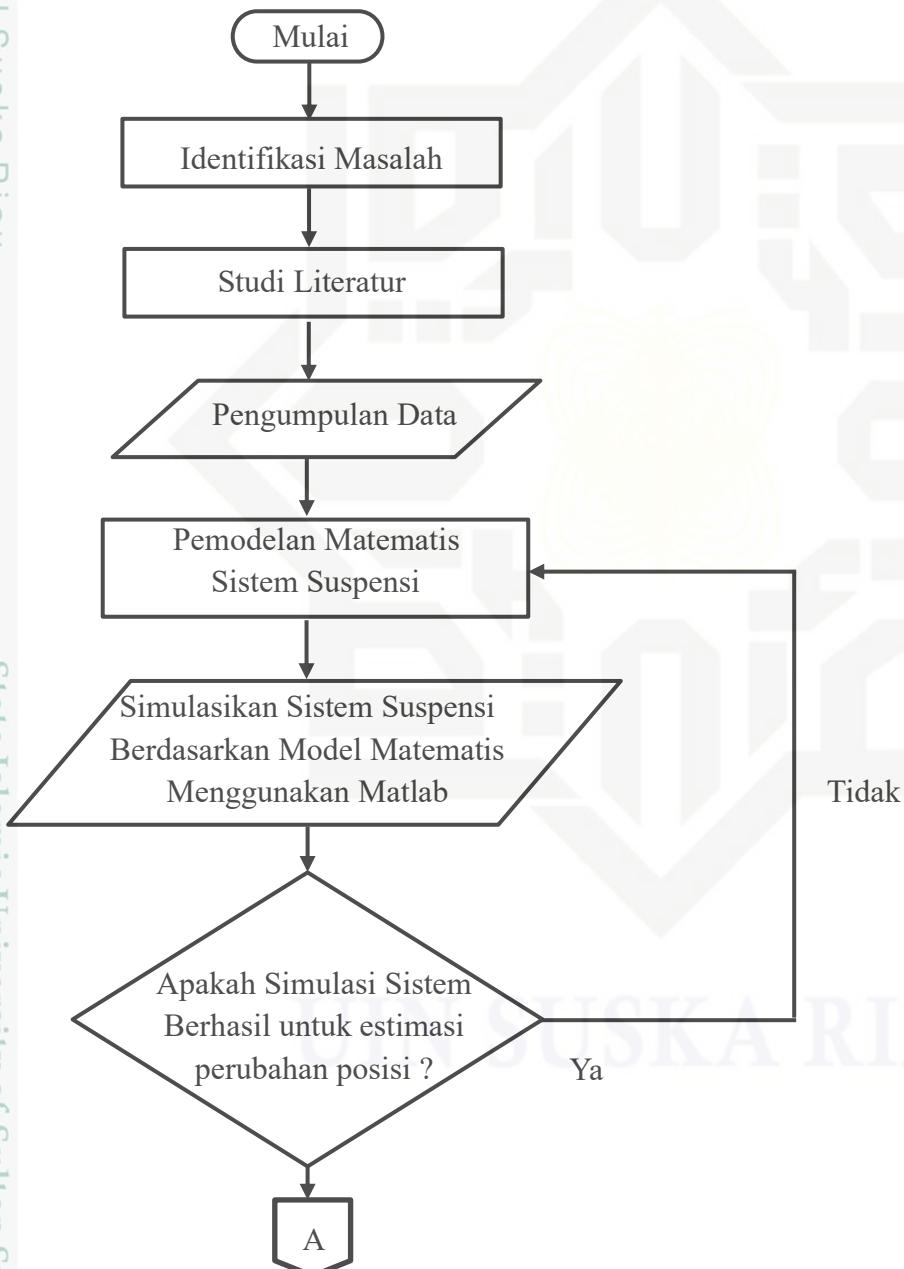
- 3.1.1.1.1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

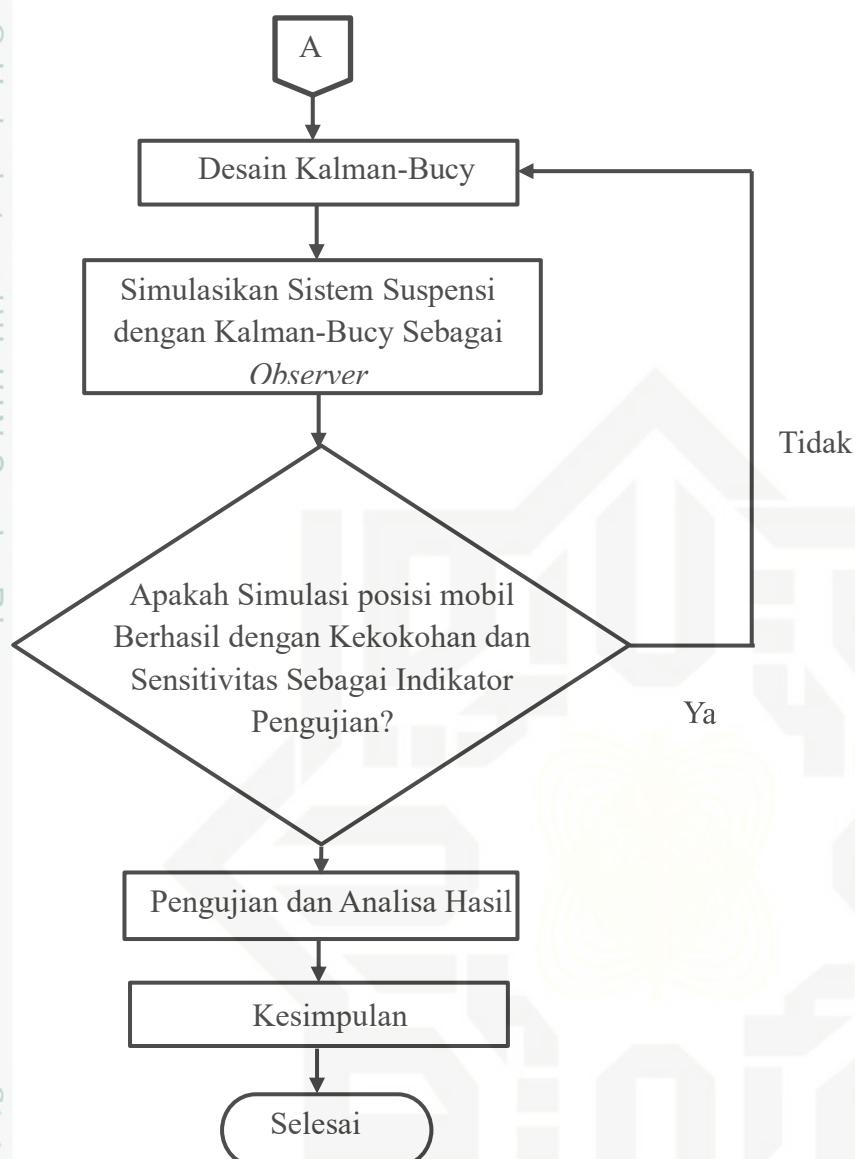
#### Proses Alur Penelitian

Beberapa tahapan utama penelitian tugas akhir ini yaitu penentuan judul, perumusan masalah, penetapan tujuan penelitian, pemodelan matematis dari sistem yang dikaji, serta proses perancangan. Alur penelitian tersebut dapat digambarkan melalui *flowchart* berikut :



## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.1 Flowchart Alur Penelitian

## 3.2

**Tahap Penelitian**

Adapun tahapan penelitian yang dilakukan penulis berdasarkan *flowchart* diatas sebagai berikut:

 1. **Identifikasi Masalah**

Melakukan identifikasi masalah pada sistem suspensi adalah langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Dimana pada sistem suspensi sering terdapat gangguan berupa getaran akibat jalanan yang tidak datar. Banyak pengendalian modern sudah diterapkan bahkan menggabungkan dua pengendali sekaligus, namun hasil nya masih terdapat *error* dan *overshoot*. Selain itu, pengendalian yang

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang****2.**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

**3.****4.**

digunakan masih tergantung dari hasil pengukuran sensor. Yang mana sensor memiliki akurasi yang terbatas. Oleh karena itu, dalam penelitian tugas akhir ini diajukan pendekatan baru yaitu Kalman-bucy sebagai *state observer* untuk estimasi pada sistem suspensi dan medukung atau bahkan menggantikan kinerja sensor.

**Studi Literatur**

Penulis memulai dengan melakukan studi literatur untuk mempelajari dan memahami berbagai penelitian terkait sistem suspensi, seperti buku, makalah, jurnal, dan referensi lainnya yang berkaitan dengan sistem suspensi, Kalman-Bucy, serta *observer*.

**Pengumpulan Data**

Dalam penelitian ini, data dari jurnal dan penelitian sebelumnya dikumpulkan untuk memperoleh model matematis sistem suspensi seperempat mobil dalam bentuk *state space* beserta parameter yang digunakan. Data yang telah dikumpulkan digunakan untuk pengujian pada sistem suspensi. Parameter yang diperoleh dari jurnal rujukan disajikan dalam Tabel 2.1.

**Pemodelan matematis sistem suspensi**

Melakukan penurunan model matematis pada sistem suspensi seperempat mobil adalah langkah selanjutnya yang dilakukan pada penelitian ini. Kemudian data parameter yang sudah dikumpulkan disubsitusikan kedalam model matematis untuk dilakukan pengujian menggunakan *software* matlab. Dimulai dari persamaan (2.1) hingga persamaan (2.13) didapatkan model matematis sistem suspensi. Model matematis diturunkan berdasarkan hukum Newton II pada persamaan (2.1). Pada persamaan (2.2) dan (2.3) didapatkan persamaan suspensi dalam bentuk diferensial, namun pada persamaan (2.3) ada gaya yang mempengaruhinya. Selanjutnya mengubah persamaan diferensial menjadi persamaan *state space* menggunakan rumus umum *state space* pada persamaan (2.4) dan (2.5) sehingga didapatkan persamaan *state space* pada persamaan (2.8) dan (2.9). Sehingga didapatkan matrik A, B, C, dan D pada persamaan (2.10), (2.11), (2.12) dan (2.13). Selanjutnya memasukkan nilai paramater pada tabel (2.1) pada persamaan (2.10) diperoleh matrik sistem suspesnsi seperempat mobil sebagai berikut

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -25 & -3.1250 & 25 & 3.1250 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 666.66 & 83.33 & -1.53333333333333e+03 & -83.33 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$D = 0 \quad (3.4)$$

Sehingga berdasarkan persamaan (2.14) dan (2.15) diperlukan penambahan *noise* pada sistem suspensi yaitu *noise state* ( $w$ ) dan *noise pengukuran* ( $v$ ) sebagai berikut

Persamaan *noise state* ( $w$ )

$$w = N \sim (0, Q) \quad (3.5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_w^2 (1,1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_w^2 (2,2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_w^2 (3,3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_w^2 (4,4) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0000000000000001e-04 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.260009931009575e-04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.35247626794305e-05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00327972821734079 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Persamaan *noise pengukuran* ( $v$ )

$$v = N \sim (0, R) \quad (3.8)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$R = [1.0000000000000001e-04] \quad (3.10)$$

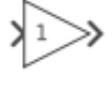
## 5. Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## Pengujian model matematis

