

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.

**DESAIN PENGENDALI DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI
SUHU PADA *STIRRED TANK HEATER* DENGAN
MENGUNAKAN LINEAR QUADRATIC
GAUSSIAN (LQG)-PID**

TUGAS AKHIR

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



Oleh:

WIDI AVANDI
12250512734

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU**

2026

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

LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN PENGENDALI DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI SUHU PADA *STIRRED TANK HEATER* MENGGUNAKAN *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) - PID*

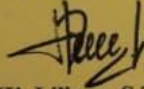
TUGAS AKHIR

oleh:

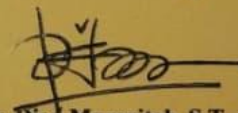
Widi Avandi
12250512734

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro di
Pekanbaru, Pada Tanggal 08 Januari 2026

Ketua Program Studi
Teknik Elektro


Dr. Hj. Liliana, S.T., M.Eng.
NIP: 19781012 200312 2 004

Pembimbing


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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN PENGENDALI DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI
SUHU PADA *STIRRED TANK HEATER* MENGGUNAKAN
LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) - PID**

TUGAS AKHIR

Oleh :

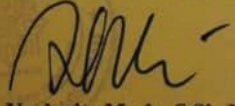
WIDI AVANDI
12250512734

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 08 Januari 2026

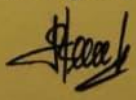
Pekanbaru, 08 Januari 2026

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi


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

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Dr. Hj. Liliana, S.T., M.Eng.
NIP. 19781012 200312 2 004

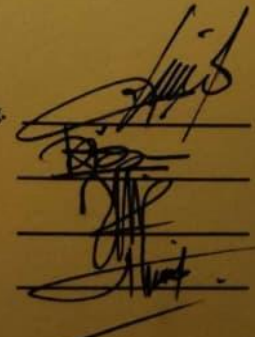
Dewan Penguji :

Ketua : Prof. Dr. Teddy Purnamirza, S.T., M.Eng.

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

Anggota I : Jufrizel, S.T., M.T.

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



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.

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

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 : Widi Avandi
NIM : 12250512734
Tempat/Tgl. Lahir : Perawang, 18 Agustus 2002
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

**DESAIN PENGENDALI DAN SIMUASI SISTEM PENGENDALI SUHU PADA
STIRRED TANK HEATER DENGAN MENGGUNAKAN LINEAR
QUADRATIC GAUSSIAN (LQG)-PID**

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, 22 Januari 2026

Yang membuat pernyataan,



Widi Avandi
NIM. 12250512734

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

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

"Man jadda wajada"

“barang siapa yang bersungguh-sungguh, maka ia akan berhasil”

“Semua jatuh bangunmu hal yang biasa, angan dan pertanyaan waktu yang menjawabnya, berikan tenggat waktu bersedihlah secukupnya, rayakan perasaanmu sebagai manusia.”

(Baskara Putra – Hindia)

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

“kado kecil ini persembahkan buat ayah dan ibu buah hasil atas segala perngorbanan yang telahdiberikan. Penulis berusaha Setiap tetesan keringat atas perjuangannya akan penulis tukar dengan senyuman kebangggaan.”

Widi Avandi

08 Januari 2026

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 wr.wb

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Dengan judul Tugas Akhir **“Desain Pengendali dan Simulasi Sistem Pengendali Suhu pada *Stirred Tank Heater* Menggunakan *Linear Quadratic Gaussian (LQG)*-PID ”** dapat diselesaikan penulis dengan tepat waktu.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis diberikan arahan dan bimbingan oleh orang-orang yang memiliki wawasan, pengetahuan, dan pengalaman yang sangat luas, sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis menerima banyak sekali bantuan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebanyak banyaknya disampaikan kepada:

- 1 Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, telah memberikan segala yang terbaik dan petunjuk sehingga dilancarkan dalam segala proses penyusunan Tugas Akhir ini.
- 2 Kepada kedua orang tua ayahanda Edi Susanto dan ibunda Dewi Andrianis. Terimakasih selalu mendoakan dan pengorbanan, kepercayaan dan nasehat yang diberikan sehingga menjadi penyamangat bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
- 3 Ibu DR. Liliana S.T., M.ENG, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- 4 Bapak Aulia Ulah, S.T., M.ENG. Selaku sekretaris jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- 5 Ibu DR. Dian Mursyitah, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan arahan yang sangat banyak berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini.
- 6 Ibu DR. Liliana, S.T., M.ENG selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari awal semester hingga akhir semester.
- 7 Bapak Jufrizel S.T., M.T selaku Dosen Penguji 1 yang telah memberikan kritik

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.

dan saran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

8 Bapak Ahmad Faizal S.T., M.T selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan kritik dan saran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

9 Kepada diri saya sendiri saya ucapkan terimakasih, sudah berusaha keras dan keteguhan bertahan sampai sejauh ini.

10 Teman seperjuangan dalam Konsentrasi Instrumentasi 2022, serta teman-teman yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Sebagai manusia biasa penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata Sempurna. Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaa.

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pekanbaru, 22 Januari 2026

Penulis,

WIDI AVANDI

NIM.12250512734

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

Desain Pengendali dan Simulasi Sistem Pengendali Suhu pada *Stirred Tank Heater* Menggunakan *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) - PID

WIDI AVANDI
NIM. 12250512734

Tanggal Sidang : 08 Januari 2026

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas No.155, Pekanbaru

ABSTRAK

Pengendalian suhu pada sistem *Stirred Tank Heater* (STH) sering terganggu oleh *noise* dan ketidakpastian parameter termal, seperti variasi kapasitansi dan resistansi panas, yang menyebabkan penurunan performa dan munculnya *steady-state error*. Pengendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) mampu memberikan respon yang stabil dan tahan terhadap *noise* melalui kombinasi *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Kalman Filter*, namun masih menyisakan kesalahan keadaan tunak. Penelitian ini mengusulkan pengendali gabungan *Linear Quadratic Gaussian-Proportional Integral Derivative* (LQG-PID) untuk meningkatkan performa pengendalian suhu pada sistem STH. Pengujian dilakukan melalui simulasi MATLAB dengan variasi *setpoint* suhu 30 °C dan 90 °C serta gangguan *noise* proses dan pengukuran. Pada *setpoint* 30 °C, pengendali LQG-PID mampu mencapai *setpoint* lebih cepat dengan nilai *rise time* 2,2 menit, *settling time* 4,17 menit, *time delay* 0,35 menit, serta *steady-state error* mendekati nol. Pada *setpoint* 90 °C, sistem menunjukkan respon yang stabil tanpa overshoot (0%) dengan *rise time* 2,27 menit, *settling time* 6,58 menit, dan *time delay* 0,8 menit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Kalman Filter* efektif mereduksi *noise*, sehingga respon sistem menjadi lebih halus dan stabil. Dengan demikian, pengendali LQG-PID terbukti efektif dan robust dalam meningkatkan performa pengendalian suhu pada sistem STH pada berbagai variasi *setpoint*.

Kata kunci : *Stirred Tank Heater* (STH), Pengendali Optimal, *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), *Kalman Filter*, PID, Simulasi.

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.

Design and Simulation of a Temperature Control System for a Stirred Tank Heater Using Linear Quadratic Gaussian (LQG) - PID

WIDI AVANDI
NIM. 12250512734

Date of Final Exam : 08 January 2026

Department of Electrical Engineering
Faculty of Science and Technology
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
Soebrantas Street No.155 Pekanbaru

ABSTRACT

Temperature control in a Stirred Tank Heater (STH) system is often disturbed by noise and thermal parameter uncertainties, such as variations in thermal capacitance and thermal resistance, which lead to performance degradation and the presence of steady-state error. The Linear Quadratic Gaussian (LQG) controller is capable of providing a stable and noise-resilient response through the combination of a Linear Quadratic Regulator (LQR) and a Kalman Filter; however, it still exhibits steady-state error. This study proposes a combined Linear Quadratic Gaussian–Proportional Integral Derivative (LQG–PID) controller to improve the temperature control performance of the STH system. The proposed controller is evaluated through MATLAB simulations with temperature setpoints of 30 °C and 90 °C under process and measurement noise disturbances. At the 30 °C setpoint, the LQG–PID controller achieves a faster response with a rise time of 2.2 minutes, a settling time of 4.17 minutes, a time delay of 0.35 minutes, and a near-zero steady-state error. At the 90 °C setpoint, the system exhibits a stable response with zero overshoot (0%), a rise time of 2.27 minutes, a settling time of 6.58 minutes, and a time delay of 0.8 minutes. Simulation results demonstrate that the Kalman Filter effectively reduces noise, resulting in smoother and more stable system responses. Therefore, the LQG–PID controller is proven to be effective and robust in enhancing temperature control performance of the STH system under various setpoint conditions.

Keywords: *Stirred Tank Heater (STH), Optimal Control, Linear Quadratic Gaussian (LQG), Kalman Filter, PID, Simulation.*

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL.....	iv
LEMBAR SURAT PERNYATAAN	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR RUMUS	xv
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 Masalah	I-4
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait.....	II-1
2.2 Landasan Teori.....	II-3
2.2.1 <i>Sistem Stirred Tank Heater</i>	II-3
2.2.2 <i>Model Matematis Sistem Stirrer Tank Heater</i>	II-4
2.3 <i>Linear Quadratic Regulator (LQR)</i>	II-6
2.4 <i>Kalman Filter</i>	II-7
2.5 <i>Propotional-Integral-Derivative (PID)</i>	II-7
2.6 <i>Linear Quadratic Gaussian (LQG)-PID</i>	II-9
2.7 Performansi Sistem Kendali	II-11
2.7.1 <i>Rise Time</i>	II-12
2.7.2 <i>Delay Time</i>	II-12

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Gambar Skematik STH.....	II-3
Gambar 2.2 Blok Diagram LQR	II-6
Gambar 2.3 Blok Diagram <i>Kalman Filter</i>	II-8
Gambar 2.4 Blok Diagram LQG	II-10
Gambar 2.5 MATLAB R2024a	II-14
Gambar 2.6 Tampilan <i>Window</i> Matlab	II-15
Gambar 2.7 Tampilan Simulink MATLAB	II-16
Gambar 3.1 <i>Flow Chart</i> Penelitian.....	III-2
Gambar 3.2 Rangkaian Simulink STH dengan <i>Open Loop</i>	III-6
Gambar 3.3 Sistem <i>Open Loop</i> Menggunakan <i>noise</i>	III-8
Gambar 3.4 Simulink MATLAB Sistem STH Menggunakan LQG.....	III-12
Gambar 4.1 (a) Sistem Open Loop STH, (b) Sistem Open Loop dengan Noise.....	IV-2
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Sistem STH Menggunakan LQG	IV-4
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Menggunakan LQG-PID	IV-7
Gambar 4.4 Hasil Pengujian PID	IV-10
Gambar 4.5 Hasil Komparasi Pada Suhu 30°C.....	IV-12
Gambar 4.6 Hasil LQG dengan Perubahan Nilai Setpoint.....	IV-14
Gambar 4.7 Pengujian PID Menggunakan Setpoint 90°C	IV-16
Gambar 4.8 Hasil LQG-PID dengan Perubahan Nilai Setpoint	IV-19
Gambar 4.9 Hasil Komparasi Perubahan Nilai Setpoint	IV-22

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR TABEL

Gambar

Halaman

Tabel 2.1 Termal Conductivity Air Antara 30 Sampai 100 °C, Diukur Dengan Hot Disk	II-4
Tabel 2.2 Parameter Sistem STH.....	II-5
Tabel 3.1 Blok-Blok Simulink.....	III-5
Tabel 3.2 Algoritma Sistem STH Secara <i>Open Loop</i>	III-6
Tabel 3.3 Pemograman Membuat <i>Noise</i>	III-7
Tabel 3.4 Pemograman Sistem <i>Open Loop</i> Menggunakan <i>Noise</i>	III-8
Tabel 3.5 Algoritma LQG-PID	III-9
Tabel 3.6 Pemograman LQG-PID	III-13
Tabel 4.1 Hasil Sistem STH Menggunakan LQG	IV-5
Tabel 4.2 Hasil Simulasi LQG-PID	IV-7
Tabel 4.3 Hasil Pengujian PID	IV-10
Tabel 4.4 Hasil Komparasi LQG, PID, LQG-PID.....	IV-13
Tabel 4.5 Nilai Performansi LQG.....	IV-15
Tabel 4.6 Nilai Performansi PID	IV-17
Tabel 4.7 Hasil Sistem LQG-PID Menggunakan Perubahan Nilai <i>Setpoint</i>	IV-20
Tabel 4.8 Hasil Komparasi dengan Menggunakan Perubahan <i>Setpoint</i>	IV-23

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.

