

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.

PERBANDINGAN PERFORMA *EXTENDED KALMAN FILTER* (EKF) DAN EKF-BASED *NONLINEAR OBSERVER* PADA SISTEM *NONLINEAR* TANGKI GANDA

TUGAS AKHIR

Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Kelulusan Tingkat Sarjana Strata 1 Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi



UIN SUSKA RIAU

Oleh :

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA
12250523360

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

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

2025

LEMBAR PERSETUJUAN

PERBANDINGAN PERFORMA *EXTENDED KALMAN FILTER (EKF)* DAN *EKF-BASED NONLINEAR OBSERVER* PADA SISTEM *NONLINEAR TANGKI GANDA*

TUGAS AKHIR

Oleh:

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA
12250523360

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, Pada Tanggal 23 Desember 2025

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Hl. Liliyana, S.T., M.Eng
NIP: 19780112 200312 2 004

Pembimbing

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

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang menyalin 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

LEMBAR PENGESAHAN

PERBANDINGAN PERFORMA *EXTENDED KALMAN FILTER* (EKF) DENGAN EKF-BASED *NONLINEAR OBSERVER* PADA SISTEM *NONLINEAR* TANGKI GANDA

TUGAS AKHIR

Oleh :

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA
12250523360

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 23 Desember 2025

Pekanbaru, 23-Desember 2025

Mengesahkan,

Dean Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. Yuslenita Muda, S.Si., M.Sc
NIP. 19770103 200710 2 001

Dr. Hj. Lilliana, ST., M.Eng
NIP. 19781012 200312 2 004

Dewan Penguji :

Ketua : Dr. Ir. Hj. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP

Sekretaris : Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T.

Anggota I : Putut Son Maria, S.ST., M.T.

Anggota II : Ahmad Faizal, S.T., M.T., CHQA

© 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

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.

PERBANDINGAN PERFORMA *EXTENDED KALMAN FILTER* (EKF) DAN *EKF-BASED NONLINEAR OBSERVER* PADA SISTEM *NONLINEAR* TANGKI GANDA

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA
NIM. 12250523360

Tanggal Sidang : 23 Desember 2025

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas KM 15 NO. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Sistem tangki ganda merupakan sistem proses industri yang memiliki dinamika nonlinier, sehingga menyulitkan proses estimasi ketinggian air, terutama ketika sistem dipengaruhi oleh gangguan. Kondisi ini menyebabkan hasil pengukuran tidak selalu merepresentasikan keadaan sistem secara akurat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan observer sebagai metode estimasi keadaan yang berfungsi untuk memperkirakan ketinggian air berdasarkan model sistem dan sinyal keluaran yang tersedia. Pada penelitian ini, dua metode observer digunakan untuk menyelesaikan permasalahan estimasi pada sistem tangki ganda nonlinier, yaitu *Extended Kalman Filter* (EKF) dan *EKF-Based Nonlinear Observer*. Perbandingan performa kedua metode dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dengan tiga skenario pengujian, yaitu variasi *input* sistem, perbedaan kondisi awal observer, serta variasi tingkat *noise* proses dan pengukuran. Tingkat akurasi estimasi dievaluasi menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE). Hasil simulasi menunjukkan bahwa *EKF-Based Nonlinear Observer* memberikan performa estimasi yang lebih baik dibandingkan dengan EKF konvensional pada seluruh skenario pengujian. Metode ini mampu mengikuti dinamika sistem dengan baik meskipun terjadi variasi *input*, perbedaan kondisi awal, serta peningkatan *noise* hingga 50%, yang ditunjukkan oleh nilai RMSE yang relatif kecil. Sebaliknya, EKF konvensional menghasilkan kesalahan estimasi yang lebih besar dan lebih sensitif terhadap *noise*. Berdasarkan hasil tersebut, *EKF-Based Nonlinear Observer* dinilai lebih sesuai untuk digunakan pada sistem tangki ganda nonlinier.

Kata kunci: EKF, *EKF-Based Nonlinear Observer*, sistem tangki ganda, sistem nonlinier, estimasi keadaan, RMSE.

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.

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF THE EXTENDED KALMAN FILTER (EKF) AND EKF-BASED NONLINEAR OBSERVER ON A NONLINEAR DOUBLE TANK SYSTEM

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA
NIM. 12250523360

Date of Final Exam: December 23, 2025

*Departement of Electrical Engineering
Faculty of Science and Technology
State Islamic University Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas KM 15 No. 155 Pekanbaru*

ABSTRCT

The coupled tank system is an industrial process system with nonlinear dynamics, which makes the estimation of water levels more difficult, especially when the system is affected by process disturbances and measurement noise. Under these conditions, the measured output does not always accurately represent the actual system states. To address this problem, an observer is used as a state estimation method to estimate water levels based on the system model and available output signals. In this study, two observer methods are applied to solve the estimation problem in a nonlinear coupled tank system, namely the Extended Kalman Filter (EKF) and the EKF-Based Nonlinear Observer. The performance of both methods is evaluated through MATLAB/Simulink simulations using three testing scenarios, including input variations, differences in observer initial conditions, and variations in process and measurement noise levels. Estimation accuracy is assessed using the Root Mean Square Error (RMSE) parameter. The simulation results show that the EKF-Based Nonlinear Observer provides better estimation performance than the conventional EKF across all testing scenarios. This method is able to track system dynamics effectively despite input variations, mismatched initial conditions, and noise levels increased up to 50%, as indicated by relatively small RMSE values. In contrast, the conventional EKF produces larger estimation errors and shows higher sensitivity to noise. Therefore, the EKF-Based Nonlinear Observer is considered more suitable for application in nonlinear coupled tank systems.

Keywords: *EKF, EKF-Based Nonlinear Observer, coupled tank system, nonlinear system, state estimation, RMSE.*

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan dengan mengikuti kaidah pengutipan yang berlaku.

Penggunaan 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.

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.

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kanaya Syafa Az-zahra
NIM : 12250523360
Tempat/Tgl. Lahir : Payakumbuh, 24 Februari 2004
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

PERBANDINGAN PERFORMA EXTENDED KALMAN FILTER (EKF) DAN EKF-BASED NONLINEAR OBSERVER PADA SISTEM NONLINEAR TANGKI GANDA

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.

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

Pekanbaru, 23 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,



Kanaya Syafa Az-zahra
NIM. 12250523360

LEMBAR PERSEMBAHAN



Alhamdulillahirabbil ‘alamin. Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan pertolongan-Nya sehingga karya ini dapat diselesaikan. Penyusunan karya ini merupakan bagian dari proses panjang dalam menuntut ilmu dan belajar bertanggung jawab atas pilihan yang diambil, dengan memahami bahwa setiap proses memiliki ritmenya masing-masing dan tidak selalu dapat diselesaikan dengan cara yang sama.

Perjalanan yang dilalui tidak selalu berjalan cepat maupun mulus. Terdapat fase melambat, tertahan, dan menyesuaikan diri dengan berbagai kondisi yang tidak selalu dapat dikendalikan. Melalui proses tersebut, penulis belajar bahwa bertahan dan terus melangkah, meskipun dengan cara yang berbeda, tetap merupakan bentuk usaha dan komitmen terhadap tujuan yang ingin dicapai.

Karya ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua tercinta, Yose Merina Baharten dan Dedi Azmi, yang memiliki tuntutan namun disertai pemahaman. Dukungan tidak selalu hadir melalui kata-kata hangat, tetapi diwujudkan melalui kepercayaan, pengertian, serta kesediaan memberikan dukungan penuh dalam menunjang pendidikan dan tujuan penulis, termasuk dalam menghadapi proses yang tidak selalu berjalan sesuai rencana.

Semoga karya ini menjadi salah satu bentuk tanggung jawab penulis atas kesempatan yang telah diberikan. Penulis berharap Allah SWT senantiasa melimpahkan kesehatan dan keberkahan kepada Ayah dan Ibu, serta membimbing langkah penulis agar tetap berada di jalan yang diridhai-Nya.

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia baik bagimu...”

(QS. Al-Baqarah [2]: 216)

“I still have faith in you, It stands above the stormy seas.” (ABBA)

KANAYA SYAFA AZ-ZAHRA

10 DESEMBER 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.

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Atas izin dan karunia Allah SWT, Tugas Akhir dengan judul **“Perbandingan Performa *Extended Kalman Filter* (EKF) dan *EKF-Based Nonlinear Observer* pada Sistem *Nonlinear* Tangki Ganda”** dapat diselesaikan dengan lancar.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak memperoleh bimbingan, arahan, bantuan, serta motivasi dari berbagai pihak yang memiliki pengetahuan, wawasan, dan pengalaman yang sangat berharga. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. ALLAH SWT, atas rahmat dan hidayah-Nya yang senantiasa melimpah sehingga penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kedua orang tua tercinta, ayahanda Dedi Azmi dan ibunda Yose Merina Baharten, yang selalu memberikan doa, pengorbanan, kepercayaan, serta nasihat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti, MS, M.Si., Ak., CA., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, beserta seluruh staf dan jajarannya.
4. Ibu Dr. Yuslenita Muda, S.Si., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, beserta seluruh staf dan jajarannya.
5. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
6. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
7. Ibu Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pemikirannya dengan penuh keikhlasan dalam memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berarti sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
8. Ibu Dr. Ir. Hj. Zulfatri Aini, S.T., M.T., IPP. selaku Ketua Sidang, serta Bapak Putut Son Maria, S.S.T., M.T. dan Bapak Ahmad Faizal, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji,

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.

yang telah memimpin jalannya sidang Tugas Akhir serta memberikan arahan, kritik, saran, dan masukan yang membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini.

9. Ucapan terima kasih kepada Ibu Dr. Fitri Amillia, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik atas perhatian dan arahan yang diberikan selama proses akademik penulis.

10. Ucapan terima kasih kepada diri sendiri yang memilih untuk tetap berjalan dan menyelesaikan apa yang telah dimulai, meskipun tidak selalu dalam kondisi terbaik, serta mampu bertahan melalui proses yang tidak mudah hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.

11. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Ilham Padri atas dukungan, pengertian, dan kebersamaannya dalam menjalani proses akademik dari awal hingga akhir, yang turut membantu penyelesaian skripsi ini.

12. Rekan-rekan seperbimbingan, yang telah berjuang bersama serta saling membantu dan mendukung penulis dalam pelaksanaan seminar maupun sidang, sehingga seluruh rangkaian penyusunan dan penyelesaian Tugas Akhir ini dapat berjalan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa sebagai manusia biasa, Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari kata sempurna karena keterbatasan ilmu pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan karya ini. Kesempurnaan hanya milik Allah SWT, dan segala kekurangan sepenuhnya merupakan tanggung jawab penulis.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Pekanbaru, 27 Oktober 2025

Penulis

Kanaya Svafa Az-zahra
NIM. 12150523360

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	v
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	vi
SURAT PERNYATAAN.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-4
1.3 Tujuan Penelitian	I-4
1.4 Batasan Penelitian.....	I-4
1.5 Manfaat Penelitian	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait.....	II-1
2.2 Sistem Tangki Ganda.....	II-2
2.3 Pemodelan Matematis pada Tangki Ganda	II-3
2.3.1 Parameter Sistem Tangki Ganda	II-3
2.3.2 Parameter Tangki Ganda Skala Industri.....	II-5
2.3.3 Model Matematis Tangki 1.....	II-6
2.3.4 Model Matematis Tangki 2.....	II-8
2.4 Kalman Filter	II-10
2.4.1 <i>Extended Kalman Filter</i>	II-10
2.4.2 <i>EKF-Based non Linear Observer</i>	II-11
2.5 Root Mean Square Error (RMSE)	II-12
2.6 Software MATLAB	II-13

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.

2. Dilarang mengemukakan 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.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	III-1
3.1 Diagram Alur Penelitian	III-1
3.2 Tahap Penelitian	III-2
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	IV-1
4.1 Analisa Hasil Simulasi Sistem Tangki Ganda Tanpa Observer	IV-1
4.2 Simulasi dan Analisa Sensitivitas Observer Terhadap Perubahan <i>Input</i>	IV-4
4.2.1 EKF-Based Nonlinear Observer	IV-4
4.2.2 EKF	IV-6
4.3 Simulasi dan Analisa Performa Observer Terhadap Perbedaan Kondisi Awal... ..	IV-8
4.3.1 EKF-Based Nonlinear Observer.....	IV-8
4.3.2 EKF	IV-10
4.4 Simulasi dan Analisa Ketahanan Observer Terhadap Variasi <i>Noise</i>	IV-11
4.4.1 EKF-Based Nonlinear Observer.....	IV-11
4.4.2 EKF	IV-13
4.5 Rekapitulasi Hasil dan Pembahasan Umum	IV-14
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	V-1
5.1 Kesimpulan.....	V-1
5.2 Saran	V-1
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Sistem tangki ganda pada industri	II-2
2.2 Sistem Tangki Ganda	II-3
2.3 Tampilan simulink MATLAB	II-13
2.4 Tampilan simulasi dan blok library MATLAB	II-14
2.5 M-file MATLAB	II-15
3.1 Alur Kerja	III-2
3.2 Blok Diagram Nonlinear Tangki Ganda	III-4
3.3 Simulink Sistem Tangki Ganda	III-5
3.4 Blok Diagram Linear Tangki Ganda	III-7
3.5 Simulink Tangki Ganda Linier	III-7
3.6 <i>Noise</i> pada Simulink	III-11
3.7 Simulink Tangki Ganda Linier ditambah <i>Noise</i>	III-12
3.8 Simulink EKF Tangki Ganda	III-16
3.9 Simulink EKF – <i>Based Nonlinear Observer</i> Tangki Ganda	III-17
4.1 Hasil Simulasi Tangki Ganda Nonlinier	IV-2
4.2 Hasil Simulasi Tangki Ganda Nonlinier + <i>Noise</i>	IV-3
4.3 Hasil pengujian observer terhadap variasi <i>input</i>	IV-5
4.4 Hasil Estimasi EKF dengan Variasi <i>Input</i>	IV-7
4.5 Hasil pengujian kondisi awak EKF- <i>Based Nonlinear Observer</i>	IV-9
4.6 Hasil Pengujian Kondisi Awal pada EKF	IV-10
4.7 Hasil Pengujian EKF- Based Nonlinear Observer Terhadap <i>Noise</i>	IV-12
4.8 Hasil Pengujian EKF terhadap <i>Noise</i>	IV-13
4.9 Perbandingan hasil estimasi EKF linier dan EKF- <i>Based Nonlinear Observer</i> terhadap sistem tangki ganda nonlinier	IV-16