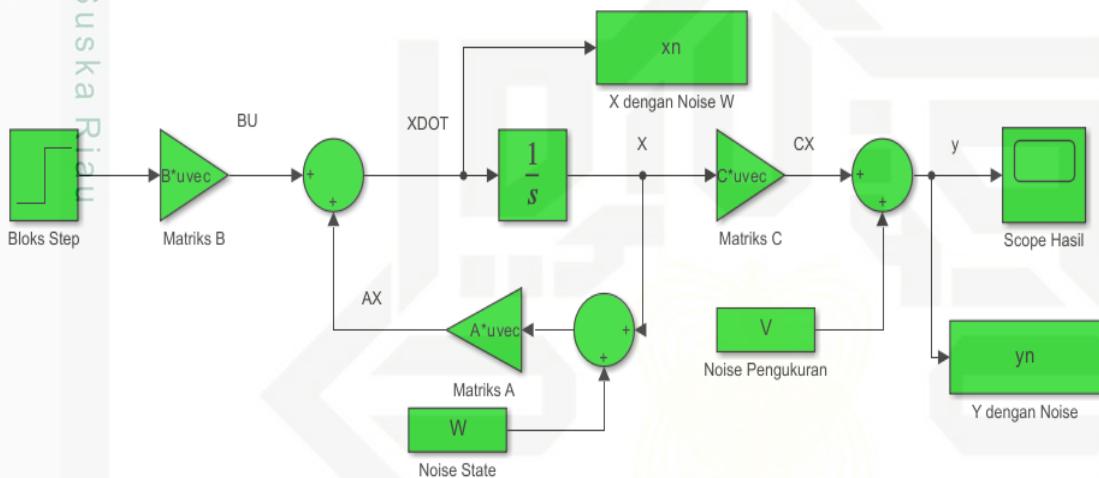
Tahap pengujian model matematis dalam bentuk *state space* ditunjukkan pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4) dimasukkan dalam algoritma pemograman dan *Simulink* matlab. Dilakukan pengujian untuk memastikan *output* yang dihasil sama dengan sumber atau referensi [7] yang digunakan. Kemudian berdasarkan persamaan umum *state space* dibentuk blok *Simulink* sistem suspensi secara *open loop*. Adapun blok *Simulink* yang digunakan sebagai berikut :

Tabel 3.1 Blok-Blok *Simulink*

Blok <i>Simulink</i>	Keterangan
	Blok <i>step</i> adalah elemen yang digunakan untuk menampilkan nilai <i>output</i> yang dihasilkan pada simulasi. <i>Step</i> menghasilkan nilai naik dari awal 0 ke nilai tertentu pada waktu tertentu.
	Blok <i>Scope</i> berguna untuk menampilkan nilai <i>input</i> atau sinyal berkaitan dengan waktu simulasi yang dilakukan.
	<i>Integrator</i> berperan untuk mengintegrasikan dari sinyal <i>input</i> secara <i>real time</i> . <i>Integrator</i> sering digunakan dalam pemodelan sistem dinamis untuk merepresentasikan elemen integratif dalam sistem.
	<i>Sum</i> adalah elemen yang berfungsi untuk menambahkan dan mengurangi dua atau lebih sinyal.
	Blok <i>gain</i> berperan sebagai pengali sinyal masukan suatu faktor <i>scalar</i> tertentu sebelum lanjut ke blok selanjutnya dalam <i>Simulink</i> .

 <b>© Hak cipta m ikUNI Suska Riau</b>	<p><i>To workspace</i> berfungsi untuk menyimpan hasil simulasi ataupun analisis sistem ke dalam <i>workspace</i> matlab yang berupa variabel, struktur data atau respon sistem yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut</p>
--	---

Berdasarkan persamaan *state space* pada (2.4) dan (2.5) dapat dibentuk blok diagram *Simulink* sistem suspensi secara *open loop* dengan menggunakan blok-blok *Simulink* pada tabel 3.1.



Gambar 3.2 Rangkaian *Simulink* Sistem Suspensi dengan *Open Loop*

Setelah mendesain sistem suspensi *open loop* dengan menggunakan *blok-blok Simulink*, selanjutnya dapat dituliskan algoritma pemrograman sistem suspensi *open loop* seperti dibawah ini:

Tabel 3.2 Algoritma Pemrograman Sistem Suspensi Secara *Open Loop*

**Algoritma pemrograman 1. Sistem suspensi secara *open loop***

1. Memberi nama program sistem\_suspensi\_ok
2. Membuat perintah `clc; clear all; close all;` (membersihkan *comand window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup jendela *figure* yang masih terbuka)
3. Mendefinisikan waktu: waktu mulai (`T_start`), waktu sampling (`T_S`) dan waktu akhir (`T_N`).
4. Mendefinisikan parameter sistem suspensi sesuai Tabel 2.1

5. Mendefinisikan matrik sistem sesuai persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4)

6. Mendefinisikan kondisi awal yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$

7. Memanggil *simulink* Matlab dengan nama “Simulasi\_suspensi”

8. Plot hasil keluaran sistem suspensi secara *open loop*

9. Menyimpan data sistem suspensi *open loop* dengan nama “datas\_sistem\_suspensi”

End

Tabel 3.2 adalah algoritma pemrograman dari sistem suspensi *open loop* yang belum ditambahkan *noise*. Selanjutnya, sebelum melakukan desain kalman-bucy dan melakukan simulasi sebagai *observer* perlu dibangun algoritma pemrograman *noise* terlebih dahulu. Hal ini sebagai pengujian kekokohan dan sistem *open loop* menggunakan kalman-bucy sebagai *observer*nya sudah terdapat *noise*. Berikut adalah algoritma pemrograman *noise* yaitu:

Tabel 3.3 Algoritma Pemrograman *Noise*

Algoritma pemrograman 2. Pemrograman *noise*

- Memberi pemograman dengan nama program *noise*
- Membuat perintah `clc; clear all; close all;` (membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
- Membuat “data\_sistem\_suspensi” yang telah disimpan pada pemograman 1 keruang kerja matlab.
- Mendefenisikan  $\sigma_w$  (*noise* untuk *state*) dengan  $\max(y_{\text{sistem}}) * 0.1$  atau (10%).
- Mendefenisikan  $\sigma_v$  (*noise* untuk pengukuran) dengan  $\max(x_{\text{sistem}}) * 0.1$  atau (10%).
- Mebangun signal random acak yaitu `rw` dan `rv`
- Ganguan acak `rw` dan `rv` tersebut dinormalisasi sehingga terdistribusi dengan rata-rata 0 dan varian 1.
- Hasil normalisasi dijumlahkan dengan masing-masing *noise*  $\sigma_w$  dan  $\sigma_v$
- Data *noise* di *save* dengan nama ‘datanoise’

End

Tabel 3.4 Algoritma Program Sistem *Open Loop* Ditambah *Noise*

Algoritma pemrograman 3. Pemrograman *main function*

1. Memberi pemograman dengan nama program *main function*
2. Membuat perintah clc; clear all; close all;(membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
3. Memuat data *\_sistem \_ suspensi* keruangan kerja matlab
4. Memuat data *noise* keruangan kerja matlab
5. Memanggil program *simulink* matlab dengan nama “*suspensi\_w\_v*”.
6. Plot hasil keluaran *yn* dan *xn* yaitu keluaran sistem sudah ada *noise*
7. *Save* data dengan nama “*data\_sistem\_noise*”

End

Tabel 3.4 adalah algoritma program dengan hasil keluaran sistem sudah terdapat *noise*, sehingga selanjutnya adalah mendesain kalman-bucy sebagai *observer*.

### 6. Desain Kalman-bucy sebagai *State Observer*

Dalam mendesain Kalman-Bucy, langkah pertama dilakukan yaitu mendefinisikan model *state space* dari sistem suspensi seperti persamaan (2.4) dan (2.5). Sehingga Matrik A, B, C, dan D dari sistem suspensi dapat dilihat Pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4). Langkah selanjutnya yang dapat dilakukan adalah mendefinisikan model *state space* kontinyu seperti persamaan (2.14) dan (2.15). Dimana pada persamaan (2.14) terdapat *noise*  $w(t)$  pada *state* dan pada persamaan (2.15) terdapat *noise*  $v(t)$  pada pengukuran. *noise* tersebut dirancang sebagai sinyal *gaussian white*

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

*noise*. Dimana  $Q$  adalah varian untuk  $noise$   $w(t)$  dan  $R$  adalah varian untuk  $noise$   $v(t)$ . Berdasarkan blok diagram Kalman-Bucy pada gambar 2.3 bahwa diperlukan sebuah sistem untuk merancang Kalman-Bucy sebagai *observer*. Yang mana sebuah sistem tersebut sudah dirancang berdasarkan *state space*, dapat dilihat pada persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4). Pada blok diagram Kalman-bucy pada gambar (2.3) terdapat  $Kf$  yang merupakan *gain* kalman-bucy atau istilah lain dikenal dengan sebagai matrik *gain* Kalman.  $Kf$  adalah matrik Kalman-Bucy yang digunakan untuk memperbarui estimasi keadaan sistem berdasarkan pengukuran.  $Kf$  diselesaikan dengan persamaan (2.17) dan (2.18).

Berikut langkah-langkah untuk mendapatkan *gain kf* dengan mendefenisikan algoritma berikut dalam matlab. Defenisikan matrik *observer* dengan nama seperti berikut

$$A\_obs = [A] \quad (3.11)$$

$$B\_obs = [B] \quad (3.12)$$

$$C\_obs = [C] \quad (3.13)$$

$$D\_obs = [D] \quad (3.14)$$

Setelah mendefenisikan matrik kalman-bucy sebagai *observer*, maka Adapun persamaan umum kalman *state estimator* dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Gw \quad (3.15)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) + Hw + v \quad (3.16)$$

Dimana  $[Bu(t) + Gw]$  diasumsikan sebagai matrik  $(BG)$ , dan matrik  $(DH)$  merupakan diasumsikan  $[Du(t) + Hw]$ . Sehingga matrik  $(BG)$  dan  $(DH)$  dapat dituliskan sebagai berikut

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$BG = \left[ B_{obs} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right] \quad (3.17)$$

$$DH = \left[ D_{obs} [0 \ 0 \ 0 \ 0] \right] \quad (3.18)$$

Sehingga dapat dituliskan sistem baru berdasarkan persamaan (3.13) dan (3.14) sebagai berikut ini:

$$sys\_kf = ss(A_{obs}, BG, C_{obs}, DH) \quad (3.19)$$

Kemudian untuk *gain Kf* dapat dicari dimana Q dan R sudah diketahui sebelumnya yaitu Q adalah *noise* pada sistem (*w*) dan R adalah *noise* pada pengukura (*v*) sehingga dihitung menggunakan matlab dengan persamaan berikut ini

$$[kalmf, Kf, p] = kalman(sys\_kf, Q, R) \quad (3.20)$$

Berikut adalah nilai Kf yang dapat

$$Kf = \begin{bmatrix} 0.5740 \\ -0.3352 \\ 0.2299 \\ 0.0658 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Setelah didapatkan *gain Kf*, selanjutnya dapat dirancang Kalman-bucy sebagai *state observer* berdasarkan persamaan (2.16) menggunakan blok-blok *simulink* pada Tabel 3.1. Berikut adalah tampilan dari rangkain blok diagram sistem suspensi dengan noise (*w*) dan (*v*) dan kalman-bucy sebagai *observer* yang telah dirancang menggunakan *Simulink* matlab adalah sebagai berikut:

## © Hak Cipta milik UIN Suska Riau

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

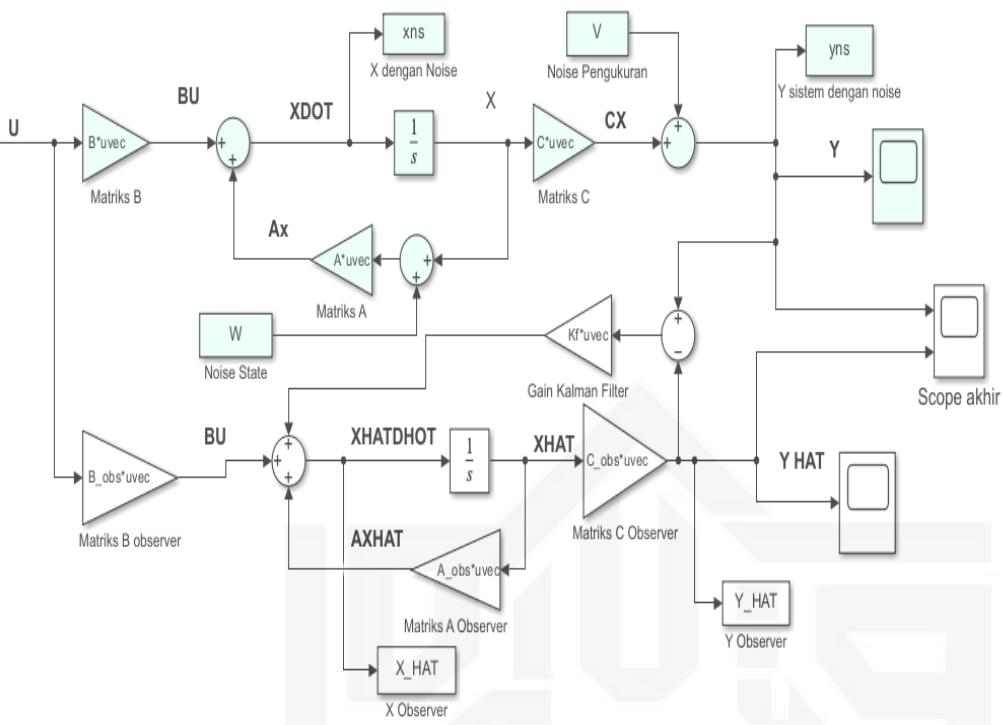
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

7.

Tabel 3.5 Pengujian Performansi Kalman-Bucy

NO	$m_1$	$m_2$	$k_1$	$k_2$	B	Gangguan	Noise
1.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	10 cm	10 %
2.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	9 cm	10 %
3.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	15 cm	10 %
5.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	-10 cm (lubang)	10 %



Gambar 3.3 Simulink Matlab Kalman-Bucy Sebagai State Observer

Gambar 3.3 adalah diagram *Simulink* matlab terdapat rangkaian sistem suspensi yang telah ditambahkan *noise* dan kalman-bucy sebagai *observer* untuk mengestimasi keluaran dari sistem. Selanjutnya yaitu simulasikan Kalman-Bucy yang telah dirancang.

### Simulasi Kalman-Bucy Sebagai State Observer dan Pengujian

Setelah Kalman-Bucy didesain, pada tahap ini dilakukan simulasikan sistem dengan Kalman-Bucy yang telah dirancang sebelumnya sebagai *observer*. Berikut tabel untuk pengujian performansi Kalman-Bucy dengan gangguan jalan yang berbeda berdasarkan parameter tabel 2.2.

Setelah pengujian performansi dilanjut pengujian kekokohan dan sensitivitas simulasi ini bertujuan untuk menguji kekokohan *observer* dalam mengestimasi sistem yang mengalami gangguan, serta menilai sensitivitas Kalman-Bucy sebagai *observer* pada sistem suspensi.

a. Pengujian kekokohan kalman-bucy dengan *noise*

Berikut adalah tabel parameter pengujian kekokohan Kalman-Bucy sebagai *observer* yang ditambahkan *noise*.

Tabel 3.6 Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan *Noise* [31]

NO	$m_1$	$m_2$	$k_1$	$k_2$	B	IC	Noise
1.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	[0.1; 0; 0; 0]	20 %
2.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	[0.1; 0; 0; 0]	30 %
3.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	[0.1; 0; 0; 0]	40%
4.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	[0.1; 0; 0; 0]	50 %

Tabel 3.6 menyajikan hasil pengujian kekokohan Kalman-Bucy sebagai *Observer*, yang dilakukan dengan menambahkan gangguan (*noise*) pada sistem. Adapun algoritma pengujian kekokohan Kalman-Bucy sebagai *observer* disajikan sebagai berikut

Tabel 3.7 Algoritma Kalman-Bucy Sebagai *Observer*

Algoritma pemrograman 4. Kekokohan Kalman-Bucy terhadap gangguan

1. Memberi nama program simulasi sistem suspensi dengan kalman-bucy sebagai *observer*
2. Membuat perintah `clc; clear all; close all;` (membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
3. Memuat data\_sistem\_suspensi keruangan kerja matlab
4. Memuat data noise keruangan kerja matlab
5. Membangun nilai Q dan R
6. Mendefinisikan kondisi awal sistem yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$ .
7. Mendefinisikan matriks Kalman-Bucy sebagai *state observer*
8. Mendefinisikan gain Kalman ( $k_f$ )

9. Mendefenisikan kondisi awal *observer* yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$ .

10. Memanggil program *simulink* matlab dengan nama “SUSPENSIOSERVERfix”

11. Plot untuk melihat respon keluaran Kalman-Bucy sebagai *observer*

End

Tabel 3.7 adalah algoritma pemrograman Kalman-Bucy sebagai *observer* dengan kondisi awal  $[0.1; 0; 0; 0]$ . Kemudian selanjutnya dilakukan Pengujian terhadap perubahan kondisi awal sebagai pengujian sensitivitas.

b. Perbedaan kondisi awal sebagai pengujian sensitivitas

Selanjutnya dilakukan pengujian perubahan atau perbedaan kondisi awal untuk menguji sensitivitas Kalman-Bucy sebagai *observer*. Adapun tabel pengujian adalah sebagai berikut berdasarkan parameter tabel 2.1 dan tabel 2.2 sebagai berikut

Tabel 3.8 Pengujian Sensitivitas Kalman-Bucy dengan Perbedaan Kondisi Awal

NO	$m_1$	$m_2$	$k_1$ dan $k_2$	B	I_C Sistem	I_C Observer	Noise
1.	400 kg	15 kg	2500 N/m 3250 N/m	1250 N/m	[0; 0; 0; 0]	[0.1; 0; 0; 0]	10 %
2.	400 kg	15 kg	2500 N/m 3250 N/m	1250 N/m	[0.1; 0; 0; 0]	[0; 0; 0; 0]	10%
3.	400 kg	15 kg	2500 N/m 3250 N/m	1250 N/m	[0; 0; 0; 0]	[0.2; 0; 0; 0]	10%
4.	400 kg	15 kg	2500 N/m 3250 N/m	1250 N/m	[0.2; 0; 0; 0]	[0; 0; 0; 0]	10%

Tabel 3.8 menunjukkan pengujian sensitivitas terhadap perbedaan kondisi awal antara sistem dan *observer*. Pengujian ini dilakukan berdasarkan algoritma yang dirancang khusus untuk mengevaluasi pengaruh variasi kondisi awal tersebut, berikut adalah algoritma pemrogramannya.

1. Dilarang mengujip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mendapat izin dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

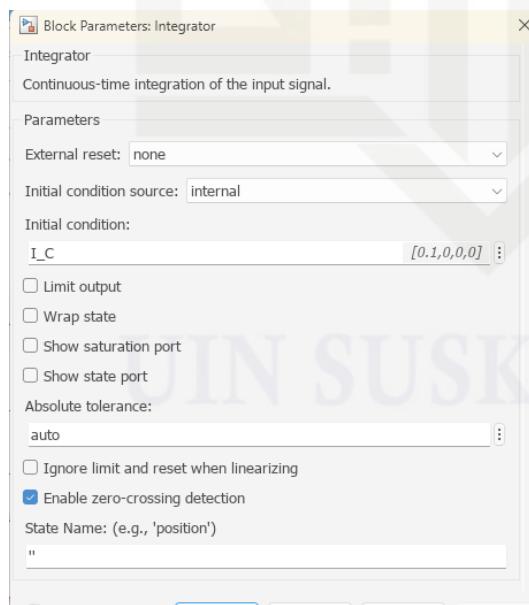
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Tabel 3.9 Pengujian Sensitivitas Terhadap Perbedaan Kondisi Awal

Algoritma pemrograman 5. Pengujian sensitivitas terhadap perbedaan kondisi awal

1. Memberikan nama program simulasi sistem suspensi dengan kalman-bucy sebagai *observer*
2. Membuat perintah `clc; clear all; close all;` (membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
3. Memuat data\_sistem\_suspensi ke ruang kerja matlab
4. Memuat data noise ke ruang kerja matlab
5. Mendefenisikan kondisi awal sistem yang dimulai dari  $[0; 0; 0; 0]$ .
6. Memuat data *noise v* dan *w* dengan nama “datanoise” ke ruang kerja matlab
7. Mendefinisikan matriks Kalman-Bucy sebagai *state observer*
8. Mendefinisikan gain Kalman (*kf*)
9. Mendefenisikan kondisi awal *observer* yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$ .
10. Memanggil program *simulink* matlab dengan nama “SUSPENSIOBSEVER”
11. Plot untuk melihat respon keluaran Kalman-Bucy sebagai *obsever*

*end*


 Gambar 3.4 Kondisi Awal Sistem  $[0.1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 

1. Dilarang mengutip sebagai sumber:  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan sumber:  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Gambar 3.4 adalah tampilan blok *step* pada *Simulink* untuk pengujian sensitivitas terhadap perbedaan kondisi awal. Dimana pada sistem diberi kondisi awal  $[0;0;0;0]$ . Setelah merubah kondisi awal pada algoritma pemograman, maka *run* algoritma pemograman 5 pada matlab untuk melihat keluaran Kalman-bucy dengan kondisi awal  $[0.1;0;0;0]$ .

c. Pengujian kalman-bucy terhadap perubahan massa mobil

Berikut adalah tabel pengujian untuk perubahan massa mobil. Dimulai dari massa mobil kosong, setengah penumpang sampai dengan kapasitas penuh yang berdasarkan parameter pada tabel 2.1.

Tabel 3.10 Pengujian Perubahan Massa Mobil

NO	$m_1$	$m_2$	$k_1$	$k_2$	B	IC	Noise
1.	400 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	$[0.1; 0; 0; 0]$	10 %
4.	500 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	$[0.1; 0; 0; 0]$	10%
5.	600 kg	15 kg	2500 N/m	3250 N/m	1250 N/m	$[0.1; 0; 0; 0]$	10%

Tabel 3.10 adalah pengujian sensitivitas terhadap perubahan massa mobil.