DAFTAR RUMUS

Gambar

Halaman

2.1 Nilai Kalor Jenis Air	II-4
2.2 Nilai Kapasitansi per massa.....	II-4
2.3 Model Matematis Persamaan Diferensial.....	II-4
2.4 Model Matematis Persamaan <i>Transfer Function</i>	II-4
2.5 Model Matematis <i>State Space</i>	II-4
2.6 Model Matematis <i>State Space</i>	II-4
2.7 Matriks Orde 1	II-5
2.8 Matriks Orde 1	II-5
2.9 Matriks Orde 1	II-5
2.10 Matriks Orde 1	II-5
2.11 Model Matematis LQG.....	II-6
2.12 Model <i>Ricati Equation</i>	II-6
2.13 Model Matematis Sistem dengan <i>Noise</i>	II-6
2.14 Model Matematis Sistem dengan <i>Noise</i>	II-7
2.15 Model Matematis Merancang <i>Kalman Filter</i>	II-7
2.16 Model Matematis Merancang w <i>Noise</i> 6%.....	II-7
2.17 Model Matematis Merancang v <i>Noise</i> 6%	II-7
2.18 Model Matematis Gain Kf.....	II-7
2.19 Model Matematis <i>Coust Function</i>	II-7
2.20 Model Matematis PID	II-9
2.21 Model Matematis <i>Noise Random</i>	II-9
2.22 Model Matematis <i>Noise Random</i>	II-9
2.23 Model Matematis LQG.....	II-12
2.24 Model Matematis <i>Rise Time</i>	II-12
2.25 Model Matematis <i>Delay time</i>	II-13
2.26 Model Matematis <i>Settling Time</i>	II-13
2.27 Model Matematis <i>Error Steady State</i>	II-14
2.28 Model Matematis <i>Overshoot</i>	II-14
3.1 Model Matematis <i>Noise v</i>	III-3
3.3 Model Matematis <i>Noise w</i>	III-4

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.

3.4 Model Matematis Mendapatkan <i>Noise</i> 6%.....	III-7
3.5 Model Matematis Mendapatkan <i>Noise</i> 6%	III-7
3.6 Model Matematis Normalisasi <i>Noise</i>	III-3
3.7 Model Matematis <i>Noise State w</i>	III-4
3.8 Model Matematis Matriks Orde 1 <i>Noise w</i>	III-4
3.9 Model Matematis Persamaan <i>Noise v</i>	III-4
3.10 Model Matematis Persamaan <i>Noise v</i>	III-4
3.11 Model Matematis Kalman <i>State Estimator</i>	III-4
3.12 Model Matematis Kalman <i>State Estimator</i>	III-10
3.13 Model Matematis Matriks <i>Bf</i>	III-10
3.15 Model Matematis Matriks <i>Df</i>	III-10
3.16 Model Matematis Program Sistem <i>Kalman Filter</i>	III-11
3.17 Model Matematis Gain <i>Kalman Filter</i>	III-11
3.18 Model Matematis Program Sistem LQR	III-11
3.19 Model Matematis Matriks <i>Df</i>	III-11
3.20 Model Matematis Matriks <i>Df</i>	III-11

DAFTAR SINGKATAN

DNN	= <i>Deep Neural Network</i>
FLC	= <i>Fuzzy Logic Controller</i>
GA	= <i>Genetic Algorithm</i>
IAE	= <i>Integral of Absolute Error</i>
Kf	= <i>Kalman Filter</i>
LQR	= <i>Linear Quadratic Regulator</i>
LQG	= <i>Linear Quadratic Gaussian</i>
MAE	= <i>Mean Absolute Error</i>
MPC	= <i>Model Predictive Control</i>
MRAC	= <i>Model Reference Adaptive Control</i>
PID	= <i>Proportional-Integral-Derivative</i>
PSO	= <i>Particle Swarm Optimization</i>
SMC	= <i>Sliding Mode Control</i>
STH	= <i>Stirred Tank Heater</i>

© 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.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stirred Tank Heater (STH) merupakan sistem sangat penting dalam berbagai sektor industri yang menggunakan fluida dalam prosesnya, mulai dari industri kimia, petrokimia, farmasi, hingga pangan dan laboratorium riset. Fungsi utamanya adalah untuk menjaga kestabilan suhu suatu fluida melalui proses pemanasan dan pencampuran yang simultan, di mana kualitas dan konsistensi produk akhir sangat bergantung pada presisi pengendalian suhu ini [1]. Dalam operasionalnya, suhu produk di dalam tangki menjadi variabel proses utama yang harus dikendalikan, sementara daya yang disuplai ke elemen pemanas bertindak sebagai variabel yang dimanipulasi [2]. Meskipun konsepnya sederhana, kendali suhu pada STH merupakan tantangan rekayasa yang kompleks karena karakteristik dinamisnya yang sulit dikendalikan, seperti non-linearitas, serta kerentanan tinggi terhadap gangguan eksternal seperti fluktuasi laju alir dan temperatur fluida *input* [2]. Kombinasi dari faktor-faktor ini menyebabkan sistem sulit mencapai titik yang diinginkan secara presisi jika hanya mengandalkan metode kendali konvensional.

Menghadapi tantangan tersebut, berbagai strategi pengendalian telah dieksplorasi. Dilakukan pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) konvensional dengan metode penalaan klasik. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun *setpoint* dapat tercapai, sistem mengalami *overshoot* signifikan sebesar 20% dan osilasi yang lama sebelum stabil, terutama saat terjadi perubahan beban berupa peningkatan laju alir sebesar 25% [3]. Upaya perbaikan dilakukan dengan menerapkan optimasi parameter PID menggunakan algoritma metaheuristik. Sebuah studi berhasil menekan *overshoot* hingga di bawah 5% pada titik operasi nominal menggunakan *Genetic Algorithm* (GA) [4]. Namun, kelemahannya terungkap saat sistem diuji pada *setpoint* yang berbeda; parameter PID yang optimal di satu kondisi terbukti sub optimal di kondisi lain, menunjukkan kurangnya kemampuan adaptasi dan robustisitas dari metode optimasi *offline* ini.

Penggunaan kendali cerdas juga telah diterapkan. Sebuah penelitian merancang *Fuzzy Logic Controller* (FLC) tipe Mamdani dengan 25 basis aturan untuk mengatur daya pemanas [4]. FLC ini terbukti memberikan transisi yang lebih mulus saat perubahan *setpoint* dibandingkan PID. Akan tetapi, kelemahan mendasarnya adalah proses desain basis aturan yang sangat subjektif, tidak adanya jaminan stabilitas formal, dan adanya *steady-state error*

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

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.

kecil yang sulit dihilangkan. Di sisi lain, pendekatan menggunakan *Deep Neural Network* (DNN) telah digunakan untuk memodelkan dinamika STH secara akurat [5]. Meskipun model DNN mampu memprediksi temperatur dengan *error* di bawah 2% pada data pelatihan, kelemahannya adalah performanya menurun drastis saat dihadapkan pada pola gangguan yang belum pernah ada sebelumnya, membuktikan risiko *overfitting* dan sifat "kotak hitam" yang sulit diinterpretasikan.

Sebuah studi telah menerapkan pengendali *robust Sliding Mode Control* (SMC) berhasil menunjukkan kekokohan sistem terhadap variasi parameter hingga 30% [6]. Namun, sinyal pengendali yang dihasilkan menunjukkan adanya *chattering* (getaran frekuensi tinggi) yang dalam implementasi fisik dapat menyebabkan keausan dini pada aktuator. Pendekatan berbeda yang menerapkan *Model Predictive Control* (MPC) berhasil menangani batasan daya pemanas maksimum sambil melacak *setpoint* [7]. Kelemahannya terletak pada beban komputasi yang tinggi dan performa yang sangat bergantung pada akurasi model linear yang digunakan untuk prediksi. Begitu pula dengan *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) yang desainnya bisa menjadi sangat kompleks dan stabilitasnya tidak selalu terjamin [8]. Tinjauan ini menunjukkan bahwa banyak metode berfokus pada penanganan non-linearitas atau gangguan deterministik, namun kurang memberikan perhatian pada penanganan gangguan stokastik atau *noise* secara optimal.

Noise diredam dengan menggunakan kendali optimal [9] yang menawarkan kerangka kerja yang kuat untuk mengatasi masalah ini, di mana pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) lahir sebagai solusi optimal yang mampu menyeimbangkan antara performa dan upaya kendali [10]. Namun, kelemahan utama LQR adalah asumsi bahwa semua variabel keadaan dapat diukur secara langsung, sebuah kondisi yang tidak realistis pada aplikasi STH. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dibutuhkan sebuah *observer* yang andal. Di antara berbagai jenis *observer* [11], *Kalman Filter* menjadi pilihan superior ketika sistem dipengaruhi oleh *noise* yang bersifat stokastik [12]. *Kalman Filter* bekerja secara rekursif melalui tahap prediksi dan pembaruan untuk memberikan estimasi keadaan yang optimal dengan meminimalkan variansi *error*, bahkan di tengah adanya *noise* proses maupun gangguan dalam pengukuran [13]. Efektivitasnya dalam menyaring *noise* telah terbukti pada berbagai aplikasi, seperti pada motor DC [14], Mampu menyaring *noise* dan memberikan estimasi kecepatan motor DC yang stabil (bebas dari *noise*).