DAFTAR RUMUS

Rumus

Halaman

2.1 Persamaan EOM / kesetimbangan massa (model tangki 1)	II-6
2.2 Persamaan perubahan massa (langkah penurunan, tangki 1)	II-6
2.3 Definisi aliran / variabel terkait (tangki 1)	II-6
2.4 Definisi hubungan aliran (tangki 1).....	II-6
2.5 Mass-balance (intermediate) — bentuk awal	II-6
2.6 Bentuk transformasi / manipulasi aljabar (tangki 1)	II-6
2.7 Definisi konstanta / substitusi (tangki 1)	II-6
2.8 Langkah substitusi (tangki 1)	II-6
2.9 Definisi parameter tambahan (tangki 1)	II-6
2.10 Persamaan setelah substitusi (tangki 1).....	II-6
2.11 Bentuk sebelum penyederhanaan akhir (tangki 1).....	II-6
2.12 Hasil akhir persamaan model tangki 1 (final)	II-6
2.13 Persamaan EOM / model awal tangki 2	II-8
2.14 Persamaan perubahan massa (langkah penurunan, tangki 2)	II-8
2.15 Definisi aliran / variabel (tangki 2).....	II-8
2.16 Definisi hubungan aliran (tangki 2).....	II-8
2.17 Substitusi / intermediate (tangki 2).....	II-8
2.18 Transformasi bentuk persamaan (tangki 2)	II-8
2.19 Definisi parameter tambahan (tangki 2)	II-9
2.20 Hasil substitusi (tangki 2).....	II-9
2.21 Definisi konstanta/parameter (tangki 2)	II-9
2.22 Persamaan hasil substitusi (tangki 2)	II-9
2.23 Hasil akhir pemodelan tangki 2 (final)	II-9
2.24 Persamaan umum (representasi umum/model vektor)	II-9
2.25 Perubahan Notasi.....	II-9
2.26 Definisi vektor / notasi matriks pada (2.24)	II-10
2.27 Persamaan yang digunakan oleh observer (EKF — bentuk yang dipakai)	II-11
2.28 Bentuk algoritma / langkah perancangan observer (bentuk ringkas)	II-11
2.29 Rumus untuk memperoleh gain K (persamaan pencarian K).....	II-11
2.30 Persamaan Riccati (persamaan untuk matriks P)	II-11

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:

- 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.

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

2.31	Bentuk umum sistem nonlinear untuk EKF- <i>Based Nonlinear Observer</i>	II-12
2.32	Persamaan perancangan EKF	II-12
3.1	<i>State-space</i> nonlinear	III-3
3.2	Bentuk vektor hasil program	III-3
3.3	Persamaan gangguan keadaan	III-4
3.4	Persamaan gangguan pengukuran	III-4
3.5	Persamaan bentuk umum (EKF — pers. umum untuk simulasi)	III-4
3.6	Persamaan hasil linierisasi	III-4
3.7	Persamaan state EKF- <i>Based Nonlinear Observer</i>	III-4

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2. 1 Parameter Sistem Tangki Ganda.....	II-4
2. 2 Parameter Sistem Tangki Ganda Skala Industri	II-5
3. 1 Blok Simulink yang Digunakan	III-5
3. 2 Algoritma Tangki Ganda Nonlinear.....	III-6
3. 3 Algoritma Pemrograman Tangki Ganda Linier	III-8
3. 4 Algoritma <i>Noise</i> Tangki Ganda Nonlinier	III-9
3. 5 Algoritma <i>Noise</i> Tangki Ganda Linier.....	III-11
3. 6 Algoritma Observer	III-13
3. 7 Algoritma <i>EKF-Based Nonlinear Observer</i>	III-14
4. 1 Skenario Variasi Input Tegangan	IV-4
4. 2 Nilai RMSE Estimasi EKF Nonlinier pada Pengujian Variasi Input.....	IV-6
4. 3 Nilai RMSE EKF Variasi Input	IV-8
4. 4 Nilai RMSE pengujian Kondisi Awal pada EKF-Based Nonlinear Observer.....	IV-9
4. 5 Nilai RMSE EKF pada Pengujian Kondisi Awal	IV-10
4. 6 Nilai RMSE EKF-Based Nonlinear Observer pada Pengujian Variasi Noise	IV-12
4. 7 Nilai RMSE EKF pada Pengujian Variasi Noise.....	IV-14
4. 8 Rekapitulasi Perbandingan Nilai RMSE EKF dan EKF-Based Nonlinear Observer.....	IV-14

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.

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

DAFTAR SINGKATAN

EKF	: <i>Extended Kalman Filter</i>
KF	: <i>Kalman Filter</i>
DO	: <i>Disturbance Observer</i>
ZD	: <i>Zeroing Dynamics</i>
FLC	: <i>Fuzzy Logic Controller</i>
LESO	: <i>Linear Extended State Observer</i>
EOM	: <i>Equations of Motion</i>
MATLAB	: <i>Matrix Laboratory</i>

UIN SUSKA RIAU



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

BAB I

PENDAHULUAN

1 Latar belakang

Industri proses seperti petrokimia, pembuatan kertas, dan pengolahan air, sistem cairan umumnya membutuhkan pemompaan dan pengaliran dari satu tangki ke tangki lain untuk penyimpanan, pencampuran, atau pengolahan lanjutan [1]. Sistem ini dapat terdiri dari konfigurasi satu tangki hingga tangki ganda yang saling terhubung melalui aliran cairan. Model tangki ganda banyak digunakan dalam aplikasi seperti pengolahan air limbah, desalinasi, dan industri kimia karena dapat merepresentasikan dinamika fluida kompleks [2]. Dalam praktiknya, sistem ini dilengkapi pompa untuk mendistribusikan cairan ke berbagai cabang dan tangki [3]. Kompleksitas struktur serta interaksi antar tangki menyebabkan pengendalian sistem ini lebih menantang dibandingkan sistem tunggal, terutama karena keterkaitan antar variabel dan dinamika nonlinier [2].

Tangki ganda terdiri dari dua atau lebih tangki yang saling terhubung, yang memungkinkan interaksi aliran antar tangki [4]. Salah satu tantangan utama yang sering muncul adalah karakteristik sistem yang nonlinier, di mana aliran antar tangki bergantung pada akar kuadrat dari perbedaan tinggi permukaan cairan [5]. Hal ini membuat pendekatan linier konvensional sulit mencapai pengendalian presisi. Selain itu, sistem ini juga rentan terhadap gangguan eksternal dan *noise* sensor seperti fluktuasi aliran, keterlambatan aktuator, serta kesalahan pengukuran yang dapat menurunkan stabilitas dan akurasi sistem [6].

Observer untuk memfilter serta mendeteksi gangguan dan *noise* telah dikembangkan. Salah satunya adalah *disturbance observer* (DO) yang mampu mengestimasi gangguan tidak terukur secara *real-time* dan menyaring sinyal pengendali, seperti dalam pengendali prediktif eksplisit [6]. Pendekatan *zeroing dynamics* (ZD) juga terbukti efektif dalam menekan *error* pelacakan secara eksponensial, bahkan dalam sistem yang terganggu [7]. Di sisi lain, meskipun *fuzzy logic controller* (FLC) mampu mengurangi *overshoot* dan *steady-state error*, pendekatan ini masih memiliki keterbatasan dalam meredam gangguan karena tidak memiliki mekanisme *filtering* eksplisit atau adaptasi terhadap *noise* [5].

Observer digunakan untuk memperkirakan variabel keadaan yang tidak dapat diukur langsung serta mengompensasi gangguan dan ketidakpastian model [8]. Pada aplikasi seperti eksoskeleton, suspensi aktif kendaraan, atau aktuator berkecepatan tinggi, keterbatasan

sensor dan gangguan lingkungan dapat menurunkan kualitas pengukuran [9]. Contohnya, Zhang et al. menggunakan LESO pada eksoskeleton dan berhasil mencapai kesalahan pelacakan kurang dari $0,5^\circ$ meskipun ada ketidakpastian model [8], sedangkan Wang et al. menunjukkan bahwa kendali suspensi aktif berbasis observer meningkatkan stabilitas dan kenyamanan dibanding metode konvensional [9]. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan pengendalian presisi bergantung pada kekuatan sensor ataupun kemampuan memperkirakan variabel internal jika tidak dapat diukur langsung.

Pemilihan jenis *observer* harus mempertimbangkan karakteristik sistem, misalnya apakah sistem bersifat linier atau nonlinier [8]. Kecepatan estimasi dan sensitivitas terhadap *noise* juga menjadi faktor penting karena *observer* yang terlalu cepat dapat memperbesar efek *noise* pengukuran [9]. Kompleksitas implementasi dan keterbatasan perangkat keras menjadi pertimbangan tambahan untuk memilih *observer* yang efisien dan sesuai dengan sumber daya yang tersedia [8]. Terakhir, ketersediaan model sistem dan jenis sensor yang digunakan harus dievaluasi agar *observer* dapat memberikan estimasi yang akurat tanpa membebani performa sistem kendali [10]. Pertimbangan-pertimbangan ini menunjukkan bahwa peran *observer* melampaui aplikasi sederhana dan menjadi komponen penting dalam skenario pengendalian yang lebih kompleks.

Salah satu algoritma estimasi yang umum digunakan adalah Kalman Filter (KF). KF menyediakan solusi rekursif untuk estimasi status sistem dinamis berdasarkan pengukuran yang terkontaminasi oleh *noise* [11]. Namun, sebagian besar sistem teknik nyata seperti robotika, motor induksi, dan sistem navigasi memiliki karakteristik nonlinier yang tidak dapat ditangani langsung oleh KF linier [12].

Untuk menjawab kebutuhan ini, peneliti berkembang dengan menemukan teknik *linearization* lokal (ekspansi Taylor orde pertama) yang memungkinkan penerapan KF pada sistem nonlinier [13][17]. Namun, EKF tidak lepas dari kelemahan, seperti sensitivitas terhadap kesalahan linierisasi dan ketergantungan pada kondisi observabilitas lokal. Kesalahan linierisasi yang berulang dapat menyebabkan akumulasi *error* atau bahkan divergensi. Untuk itu, dikembangkan pendekatan seperti *EKF-Based Nonlinear Observer* dengan jaminan stabilitas eksponensial untuk meningkatkan ketahanan terhadap dinamika sistem nonlinier [14]. Keterbatasan ini sekaligus mendorong pengembangan EKF sebagai dasar perancangan *observer* nonlinier yang lebih handal.

EKF-Based Nonlinear Observer, yaitu metode estimasi status yang menggabungkan rekursivitas dan *filtering* dari EKF ke dalam struktur *observer* untuk sistem nonlinier [11].

EKF *Based Nonlinear Observer* menggunakan dua tahap utama: prediksi dan koreksi, di mana model sistem nonlinier dipakai untuk memperkirakan keadaan internal sebelum penyesuaian dengan data pengukuran dilakukan [14]. Pada tahap prediksi, keadaan diperkirakan berdasarkan kondisi sebelumnya dan masukan sistem; pada tahap koreksi, perkiraan ini diperbarui dengan membandingkan keluaran yang diprediksi terhadap pengukuran aktual [15]. EKF bertindak sebagai pengamat terhadap variabel yang tidak dapat diukur secara langsung, dengan asumsi bahwa model sistem dan pengukuran memiliki bentuk nonlinier yang dapat didekati secara lokal linier.

Metode ini memanfaatkan prinsip EKF, namun melakukan linearisasi lokal di sekitar perkiraan keadaan dan menambahkan modifikasi struktural untuk menjaga kestabilan estimasi [14]. Pendekatan ini sangat relevan untuk sistem tangki ganda, di mana dinamika nonlinier dan interaksi antar-tangki menuntut estimasi keadaan yang akurat dan stabil. Sensitivitas EKF terhadap *noise* proses dan pengukuran menjadi lebih tinggi pada sistem nonlinier yang kompleks, sehingga memerlukan penyesuaian parameter yang cermat [14]. Karena keterbatasan ini, melakukan perbandingan antara EKF biasa dan EKF-*Based Nonlinear Observer* menjadi penting. Analisis perbandingan memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi sejauh mana masing-masing metode mampu menangani nonlinieritas, ketidakpastian model, dan sensitivitas terhadap gangguan. Hasil perbandingan ini dapat memberikan dasar ilmiah dalam memilih strategi estimasi yang paling sesuai untuk sistem tangki ganda, sekaligus memahami karakteristik dan batasan dari kedua pendekatan [16].

Berdasarkan uraian di atas, sistem tangki ganda memiliki dinamika nonlinier dan interaksi antar-tangki yang kompleks, sehingga estimasi variabel internal secara akurat menjadi penting. EKF-*Based Nonlinear Observer* dipilih karena menggunakan pendekatan yang memanfaatkan model nonlinier secara langsung, sementara EKF yang berbasis linearitas lokal, digunakan sebagai pembanding untuk menentukan pendekatan mana yang memberikan performa estimasi status paling optimal pada sistem nonlinier ini.

Oleh karena itu, penelitian ini mengangkat judul **PERBANDINGAN PERFORMA EKF DAN EKF BASED NONLINEAR OBSERVER PADA SISTEM NONLINEAR TANGKI GANDA** untuk mengidentifikasi metode estimasi status yang paling efektif untuk sistem nonlinier dengan karakteristik kuat seperti tangki ganda.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana perbandingan performa estimasi antara metode *Extended Kalman Filter* (EKF) dan EKF Nonlinear Observer ketika sistem diberi tambahan *noise* pada proses pengukuran maupun sistem?

Bagaimana respons sistem terhadap perubahan parameter pada metode EKF dan EKF Nonlinear Observer dalam proses estimasi ketinggian air pada sistem tangki ganda?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis dan membandingkan performa estimasi metode *Extended Kalman Filter* (EKF) dan EKF Nonlinear Observer terhadap pengaruh *noise* pada sistem.

2. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi respons sistem terhadap variasi parameter pada metode EKF dan EKF Nonlinear Observer pada sistem tangki ganda.

1.4 Batasan Penelitian

1. Model tangki ganda menggunakan hasil linearisasi dengan deret Taylor di sekitar titik kerja tertentu.
2. Jenis gangguan yang diperhitungkan berupa *noise* Gaussian pada proses dan pengukuran.
3. Perubahan sistem dibatasi pada variasi parameter tertentu tanpa mempertimbangkan kondisi ekstrem atau kerusakan komponen.
4. Pengujian dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink tanpa implementasi perangkat keras.
5. Kriteria performa yang dianalisis terbatas pada kemampuan estimasi, penanganan *noise*, dan respons terhadap perubahan sistem.