Sehingga Adapun algoritma pemrogramannya adalah sebagai berikut:

Tabel 3.11 Algoritma Pengujian Terhadap Perubahan Massa Mobil

**Algoritma pemrograman 6. Pengujian perubahan massa mobil**

- Memberikan nama program simulasi suspensi dengan kalman-bucy sebagai *observer*
- Membuat perintah `clc; clear all; close all;` (membersihkan *command window*, menghapus variabel di *baseworkspace* dan menutup semua jendela *figure* terbuka)
- Memuat datasistem ke ruang kerja matlab
- Memuat datanoise kerueng kerja matlab
- Mendefenisikan kondisi awal sistem yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$ .
- Memuat data *noise* v dan w dengan nama “datanoise kerueng kerja matlab
- Mendefinisikan matriks Kalman-Bucy sebagai *state observer*
- Mendefinisikan gain Kalman (*kf*)
- Mendefinisikan kondisi awal *observer* yang dimulai dari  $[0.1; 0; 0; 0]$ .

---

10. Memanggil program *simulink* matlab dengan nama “SUSPENSIOBSEVER”

---

11. Plot untuk melihat respon keluaran Kalman-Bucy sebagai *obsever*

*end*

### Analisa hasil

Ketika telah melakukan perancangan dan disimulasikan pengujian dilakukan, langkah berikutnya adalah menganalisis hasil pengujian tersebut. Analisis hasil dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi telah memenuhi tujuan yang diharapkan. Tujuan utama adalah memastikan bahwa Kalman-Bucy sebagai *obsever* mampu mengestimasi sistem meskipun terdapat gangguan dan memberikan estimasi yang baik terhadap sistem, meskipun terjadi berbagai macam perubahan.

### Kesimpulan

Selanjutnya ketika seluruh tahapan selesai dilaksanakan dan menunjukkan hasil evaluasi bahwa penelitian menggunakan Kalman-Bucy sebagai *state estimator* telah berhasil disimulasikan mampu mengikuti keadaan sistem, maka dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian ini tercapai. Kesimpulan tersebut juga dapat mempertegas gagasan yang dikemukakan dan menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

8. Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *observer* Kalman-Bucy menunjukkan performansi yang baik, dengan karakteristik yang sensitif sekaligus kokoh terhadap gangguan. Hal ini dibuktikan melalui serangkaian pengujian terhadap berbagai jenis gangguan permukaan jalan, yang merujuk pada Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 14 Tahun 2021 tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 48 Tahun 2018 mengenai alat pengendali dan pengaman pengguna jalan, seperti *speed bump*, *speed hump*, dan lubang jalan.

Selain itu, pengujian kekokohan dilakukan dengan menambahkan gangguan acak berupa *Gaussian white noise* pada sistem (*noise*, *w*) dan pengukuran (*noise*, *v*) dengan tingkat variasi sebesar 20% hingga 50%. Pengujian sensitivitas juga dilakukan terhadap variasi kondisi awal sistem, mulai dari [0; 0; 0; 0] hingga [0.2; 0; 0; 0], serta variasi massa kendaraan dalam rentang 400 kg hingga 600 kg.

Hasil dari seluruh pengujian menunjukkan bahwa Kalman-Bucy mampu mengestimasi posisi kendaraan secara konsisten meskipun terdapat berbagai jenis gangguan dan perubahan parameter sistem. Dengan demikian, secara keseluruhan, Kalman-Bucy terbukti memiliki performansi yang andal dan efektif sebagai *state observer* pada sistem suspensi seperempat mobil, dengan tingkat kekokohan yang tinggi terhadap *noise*, sensitivitas terhadap variasi kondisi awal dan variasi massa mobil, serta akurasi estimasi yang tetap terjaga.

## Saran

Penelitian ini hanya dilakukan secara *open loop*, sehingga pada penelitian selanjutnya dapat dipasang pengendali seperti PID atau *Fuzzy* untuk meningkatkan performa sistem secara keseluruhan. Selain itu, penelitian ini hanya menggunakan model seperempat mobil, sehingga penelitian selanjutnya perlu melakukan pengujian lebih lanjut pada sistem suspensi penuh (*full car model*) untuk menunjukkan performa Kalman-Bucy pada sistem dengan kompleksitas yang lebih tinggi dan representasi kendaraan yang lebih nyata.

## DAFTAR PUSTAKA

- © Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang [11]  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber: [12]  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah. [13]  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau. [14]  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau. [15]
- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang [16]  
[17]
- [18]
- [19]
- [20]
- [21]
- [22]
- [23]
- [24]
- [25]
- [26]
- [27]
- [28]
- [29]
- [30]
- [31]
- [32]
- [33]
- [34]
- [35]
- [36]
- [37]
- [38]
- [39]
- [40]
- [41]
- [42]
- [43]
- [44]
- [45]
- [46]
- [47]
- [48]
- [49]
- [50]
- [51]
- [52]
- [53]
- [54]
- [55]
- [56]
- [57]
- [58]
- [59]
- [60]
- [61]
- [62]
- [63]
- [64]
- [65]
- [66]
- [67]
- [68]
- [69]
- [70]
- [71]
- [72]
- [73]
- [74]
- [75]
- [76]
- [77]
- [78]
- [79]
- [80]
- [81]
- [82]
- [83]
- [84]
- [85]
- [86]
- [87]
- [88]
- [89]
- [90]
- [91]
- [92]
- [93]
- [94]
- [95]
- [96]
- [97]
- [98]
- [99]
- [100]
- G. L. S. S. Vius, "Desain Pengendali Model *Reference Adaptive Control (MRAC)-PID* Untuk Mengendalikan Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2019.
- E. Asfa'ani, A. R. Sari, and L. H. Hasibuan, "Aplikasi Metode Kendali LQR (*Linier Quadratic Regulator*) pada Sistem Suspensi Seperempat Mobil," *Jostech Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 49-62, 2024.
- M. F. Fahmi and D. T. Laksono, "Simulasi Kendali Sistem Suspensi Aktif Kendaraan Roda Empat Menggunakan Metode *Full State Feedback* dan PID," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 9, no. 3, pp. 125-129, 2022.
- A. Faizal, E. Safitri, and R. Kurniawan, "Pengendalian Suspensi Kendaraan menggunakan Pengendali *Sliding Mode Control* dan *Proposional Integral Derivative*," *Jurnal Ecotype (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 9, no. 1, pp. 49-56, 2022.
- E. I. Halawa and J. H. Panggabean, "Simulasi Sistem Suspensi Mobil Menggunakan *Magnetorheological* Sebagai Peredam," *Jurnal Einstein*, vol. 6, pp. 29-35, 2018.
- S. S. Edie, "Desain Dan Analisis Kendali Sistem Suspensi Menggunakan Pid Dan Logika Fuzzy Dengan *Simulink Matlab*," *Unnes Physics Journal*, vol. 4, no. 1, 2015.
- F. Arifin, "Perancangan dan Simulasi Sistem Suspensi Mobil Berbasis Kendali Optimal," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 4, no. 3, pp. 201-210, 2006.
- M. Zoni and A. Arzul, "Perancangan *Full Order Observer* Pada Sistem Sliding Mode Control Untuk Mengatasi *Anti-Windup* Berbasis LMI," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro UIN Sunan Gunung Djati Bandung*, 2018, pp. 1-12.
- S. Sovi Pebriani, "Performasi Estimasi Kecepatan Motor DC Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai *State Obserever*, Skripsi," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
- C. M. Ho and K. K. Ahn, "Observer based adaptive neural networks fault-tolerant control for pneumatic active suspension with vertical constraint and sensor fault," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 5, pp. 5862-5876, 2022.

- [11] Hak Cipta Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menitumkan da menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- [12] Undang-Undang
- [13] 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa menitumkan da menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
- [14]
- [15]
- [16]
- [17]
- [18]
- [19]
- [20]
- [21]
- T. M. Hung and V. V. Tan, "Designing a Kalman–Bucy State Estimator for a Full Vertical Car Model," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2023, no. 1, p. 6941084, 2023.
- B. W. Harini, "Comparison of Two DC Motor Speed Observers on Sensorless Speed Control Systems," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 11, no. 4, pp. 267-273, 2022.
- A. Setiawan, "Pengembangan *Observer* untuk Pendekslan Kecepatan Brushed DC Generator NC475." *Elektronik Jurnal Arus Elektro Indonesia (eJAEI)*, vol. 2, no. 2, pp. 23–28, 2015.
- N. Kurnia Apriyanti, "Performansi Estimasi Kecepatan Sistem Motor Direct Current Menggunakan Luenberger *Observer*, Skripsi, " Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
- I. Hudati, N. I. Wijayakusuma, A. Y. Ismail, A. A. P. Barus, and H. Budianto, "Kontrol motor dc dengan kendali *linear quadratic regulator* dan filter kalman menggunakan gui matlab," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023.
- G. Sugumaran, "An extended Kalman-Bucy filter for state of charge estimation of 2-RC network modelled Li-ion battery," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 6, p. 100362, 2023.
- E. Listijorini, S. Susilo, S. Ula, R. R. Ananda, and H. Haryadi, "Modeling And Dynamic Analisys Of Vehicle Suspension Based On State Space Variable," *Timer: Trends in Mechanical Engineering Research*, vol. 1, no. 2, pp. 66-70, 2023.
- H. Hendrianto, I. Haryanto, and T. Prahasto, "Analisis Performa Suspensi Mobil Sedan Pada Saat Cornering Melalui Metode *Multibody Dynamics* ()," *Jurnal Teknik mesin*, vol. 11, no. 4, pp. 79-86, 2023.
- S. Sunarno and R. Rohmad, "Simulasi dan Analisis Respon Fuzzy Logic Controller Pada Sistem Suspensi," *Jurnal Fisika*, vol. 5, no. 2, 2015.
- D. E. ASRY, "Perancangan Model Predictive Control (MPC) Untuk Mengendalikan Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan, Skripsi, " Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2022.
- O. Store. "Ukuran Ban OEM Mobil Toyota." <https://otomax.store/id/pages/ukuran-ban-oem-mobil-toyota>. (accessed 29 april 2025).

[22]

Hak Cipta

Dilindungi

[23]

Dilang

dang

[24]

dang

[25]

dang

[26]

dang

[27]

dang

[28]

dang

[29]

dang

[30]

dang

[31]

dang

[32]

dang

[33]

dang

[34]

dang

[35]

dang

[36]

dang

[37]

dang

[38]

dang

[39]

dang

[40]

dang

[41]

dang

[42]

dang

[43]

dang

[44]

dang

[45]

dang

[46]

dang

[47]

dang

[48]

dang

[49]

dang

[50]

dang

[51]

dang

[52]

dang

[53]

dang

[54]

dang

[55]

dang

[56]

dang

[57]

dang

[58]

dang

[59]

dang

[60]

dang

[61]

dang

[62]

dang

[63]

dang

[64]

dang

[65]

dang

[66]

dang

[67]

dang

[68]

dang

[69]

dang

[70]

dang

[71]

dang

[72]

dang

[73]

dang

[74]

dang

[75]

dang

[76]

dang

[77]

dang

[78]

dang

[79]

dang

[80]

dang

[81]

dang

[82]

dang

[83]

dang

[84]

dang

[85]

dang

[86]

dang

[87]

dang

[88]

dang

[89]

dang

[90]

dang

[91]

dang

[92]

dang

[93]

dang

[94]

dang

[95]

dang

[96]

dang

[97]

dang

[98]

dang

[99]

dang

[100]

dang

[101]

dang

[102]

dang

[103]

dang

[104]

dang

[105]

dang

[106]

dang

[107]

dang

[108]

dang

[109]

dang

[110]

dang

[111]

dang

Astro Wheels. "Ukuran Standar Ban Mobil." <https://astrowheels.com/ukuran-standar-ban-mobil/>. (accessed 29 april 2025).