Penelitian dos Santos et al menyajikan sebuah *tutorial* tentang penerapan *Kalman Filter* (K_f) untuk mengurangi *noise* pada data arus pelepasan baterai yang dikumpulkan

© HAK Cipta Ditanggung UIN Suska Riau
 menggunakan *Battery Discharger Board* (BDB) yang mereka kembangkan untuk tujuan pendidikan. Dua pendekatan K_f dirancang dan dibandingkan: K_{f1} , yang mengasumsikan adanya *process noise* dan *measurement noise* (dengan $Q = 0.1R$), dan K_{f2} , yang hanya mengasumsikan *measurement noise* ($Q = 0$) namun dilengkapi dengan mekanisme "reset halus" untuk beradaptasi dengan perubahan arus tanpa membuat filter "tertudur". Dalam dua eksperimen pelepasan arus konstan sekitar 770.5 mA dan arus berdenyut (*pulsed*) selama 10 detik kedua *filter* menunjukkan performa yang sangat baik dalam mengikuti dinamika arus. Meskipun K_{f1} berhasil mengurangi *noise* secara signifikan, K_{f2} dapat secara konsisten menghasilkan sinyal yang paling halus (*smoothest*) di kedua skenario pengujian, membuktikan efektivitas pendekatan "reset halus" dalam menangani data sensor yang bising. Dengan demikian, studi ini secara efektif mendemonstrasikan bagaimana berbagai strategi desain K_f dapat diterapkan untuk menyaring *noise* secara akurat dari data sensor dunia nyata dalam konteks aplikasi laboratorium pendidikan [12].

Penelitian oleh Hudati et al *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk optimisasi respons motor DC, yang kemudian digabungkan dengan K_f untuk mereduksi *noise* dan meningkatkan stabilitas sistem. Dalam studi ini, model motor DC direpresentasikan dalam bentuk *state space* dan dilakukan proses *tuning* pada matriks pembobot Q , di mana sistem sengaja diberi *noise* berupa angka acak (*random number*) sebelum akhirnya disaring menggunakan K_f dan divisualisasikan melalui GUI MATLAB. Dari hasil uji coba, *rise time* 2,20 detik dengan *peak overshoot* hanya 0,09. Efektivitas K_f terbukti secara kuantitatif melalui *Mean Square Error* (MSE), di mana MSE respons LQR awal adalah 0,0015, kemudian meningkat menjadi 0,32 setelah diberi *noise*, dan berhasil direduksi secara signifikan menjadi 0,05 setelah penerapan *filter*. Dengan demikian, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa kombinasi kendali LQR dan K_f merupakan strategi yang efektif untuk menghasilkan sistem pengendali motor DC yang tidak hanya cepat dan optimal, tetapi juga tangguh terhadap gangguan [13].

Menggabungkan antara pengendali optimal LQR dan estimator optimal *Kalman Filter* dikenal sebagai kerangka kerja *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) [15]. Meskipun unggul dalam menstabilkan sistem dan *noise*. Akan tetapi, dalam implementasi simulasi, LQG masih menyisakan *steady-state error* yang penyebab utamanya kegagalan mencapai *setpoint* terletak pada sifat dasar LQR yang bertujuan untuk membawa keadaan sistem (x) menuju titik *kuilibrium nol* secara optimal, yang berarti ketika keadaan sistem mendekati stabil

(mendekati nol), maka sinyal kendali (u) ga akan mengecil hingga nol. Akibatnya, sistem akan stabil, tetapi tidak pada target *setpoint* yang diinginkan. membuat suhu sistem tidak mencapai target *setpoint* dengan sempurna. Untuk itu, ditambahkan kembali pengendali PID di dalam kerangka LQG agar sistem mampu mencapai target *setpoint* dengan lebih akurat. Dengan adanya LQG-PID, diharapkan kendali suhu pada STH tidak hanya optimal dan tahan terhadap *noise*, tetapi juga presisi dalam mencapai target yang diinginkan. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan desain dan simulasi pengendali suhu pada *Stirred Tank Heater* menggunakan kombinasi LQG-PID sebagai solusi yang tepat. Maka, diangkatlah judul Tugas Akhir: “**Desain Pengendali dan Simulasi Sistem Pengendali Suhu pada *Stirred Tank Heater* Dengan Menggunakan *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)-PID**”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian sebagai berikut:

- 1 Bagaimana pengaruh penambahan PID pada kerangka LQG dalam mengatasi *steady-state error* sehingga sistem dapat mencapai *setpoint* dengan lebih akurat?
- 2 Bagaimana sistem pengendali LQG mempertahankan stabilitas suhu jika diberi *noise*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berikut adalah tujuan penelitian berdasarkan rumusan masalah

- 1 Mengetahui efektivitas penambahan PID pada kerangka LQG dalam mengurangi *steady-state error* sehingga sistem mampu mencapai *setpoint* dengan lebih akurat.
- 2 menganalisa kemampuan sistem pengendali LQG untuk mempertahankan stabilitas dan kekokohan performanya ketika sistem mengalami perubahan parameter *noise* (intensitas *noise* pengukuran dan *noise* proses) yang berbeda.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih fokus dan terarah, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1 Aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan model matematis dari sistem sth dan hasil perancangan dari pengendali LQG-PID adalah Matlab R2024b.
- 2 Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB, tanpa implementasi langsung pada perangkat keras (hardware).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

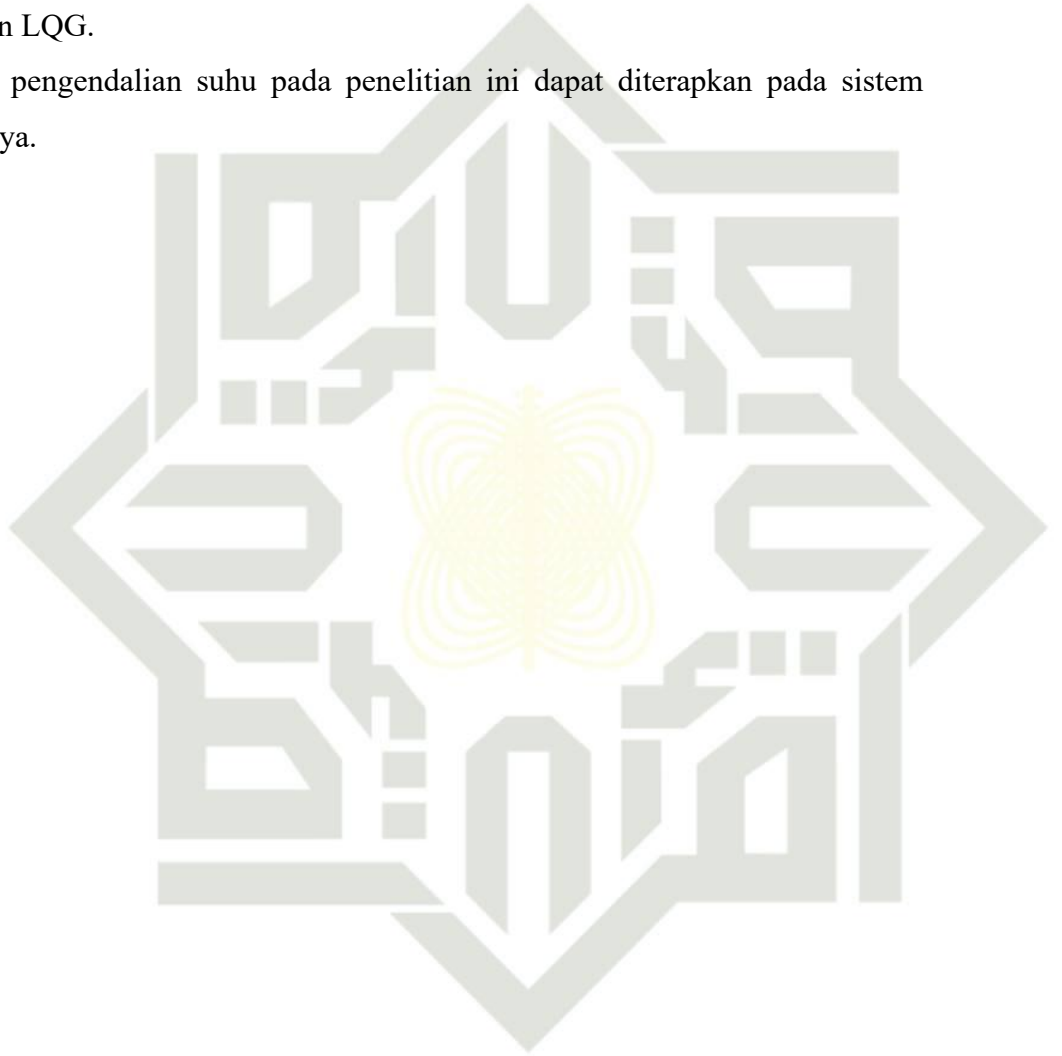
1.5

3 Sistem digunakan Adalah stirred tank heater dengan pemodelan matematis orde 1

Manfaat Penelitian

Berikut adalah manfaat dari penelitian yang dilakukan sebagai berikut:

- 1 Dapat dijadikan sebagai referensi untuk pengembangan bagi penelitian berikutnya.
- 2 Dapat memberi pengetahuan tentang estimasi pada sistem *stirrer tank heater* menggunakan LQG.
- 3 Diharapkan pengendalian suhu pada penelitian ini dapat diterapkan pada sistem sesungguhnya.



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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian Terkait

Model *Stirred Tank Heater* diturunkan secara matematik dan dimodelkan di dalam Simulink Matlab. Analisis ini membandingkan sistem dengan gangguan (variasi suhu cairan aliran masuk) dan sistem tanpa gangguan. Dalam pemodelan, *transfer function* untuk perubahan laju kalor *input* terhadap suhu *output*, sementara untuk suhu cairan aliran masuk yang berfluktuasi (berfungsi sebagai gangguan). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem termal *Stirrer Tank Heater* tergolong dalam sistem orde pertama. Perbandingan kinerja menunjukkan bahwa sistem *Stirrer Tank Heater* tanpa gangguan, di mana sisi aliran masukan ditutup setelah penuh dan sisi *output* tidak bervariasi, memberikan analisis kinerja yang lebih baik dengan nilai 1,56, dibandingkan dengan sistem yang memperhitungkan fluktuasi sisi masukan yang menghasilkan nilai 2,51. Nilai 1,56 ini dianggap lebih baik karena lebih mendekati nilai ideal 1 [16].

Dalam proses industri, khususnya industri kimia, pengendalian suhu pada *Stirred Tank Heater* (STH) merupakan faktor krusial untuk menjaga kualitas produk. Pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) menjadi solusi populer untuk masalah ini, namun tantangan terbesarnya adalah menentukan parameter (K_p , K_i , dan K_d) yang optimal. Metode *Tuning* konvensional seperti Ziegler-Nichols, saat diuji pada *setpoint* 90°C, menunjukkan kelemahan signifikan dengan menghasilkan *overshoot* (lonjakan suhu) maksimum yang sangat tinggi, yaitu 43.9°C, dan masih menyisakan *error steady-state* sebesar 0.53. Untuk mengatasi kelemahan ini, penelitian oleh Septiani mengajukan pendekatan *hybrid* yang menggabungkan Algoritma Genetika (GA) dan Logika Fuzzy. Dalam studi mereka, Logika Fuzzy digunakan untuk mengatur parameter internal GA, yang kemudian bertugas mencari nilai K_p , K_i , dan K_d yang paling optimal. Hasil eksperimen membuktikan bahwa metode hibrida ini secara signifikan lebih unggul dalam performa. Meskipun membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai *setpoint* dengan *rise time* 154.8 detik dibandingkan 4.401 detik pada Ziegler-Nichols, metode ini berhasil mengurangi *overshoot* maksimum menjadi 22.1°C dan, yang terpenting, mampu menghilangkan *error steady-state* hingga nilainya menjadi 0. Dengan demikian, data kuantitatif dari penelitian tersebut menyimpulkan bahwa metode hibrida GA-Fuzzy Logic memberikan performa keseluruhan yang lebih baik dan lebih stabil untuk aplikasi pengendali suhu pada STH [4].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mengemukakan 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.