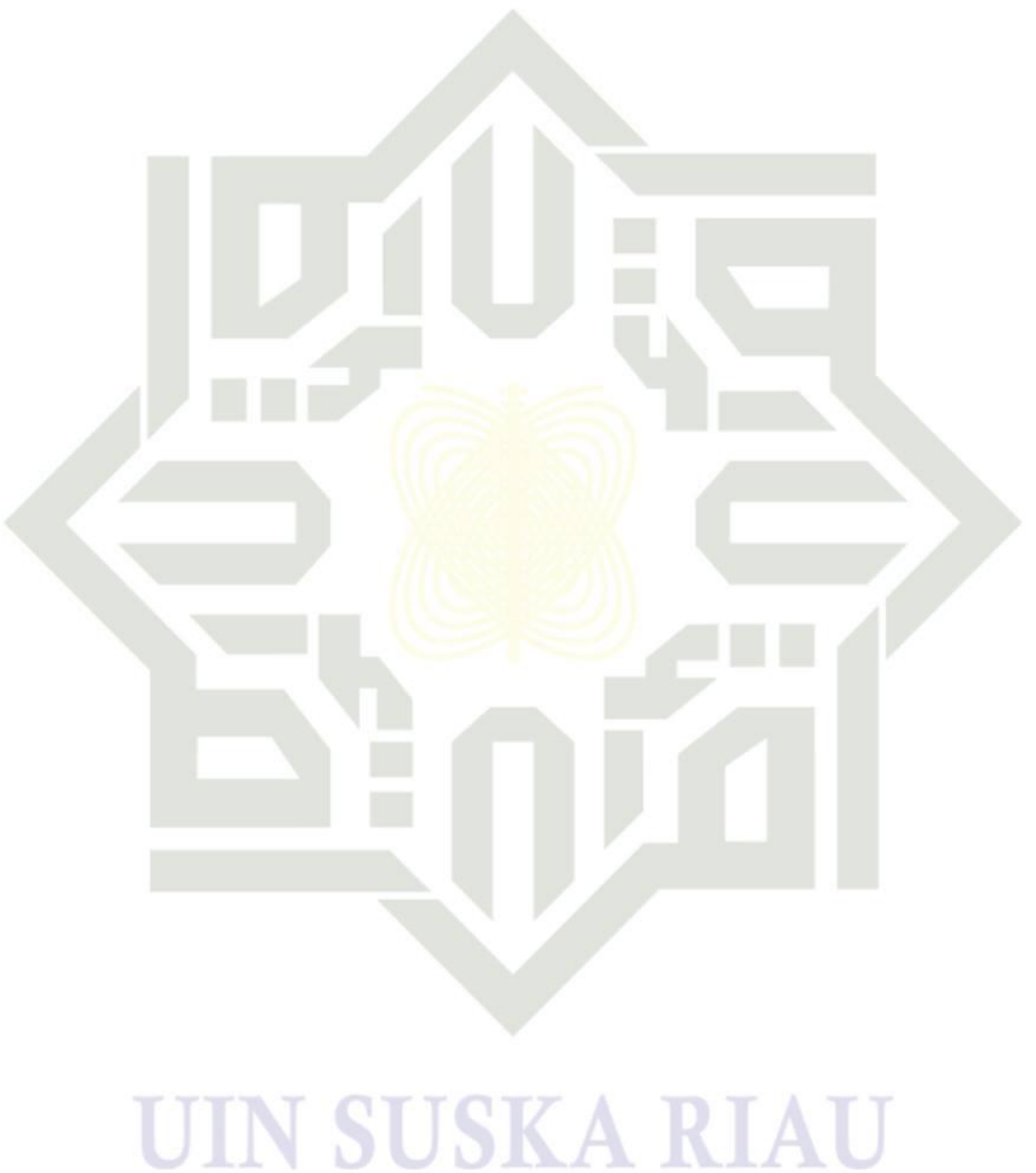
1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberikan panduan dalam memilih metode estimasi yang lebih tepat untuk sistem nonlinear tangki ganda.
2. Memberikan wawasan tentang keandalan EKF dan EKF-Based Nonlinear Observer dalam menghadapi *noise* dan perubahan kondisi sistem.

3. Menjadi referensi bagi pengembangan metode observer lanjutan untuk aplikasi industri atau kontrol proses serupa.

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.





BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian ini dilakukan studi literatur untuk mengidentifikasi sumber relevan terkait estimasi level pada sistem tangki ganda dengan fokus pada perbandingan kinerja antara *Extended Kalman Filter* (EKF) dan *EKF-Based Nonlinear Observer* yang dirancang untuk mengatasi nonlinieritas sistem.

Kelemahan mendasar pada EKF muncul karena ia bergantung pada proses linierisasi (*Jacobian*) di setiap langkah waktu. Studi oleh Rúa et al. menunjukkan secara eksplisit bahwa konvergensi EKF tidak dijamin pada sistem nonlinier [3], menguatkan argumentasi bahwa linierisasi EKF sering menimbulkan galat yang tidak dapat diabaikan dan berpotensi gagal pada dinamika nonlinier yang kuat. Secara konseptual, Ribeiro juga menguatkan bahwa EKF memang rentan terhadap kesalahan linierisasi dan memiliki potensi divergensi ketika kondisi awal estimasi kurang akurat [17].

Kelemahan struktural EKF ini mendorong penelitian untuk mencari pendekatan yang lebih stabil. Torres et al. merespons dengan menyajikan perancangan EKF-like observer dengan jaminan stabilitas formal [14], yang secara implisit menegaskan bahwa EKF konvensional tidak selalu stabil dan membutuhkan modifikasi untuk aplikasi kritis. Barrau dan Bonnabel juga mengusulkan modifikasi pada EKF, yaitu *Invariant EKF*, yang bertujuan untuk mencapai stabilitas konvergensi yang lebih terjamin dibandingkan EKF konvensional [16].

Dalam studi komparatif langsung pada sistem tangki ganda, hasil studi Muhammad Supbahan menunjukkan bahwa *observer* berbasis linierisasi (ELO, mirip EKF) memiliki performa yang kurang optimal dan menghadapi keterbatasan dalam implementasi riil [18]. Sementara itu, *observer* nonlinier murni, seperti yang diusulkan oleh Adil et al. (*High-Gain Observer*), meskipun efektif, diketahui memiliki kelemahan berupa sensitivitas tinggi terhadap *noise* sensor [2]. Situasi ini menciptakan kebutuhan nyata akan pendekatan *filtering* berbasis Kalman yang unggul dalam menangani *noise* sekaligus *robust* terhadap nonlinieritas.

Pentingnya estimasi yang andal juga ditekankan oleh Gouta et al., yang menunjukkan bahwa gangguan signifikan dapat menurunkan kinerja kontrol [6], serta Ding et al., yang

menegaskan bahwa keberhasilan kontrol lanjutan sangat bergantung pada kualitas estimasi status [7].

Berdasarkan literatur tersebut, EKF konvensional terbukti memiliki isu terkait sensitivitas linierisasi dan potensi divergensi pada sistem nonlinier, sementara *EKF-Based Nonlinear Observer* muncul sebagai solusi yang menawarkan kerangka yang lebih stabil dan akurat. Namun, belum ada penelitian terdahulu yang secara spesifik melakukan studi komparatif terperinci antara *Extended Kalman Filter* (EKF) konvensional dengan *EKF-Based Nonlinear Observer* pada sistem nonlinier tangki ganda untuk mengevaluasi perbedaan performa keduanya dalam menghadapi *noise* dan variasi parameter. Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan tersebut dengan melakukan komparasi yang teruji untuk menentukan metode estimasi mana yang paling andal.

2.2 Sistem Tangki Ganda

Sistem tangki ganda terdiri dari dua atau lebih tangki yang saling terhubung, memungkinkan interaksi aliran cairan antar tangki. Sistem ini sering digunakan sebagai model dalam studi pengendalian karena sifatnya yang mencerminkan dinamika industri, seperti pengendalian cairan, tekanan, atau sistem aliran lainnya [5].



Gambar 2.1 Sistem tangki ganda pada industri

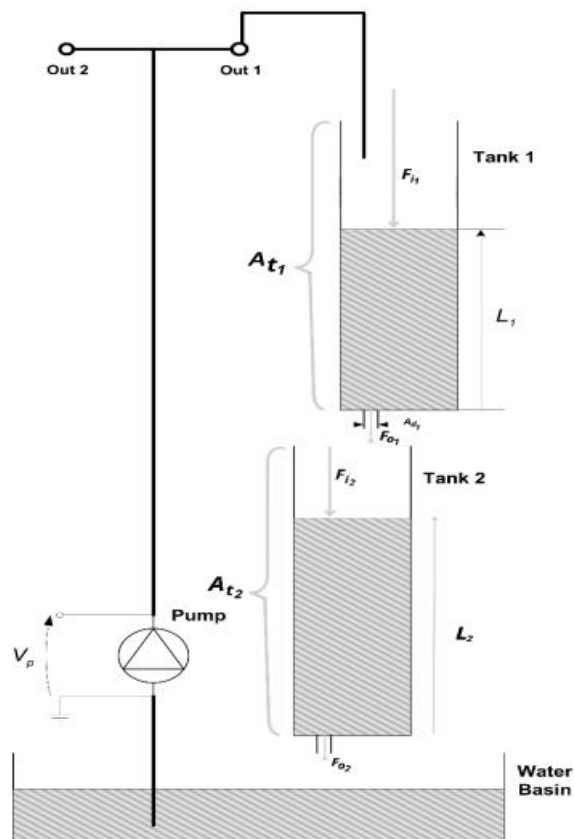
Gambar 2.1 merupakan salah satu contoh dari sistem tangki ganda yang digunakan pada industri.

2.3 Pemodelan Matematis pada Tangki Ganda

Sebelum melakukan perhitungan matematis, model dari sistem serta parameternya harus diketahui lebih dulu. Setelah menganalisa model sistem serta parameter, barulah dilakukan perhitungan secara matematis

2.3.1 Parameter Sistem Tangki Ganda

Sistem tangki ganda terdiri dari dua tangki yang saling terhubung. Dimana fluida dalam masing-masing tangki dikendalikan melalui manipulasi aliran masuk dan keluar. Setelah melakukan pemodelan matematis, selanjutnya akan dilakukan proses simulasi untuk sistem tangki ganda. Salah satu bagian dari proses simulasi yaitu pemrograman. Untuk melakukan pemrograman diperlukan parameter dari sistem tangki ganda untuk disubstitusikan ke dalam model matematis yang telah dibuat sebelumnya [5]. Berikut disajikan pada gambar 2.2 berupa model sistem tangki ganda untuk melihat parameter utama dalam sistem tersebut [19]:



Gambar 2.2 Sistem Tangki Ganda

Sistem tangki ganda memiliki beberapa parameter yang akan digunakan dalam proses pemodelan matematis yang dituangkan di dalam tabel berikut:

Tabel 2. 1 Parameter Sistem Tangki Ganda

NAMA PARAMETER	SIMBOL	Nilai	Satuan	KETERANGAN
Luas <i>orifice</i> tangki 1	A_{d_1}	0,317	Cm^2	Luas efektif lubang aliran tangki 1, dihitung dari diameter 0,635 cm
Luas <i>orifice</i> tangki 2	A_{d_2}	0,178	Cm^2	Luas efektif lubang aliran tangki 2, dihitung dari diameter 0,476 cm.
Luas tangki 1 dan 2	A_t	15,53	Cm^2	Luas penampang tangki berbentuk lingkaran dengan diameter 4,445 cm.
Level cairan tangki 1	x_1	15	Cm	Tinggi awal cairan di tangki 1.
Level cairan tangki 2	x_2	15	Cm	Tinggi awal cairan di tangki 2.
Tegangan pompa	V_p	22	V	Tegangan <i>input</i> untuk pompa.
Konstanta aliran pompa	K_p	4	$\text{Cm}^3/\text{s/V}$	Menghubungkan tegangan pompa dengan debit aliran.
Gravitasi	g	981	Cm/s^2	Konstanta gravitasi.
Konstanta aliran <i>orifice</i> 1	C_1	$A_{d_1} \sqrt{2g}$	$\text{Cm}^{5/2}/\text{s}$	Konstanta aliran tangki 1 berdasarkan gravitasi dan luas <i>orifice</i> .
Konstanta aliran <i>orifice</i> 2	C_2	$A_{d_2} \sqrt{2g}$	$\text{Cm}^{5/2}/\text{s}$	Konstanta aliran tangki 2 berdasarkan gravitasi dan luas <i>orifice</i> .

Berdasarkan model matematis yang telah diturunkan serta parameter sistem pada tabel 2.1, maka proses selanjutnya yaitu proses simulasi sistem *coupled tank*.

2.3.2 Parameter Tangki Ganda Skala Industri

Pada Tabel 2.1 ditampilkan parameter sistem tangki ganda skala laboratorium yang diambil dari penelitian sebelumnya. Untuk menilai kelayakan penerapan sistem tersebut pada skala industri, diperlukan analisis lanjutan guna memastikan observer tetap efektif. Parameter sistem tangki ganda untuk skala industri berdasarkan konversi yang ada pada penelitian sebelumnya [20] yang disajikan pada tabel 2.2 berikut:

Tabel 2. 2 Parameter Sistem Tangki Ganda Skala Industri

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Konstanta Aliran Pompa	K_p	120,1	$m^3/s/v$
Luas Lubang Keluaran 1	A_{d_1}	9,52	m^2
Luas Lubang Keluaran 2	A_{d_2}	5,34	m^2
Diameter Lubang Keluaran 1	D_1	3,48	m
Diameter Lubang Keluaran 2	D_2	2,60	m
Luas Tangki 1	A_{t_1}	466,61	m^2
Luas Tangki 2	A_{t_2}	466,61	m^2
Konstanta Gravitasi	g	9,81	m/s^2
Level Air Tangki 1	L_1	4,59	m
Level Air Tangki 2	L_2	4,59	m
Ketinggian Tangki	h	9,181	m
Diameter Tangki	d	24,365	m
Tegangan Puncak Pompa	V_p	22	V
Konstanta Aliran Keluaran 1	C_1	$A_{d_1}\sqrt{2g}$	$m^{5/2} / s$
Konstanta Aliran Keluaran 2	C_2	$A_{d_2}\sqrt{2g}$	$m^{5/2} / s$

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.

2. Dilarang mengumpukan 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:

- 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.