S. Sunarso, M. P. Bilyastuti, and E. Andayani, "Evaluasi kebijakan larangan pemasangan polisi tidur (Speed bump dan speed hump) di Kabupaten Ponorogo," *JIIP-Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, vol. 5, no. 12, pp. 5626-5631, 2022.

G. ARIEL, "Aplicación y Comparación de Controladores LQR, LQG y de Observar de Estados en Suspensi' on deVeh' iculos," 2024.

A. N. Tuan, "Real-time estimation of vehicle inertia parameters based on Kalman-bucy filter," *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, vol. 75, no. 4, pp. 1593-1603, 2024.

A. Gunadi, "Pengurangan Noise Pada Citra Digital Menggunakan Filter Aritmatik Mean, Harmonik Mean, Gaussian, Max, Min, Dan Median Dengan Membandingkan PSNR," *Jurnal Ilmu Komputer Indonesia*, vol. 5, no. 2, pp. 34-44, 2020.

F.-I. Chou, "Optimal design of Luenberger reduced-order observer with low sensitivity for linear multivariable systems," *Measurement and Control*, vol. 57, no. 6, pp. 806-812, 2024.

F. Fito Alfarido, "Performansi Luenberger Observer dalam Mengestimasi Level pada Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), Skripsi," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.

Y. Yudhi Fariztian, "Performansi Luenberger Observer dalam Mengestimasi Konsentrasi pada Continuoius Stirred Tank Reactor (CSTR), Skripsi," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.

L. Yuniahastuti, "Pemograman Matlab Aplikasi pada bidang Elektro," ed: UNIPMA Press, 2021.

A. S. Yunata, A. Halim, and H. Luthfiyah, "Analisis Pengaruh Noise pada Performance K-Nearest Neighbors Algorithm dengan Variasi Jarak untuk klasifikasi Beban Listrik," *Elkomika: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 12, no. 3, p. 745, 2024.

UIN SUSKA RIAU

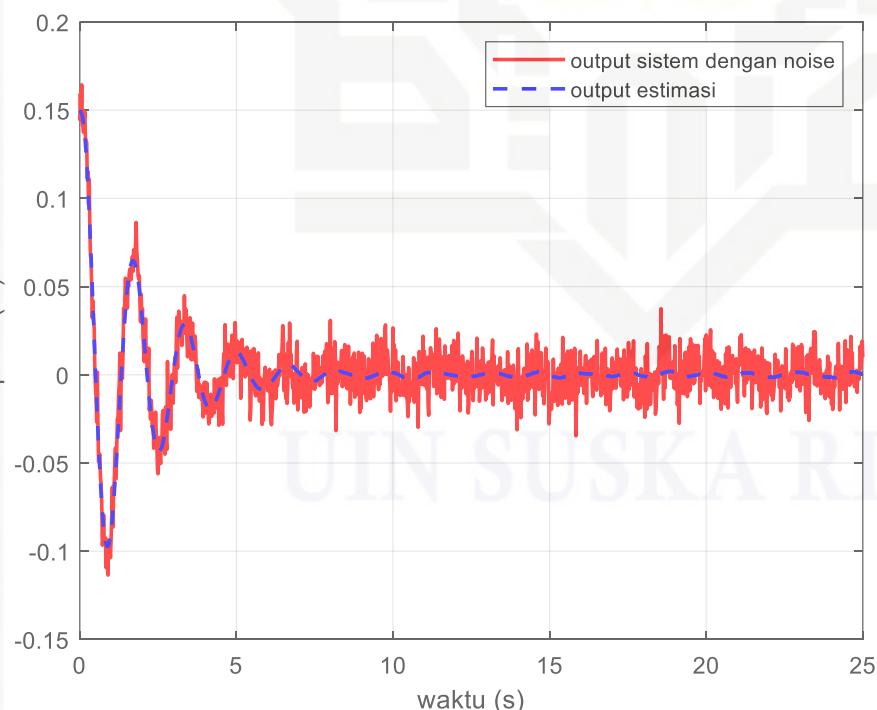
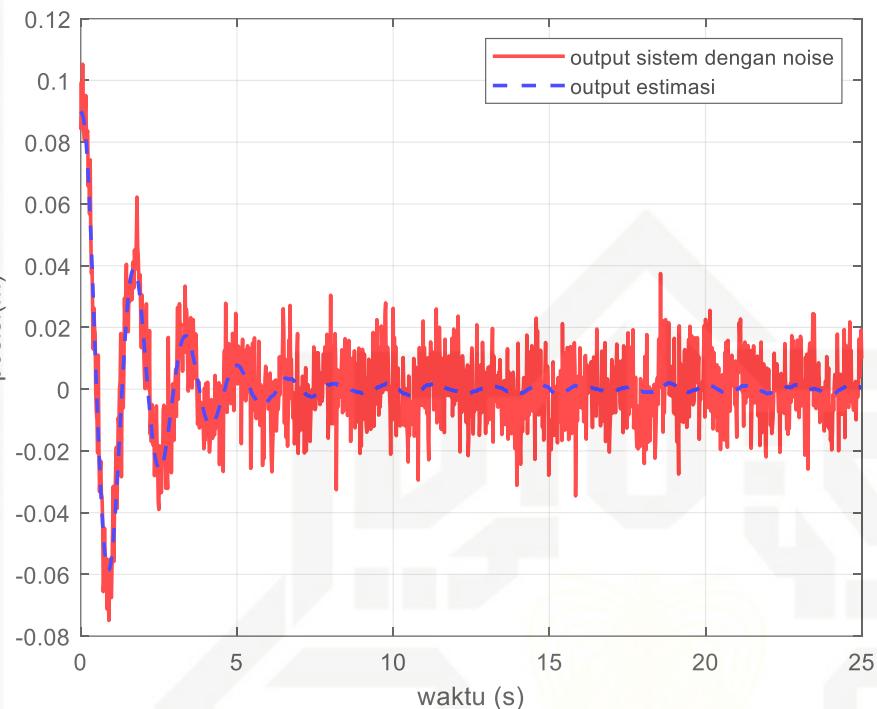
## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

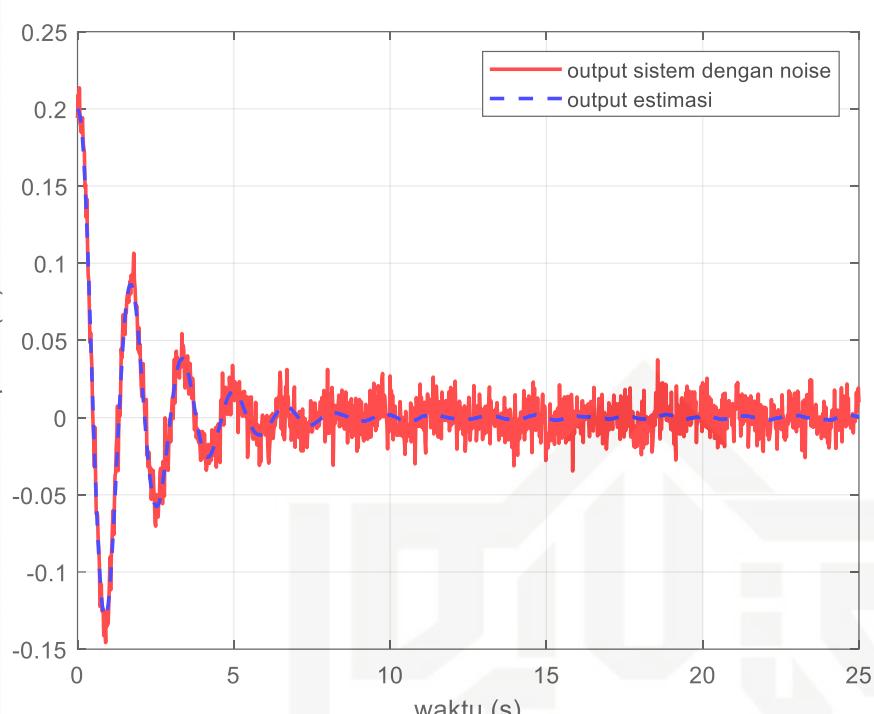
## LAMPIRAN A

### PENGUJIAN PERFORMANSI KALMAN-BUCY



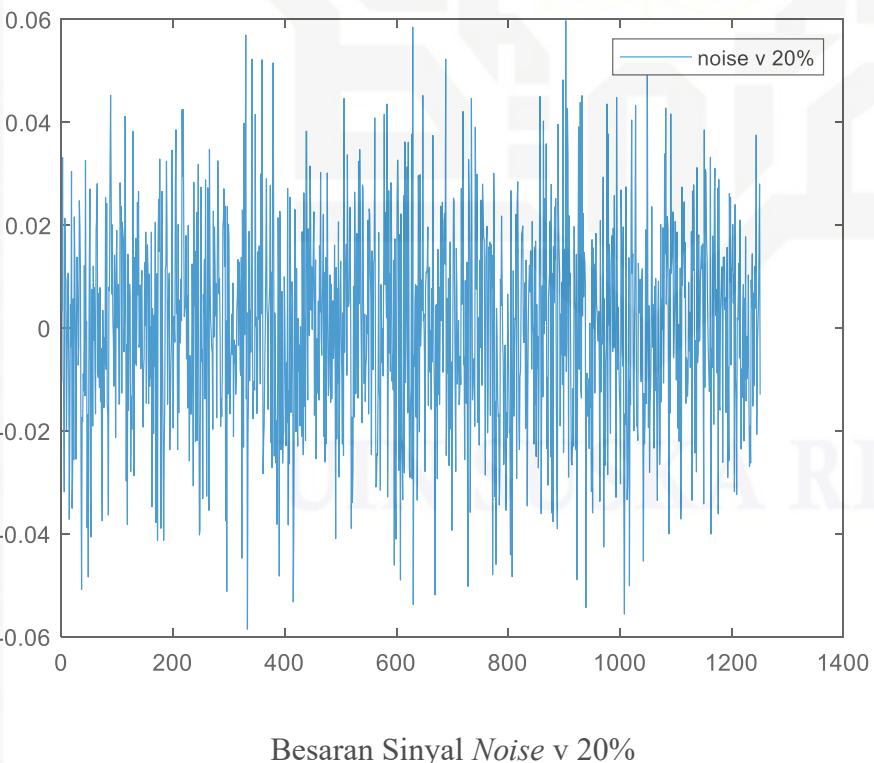
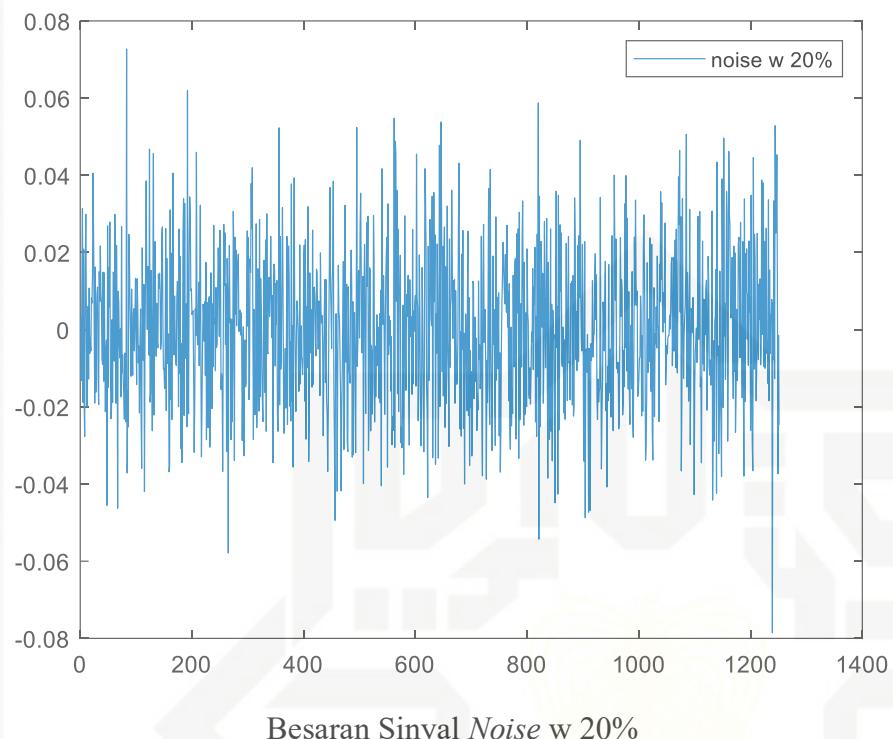
**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