Penelitian selanjutnya menggunakan pengendali MRAC dan PSO optimized FOL MRAC dilakukan dengan metode optimasi menggunakan algoritma *Artificial Bee Colony* secara berulang – ulang sampai mendapatkan hasil yang optimal. Dengan nilai parameter *settling time* = 40,69 detik, *risetime* = 6,35 detik serta indeks *error* 15,13. Kendali PSO optimized FOL MRAC mendapatkan *settling time* 26.21, *risetime* 5.44 detik serta indeks *error* 9.0. dari hasil penelitian tersebut dapat dilihat performasi PSO optimized FOL MRAC lebih baik dibandingkan dengan FOMIT MRAC, yang menghasilkan *error* lebih kecil dan *settling time* yang cukup panjang [8].

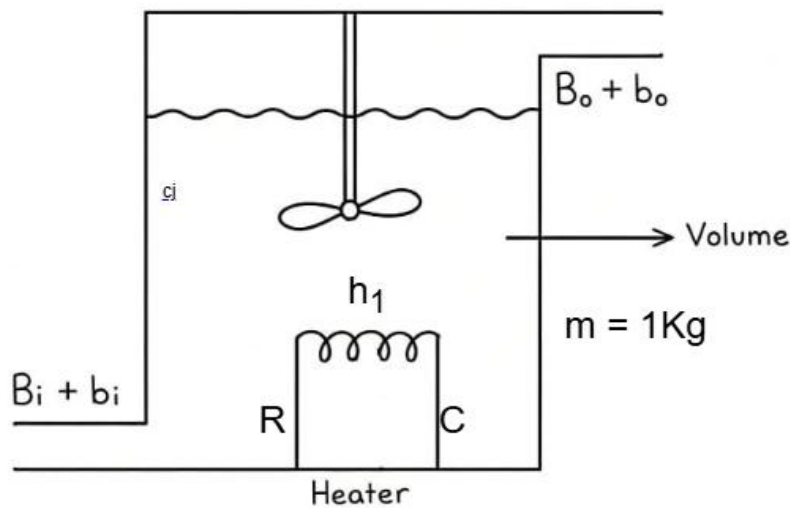
Sliding Mode Control (SMC) konvensional, meskipun tangguh, memiliki kelemahan berupa waktu konvergensi yang tak terbatas dan fenomena *chattering* (getaran frekuensi tinggi). Menjawab tantangan ini, sebuah penelitian oleh Derakhshannia dan Moosapour memperkenalkan metode pengendali baru, yaitu *Finite-Time Sliding Mode Control* (FSMC) yang dirancang untuk mengatasi *chattering* dan memastikan pelacakan *setpoint* dalam waktu terbatas. Lebih lanjut, untuk meningkatkan performa mereka mengembangkan versi adaptif (AFSMC) yang mengintegrasikan pengendali FSMC dengan *Finite-Time. Disturbance Observer* (DO) untuk meningkatkan performa dan akurasi dengan cara mengestimasi dan mengkompensasi gangguan secara aktif. Hasil simulasi menunjukkan keunggulan metode yang diusulkan dibandingkan dengan pengendali lain seperti PID dan *Terminal Sliding Mode Control* (TSMC). Metode FSMC mencapai *settling time* 1.73 detik dengan nilai *Integral Absolute Error* (IAE) sebesar 0.509, lebih akurat dibandingkan TSMC (IAE 1.05) dan PID (IAE 1.58). Ketika sistem diberi gangguan, metode AFSMC menunjukkan performa superior dengan *settling time* 1.71 detik dan IAE 0.4843, yang secara efektif menghilangkan efek gangguan jauh lebih baik daripada pengendali lainnya. Dengan demikian, penelitian ini secara kuantitatif membuktikan bahwa pengendali AFSMC berbasis *disturbance observer* memberikan solusi yang sangat efektif, akurat, dan cepat untuk masalah kendali CSTR yang kompleks di hadapan gangguan eksternal [16].

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

Landasan Teori

Sistem Stirred Tank Heater

Sistem thermal dengan STH yang dideskripsikan sebuah tangki yang ideal digunakan untuk menyampurkan fluida atau cairan secara seragam diseluruh bagian fluida. Didalam tangki diisolasi sempurna sehingga tidak ada energi panas yang masuk kedalam ataupun hilang ke udara luar tangki. Selain itu dapat diasumsikan tidak ada energi kalor yang dapat masuk dan tersimpan di dalam tangki tersebut serta pemanasan dilakukan secara sempurna oleh pemanas secara elektronik menggunakan heater, sehingga temperatur fluida secara merata diseluruh bagian dalam tangki. Gambar 2.1 adalah gambar skematik dari model STH [16].



Gambar 2. 1 Gambar Skematik STH

Berdasarkan Gambar 2.1 merupakan sistem dari STH yang dimana B_i merupakan tempat masuknya fluida yang ingin dipanaskan, kemudian fluida akan dipanaskan didalam tangki sambil diaduk agar panas dan cairan merata. Setelah semua cairan fluida panas, fluida akan keluar melalui U . Fluida air yang digunakan berdasarkan laporan dari *Hot Disk* AB yang mengukur air, melalui prosedur yang ketat diantaranya dengan menyuling air untuk membuang semua ion. Selain itu juga harus dihilangkan gasnya dan disimpan dalam wadah tertutup untuk menghilangkan gas terlarut dan mencegah serapan baru ketika kontak dengan udara. Sampel air yang disiapkan dengan cara ini dimasukkan ke dalam bejana dengan sensor *Hot Disk* dan diuji dengan standar operation procedure. Tabel 2.1 memberikan laporan suhu yang digunakan. Temperatur yang digunakan pada penelitian ini menggunakan suhu 20°C [16].

Table 2.1 Thermal Conductivity Air Antara 30 Sampai 100 °C, Diukur Dengan *Hot Disk*

Suhu	Kapasitas panas veulmetrik
30°C	4.18
40°C	3.94
60°C	3.68
90°C	3.35
10°C	3.21

2.2 Model Matematis Sistem *Stirrer Tank Heater*

Pemodelan dalam bentuk matematis dari karakteristik dinamis suatu sistem dinamis biasanya disebut dengan pemodelan matematis. Langkah awal dalam suatu analisa sistem dinamik adalah menurunkan modelnya. Penurunan model matematis yang logis merupakan aspek paling penting dan krusial dalam keseluruhan tahapan analisis. Dalam hal ini, sistem pemanas digunakan untuk menaikkan suhu air, dimana laju aliran temperatur berubah-ubah akibat adanya penambahan fluida masuk dan faktor dari lingkungan diarea tangki. Dan untuk mengembalikan suhu dalam keadaan stabil memerlukan waktu yang cukup lama [17].

Laju pemanasan kalor dapat diubah-ubah dari H menjadi $H + h_1$, dimana menyatakan perubahan kecil dari laju kalor *input*. *Temperature* fluida keluar juga akan berubah dari B_0 menjadi $B_0 + u$. Untuk mendapatkan nilai kalor jenis air dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut

$$C_j = \frac{\rho_{air}}{\rho_{cp}} \quad (2.1)$$

$$C = m.C_j \quad (2.2)$$

Model matematis persamaan diferensial dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$RC \frac{db_0}{dt} + b_1 = Rh_1 \quad (2.3)$$

Sehingga dapat diturunkan persamaan *Transfer Function*

$$\frac{b_0(s)}{h_1(s)} = \frac{R}{R(s+1)} \quad (2.4)$$

Model matematis persamaan (2.5) diubah ke model matematis *state space*, dengan bentuk umum sebagai berikut

$$x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.5)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.6)$$

Dari persamaan (2.6) dan (2.7) didapatkan model *state space* dari sistem STH sebagai berikut:

$$A = \left(\frac{-1}{RC} \right) \quad (2.7)$$

$$B = \left(\frac{1}{C} \right) \quad (2.8)$$

$$C = 1 \quad (2.9)$$

$$D = 0 \quad (2.10)$$

Data parameter yang digunakan merujuk kepada penelitian Mochammad Denny Surindra, dimana STH dengan nilai resistansi thermal, massa fluida, kapasitansi thermal, kalor jenis dengan nilai sebagai berikut:

Tabel 2. 2 Parameter Sistem STH

Notasi	Keterangan	Nilai
R	Resistansi	0,000165
ρ_{air}	Massa jenis air	1000 Kg / m ³
ρCp	Kapasitas panas volumetrik	4,18 MJ / m ³
C	Kapasitansi	4.180 J/°C
M	Massa	1 Kg
Cj	Kalor jenis air	4.180 J / Kg

Linear Quadratic Regulator (LQR)

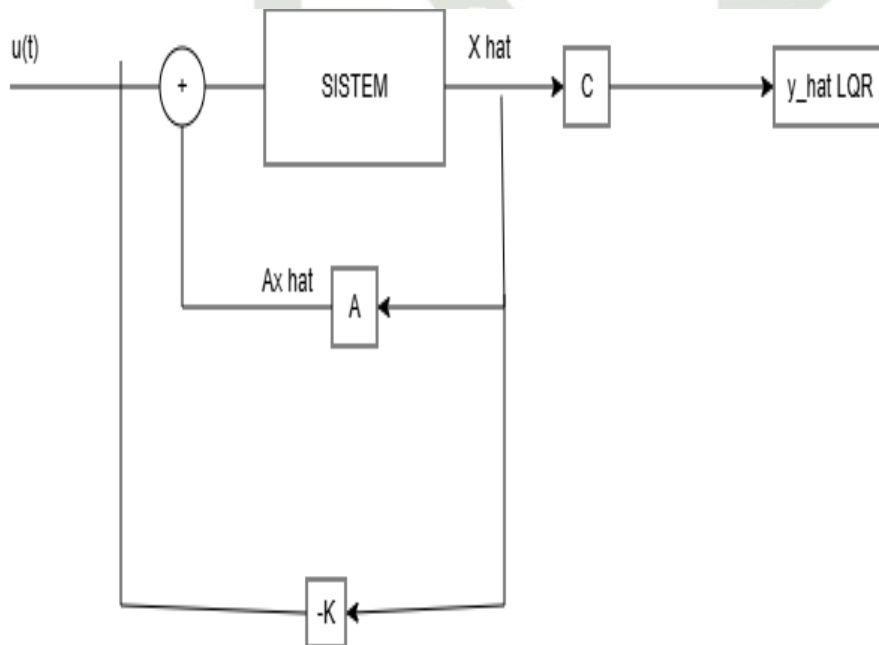
Linear quadratic regulator (LQR) adalah suatu metode kendali modern karena menerapkan sistem *multiple input multiple output* (MIMO), di mana sistem yang akan dikendalikan dibuat menjadi bentuk *state space* sehingga pengendalian dapat dilakukan dari beberapa masukan dan menghasilkan beberapa keluaran [18]. LQR disebut linier karena model dan bentuk pengendali berupa linier, sedangkan disebut kuadratik karena *cost function* pada kendali ini berbentuk kuadratik. Fungsi tersebut harus dikecilkan, serta referensi yang diberikan bukanlah berupa fungsi waktu sehingga disebut *regulator* [19]. Berikut merupakan persamaan umum dari LQR sebagai berikut:

$$u(t) = -K \cdot x(t) \quad (2.11)$$

Nilai matriks P didapatkan dengan cara menyelesaikan persamaan Aljabar Riccati tereduksi yang menghasilkan:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (2.12)$$