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

2.3.3 Model Matematis Tangki 1

Pada tahapan pertama, digunakan prinsip kesetimbangan massa untuk menyusun EOM (*Equations of Motion*) yang menggambarkan ketinggian air pada tangki 1.

$$\frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = f(L_1(t), V_p(t)) \quad (2.1)$$

di mana:

A_1 : Luas penampang tangki 1.

L_1 : Ketinggian air di tangki 1.

V_p : Tegangan *input* ke pompa.

Perubahan massa di dalam sistem sama dengan massa yang masuk dikurangi massa yang keluar dalam interval waktu tertentu.

$$A_1 \frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = F_{i_1}(t) - F_{o_1}(t) \quad (2.2)$$

dimana

$$F_{i_1}(t) = K_p \times V_p(t) \quad (2.3)$$

dan

$$F_{o_1}(t) = \sqrt{2gL_1(t)} \quad (2.4)$$

Sehingga persamaan menjadi

$$A_1 \frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = (K_p \times V_p(t)) - (\sqrt{2gL_1(t)}) \quad (2.5)$$

yang diubah ke bentuk

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

dengan

maka

dimana

yang setelah disubstitusikan sehingga persamaannya menjadi

lalu diubah bentuknya ke

sehingga hasil akhir persamaan tangki 1 menjadi

Dikarenakan sistem *Coupled tank* terdiri atas 2 tangki, maka pada tangki kedua juga diperlukan pemodelan matematis setelah ini.

$$\frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = \left(\frac{K_p \times V_p(t)}{A_{t_1}} \right) - \left(\frac{\sqrt{2gL_1(t)}}{A_{t_1}} \right) \quad (2.6)$$

$$F_{o_1}(t) = A_{d_1} \sqrt{2g} \times \sqrt{L_1(t)} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = \left(\frac{K_p \times V_p(t)}{A_{t_1}} \right) - \left(\frac{A_{d_1} \sqrt{2g} \times \sqrt{L_1(t)}}{A_{t_1}} \right) \quad (2.8)$$

$$C_1 = A_{d_1} \sqrt{2g} \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = \left(\frac{K_p \times V_p(t)}{A_{t_1}} \right) - \left(\frac{C_1 \sqrt{L_1(t)}}{A_{t_1}} \right) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial L_1(t)}{\partial t} = \frac{K_p}{A_{t_1}} V_p(t) - \left(\frac{C_1 \sqrt{L_1(t)}}{A_{t_1}} \right) \quad (2.11)$$

$$\dot{L}_1(t) = \frac{K_p}{A_{t_1}} V_p(t) - \left(\frac{C_1 \sqrt{L_1(t)}}{A_{t_1}} \right) \quad (2.12)$$

2.3.4 Model Matematis Tangki 2

Pada tangki 2 juga menggunakan prinsip kesetimbangan massa untuk menyusun EOM yang menggambarkan ketinggian air pada tangki.

$$\frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = f(L_1(t), L_2(t)) \quad (2.13)$$

di mana:

A_2 : Luas penampang Tangki 2.

$L_2(t)$: Ketinggian air di Tangki 2.

Sama dengan tangki pertama, pada tangki 2 ini perubahan massa di dalam sistem juga sama dengan massa yang masuk dikurangi massa yang keluar dalam interval waktu tertentu.

$$A_{i_2} \frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = F_{i_2}(t) - F_{o_2}(t) \quad (2.14)$$

dimana

$$F_{i_2}(t) = F_{o_1}(t) = \sqrt{2gL_1(t)} \quad (2.15)$$

dan

$$F_{o_2}(t) = \sqrt{2gL_2(t)} \quad (2.16)$$

yang disubstitusikan sehingga menghasilkan

$$A_{i_2} \frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = \sqrt{2gL_1(t)} - \sqrt{2gL_2(t)} \quad (2.17)$$

lalu diubah menjadi

$$\frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = \left(\frac{\sqrt{2gL_1(t)}}{A_{i_2}} \right) - \left(\frac{\sqrt{2gL_2(t)}}{A_{i_2}} \right) \quad (2.18)$$

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

Dengan $F_{o1}(t) = Ad_1\sqrt{2g} \times \sqrt{L_1(t)}$ dan

$$F_{o2}(t) = Ad_2\sqrt{2g} \times \sqrt{L_2(t)} \quad (2.19)$$

maka

$$\frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = \left(\frac{Ad_1\sqrt{2g} \times \sqrt{L_1(t)}}{A_{t_2}} \right) - \left(\frac{Ad_2\sqrt{2g} \times \sqrt{L_2(t)}}{A_{t_2}} \right) \quad (2.20)$$

dimana $C_1 = Ad_1\sqrt{2g}$ dan

$$C_2 = Ad_2\sqrt{2g} \quad (2.21)$$

lalu di substitusikan sehingga persamaan menjadi

$$\frac{\partial L_2(t)}{\partial t} = \left(\frac{C_1\sqrt{L_1(t)}}{A_{t_2}} \right) - \left(\frac{C_2\sqrt{L_2(t)}}{A_{t_2}} \right) \quad (2.22)$$

sehingga didapat hasil akhir pemodelan matematis tangki 2 yaitu

$$\dot{L}_2(t) = \left(\frac{C_1\sqrt{L_1(t)}}{A_{t_2}} \right) - \left(\frac{C_2\sqrt{L_2(t)}}{A_{t_2}} \right) \quad (2.23)$$

Secara umum dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, t) \\ y &= h(x, t) \end{aligned} \quad (2.24)$$

dengan

$$\begin{aligned} L_1 &= x_1 \\ L_2 &= x_2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Sehingga hasilnya menjadi

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.

$$\dot{x} = f(x, u, t) = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{A_1} \sqrt{x_1(t)} x_1(t) + \frac{K_p}{A_1} u(t) \\ \frac{C_1}{A_1} \sqrt{x_1(t)} x_1(t) - \frac{C_2}{A_2} \sqrt{x_2(t)} x_2(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$y = h(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

2.4 Kalman Filter

2.4.1 Extended Kalman Filter

Extended Kalman Filter (EKF) adalah metode estimasi status sistem yang merupakan perluasan dari *Kalman Filter* (KF) konvensional [21]. *Kalman Filter* pertama kali diperkenalkan oleh R.E. Kalman pada tahun 1960 sebagai solusi optimal untuk estimasi status sistem dinamis linier dengan gangguan Gaussian [11]. Namun, dalam kenyataannya, banyak sistem fisik yang memiliki dinamika nonlinier, seperti sistem navigasi, robotika, dan sistem proses industri seperti tangki ganda. Sistem-sistem ini tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh model linier, sehingga *Kalman Filter* konvensional menjadi kurang efektif atau bahkan tidak dapat diterapkan secara langsung [22].

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkanlah *Extended Kalman Filter* (EKF), yang memungkinkan penerapan prinsip *Kalman Filter* pada sistem nonlinier dengan cara melakukan pelurusan (*linearization*) lokal terhadap model sistem [23]. EKF bekerja dengan prinsip yang sama seperti Kalman Filter biasa, yaitu melakukan prediksi status berdasarkan model sistem, kemudian memperbaruinya menggunakan data pengukuran aktual [11]. Namun, dalam EKF, proses prediksi dan koreksi dilakukan dengan melinierkan fungsi sistem dan pengukuran di sekitar estimasi status saat ini [24]. Proses linierisasi ini dilakukan menggunakan pendekatan deret Taylor orde pertama, di mana turunan parsial dari fungsi sistem dihitung terhadap variabel statusnya.

EKF memiliki beberapa keterbatasan penting. Salah satunya adalah sensitivitas terhadap kesalahan linierisasi. Jika model sistem atau estimasi awal tidak cukup dekat dengan kondisi aktual, proses linierisasi lokal dapat menyebabkan estimasi melenceng atau bahkan menyebabkan divergensi, di mana kesalahan estimasi semakin besar seiring waktu [24]. Selain itu, EKF juga sangat tergantung pada asumsi bahwa sistem dapat dilinierkan secara valid di sekitar titik operasi saat ini dan bahwa *noise* sistem memiliki karakteristik Gaussian dengan kovarians yang diketahui [25].

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.

Persamaan yang digunakan observer adalah:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= C\hat{x}(t) + v(t)\end{aligned}\quad (2.27)$$

Dan bentuk algoritma perancangan observer menjadi

$$\dot{\hat{x}}(t) = A(t)\hat{x}(t) + Bu(t) + k_f(t)(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.28)$$

Untuk mendapatkan nilai *gain* k , dapat diselesaikan dengan persamaan berikut:

$$k = P(t)C^T R^{-1}(t) \quad (2.29)$$

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

$$\dot{P}(t) = A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - P(t)C^T R^{-1}(t)CP(t) + Q(t) \quad (2.30)$$

2.4.2 EKF-Based non Linear Observer

EKF-Based Nonlinear Observer merupakan salah satu pendekatan *observer* yang memanfaatkan *Extended Kalman Filter* sebagai dasar algoritmanya. Pendekatan ini sangat cocok untuk sistem dengan karakteristik nonlinier, seperti sistem tangki ganda, karena mampu menangani kompleksitas dinamika serta ketidakpastian pengukuran dengan cara yang efisien dan adaptif [26].

Pelurusan lokal terhadap fungsi nonlinier dilakukan pada kedua tahap ini, menggunakan turunan Jacobian dari fungsi sistem dan fungsi pengukuran terhadap status sistem. Dengan melakukan hal ini secara berulang pada setiap langkah waktu, *observer* dapat mengikuti perubahan status sistem secara *real-time* meskipun hanya sebagian informasi yang tersedia [27].

Dalam sistem seperti tangki ganda, *EKF-Based Nonlinear Observer* sangat relevan karena umumnya hanya satu tangki yang dilengkapi sensor *level*, sementara tangki lainnya tidak dapat diukur secara langsung [3]. Dengan menggunakan *observer* ini, operator atau sistem kendali dapat mengetahui ketinggian cairan di seluruh sistem secara estimatif, tanpa harus menambahkan sensor fisik baru, sehingga efisien secara biaya dan tetap akurat secara teknik.

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.

Bentuk persamaan umum sistem nonlinear untuk EKF-Based Nonlinear Observer adalah:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, t) \\ y &= h(x)\end{aligned}\tag{2.31}$$

Sehingga dalam bentuk nonlinear, persamaan untuk perancangan EKF menjadi

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(x, u, t) + k_f(t)(y(t) - \hat{y}(t))\tag{2.32}$$

Sama seperti EKF biasa, untuk mencari *gain* K di EKF-Based Nonlinear Observer ini, digunakan persamaan 2.28 dan persamaan 2.29 untuk mencari nilai P.

2.5 Root Mean Square Error (RMSE)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan salah satu parameter evaluasi yang umum digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan antara nilai hasil estimasi dengan nilai aktual suatu sistem. RMSE memberikan informasi mengenai besarnya deviasi rata-rata antara nilai estimasi dan nilai sebenarnya dalam bentuk kuadrat rata-rata yang kemudian diakarkan, sehingga satuannya tetap sama dengan variabel yang diamati. Oleh karena itu, RMSE banyak digunakan untuk menilai akurasi suatu estimator atau model matematis [28].

Secara matematis, RMSE didefinisikan sebagai akar dari nilai rata-rata kuadrat selisih antara sinyal aktual dan sinyal estimasi, yang dinyatakan sebagai berikut [28], [11]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}\tag{2.33}$$

dengan $y(k)$ menyatakan nilai aktual, $\hat{y}(k)$ menyatakan nilai hasil estimasi, dan N adalah jumlah data pengamatan. Nilai RMSE yang semakin kecil menunjukkan bahwa hasil estimasi semakin mendekati nilai aktual, sehingga performa estimator dapat dikatakan semakin baik [29].

Dalam bidang sistem kendali dan estimasi keadaan, RMSE sering digunakan sebagai indikator kinerja untuk mengevaluasi dan membandingkan performa berbagai metode estimator, seperti Kalman Filter dan Extended Kalman Filter (EKF), baik pada kondisi tanpa gangguan maupun pada sistem yang dipengaruhi oleh noise dan ketidakpastian [11], [29].

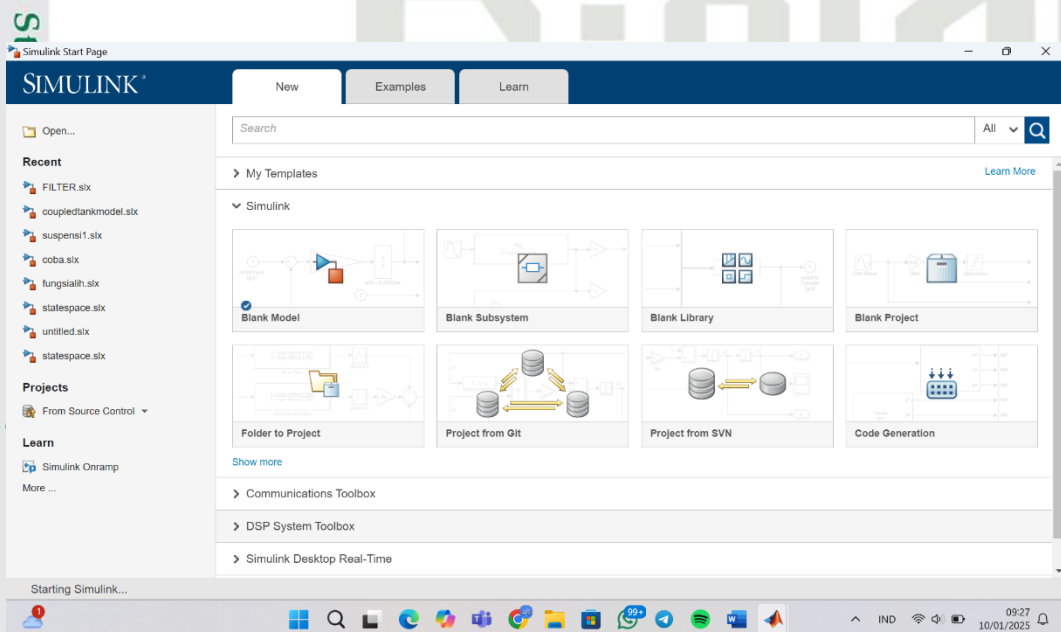
2.6 Software MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik yang merupakan bahasa pemrograman matematika lanjutan dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. MATLAB merupakan perangkat lunak yang sangat populer untuk simulasi dan analisis sistem dinamis [30]. MATLAB telah berkembang menjadi sebuah *environment* pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan pengolahan sinyal, aljabar linear dan kalkulasi matematis lainnya [31].

MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsifungsi tambahan untuk aplikasi khusus. Dalam konteks sistem *coupled tank*, MATLAB dapat digunakan untuk:

1. Membuat persamaan matematika yang merepresentasikan sistem.
2. Menyelesaikan persamaan diferensial menggunakan *solver* numerik.
3. Menganalisis respons sistem terhadap gangguan atau perubahan parameter.
4. Memvisualisasikan perubahan *level* cairan antar tangki berdasarkan variasi parameter *input* dan kondisi awal.

Simulasi menggunakan MATLAB memungkinkan visualisasi yang lebih baik dan efisiensi dalam pengujian sistem tanpa harus membangun *prototipe* fisik. MATLAB juga menyediakan alat seperti *Simulink* untuk memodelkan sistem dengan pendekatan berbasis blok diagram.

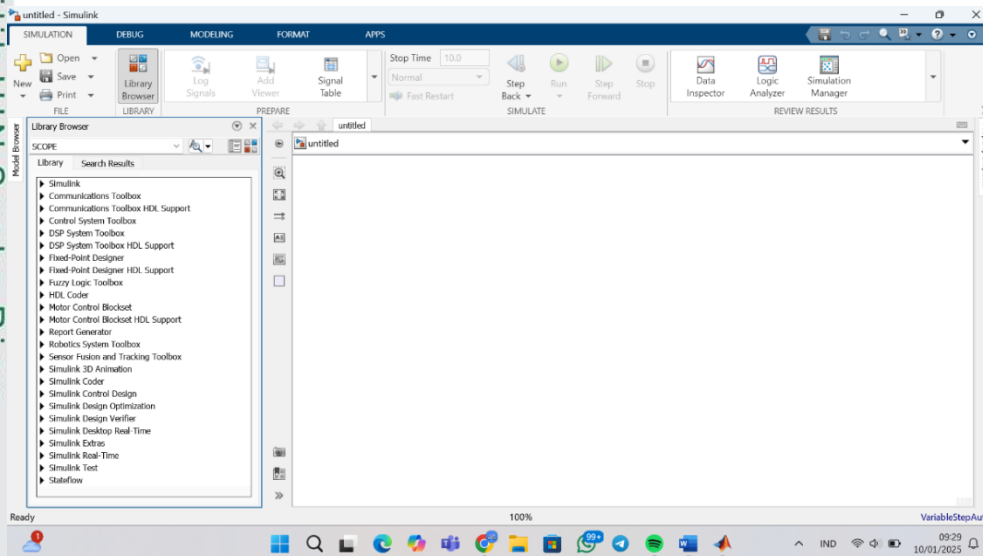


Gambar 2.3 Tampilan simulink MATLAB

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

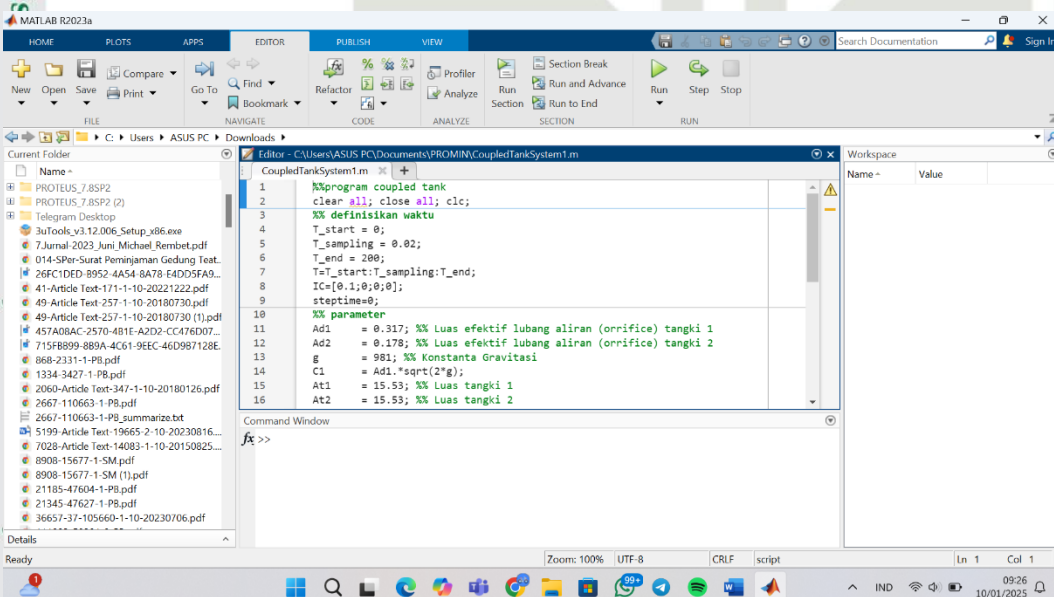
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

Berdasarkan gambar 2.3, jenis *Simulink* yang digunakan pada simulasi tangki ganda yaitu *blank model* untuk membuat model yang berisikan blok-blok parameter untuk kepentingan dalam melakukan simulasi.



Gambar 2.4 Tampilan simulasi dan blok library MATLAB

Berdasarkan model matematika yang dibuat sebelumnya, persamaan-persamaan tersebut dituangkan dalam bentuk kode program yang juga tersedia fiturnya di aplikasi MATLAB pada gambar 2.4. Melalui fitur *m-file* dapat dituliskan kode program untuk model yang dibuat di *Simulink* dengan berdasarkan penurunan persamaan model matematis.

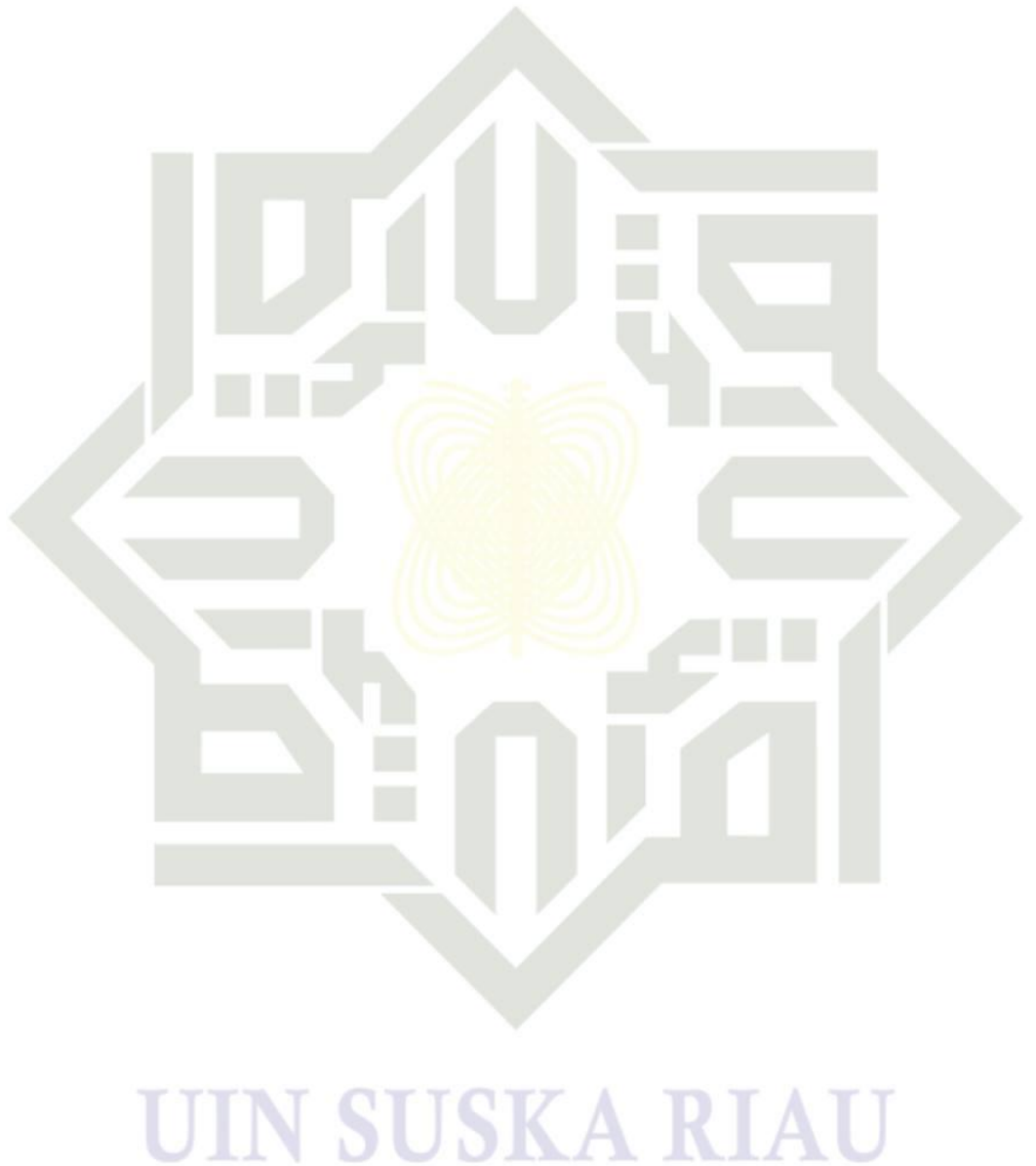


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Gambar 2.5 *M-file* MATLAB

Gambar 2.5 merupakan tampilan *M-file* MATLAB untuk menuangkan kode program agar simulasi bisa dijalankan, serta berisikan fitur lain berupa *command window* dan *workspace* data hasil simulasi.



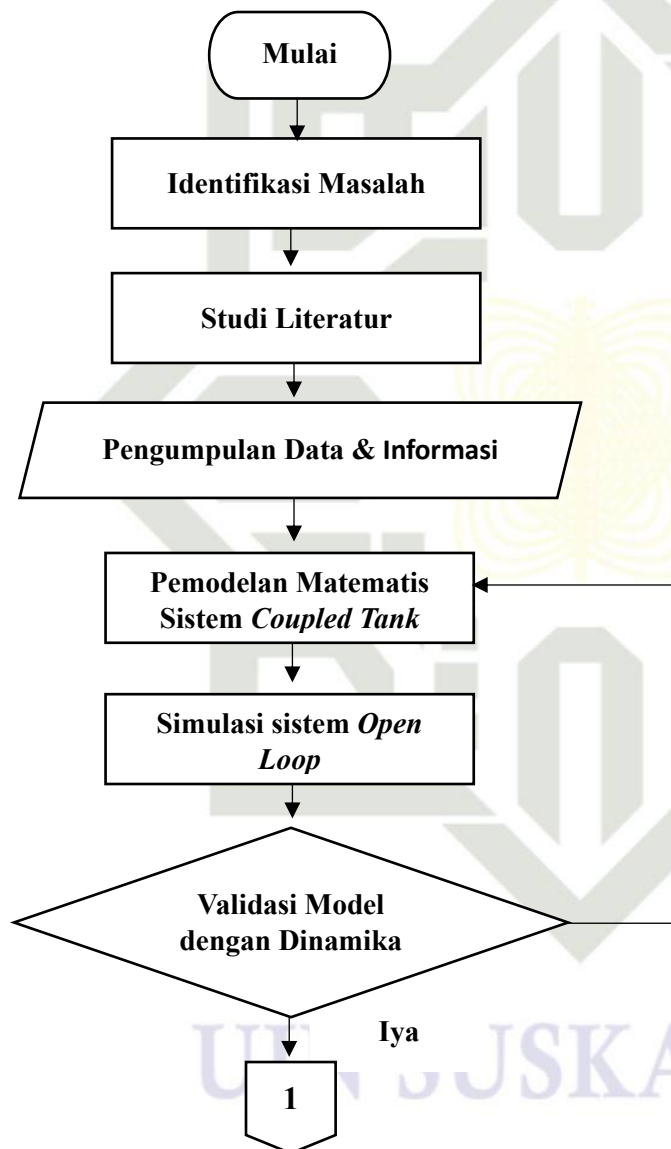
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

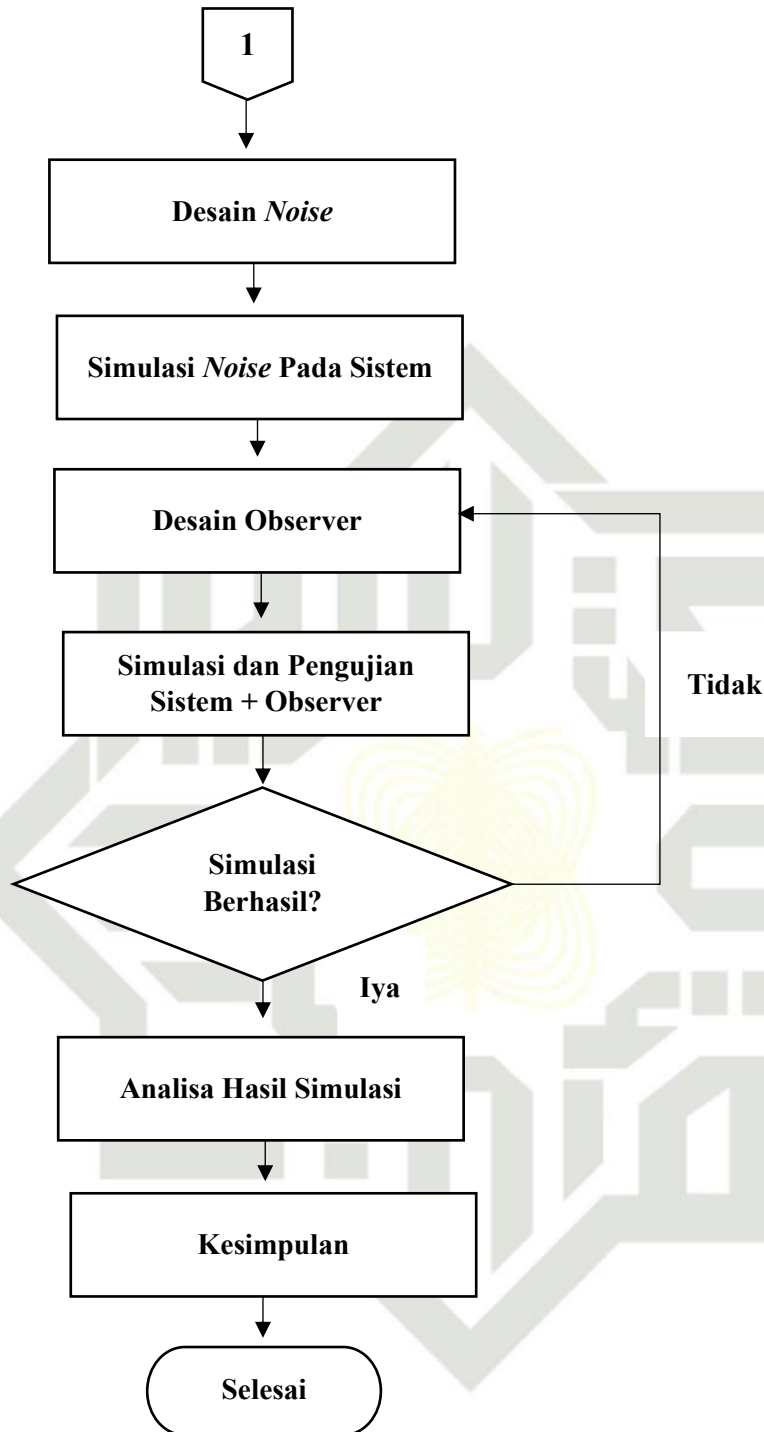
3.1 Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling terintegrasi dan tersusun secara sistematis untuk mencapai tujuan dari tugas akhir. Adapun alur penelitian digambarkan dalam bentuk diagram pada gambar 3.1 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 Alur Kerja

Tahapan penelitian dilakukan berdasarkan diagram alur kerja yang terdapat pada gambar 3.1 diatas.