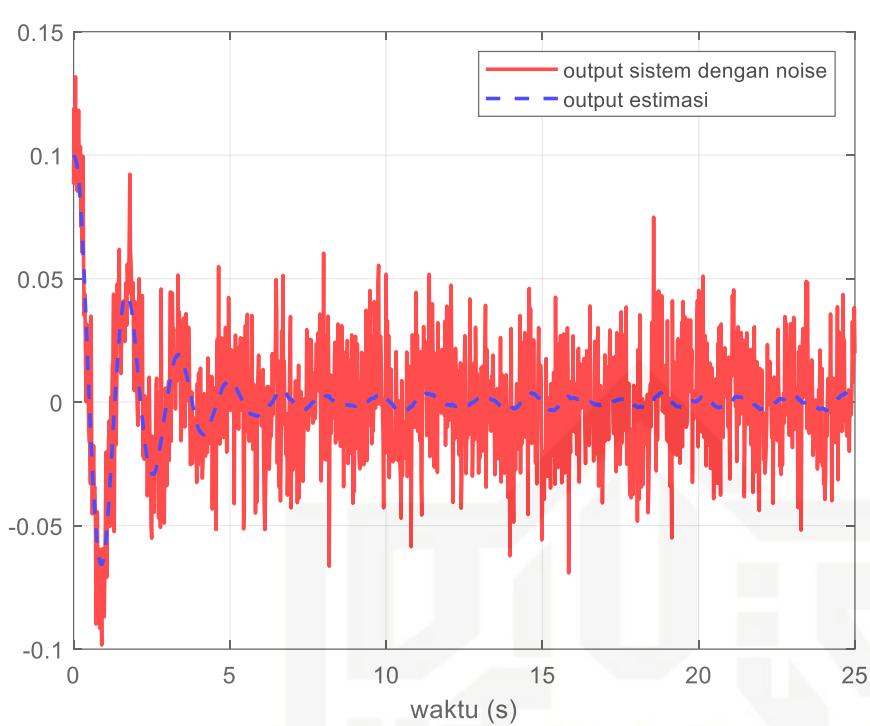
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

**LAMPIRAN B**  
**PENGUJIAN KEKOKOHAN KALMAN-BUCY**

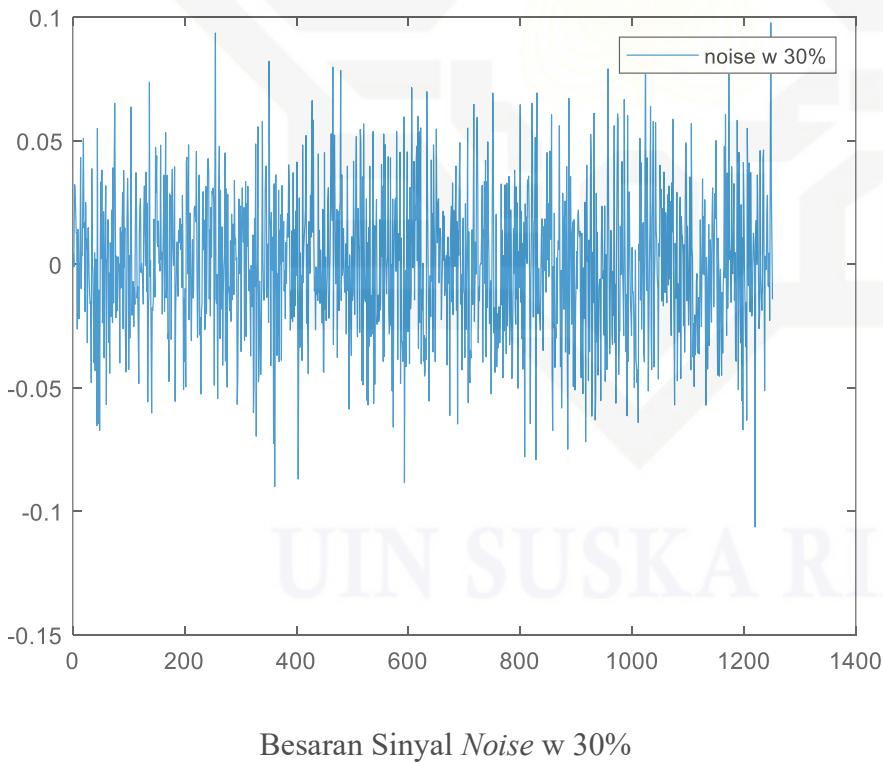
**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hasil Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan Noise 20%



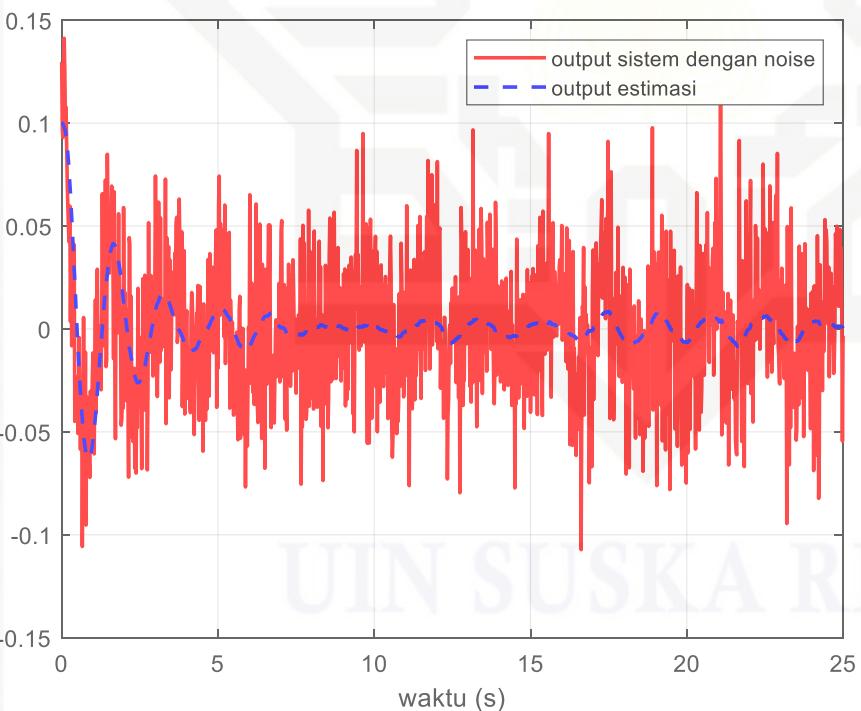
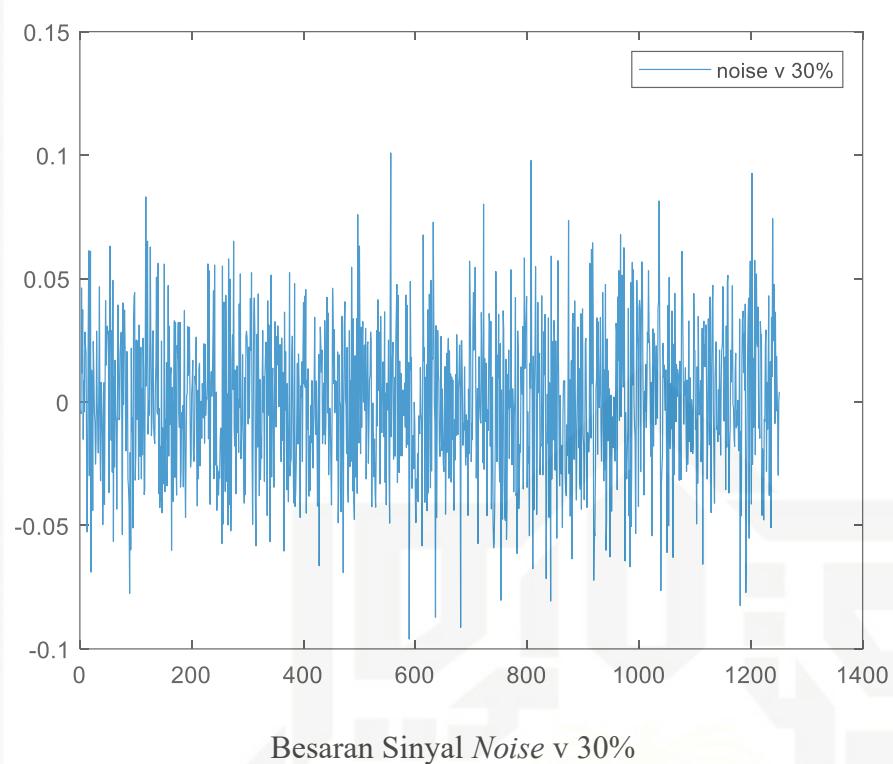
Besar Sinyal Noise w 30%