Berikut adalah gambar blok diagram dari LQR



Gambar 2.2 Blok Diagram LQR

Kalman Filter

Kalman Filter (KF) diperkenalkan pertama kali oleh Rudolf E. Kalman sebagai algoritma estimasi keadaan optimal untuk sistem linear dinamis dengan gangguan *noise* Gaussian. KF menggabungkan model sistem dan data pengukuran untuk memperkirakan keadaan yang tidak bisa diukur langsung. *Kalman Filter* digunakan untuk menyelesaikan masalah estimasi keadaan pada sistem yang dipengaruhi oleh gangguan [20]. Pengaruh besar telah diberikan oleh teknik ini terhadap kontrol, pemrosesan sinyal, serta analisis deret waktu. Berikut persamaan umum dari sistem dengan *noise* sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \quad (2.13)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + v(t) \quad (2.14)$$

Untuk merancang *kalman filter* sebagai observer, dituliskan algoritma sebagai berikut

$$\hat{\dot{x}}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Kf(t)(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.15)$$

Merancang *noise* dengan nilai 6% dengan cara sebagai berikut:

$$\sum V = \text{Max}(y) \cdot 0,06 \quad (2.16)$$

$$\sum W = \text{Max}(x) \cdot 0,06 \quad (2.17)$$

Untuk mendapatkan nilai gain $Kf(t)$ dapat diselesaikan dengan cara sebagai berikut:

$$Kf(t) = P(t)C^T R^{-1}(t) \quad (2.18)$$

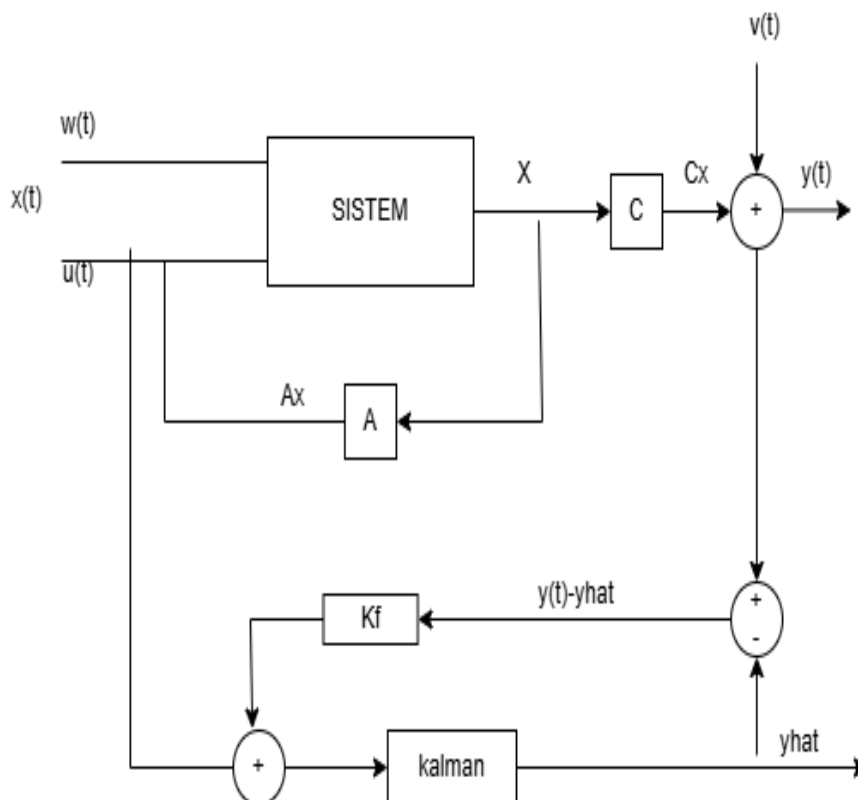
Dimana $P(t)$ dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan *Ricatti Equation*

$$J = \int_0^\infty (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (2.19)$$

Berikut persamaan umum dari sistem dengan *noise* 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.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau



Gambar 2.3 Blok Diagram Kalman Filter

Propotional-Integral-Derivative (PID)

PID merupakan metode pengendalian umpan balik yang digunakan untuk mengatur sistem agar mendapatkan nilai referensi dengan cepat dan tetap stabil, PID bekerja dengan mengombinasikan aksi proporsional, integral, serta derivatif untuk mengurangi kesalahan pada sistem secara menyeluruh [21]. Menurut Mohindru pengendali ini sangat umum digunakan di berbagai industri, termasuk industri kimia, untuk mengatur parameter proses seperti suhu, tekanan, pH, dan aliran cairan [22]. Untuk menghasilkan sinyal kendali, ketiga aksi tersebut dihitung berdasarkan nilai *error* antara *setpoint* dan nilai terukur, yang kemudian dijumlahkan. Hubungan ini dapat diekspresikan secara matematis melalui rumus berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.20)$$

Keterangan:

$u(t)$ = Sinyal Kontrol

$e(t)$ = Error

- = Gain Proporsional
- = Gain Integral
- = Gain Derivatif
- = Variabel Integrasi

Di mana tantangan utamanya adalah menentukan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d yang optimal dari rumus tersebut. Proses penalaan (*tuning*) ini dapat dilakukan secara efisien dan interaktif dengan menggunakan aplikasi tuner melalui *Simulink*. Alat ini memungkinkan perancang untuk secara visual menyesuaikan respons sistem dan secara otomatis mendapatkan nilai-nilai parameter PID terbaik tanpa perlu melakukan perhitungan manual yang rumit [22].

Linear Quadratic Gaussian (LQG)

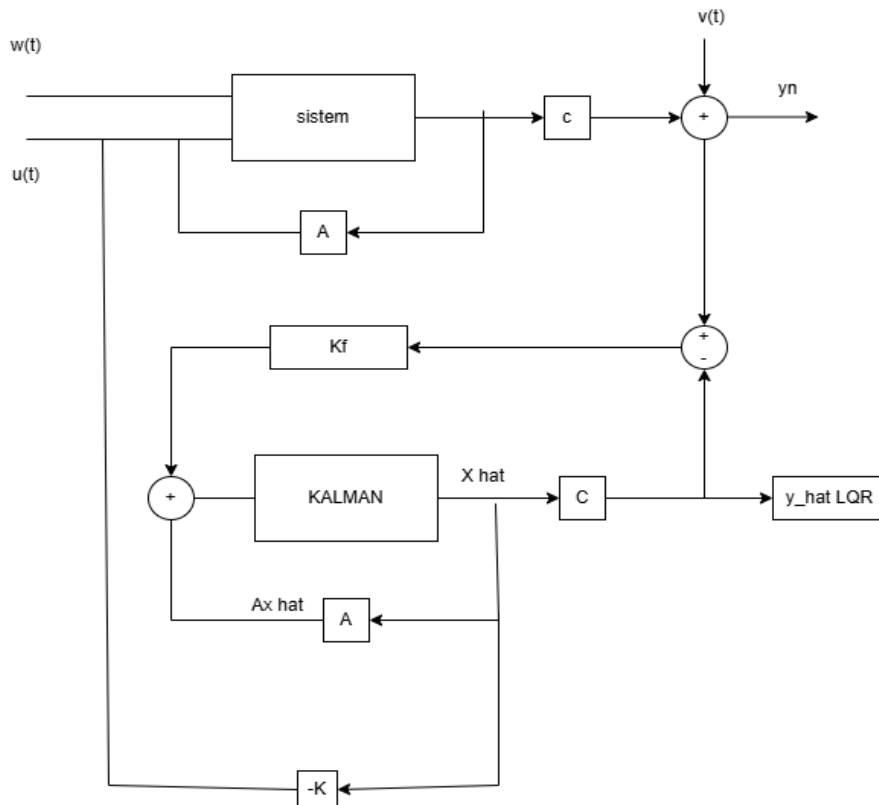
Kendali optimal LQG didefinisikan sebagai teknik kendali modern yang diimplementasikan dalam bentuk ruang dan waktu (*state space*) yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator. Pada perjalanan perkembangan konsep, LQR (*Linear Quadratic Regulator*) mengalami pengembangan yaitu dengan menambahkan estimator optimal (*Filter Kalman*) [23]. *Kalman filter* adalah *filter* yang handal untuk mengeleminasi *noise*, *noise* yang terdapat didalam LQG adalah *Gaussian white noise* [24]. *Gaussian white noise* (*noise* yang dibangkitkan dari alam) sangat berpengaruh pada respon sistem. Konsep pengembangan itu diperkenalkan pada tahun 1970 dengan nama *Linear Quadratic Gaussian* LQG. Pada konsep LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan (*separation theorem*) atau sering disebut *Certainty Equivalence Principle*. Dari hasil tersebut penguatan umpan balik dan filter dalam LQG dirancang secara terpisah [23]. Berikut adalah blok diagram dari LQG berdasarkan persamaan (2.12), dan (2.13).

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.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Saifuddin Kasim Riau



Gambar 2. 4 Blok Diagram LQG

Perikut adalah rumus mendapatkan *noise gaussian* yang acak dengan deviasi standar σ dan rata-rata μ dengan μ adalah sebagai berikut:

$$d = rand * \sigma + \mu \quad (2.21)$$

Jika μ adalah nol maka rumus diatas dapat disederhanakan menjadi

$$d = rand * \sigma \quad (2.22)$$

Linear quadratic regulator (LQR) adalah suatu metode kendali modern karena menerapkan sistem *multiple input multiple output* (MIMO), di mana sistem yang akan dikendalikan dibuat menjadi bentuk *state space* sehingga pengendalian dapat dilakukan dari beberapa masukan dan menghasilkan beberapa keluaran [18]. LQR disebut linier karena model dan bentuk pengendalinya berupa linier, sedangkan disebut kuadratik karena *cost function* pada kendali ini berbentuk kuadratik. Dapat dilihat dari persamaan (2.11) merupakan persamaan umum dari LQR yang menggunakan nilai x dari sistem

sistem kendali umumnya didasarkan pada parameter respon transien dan keadaan tunak. Parameter-parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis kinerja sistem kendali pada bagian selanjutnya [25].

Secara umum, suatu sistem kendali dapat dikatakan memiliki performansi yang baik apabila mampu merespons masukan dengan cepat, mencapai kondisi stabil dalam waktu yang relatif singkat, memiliki tingkat ketelitian yang tinggi [25]. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *delay time* dan *rise time* yang kecil, *settling time* yang berada dalam batas toleransi yang ditentukan ($\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$), *steady-state error* yang mendekati nol, serta nilai *overshoot* yang rendah atau tidak terjadi sama sekali. Keseimbangan antara kecepatan respon, kestabilan, dan ketelitian menjadi faktor utama dalam menentukan kualitas performansi suatu sistem kendali.