3.2 Tahap Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang saling berkaitan dan dilakukan secara berurutan sebagai berikut:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi 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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Identifikasi Masalah

Tahapan awal penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan yang relevan dalam dunia industri, khususnya pada sistem kendali proses fluida. Permasalahan utama yang diangkat adalah keterbatasan pengukuran variabel status pada sistem tangki ganda, serta kompleksitas dinamika nonlinier yang sulit dikendalikan dan dipantau secara langsung.

Studi Literatur

Setelah masalah teridentifikasi, dilakukan studi pustaka dari berbagai referensi seperti jurnal ilmiah, buku teks, laporan tugas akhir sebelumnya, dan publikasi terkini yang membahas topik terkait *observer*, Kalman Filter, sistem nonlinier, serta pemodelan sistem tangki ganda. Studi ini bertujuan memperkuat landasan teori dan menentukan pendekatan yang sesuai.

3. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan pada penelitian ini meliputi parameter fisik sistem tangki ganda (luas penampang, ketinggian maksimum, konstanta aliran, dsb.) serta konfigurasi sistem. Data tersebut diperlukan untuk membuat model matematika sistem secara akurat, baik dalam bentuk nonlinier maupun representasi *state-space*.

4. Pemodelan Matematis Sistem Tangki Ganda

Berdasarkan persamaan 2.26, dihasilkan *state space equation* berbentuk nonlinear berikut:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{A_{t_1}} \sqrt{x_1(t)} x_1(t) & 0 \\ \frac{C_1}{A_{t_2}} \sqrt{x_1(t)} x_1(t) & \frac{C_2}{A_{t_2}} \sqrt{x_2(t)} x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{A_{t_1}} u(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Untuk pemodelan matematis EKF konvensional, dilakukan linearisasi terlebih dahulu menggunakan deret Taylor dengan bentuk umumnya yaitu:

$$f(x) = y(x_0) + y'(x-x_0) + \frac{y''(x_0)}{2!} (x-x_0)^2 + \frac{y'''(x_0)}{3!} (x-x_0)^3 + \dots \quad (3.2)$$

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.

Sehingga bentuk *state space equation* untuk EKF menjadi

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{2A_{t_1}\sqrt{x_1(t)}} & 0 \\ \frac{C_1}{2A_{t_1}\sqrt{x_1(t)}} & -\frac{C_2}{2A_{t_2}\sqrt{x_2(t)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{A_{t_1}} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

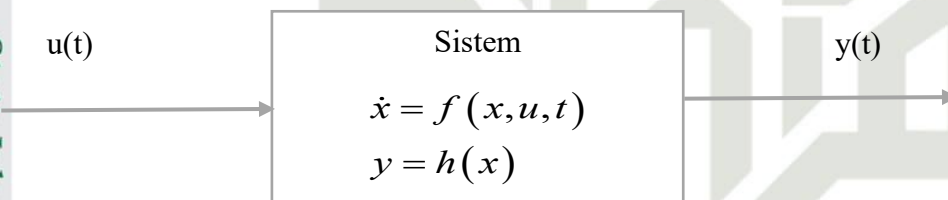
Lalu kedua hasil *state space equation* pada persamaan 3.1 dan 3.3 di simulasikan menggunakan MATLAB.

5. Simulasi Sistem Tangki Ganda

Simulasi sistem tangki ganda dilakukan sebanyak 2 kali untuk sistem yang nonlinier dan sistem yang sudah di linearisasi.

a. Tangki Ganda Nonlinier

Model nonlinier disimulasikan tanpa pengendali maupun *observer* dengan bentuk sebagai berikut:



Gambar 3.2 Blok Diagram Nonlinear Tangki Ganda

Simulasi menggunakan *simulink* MATLAB dilakukan berdasarkan blok diagram pada gambar 3.2. Tujuannya adalah memverifikasi dinamika model, menilai kestabilan awal, serta untuk kebutuhan tahapan simulasi selanjutnya. Berikut model sistem nonlinear dari sistem tangki ganda.



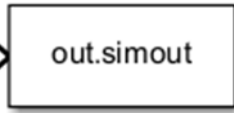
Tabel 3. 1 Blok Simulink yang Digunakan

III-5



Scope

Menampilkan hasil keluaran simulasi dalam bentuk grafik.



To Workspace

Menyimpan data keluaran simulasi ke *workspace* MATLAB untuk dianalisis lebih lanjut.



Sqrt

Menghitung akar kuadrat dari sinyal masuk.

Model *simulink* dijalankan melalui program dengan algoritma yang disajikan pada tabel 3.2 berikut:

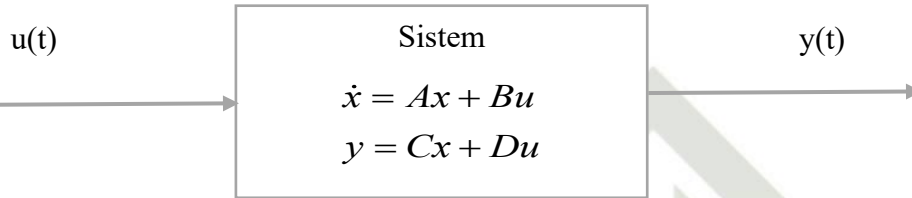
Tabel 3. 2 Algoritma Tangki Ganda Nonlinear

ALGORITMA	
1	<i>start</i>
2	Inisialisasi sistem ; <i>clear a;close all;clc, %%Bersihkan semua variabel</i>
3	Definisikan waktu; <i>T_start, T_Sampling, T_end, T= T_start, T_Sampling, T_end, steptime, dan IC %%T_start=0; T_Sampling=1; T_end=1000; T = T_start:T_sampling:T_end; steptime = 0; IC = [0; 0];</i>
4	Definisikan parameter; <i>%%Berdasarkan tabel 2.2</i>
5	Definisikan matriks; <i>%%Berdasarkan rumus 3.1</i>
6	Panggil blok <i>Simulink: sim("coupledtanknonlinier.slx") %%Gambar 3.3</i>
7	Menyimpan data <i>T, x_tank1, x_tank2;</i>
8	Plot grafik;
9	<i>end</i>

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.

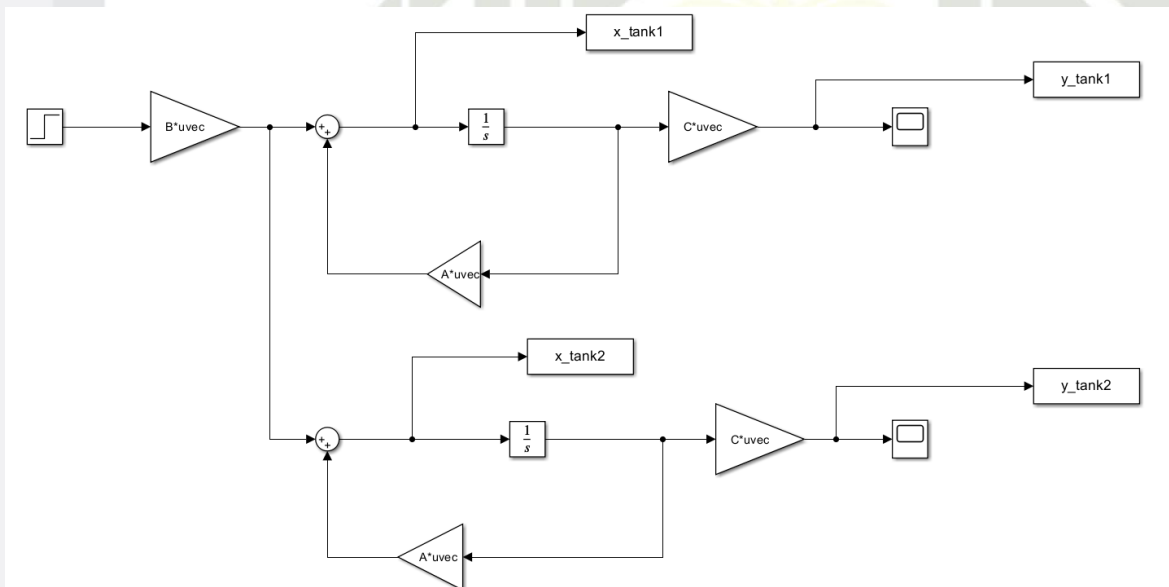
b. Tangki Ganda Linier

Model nonlinier disimulasikan tanpa pengendali maupun *observer* dengan bentuk sebagai berikut:



Gambar 3. 4 Blok Diagram Linear Tangki Ganda

Berikut model sistem pada gambar 3.4 yang sudah di linearisasi dari sistem tangki ganda pada *simulink*:



Gambar 3. 5 *Simulink* Tangki Ganda Linier

Berdasarkan pemodelan matematis, *simulink* dijalankan melalui program dengan algoritma pada tabel 3.3 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.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

Tabel 3. 3 Algoritma Pemrograman Tangki Ganda Linier

ALGORITMA	
1	<i>start</i>
2	Inisialisasi sistem ; <i>clear a;close all;clc, %%Bersihkan semua variabel</i>
3	Definisikan waktu; T_start, T_Sampling, T_end, T= T_start, T_Sampling, T_end, steptime, dan IC %%T_start=0; T_Sampling=1; T_end=1000; T = T_start:T_sampling:T_end; steptime = 0; IC = [0; 0];
4	Definisikan parameter; %%Berdasarkan tabel 2.2
5	Definisikan matriks <i>state-space</i> ;
6	Panggil blok <i>Simulink</i> : <i>sim("ctliniertanpanoise.slx"); %%Gambar 3.5</i>
7	Simpan hasil <i>state</i> (tinggi tangki) dari simulasi ke file .mat untuk penggunaan atau analisis lebih lanjut. %%save('x_tanklinear_data.mat', 'T', 'x_tank1', 'x_tank2');
8	Plot grafik; <i>plot(T,y_out,'b',LineWidth,2);grid</i>
9	<i>end</i>

6. Desain Gangguan

Dalam pemodelan sistem *coupled tank*, dinamika sebenarnya tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan oleh model matematis yang ideal. Untuk mendekati kondisi nyata, dua jenis gangguan ditambahkan:

a. Gangguan Keadaan

Gangguan ini mewakili ketidakpastian proses yang memengaruhi dinamika sistem, seperti fluktuasi debit aliran, perubahan parameter fisik tangki, atau efek hidrodinamika yang tidak termodelkan. Gangguan keadaan dimasukkan langsung ke persamaan keadaan:

$$\dot{x} = f(x, u, t) + w \quad (3.4)$$

Dan persamaan

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \quad (3.5)$$

untuk tangki ganda linier

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.

Gangguan Pengukuran

Gangguan ini menggambarkan ketidakpastian pada pengukuran sensor, seperti kesalahan pembacaan level air, interferensi sinyal listrik, atau *noise* lingkungan. Gangguan pengukuran ditambahkan ke persamaan keluaran:

$$y = h(x) + v \quad (3.4)$$

Dan persamaan

$$y = Cx + Du + v \quad (3.5)$$

untuk tangki ganda linier. Dengan menambahkan gangguan keadaan dan pengukuran, simulasi menjadi lebih realistis dan mampu menguji ketahanan algoritma pengamat terhadap ketidakpastian dunia nyata

7. Simulasi Gangguan Pada Sistem

Untuk mensimulasikan kondisi nyata, gangguan acak ditambahkan pada setiap tangki. *Noise* proses (w) merepresentasikan ketidakpastian dinamika sistem, sedangkan *noise* pengukuran (v) mewakili ketidakakuratan sensor. Keduanya dihitung langsung melalui program MATLAB.

a. Tangki Ganda Nonlinier + *Noise*

Algoritma untuk *noise* proses dan pengukuran dituangkan pada program MATLAB dengan algoritma sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Algoritma *Noise* Tangki Ganda Nonlinier