## © Hak cipta milik UIN Suska Riau

## Stat (w)lsisodic University of Sultan Syarif Kasim Riau

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

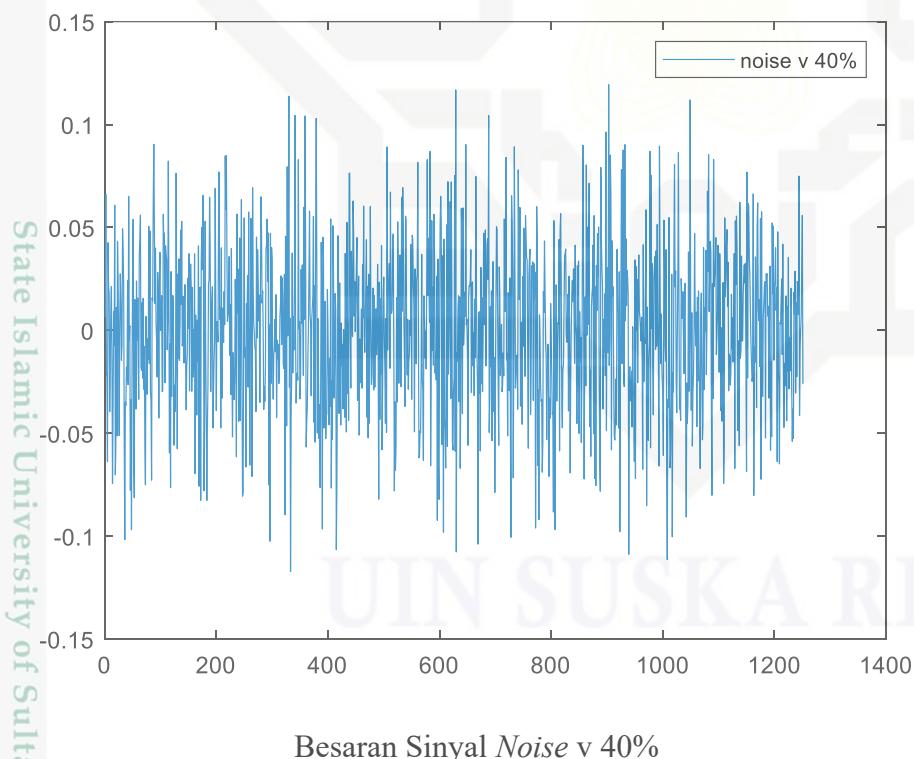
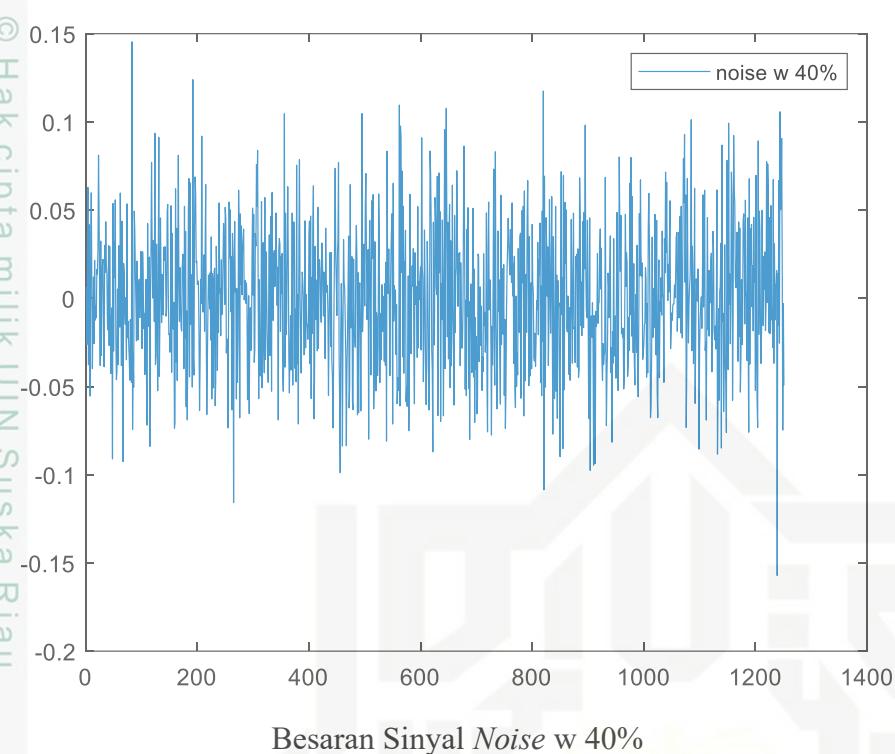


Hasil Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan Noise 30%

## © Hak cipta milik UIN Suska Riau

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

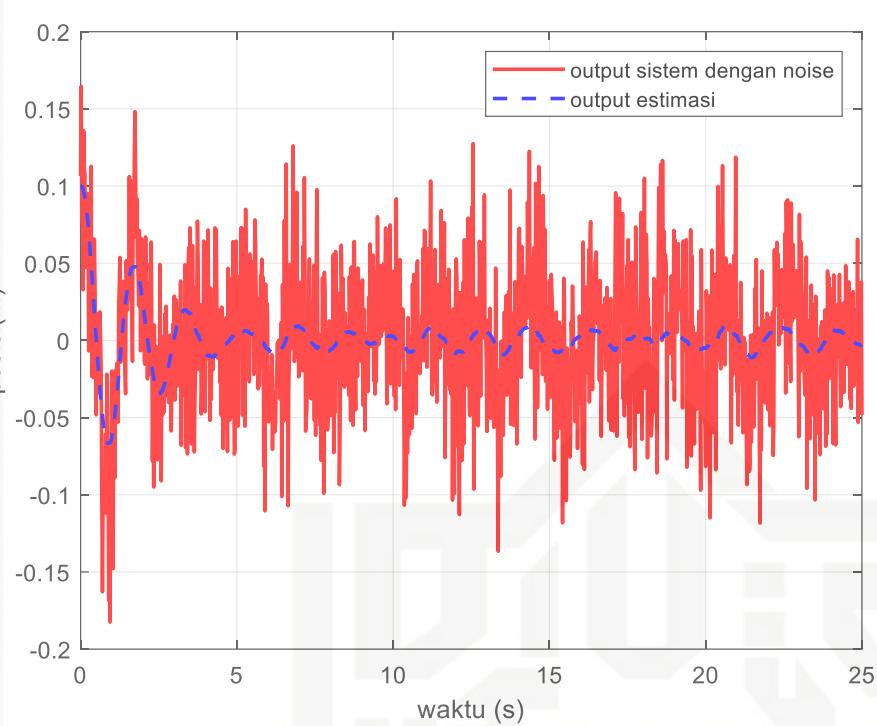
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



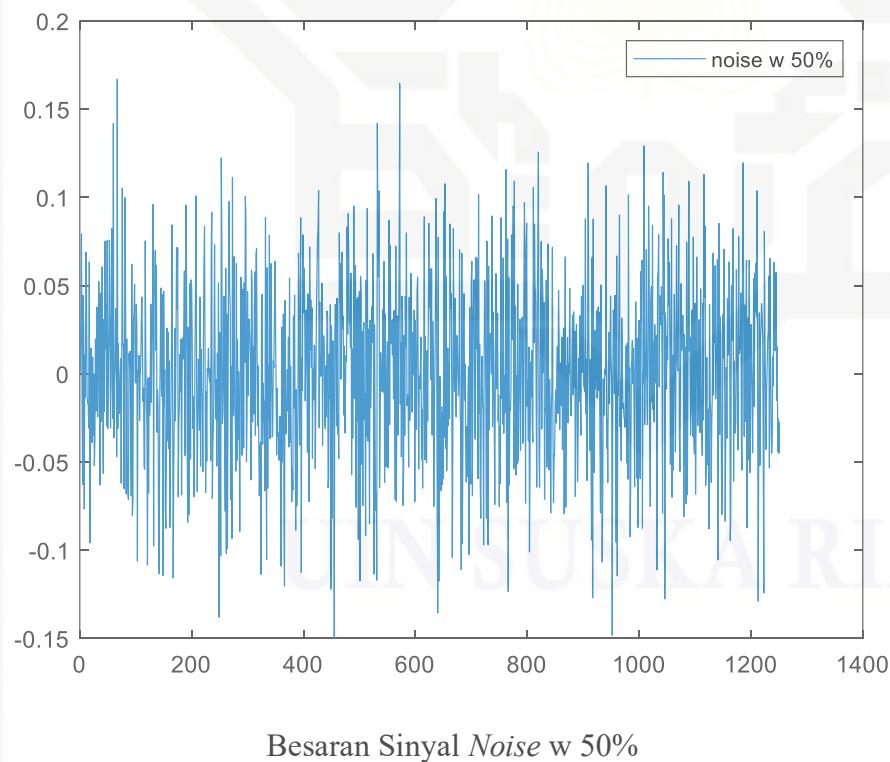
## State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hasil Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan Noise 40%



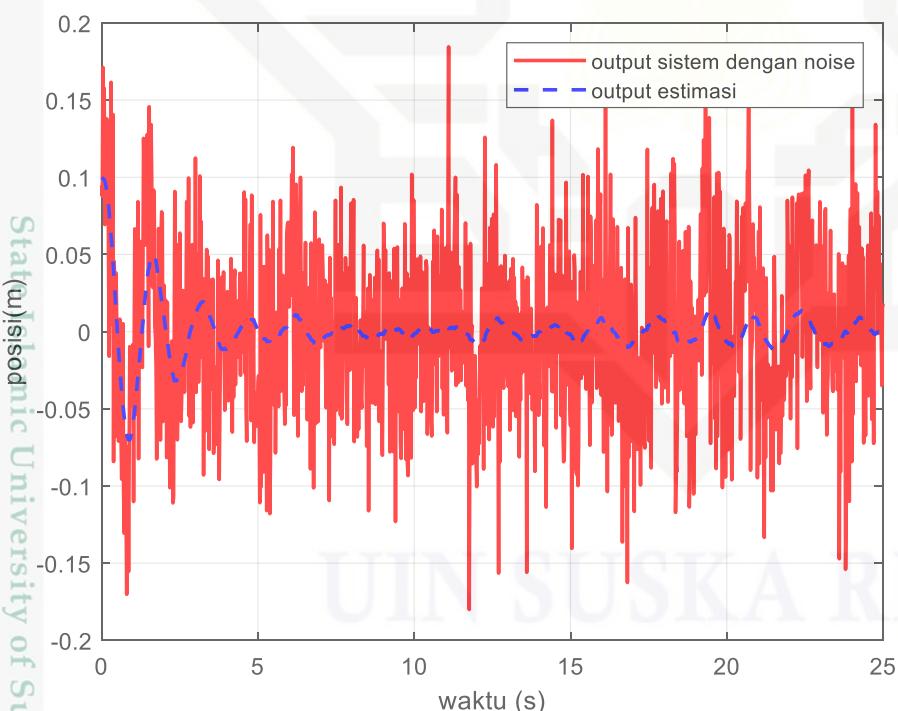
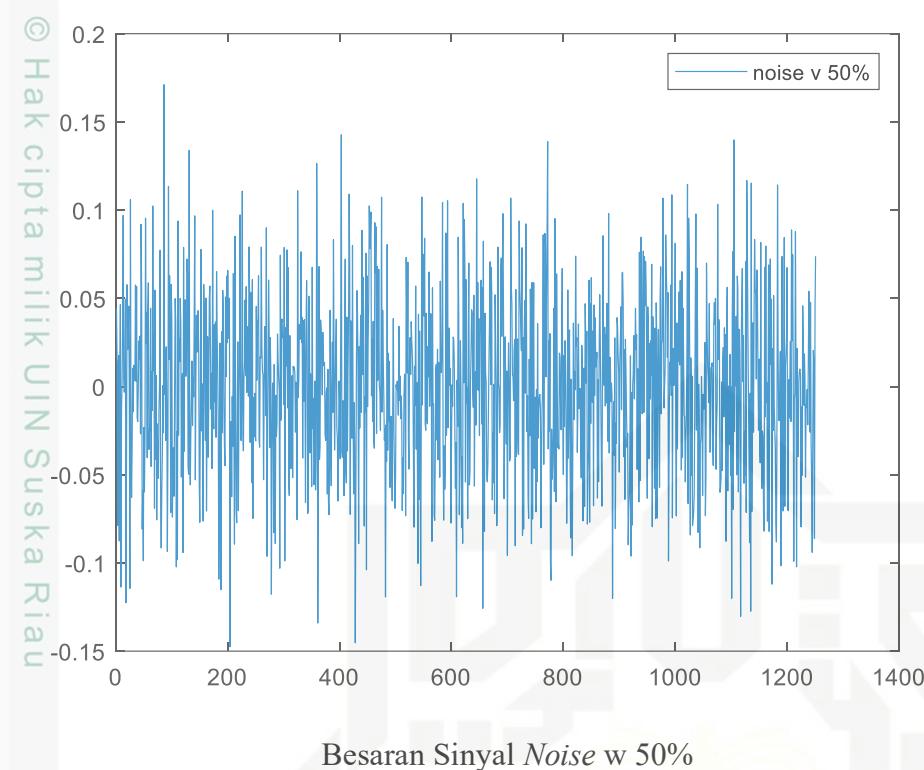
Besaran Sinyal Noise w 50%