2.7.1 Rise Time (Tr)

Rise time (waktu naik) merupakan salah satu parameter performansi transien yang digunakan untuk menggambarkan kecepatan awal respon sistem terhadap masukan, yaitu selang waktu yang dibutuhkan oleh keluaran sistem untuk meningkat dari kondisi awal hingga mencapai persentase tertentu dari nilai keadaan tunak, umumnya dari 10% hingga 90% dari nilai akhir [26]. Parameter ini menunjukkan seberapa cepat sistem merespons perubahan *setpoint*, sehingga semakin kecil nilai *rise time*, semakin cepat sistem mencapai daerah kerja yang diinginkan dan semakin baik kinerja respon awal sistem tersebut. Dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$t_r = t_{90} - t_{10} \quad (2.24)$$

2.7.2 Delay Time (Td)

Delay time (Td) adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai sekitar 50% dari nilai keadaan tunaknya pertama kali. Parameter ini menggambarkan kecepatan awal sistem merespons masukan [26]. Nilai Td yang kecil menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon awal dengan cepat terhadap perubahan masukan yang diberikan. Dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$t_d = t_{50\%} \quad (2.25)$$

2.7.3 Settling Time

Settling time (Ts) adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk masuk dan tetap berada dalam batas toleransi tertentu terhadap nilai keadaan tunak. Batas toleransi yang umum

digunakan dalam analisis performansi sistem kendali adalah $\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$ dari nilai keadaan awal. Parameter T_s menunjukkan kemampuan sistem dalam mencapai kondisi stabil setelah adanya perubahan masukan.

T_s = waktu ketika respon pertama kali masuk dan Tetap berada dalam pita toleransi (2.26)

Error steady-state (Ess) merupakan selisih antara nilai keluaran

sistem pada keadaan tunak dengan nilai referensi yang diinginkan. Parameter ini digunakan untuk menilai tingkat ketelitian sistem kendali dalam mengikuti masukan. Nilai Ess yang kecil menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi yang baik pada kondisi tunak [26].

$$e_{ss} = \text{setpoint} - y_{ss} \quad (2.27)$$

2.7.5 Overshoot

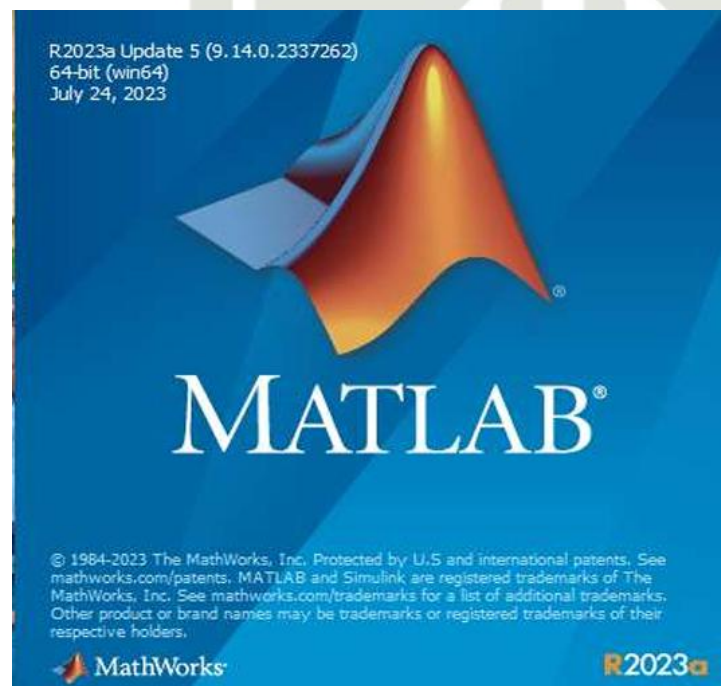
Overshoot adalah besarnya lonjakan maksimum respon sistem yang melampaui nilai keadaan tunak setelah diberikan masukan. *Overshoot* biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap nilai referensi dan digunakan untuk menilai kestabilan serta keamanan respon sistem. *Overshoot* yang terlalu besar dapat mengindikasikan respon sistem yang terlalu agresif. Dalam praktik sistem kendali, nilai *overshoot* yang masih dapat ditoleransi umumnya berada di bawah 5%, khususnya pada sistem yang sensitif terhadap kenaikan keluaran seperti sistem termal [26].

$$O_s = \frac{y_{\max} - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (2.28)$$

UIN SUSKA RIAU

2.7 Software MATLAB

MATLAB merupakan perangkat lunak yang dirancang untuk pemrograman, analisis, serta komputasi teknis dan matematis berbasis matriks. Nama MATLAB berasal dari singkatan *MATrix LABoratory*, karena perangkat ini digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah perhitungan atau analisis komputasi yang didasarkan pada sifat dan bentuk matriks. Bahasa pemrograman ini dikembangkan oleh *MathWorks Inc*, dengan tujuan untuk menggabungkan proses pemrograman, komputasi, dan visualisasi ke dalam satu lingkungan yang ramah pengguna [27].



Gambar 2. 6 MATLAB R2024a

2.7.1 Ruang Lingkup MATLAB

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

1. Command Window / Editor

Command indow / Editor adalah jendela pertama yang muncul saat MATLAB dijalankan, yang memberikan akses langsung ke perintah-perintah MATLAB. Pengguna dapat mengetikkan ekspresi MATLAB, seperti mengakses *help window* dan lainnya. *Command window* digunakan untuk menjalankan fungsi, mendeklarasikan variabel, melaksanakan proses, dan melihat isi variabel.

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.

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

© Hak cipta dilindungi undang-undang UIN Suska Riau

2. *Current Directory*

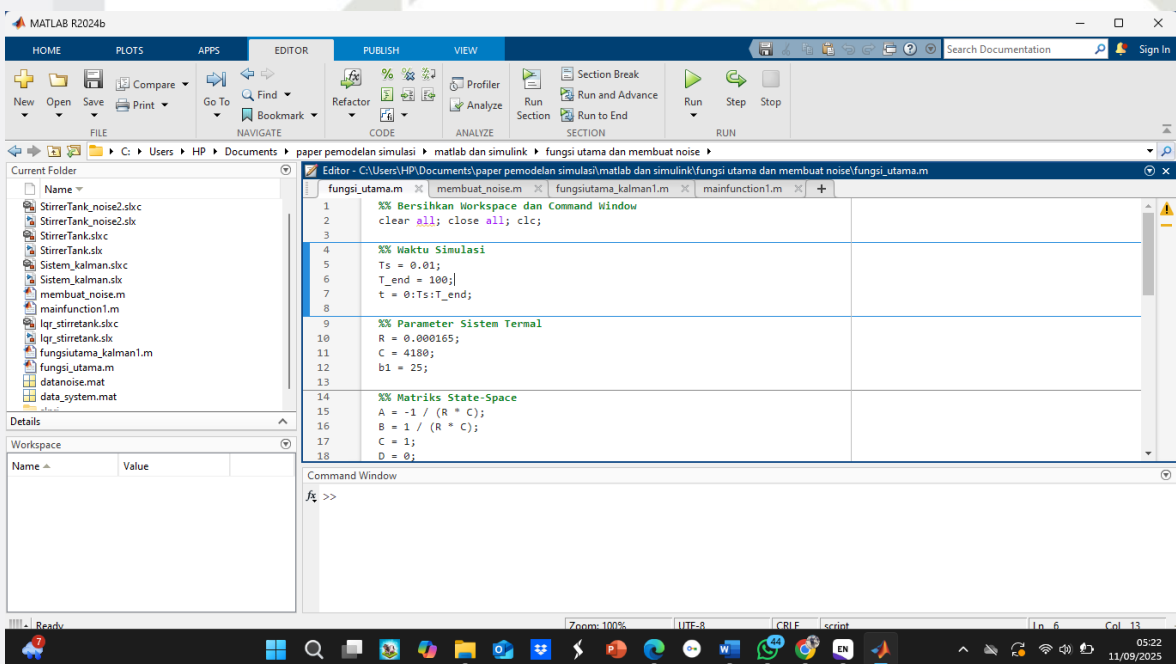
Current Directory adalah jendela yang menampilkan isi dari direktori kerja saat MATLAB digunakan. Direktori ini dapat diganti sesuai keinginan pengguna. Alamat direktori *default* terletak di dalam *folder* kerja tempat program file berada.

3. *Command History*

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

4. *Workspace*

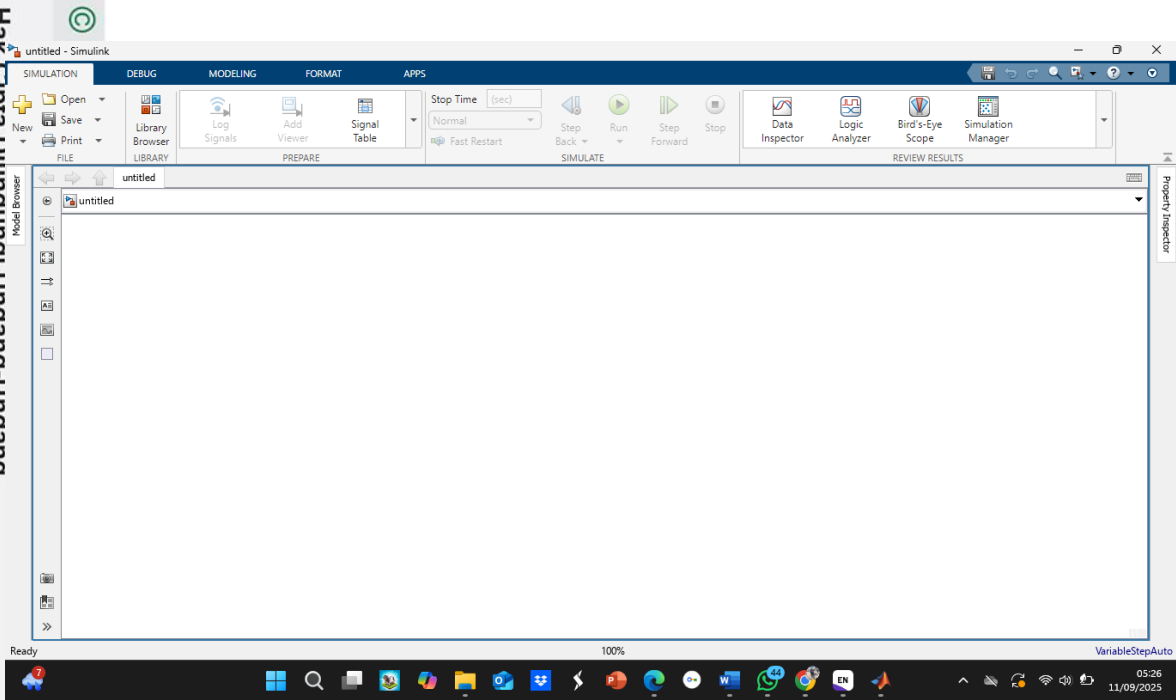
Berfungsi untuk menampilkan semua variabel yang sedang aktif saat MATLAB digunakan. Jika terdapat variabel berupa data matriks besar, pengguna dapat melihat isi data tersebut dengan cara mengklik dua kali pada variabel tersebut. MATLAB secara otomatis akan menampilkan jendela "*Array Editor*" yang berisi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