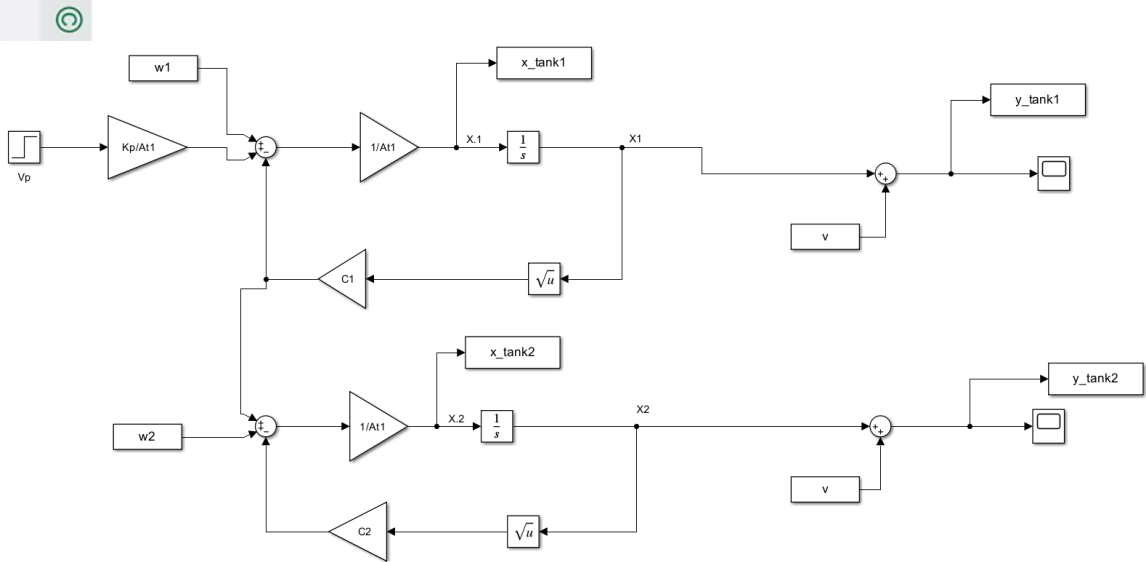
ALGORITMA	
1	<i>start</i>
2	Inisialisasi sistem <code>clear; clc;</code> %% Bersihkan workspace dan command window
3	Definisikan waktu; <code>T_start, T_Sampling, T_end, T= T_start, T_Sampling, T_end, %%T_start=0; T_Sampling=1; T_end=1000;</code>
4	Definisikan parameter %%Berdasarkan tabel 2.2
5	Definisikan matriks; %%Berdasarkan rumus 3.1
6	Definisikan kondisi awal dan step time %% <code>IC=[0;0], steptime=0;</code>
7	Jalankan model Simulink tanpa <i>noise</i> ; <code>sim("cttanpanoise.slx");</code> %%Gambar 3.3
8	Hitung jumlah sampel; %% <code>N=length(T).</code>

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

9	Hitung <i>noise</i> state (6% dari max sinyal); %% sigma_w1 = max(abs(x_tank1(:,2)))*0.06;, sigma_w2 = max(abs(x_tank2(:,2)))*0.06;.
10	Membuat deret Gaussian; %% w1_series = sigma_w1 .* randn(1,N);, w2_series = sigma_w2 .* randn(1,N);.
11	Gabungkan waktu dan <i>noise</i> ; %% w1 = [T' w1_series'];, w2 = [T' w2_series'];.
12	Jalankan simulasi dengan <i>noise</i> proses; sim("coupledtanknonlinier.slx").
13	Hitung deviasi standar gangguan pengukuran; %% sigma_v = max(abs(y_tank1(:,2)))*0.06; sigma_v = max(abs(y_tank2(:,2)))*0.06;.
14	Buat gangguan pengukuran, lalu tambahkan gangguan itu ke sinyal keluaran sensor.
15	Simpan semua hasil
16	Tampilkan nilai maksimum <i>noise</i>
17	Load <i>noise</i> untuk simulasi selanjutnya; %%load('noise_naya.mat');
18	Definisikan <i>noise</i> dan waktu; %%v = timeseries(v, T); W1s = timeseries(w1, T); w2s = timeseries(w2, T);
19	Jalankan simulasi dengan <i>noise</i> final; %%sim("coupledtanknonlinier1.slx");
20	Plot hasil simulasi
21	end

Program pada tabel 3.4 dijalankan di MATLAB untuk membuat dan menyimpan data gangguan keadaan serta pengukuran. Data tersebut kemudian dimasukkan ke Simulink melalui blok *From Workspace*, sehingga Simulink cukup memanggil gangguan yang sudah tersedia tanpa menghitungnya lagi. Hasil desain gangguan yang dimasukkan ke sistem pada Simulink ada pada gambar 3.6 berikut ini :

UIN SUSKA RIAU



Gambar 3.6 Noise pada Simulink

b. Tangki Ganda Linier + Noise

Sama seperti pada sistem tangki ganda nonlinier, pada sistem yang linier juga ditambahkan *noise* proses dan pengukuran dengan algoritma yang disajikan dalam tabel 3.5 berikut:

Tabel 3. 5 Algoritma Noise Tangki Ganda Linier

ALGORITMA	
1	<i>start</i>
2	Inisialisasi sistem clear; clc; %% Bersihkan workspace dan command window
3	Definisikan waktu; T_start, T_Sampling, T_end, T= T_start, T_Sampling, T_end, steptime, IC %%T_start=0; T_Sampling=1; T_end=1000; steptime=0, IC=[0,0]
4	Definisikan parameter %%Berdasarkan tabel 2.2
5	Definisikan matriks;
6	Jalankan model Simulink tanpa noise; sim("ctliniertanpanoise.slx"); %%Gambar 3.3
7	Hitung jumlah sampel; %%N=length(T).
8	Hitung noise state (6% dari max sinyal); %% sigma_w1 = max(abs(x_tank1(:,2)))*0.06; sigma_w2 = max(abs(x_tank2(:,2)))*0.06;.
9	Membuat deret Gaussian; %% w1_series = sigma_w1 .* randn(1,N); w2_series = sigma_w2 .* randn(1,N);.
10	Gabungkan waktu dan noise; %% w1 = [T' w1_series']; w2 = [T' w2_series'];.

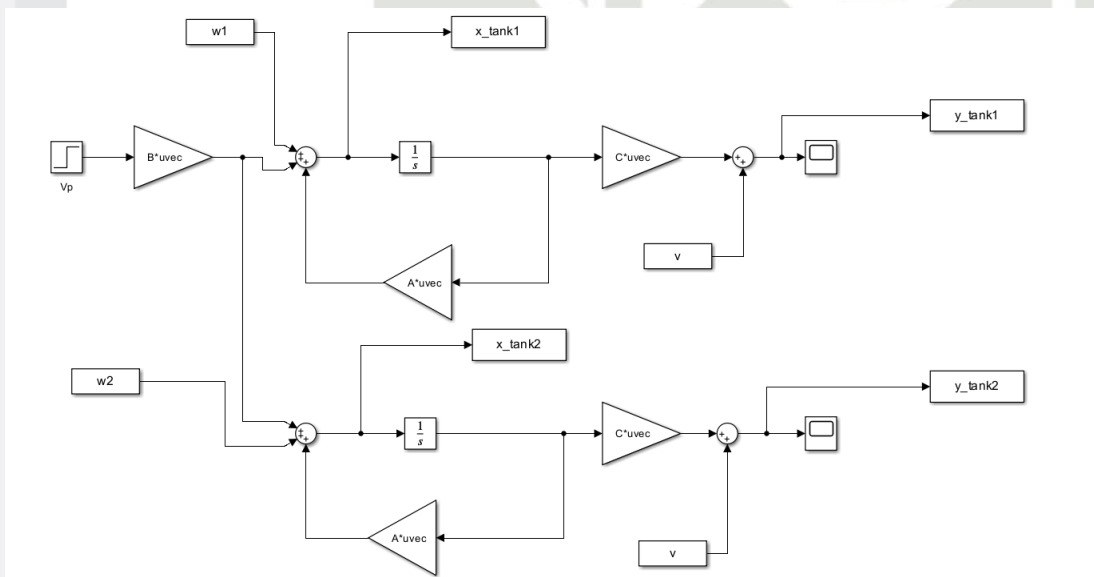
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

```

11 Jalankan simulasi dengan noise proses; sim("ctlinearW.slx").
12 Hitung deviasi standar gangguan pengukuran; %% sigma_v =
    max(abs(y_tank1(:,2)))*0.06; sigma_v = max(abs(y_tank2(:,2)))*0.06;.
13 Buat gangguan pengukuran, lalu tambahkan gangguan itu ke sinyal keluaran
    sensor.
14 Simpan semua hasil
15 Tampilkan nilai maksimum noise
16 Load noise untuk simulasi selanjutnya; %%load('noise_linear.mat');
17 Definisikan noise dan waktu; %%v = timeseries(v, T); W1s = timeseries(w1, T);
    w2s = timeseries(w2, T);
18 Jalankan simulasi dengan noise final; %%sim("ctlinearV.slx");
19 Plot hasil simulasi
20 end

```

Sama seperti pada sistem nonlinier sebelumnya, *noise* disimpan dalam bentuk data yang akan dimasukkan ke *simulink* melalui blok *form workspace* pada tiap tangkinya. Bentuk model *simulink* sistem tangka ganda yang ditambahkan dengan *noise* d\terdapat pada gambar 3.7 berikut:



Gambar 3. 7 *Simulink* Tangki Ganda Linier ditambah *Noise*

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

Desain *Observer*

Extended Kalman Filter

Untuk simulasi EKF, digunakan persamaan dari hasil linearisasi deret Taylor dengan persamaan umum

$$f(x) = y(x_0) + y'(x-x_0) + \frac{y''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \frac{y'''(x_0)}{3!}(x-x_0)^3 + \dots \quad (3.5)$$

Lalu persamaan 3.1 di linearisasi sehingga bentuknya menjadi

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{2A_{t_1}\sqrt{x_1(t)}} & 0 \\ \frac{C_1}{2A_{t_1}\sqrt{x_1(t)}} & -\frac{C_2}{2A_{t_2}\sqrt{x_2(t)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{A_{t_1}} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (3.6)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Gain kalman dihitung dengan rumus otomatis pada MATLAB :

```
[kalmf, Kf, P] = kalman(sys_kf, Q, R);
```

MATLAB otomatis menghitung gain Kalman (Kf) berdasarkan kovarians gangguan proses (Q) dan gangguan pengukuran (R) yang telah ditetapkan sesuai desain gangguan dengan algoritma pada tabel 3.6 berikut :

Tabel 3. 6 Algoritma Observer

ALGORITMA	
1	<i>start</i>
2	Inisialisasi sistem ; <i>clear all;close all;clc, %%Bersihkan semua variabel</i>
3	Tetapkan parameter waktu simulasi: <i>%%T_start, T_sampling, T_end, T, steptime,</i> dan kondisi awal IC.
4	Definisikan parameter; <i>%%Berdasarkan tabel 2.2</i>
5	Definisikan matriks; <i>%%Berdasarkan rumus 3.6</i>
6	<i>Load</i> data gangguan dari file <i>noise_linear.mat</i> dan konversi variabel gangguan (v,

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.

```

w1, w2) menjadi time series untuk Simulink.
7 Hitung kovariansi noise %%Hitung Q dan R dari varians noise keadaan dan
pengukuran.
8 Definisikan matriks observer %%A_obs, B_obs, C_obs, dan D_obs.
9 Hitung gain Kalman Filter
10 Definisikan kondisi awal observer; IC_obs = [0; 0];
11 Jalankan simulasi Simulink dengan gangguan: sim("EKFlinear.slx").
12 Tampilkan hasil melalui grafik
13 end
  
```

Hasil gain ini kemudian digunakan di Simulink untuk melakukan estimasi keluaran dari sistem tangki ganda.

b. EKF-Based Nonlinear Observer

EKF-Based Nonlinear Observer menggunakan persamaan nonlinear dari sistem tangki ganda dengan bentuk *state space*

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_1}{A_{t_1}} \sqrt{x_1(t)} & 0 \\ \frac{C_1}{A_{t_1}} \sqrt{x_1(t)} & -\frac{C_2}{A_{t_2} \sqrt{x_2(t)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{A_{t_1}} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (3.7)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Lalu hasil *state space* pada persamaan 3.7 dituangkan dalam algoritma pemrograman pada tabel 3.7 berikut

Tabel 3. 7 Algoritma EKF-Based Nonlinear Observer

ALGORITMA

```

1 start
2 Inisialisasi sistem ; clear all;close all;clc, %%Bersihkan semua variabel
3 Tetapkan parameter waktu simulasi: %%T_start, T_sampling, T_end, T, steptime,
dan kondisi awal IC.
  
```

```

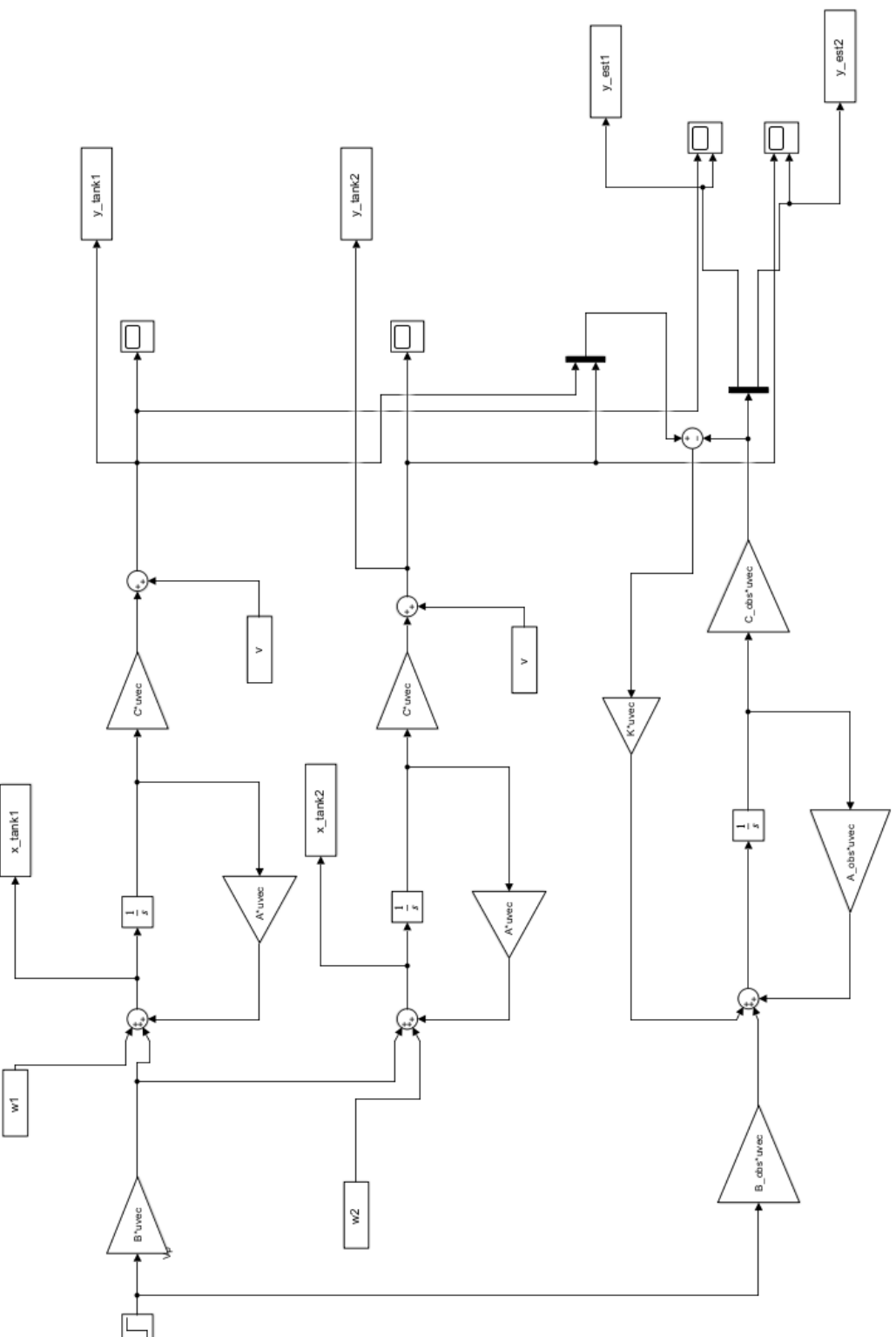
4 Definisikan parameter; %%Berdasarkan tabel 2.2
5 Definisikan matriks;
6 Load data gangguan dari file noise_naya.mat dan konversi variabel gangguan (v,
  w1, w2) menjadi time series untuk Simulink.
7 Hitung kovariansi noise %%Hitung Q dan R dari varians noise keadaan dan
  pengukuran.
8 Definisikan kondisi awal observer; IC_obs = [0; 0];
9 Definisikan matriks observer %%A_obs, B_obs, C_obs, dan D_obs.
10 Hitung gain Kalman Filter
11 Jalankan simulasi Simulink dengan gangguan: sim("EKF_noise1.slx").
12 Plot hasil grafik
13 end