## © Hak cipta milik UIN Suska Riau

## Statistic University of Sultan Syarif Kasim Riau

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

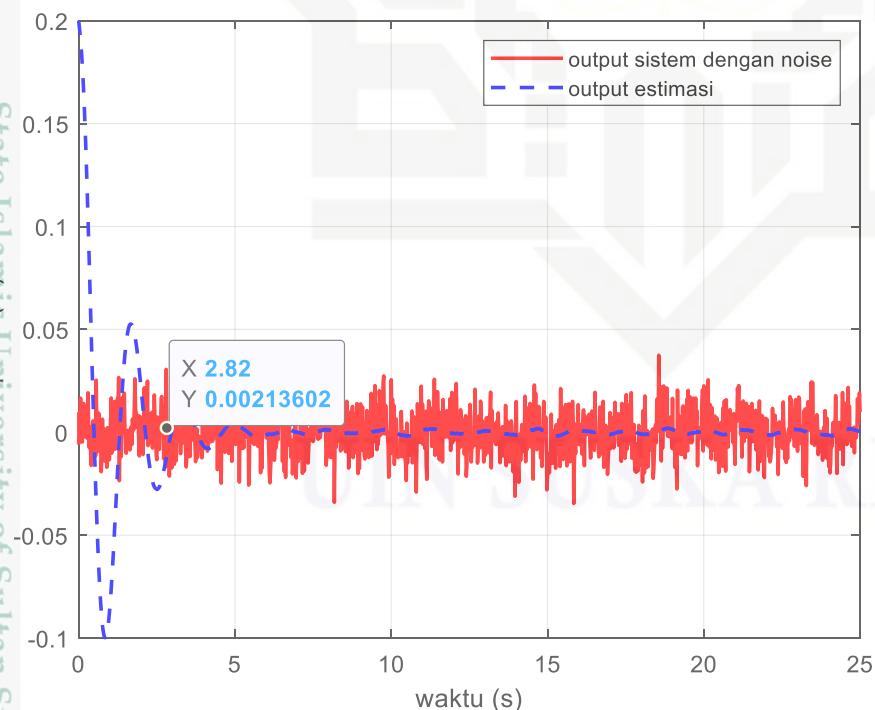
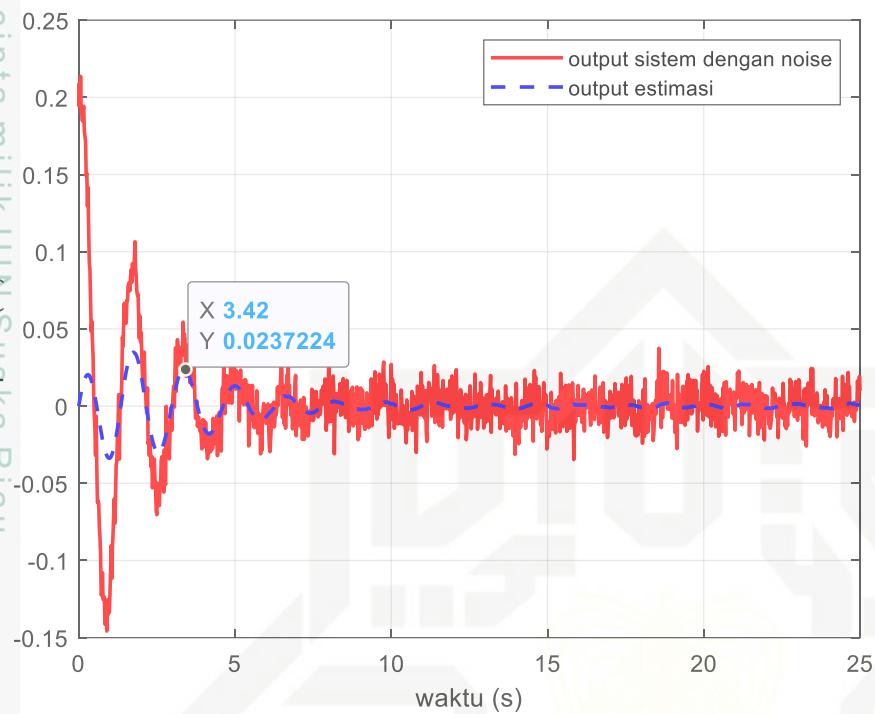
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Hasil Pengujian Kekokohan Kalman-Bucy dengan Noise 40%

## LAMPIRAN C

### PENGUJIAN SENSITIVITAS KALMAN-BUCY



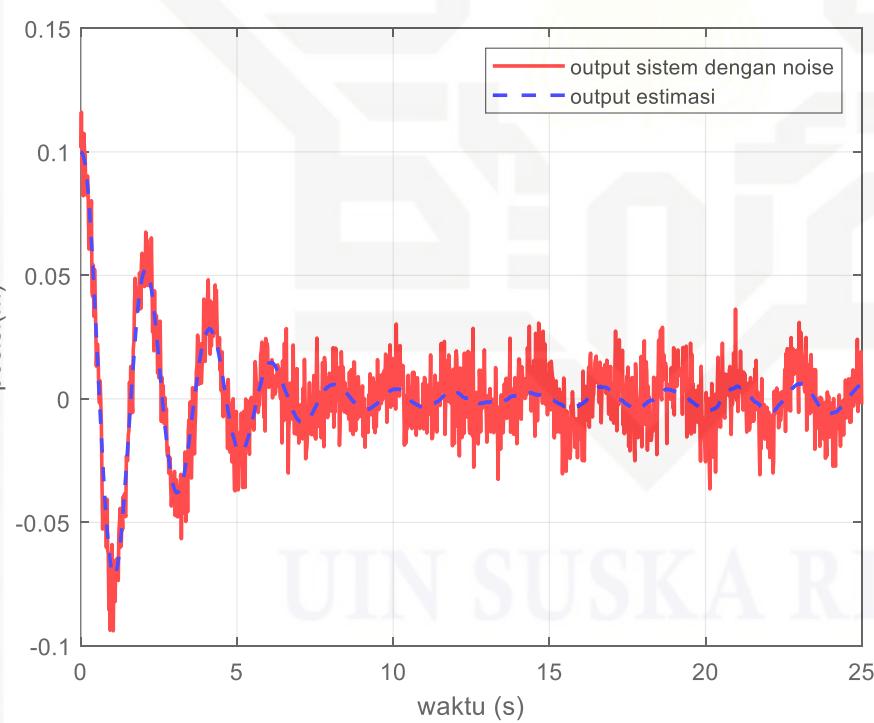
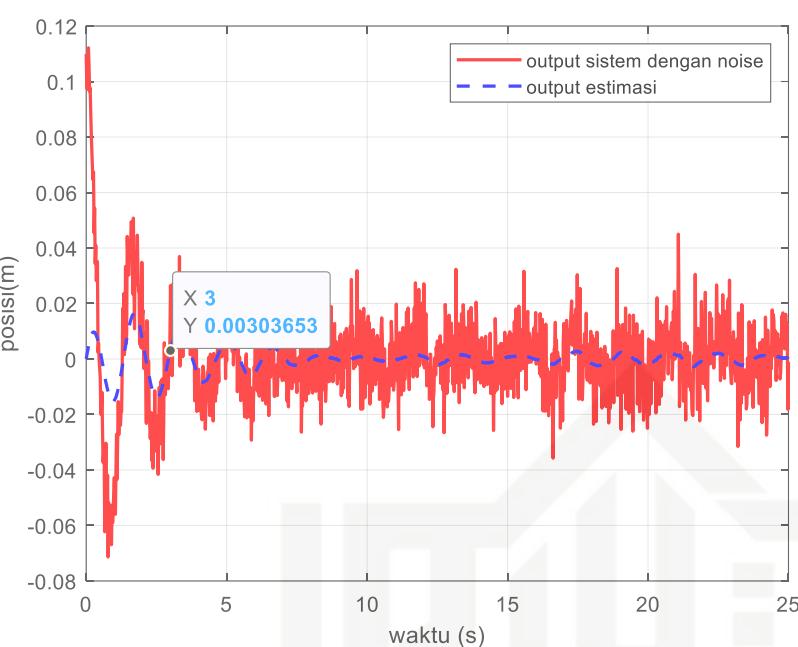
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

## Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.





UIN SUSKA RIAU

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Alpin Adriansyah, lahir di Sedinginan 10 Maret 2003, ayah bernama Saharudin dan nama ibu Hasmi. Penulis pertama kali menempuh jenjang pendidikan berumur 6 tahun yaitu di SDN 017 Sedinginan, waktu itu tahun 2009 dan selesai pada tahun 2015, dan pada tahun yang sama juga penulis melanjutkan sekolah menengah pertama di SMP N 1 Tanah Putih dan menyelesaikan pendidikannya pada tahun 2018. Pada tahun yang sama juga penulis melanjutkan pendidikan di SMA N 1 Tanah Putih dan waktu SMA saya mengambil jurusan Ipa karna sesuai minat penulis. Pada 2021 penulis selesai pendidikan di SMA dan pada tahun yang sama juga penulis diterima di melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi lulus melalui jalur SNMPTN 2022 di prodi pilihan pertama yaitu Teknik Elektro UIN Suska Riau dan sampai sekarang. Pada semester 5, penulis memilih kosentrasi pada bidang Elektronika Instrumentasi. Penulis berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2025.

Atas izin Allah SWT, berkat semangat dan ketekunan penulis, akhirnya dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis berharap, karya ini dapat memberikan manfaat serta berguna bagi siapapun yang membutuhkan.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikan tugas akhir ini yang berjudul **“Analisa Performansi Estimasi dan Simulasi Sistem Suspensi Seperempat Mobil Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai State Observer”**.

**UIN SUSKA RIAU**