Gambar 2. 7 Tampilan Window Matlab

Hak Cipta Uilindungi ungang-unaang

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

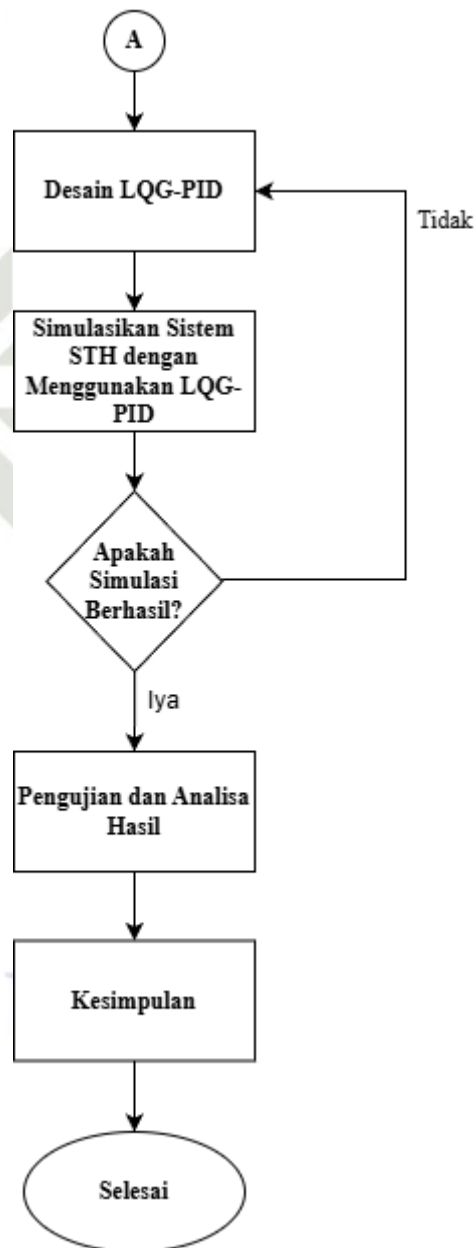


Gambar 2. 8 Tampilan Simulink MATLAB

Simulink adalah serangkaian aplikasi dalam MATLAB yang digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis dinamis pada suatu sistem. Penggunaan Simulink dapat mempermudah pembuatan simulasi interaktif. Dalam aplikasi MATLAB, performansi sistem dapat digambarkan dalam format dua atau tiga dimensi menggunakan Simulink. Desain juga menjadi lebih sederhana karena tersedia blok-blok diagram yang dapat diatur dengan mudah sesuai dengan model matematis dari sistem atau *plant* yang ada [27].

3.1 Proses Alur Penelitian

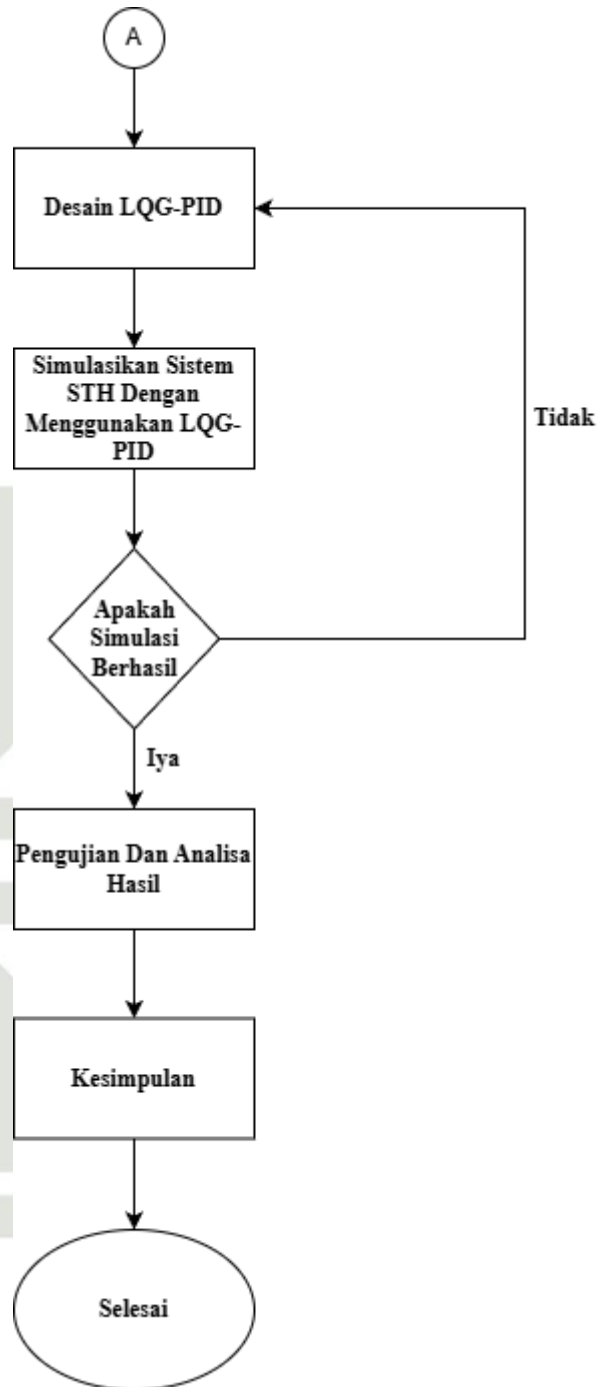
Beberapa tahapan utama penelitian tugas akhir ini yaitu penentuan judul, perumusan masalah, penetapan tujuan penelitian, pemodelan matematis dari sistem yang dikaji, serta proses perancangan. Alur penelitian tersebut dapat digambarkan melalui flowchart berikut :



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.



Gambar 3.1 Flow Chart Penelitian

3.2 Tahap Penelitian

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

1. Identifikasi Masalah

Melakukan identifikasi masalah pada sistem STH adalah langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Dimana pada sistem STH sering terdapat gangguan berupa gangguan *noise* yang menyebabkan sistem tidak bagus. Banyak pengendalian modern sudah diterapkan, namun hasil nya masih terdapat *error* dan *overshoot*. Selain itu, pengendalian yang digunakan masih tergantung dari hasil pengukuran sensor. Yang mana sensor memiliki akurasi yang terbatas. Oleh karena itu, dalam penelitian tugas akhir ini diajukan pendekatan baru yaitu LQG, dimana *Kalman Filter* sebagai state observer untuk menggantikan kinerja dari sensor dan LQR sebagai pengendali untuk estimasi pada sistem STH.

2. Studi Literatur

Penulis memulai dengan melakukan studi literatur untuk mempelajari dan memahami berbagai penelitian terkait sistem STH, makalah, jurnal, dan referensi lainnya yang berkaitan dengan sistem STH, dan LQG

3. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data dari jurnal dan penelitian sebelumnya dikumpulkan untuk memperoleh model matematis sistem STH dalam bentuk *state space* beserta parameter yang digunakan. Data yang telah dikumpulkan digunakan untuk pengujian pada sistem STH.

4. Remodelan Matematis Sistem STH

Sistem STH Melakukan penurunan model matematis pada sistem STH adalah langkah selanjutnya yang dilakukan pada penelitian ini. Kemudian data parameter yang sudah dikumpulkan disubsitusikan kedalam model matematis untuk dilakukan pengujian menggunakan *software* MATLAB. Dimulai dari persamaan (2.1) hingga persamaan (2.19) didapatkan model matematis sistem STH. Pada persamaan (2.2) untuk mencari nilai G dan (2.3) untuk mencari nilai Q . Dan untuk mencari persamaan diferensial dari sistem STH terdapat pada (2.4), persamaan (2.5) untuk membuat *transfer function* dan Selanjutnya setelah menjadi *transfer function* mengubah persamaan *transfer function* menjadi persamaan *state space* menggunakan rumus umum *state space* pada persamaan (2.6) dan (2.7). Sehingga didapatkan matrik A , B , C , dan D pada persamaan (2.8), (2.9), (2.10) dan (2.11). Selanjutnya memasukkan nilai paramater pada tabel (2.1). Sehingga berdasarkan

Hak Cipta Diindungi 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.

Persamaan (2.14) dan (2.15) diperlukan penambahan *noise* pada sistem STH yaitu *noise state* (w) dan *noise* pengukuran (v) sebagai berikut

Persamaan *noise* w dan v

$$\sum V = \text{Max}(y).0,06 \quad (3.1)$$

$$\sum W = \text{Max}(x).0,06 \quad (3.2)$$

Pada penelitian ini diberikan *noise* sebesar 6% untuk melihat kinerja dari sistem STH baik atau tidak jika diberi *noise* acak. Membuat sinyal random w dan v

$$rv = \text{rand}(\text{size}(y)) \quad (3.3)$$

$$rw = \text{rand}(\text{size}(x)) \quad (3.4)$$

Cara agar *noise* bernilai 0 dan 1 maka harus di normalisasi sinyal dengan rumus sebagai berikut

$$x = \frac{x - \mu(x)}{\text{std}(x)} \quad (3.5)$$

Sehingga didapatkan dari persamaan (2.12) dan (2.13) diperlukan penambahan *noise* dengan cara dikalikan dengan persamaan (3.1) dan (3.2). didapatkan rumus sebagai berikut:

Persamaan *noise state* (w)

$$\sigma w = \text{Max}0,6\%.X_{\text{system}} \quad (3.6)$$

$$w \sim (0, R) \quad (3.7)$$

Sehingga didapatkan matriks 1x1 dengan persamaan sebagai berikut:

$$w = (\sigma - w^2 (1 \times 1)) \quad (3.8)$$

Persamaan *noise state* (v)

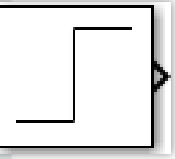
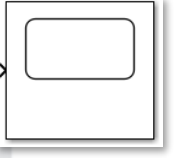
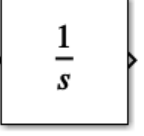
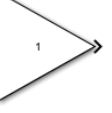
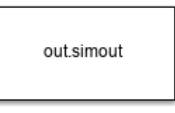
$$v = N \sim (0, R) \quad (3.9)$$

$$R = [\sigma - v^2] \quad (3.10)$$

5. Pengujian Model Matematis

Tahap pengujian model matematis dalam bentuk state space dimasukkan dalam algoritma pemrograman dan Simulink MATLAB. Dilakukan pengujian untuk memastikan *output* yang dihasil sama dengan sumber yang digunakan. Kemudian berdasarkan persamaan umum state space dibentuk blok Simulink sistem STH secara *open loop*. Adapun blok Simulink yang digunakan sebagai berikut :

Tabel 3.1 Blok-Blok Simulink

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

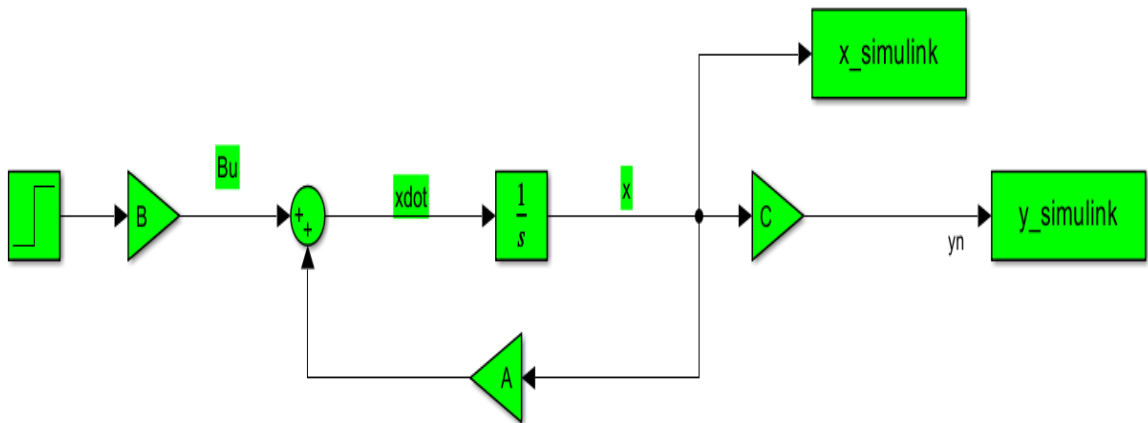
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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.