```

9. Simulasi *Observer* Pada Sistem

Setelah desain selesai, program yang sama dijalankan di MATLAB untuk melakukan simulasi. Pada *simulink*, *observer* dibangun dengan menggunakan blok gain yang sudah terintegrasi dengan program pada tabel 3.3. untuk EKF dan EKF – *Based Nonlinear Observer*:

Gambar 3.8 Simulink EKF Tangki Ganda



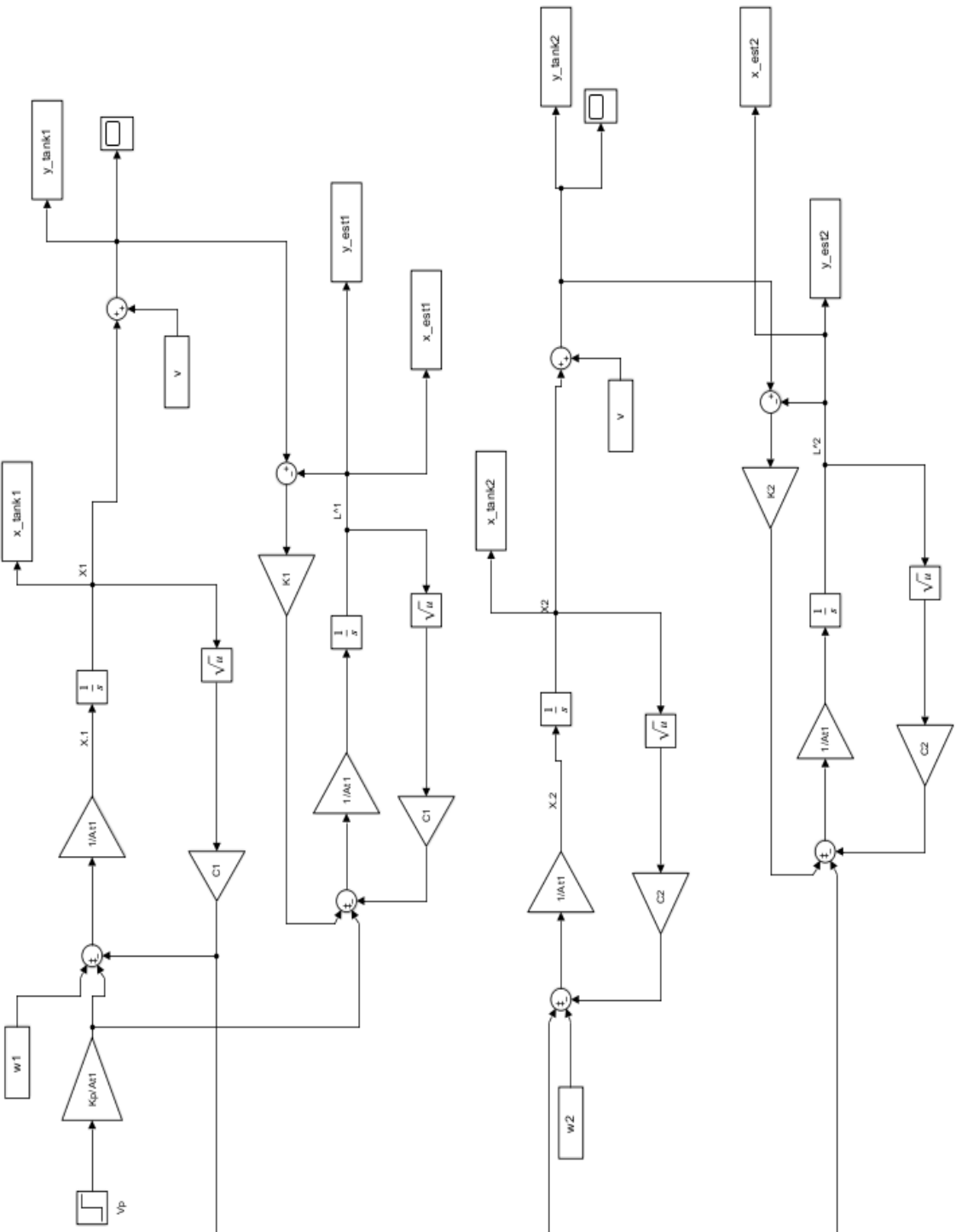
© Hak cipta milik UIN Suska Riau

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.

Gambar 3. 9 Simulink EKF – Based Nonlinear Observer Tangki Ganda



Hak Cipta Uinraung Unga-Unga

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

Gambar 3.8 dan 3.9 di atas merupakan bentuk model *Simulink* yang sudah terdapat sistem, gangguan, dan juga observer.

10. Analisa Hasil Simulasi

Pada tahap ini dilakukan pengujian untuk menilai kinerja *EKF-Based Nonlinear Observer* dalam mengestimasi keluaran sistem setelah diberi gangguan proses dan pengukuran. Respon estimasi dari *EKF-Based Nonlinear Observer* kemudian dibandingkan dengan keluaran sistem aktual serta hasil EKF biasa untuk melihat sejauh mana metode ini mampu mereduksi gangguan dan mengikuti dinamika sistem.

11. Kesimpulan

Setelah semua tahapan selesai dilaksanakan dan evaluasi menunjukkan keberhasilan penelitian yang menggunakan observer sebagai estimator, dapat disimpulkan bahwa gagasan ini berhasil dan dapat dijadikan acuan untuk penelitian berikutnya.

UIN SUSKA RIAU

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, serta pengujian yang telah dilakukan pada sistem tangki ganda nonlinier, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengaruh noise terhadap performa estimasi, *EKF-Based Nonlinear Observer* menunjukkan kemampuan estimasi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan *Extended Kalman Filter* (EKF) konvensional. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang jauh lebih kecil dan peningkatannya yang relatif terkendali meskipun tingkat noise proses dan noise pengukuran dinaikkan hingga kondisi ekstrem. Sebaliknya, EKF konvensional menunjukkan sensitivitas yang tinggi terhadap noise, yang menyebabkan peningkatan kesalahan estimasi secara signifikan. Dengan demikian, *EKF-Based Nonlinear Observer* memiliki tingkat ketahanan (*robustness*) yang lebih tinggi terhadap gangguan noise pada sistem tangki ganda nonlinier.
2. Berdasarkan evaluasi respons sistem terhadap variasi parameter, meliputi variasi input, perubahan kondisi awal observer, dan variasi noise, *EKF-Based Nonlinear Observer* secara konsisten memberikan performa estimasi yang lebih akurat dibandingkan dengan EKF konvensional. Pada pengujian variasi input, observer nonlinier mampu mengikuti perubahan dinamika sistem dengan kesalahan yang rendah. Pada pengujian perubahan kondisi awal, meskipun terjadi peningkatan kesalahan estimasi akibat perbedaan kondisi awal, *EKF-Based Nonlinear Observer* tetap menunjukkan kemampuan konvergensi yang baik. Sementara itu, EKF konvensional menghasilkan kesalahan estimasi yang relatif besar dan kurang adaptif terhadap perubahan kondisi operasi sistem.

Berdasarkan kedua kesimpulan tersebut, dapat dinyatakan bahwa *EKF-Based Nonlinear Observer* lebih sesuai digunakan untuk sistem tangki ganda nonlinier yang bekerja dalam kondisi dinamis dan bernoise dibandingkan dengan *Extended Kalman Filter* konvensional.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah 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.

1. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan metode observer lain, seperti Unscented Kalman Filter (UKF) atau Sliding Mode Observer, untuk dibandingkan dengan EKF-Based Nonlinear Observer dalam mengestimasi sistem tangki ganda nonlinier.
2. Model sistem dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan ketidakpastian parameter (*parameter uncertainty*) atau adanya gangguan eksternal lain yang lebih kompleks, sehingga kemampuan observer dapat diuji pada kondisi yang lebih mendekati sistem nyata.
3. Implementasi pengendali (*controller*) berbasis hasil estimasi observer, seperti kombinasi antara observer dan pengendali umpan balik, dapat dikaji lebih lanjut untuk membentuk sistem kontrol tertutup (*closed-loop system*).
4. Pengujian dapat diperluas ke implementasi real-time atau sistem fisik (*hardware implementation*) untuk mengevaluasi performa observer pada kondisi operasional yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. K. S. Putra, "Perancangan kontroler neural network PI untuk sistem pengaturan level dengan metode decoupling pada plant coupled tank," Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2017.
- [2] A. Adil, I. N'doye, A. Zemouche, A. Hamaz, and T.-M. Laleg-Kirati, "Coupled tanks state estimation using a high-gain like observer," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 14, pp. 96-101, 2021.
- [3] S. Rúa, R. E. Vázquez, N. Crasta, and C. A. Zuluaga, "Observability analysis and observer design for a nonlinear three-tank system: Theory and experiments," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6738, 2020.
- [4] J. Apkarian, H. Lacheray, and A. Addossalami, "Instructor Workbook : Coupled Tanks Experiment for MATLAB/Simulink users", 2013.
- [5] A. Muntaser and N. Buaossa, "Coupled Tank Non-linear System; Modeling and Level Control using PID and Fuzzy Logic Techniques," *arXiv preprint arXiv:2112.15506*, 2021.
- [6] H. Gouta, W. Haysam Al-Ashek, and B. Saad, "Anti-disturbance composite tracking control for a coupled two-tank MIMO process with experimental studies," *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije*, vol. 63, no. 3, pp. 593-604, 2022.
- [7] Y. Ding, H. Jia, Y. Zhang, and B. Qiu, "High-order modeling, zeroing dynamics control, and perturbations rejection for non-linear double-holding water tank," *Mathematics*, vol. 11, no. 13, p. 2989, 2023.
- [8] D. K. Gu, S. Duan, and Y. D. Liu, "A parametric design method of observer-based state feedback controller for quasi-linear systems," *IET Control Theory & Applications*, vol. 16, no. 16, pp. 1708-1717, 2022.
- [9] C.-C. Tsui, "Observer design—A survey," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 50-61, 2015.
- [10] W.-H. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-observer-based control and related methods—An overview," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1083-1095, 2015.

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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- [11] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter", Technical Report, University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
 - [12] C. Urrea and R. Agramonte, "Kalman filter: historical overview and review of its use in robotics 60 years after its creation," *Journal of Sensors*, vol. 2021, no. 1, p. 9674015, 2021.
 - [13] A. Gelb, "Applied Optimal Estimation, Cambridge, Massachusetts: 4M," ed: IT Press, 1974.
 - [14] L. Torres, G. Besancon, and D. Georges, "EKF-like observer with stability for a class of nonlinear systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 6, pp. 1570-1574, 2011.
 - [15] V. Agarwal and H. Parthasarathy, "Disturbance estimator as a state observer with extended Kalman filter for robotic manipulator," *Nonlinear Dynamics*, vol. 85, no. 4, pp. 2809-2825, 2016.
 - [16] A. Barrau and S. Bonnabel, "The invariant extended Kalman filter as a stable observer," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 62, no. 4, pp. 1797-1812, 2016.
 - [17] M. I. Ribeiro, "Kalman and extended kalman filters: Concept, derivation and properties," *Institute for Systems and Robotics*, vol. 43, no. 46, pp. 3736-3741, 2004.
 - [18] M. Supbahan, "Analisis komparasi performasi extended Luenberger observer dan high gain observer pada sistem nonlinier tangki ganda," Skripsi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2025.
 - [19] P. Teppa-Garran, M. Faggioni, and G. Garcia, "Optimal tracking in two-degree-of-freedom control systems: Coupled tank system," *Journal of applied research and technology*, vol. 21, no. 4, pp. 560-570, 2023.
 - [20] D. Oktaviani, "Deteksi kesalahan menggunakan Luenberger observer pada sistem tangki ganda," Skripsi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2025.
 - [21] D. Morrell, "Extended kalman filter lecture notes," *EEE 581-Spring*, 1997.
 - [22] P. Kaniewski, "Extended Kalman filter with reduced computational demands for systems with non-linear measurement models," *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1584, 2020.
 - [23] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "New extension of the Kalman filter to nonlinear systems," in *Signal processing, sensor fusion, and target recognition VI*, 1997, vol. 3068: Spie, pp. 182-193.

- [24] D. Simon, *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons, 2006.
- [25] A. M. Sabatini, "Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing," *Sensors*, vol. 11, no. 2, pp. 1489-1525, 2011.
- [26] N. Boizot, E. Busvelle, and J.-P. Gauthier, "An adaptive high-gain observer for nonlinear systems," *Automatica*, vol. 46, no. 9, pp. 1483-1488, 2010.
- [27] B. Zhang, F. Xue, Y. Zhou, H. Tian, and X. Zhang, "A study on state estimation of distributed electric drive articulated vehicle," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 12, no. 8, pp. 286-306, 2025.
- [28] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: estimation theory*. Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [29] R. G. Brown and P. Y. Hwang, "Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions," *Introduction to random signals and applied Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions*, 1997.
- [30] W. J. Palm, *Introduction to MATLAB for Engineers*. McGraw-Hill New York, 2011.
- [31] V. Katsikis, *MATLAB: A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications-Volume 3*. BoD—Books on Demand, 2012.

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.