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

Berdasarkan persamaan (2.12) dan (2.13) dapat dibentuk blok diagram Simulink sistem STH secara *open loop* dengan menggunakan blok-blok Simulink pada Tabel 3.1



Gambar 3. 2 Rangkaian Simulink STH dengan *Open Loop*

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

Tabel 3 2 Algoritma Sistem STH Secara *Open Loop*

Algoritma Pemrograman Sistem STH Secara <i>Open Loop</i>	
1.	Memberi nama program sistem Fungsi_utama
2.	Membuat perintah <code>clc</code> ; <code>clear all</code> ; <code>close all</code> ; (membersihkan <i>comand window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup jendela <i>figure</i> yang masih terbuka)
3.	Mendefinisikan waktu: waktu mulai (T_{start}), waktu sampling (T_S) dan waktu akhir (T_N)
4.	Mendefinisikan parameter pada Tabel 2.2
5.	Mendefinisikan matriks <i>state-space</i> pada persamaan (2.8), (2.9), (2.10), (2.11)
6.	Memanggil <i>Simulink</i> MATLAB dengan nama <code>StirrerTank.slx</code>
7.	Mendefinisikan kondisi awal sistem
8.	Mendefinisikan x sistem dan y sistem dengan nama <code>x_simulink</code> dan <code>y_simulink</code>

Plot hasil keluaran sistem STH secara *open loop*

10. Menyimpan data sistem STH *open loop* dengan nama “data_system”

End

Dari Tabel 3.2 merupakan algoritma program dari sistem STH *open loop* yang belum ditambahkan *noise*. Selanjutnya sebelum melakukan desain LQG, LQR sebagai pengendali dan kalman-filter sebagai observer perlu dibangun algoritma pemograman *noise* terlebih dahulu yang akan yang akan ditambahkan kedalam sistem. Berikut adalah algoritma pemograman *noise* sebagai berikut:

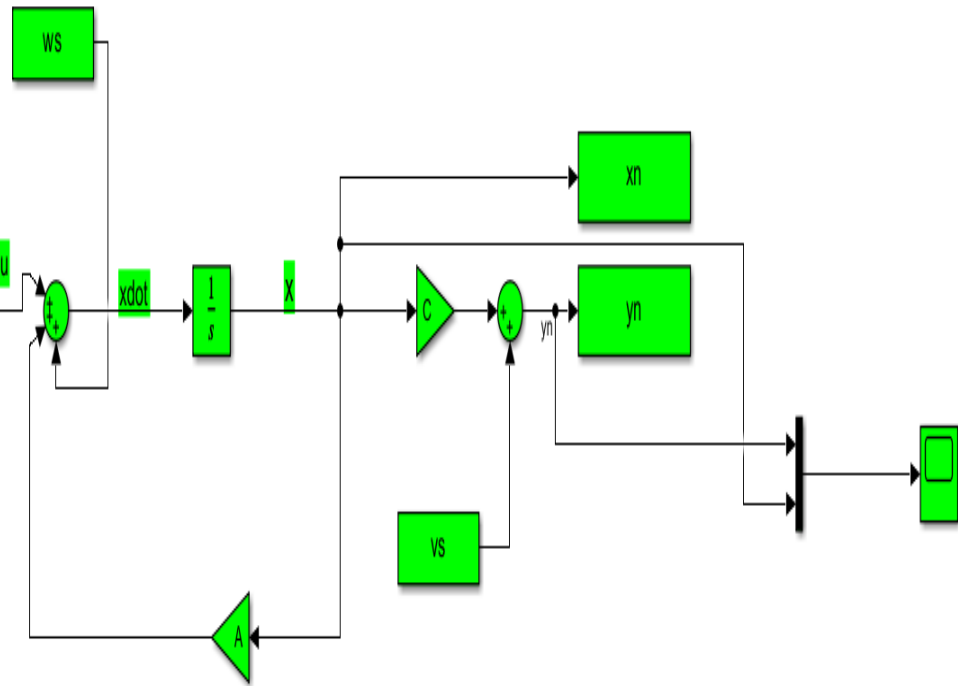
Tabel 3.3 Pemograman Membuat *Noise*

Algoritma Pemograman Membuat Noise	
1.	Memberi nama program sistem membuat_noise
2.	Membuat perintah <code>clc</code> ; <code>clear all</code> ; <code>close all</code> ; (membersihkan <i>comand window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup jendela <i>figure</i> yang masih terbuka)
3.	Memanggil file “data_system”
4.	Menentukan besarnya deviasi standar <i>noise</i> proses dan <i>noise</i> pengukuran
5.	Membangun sinyal <i>random noise</i> <i>rw</i> dan <i>rv</i>
6.	Normalisasi <i>random noise</i> <i>rw</i> dan <i>rv</i> sehingga didistribusi dengan rata-rata 0 dan varian 1
	Mengkalikan <i>noise</i> dengan nilai 6% seperti pada persamaan (3.1), dan (3.2)
	Menyimpan hasil <i>noise</i> dalam file dengan nama “save datanoise”
End	

Setelah melakukan pembuatan *noise*, langkah berikutnya adalah merancang algoritma untuk menguji ketahanan sistem STH terhadap *noise* yang sudah dibuat. Dapat dilihat dari Gambar 3.3 berikut.

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



Gambar 3. 3 Sistem *Open Loop* Menggunakan *noise*

Pada Gambar 3.2 sudah dibuat sistem *open loop* tetapi hanya sebuah sistem tidak menggunakan *noise*. Berikut adalah algoritma program sistem *open loop* dengan menggunakan *noise*.

Tabel 3.4 Pemograman Sistem *Open Loop* Menggunakan *Noise*

Algoritma Sistem <i>Open Loop</i> Menggunakan <i>Noise</i>	
1	Memberi nama program sistem <i>mainfunction1</i>
2	Membuat perintah <code>clc; clear all; close all;</code> (membersihkan <i>comand window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup jendela <i>figure</i> yang masih terbuka)
3	Mendefinisikan waktu: waktu mulai (T_{start}), waktu sampling (T_S) dan waktu akhir (T_N)
4	Mendefinisikan parameter pada Tabel 2.2
5	Mendefinisikan matriks <i>state-space</i> pada persamaan (2.8), (2.9), (2.10), (2.11)
6	Memanggil <i>noise</i> yang sudah dibuat dengan nama “ <i>datanoise.mat</i> ”
7	Mendefinisikan kondisi awal sistem

Memanggil *Simulink* dengan nama “StirrerTank_noise2.slx”

Plot hasil keluaran sistem STH secara *open loop* yang sudah mempunyai *noise*

Pada Tabel 3.4 merupakan algoritma program dengan hasil keluaran sistem yang sudah terdapat *noise*, sehingga selanjutnya adalah mendesain LQG. LQR sebagai pengendali dan Kalman-Filter sebagai observer.

Selanjutnya setelah melakukan pengujian terhadap sistem *open loop* yang diberikan *noise* maka selanjutnya membuat alortima untuk pemasangan *kalman filter*. Berikut merupakan tabel algoritma *kalman filter*

Tabel 3.5 Algoritma LQG-PID

Algoritma LQG-PID	
1.	Membuat perintah <code>clc; clear all; close all;</code> untuk membersihkan <i>command window</i> , menghapus variabel, dan menutup semua jendela grafik.
2.	Memuat data model matematis sistem STH dari file <code>data_system.mat</code> yang berisi matriks <i>state-space</i> dan waktu.
3.	Memuat data <i>noise</i> proses dan <i>noise</i> pengukuran dari file <code>datanoise.mat</code> .
4.	Menentukan parameter K_p, K_i, K_d
5.	Menghitung kovarians noise proses dan pengukuran dengan: $Q = \sigma_w.^2$; $R = \sigma_v.^2$;
6.	Membentuk sistem <i>state-space augmented</i> untuk Kalman Filter: $B_f = [B \text{ eye}(1,1)]$; $D_f = [D \text{ zeros}(1,1)]$; <code>sys_kf=ss(A,Bf,C,Df);</code>
7.	Menghitung kalman gain <code>[kalmf,Kf,P]=kalman(sys_kf,Q,R);</code>
8.	Mendesain LQR gain <code>lqr(sys_kf,Q_lqr,R_lqr)</code>
9.	Menjalankan Simulink model dengan nama <code>PID_LQG.slx</code>
10.	Menyimpan data dengan nama <code>data_LQG_PID</code>
11.	Menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik respon Kalman Filter dan respon sistem LQG-PID menggunakan perintah <code>plot()</code> .
END	

6. Desain LQG-PID

Dalam melakukan desain LQG dalam sistem STH hal yang pertama yang dilakukan yaitu mendefinisikan model *state space* dari sistem STH pada persamaan (2.6) dan (2.7) sehingga didapatkan matrik A , B , C , dan D dari sistem STH dapat dilihat dari persamaan (2.8), (2.9), (2.10), dan (2.11). Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan model *state space* kontinu seperti pada persamaan (2.6) dan (2.7). Dimana pada persamaan (2.12) yang mendefinisikan *noise* $w(t)$ dan pada persamaan (2.13) mendefinisikan *noise* $v(t)$. *Noise* tersebut digunakan sebagai sinyal untuk *gaussian white noise*. Dimana Q merupakan varian untuk *noise* $w(t)$ dan R adalah varian untuk *noise* $v(t)$. Untuk mendapatkan nilai yang diinginkan yaitu 0 dan 1 maka *noise* acak pada persamaan (3.3) dan (3.4) harus dinormalisasikan dengan menggunakan rumus pada persamaan (3.5) sehingga didapatkan nilai 0 dan 1. Berdasarkan blok diagram LQG pada Gambar 2.3 bahwa diperlukan sebuah sistem untuk merancang LQG, yang mana sudah dirancang berdasarkan *state space*. Pada blok diagram LQG pada gambar (2.3) terdapat K_f yang merupakan gain kalman filter atau istilah lain dikenal dengan sebagai matrik gain Kalman. K_f adalah matrik Kalman-filter yang digunakan untuk memperbarui estimasi keadaan sistem berdasarkan pengukuran. K_f diselesaikan dengan persamaan (2.15) dan (2.16). Berikut langkah-langkah untuk mendapatkan gain K_f dengan menggunakan state A , B , C , dan D sebagai *state observer*. maka Adapun persamaan umum kalman state estimator dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + Gw(t) \quad (3.11)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) + Hw(t) + v(t) \quad (3.12)$$

Dimana $[Bu(t) + Gw]$ diasumsikan sebagai matrik (B_f) , dan matrik (D_f) merupakan asumsi dari $[Du + Hw]$, sehingga matrik (B_f) dan (D_f) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$B_f = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$D_f = (0, 0) \quad (3.14)$$

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

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

$$sys_kf = ss(A, Bf, C, Df) \quad (3.15)$$

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

$$[kalmf, Kf, P] = kalman(sys_kf, Q, R) \quad (3.16)$$

Setelah mendapatkan nilai Q dan R , kemudian barulah bisa mendefinisikan LQR dengan menggunakan sistem Q dan R dari kalman-filter. Maka dapat dihitung menggunakan MATLAB dengan persamaan berikut:

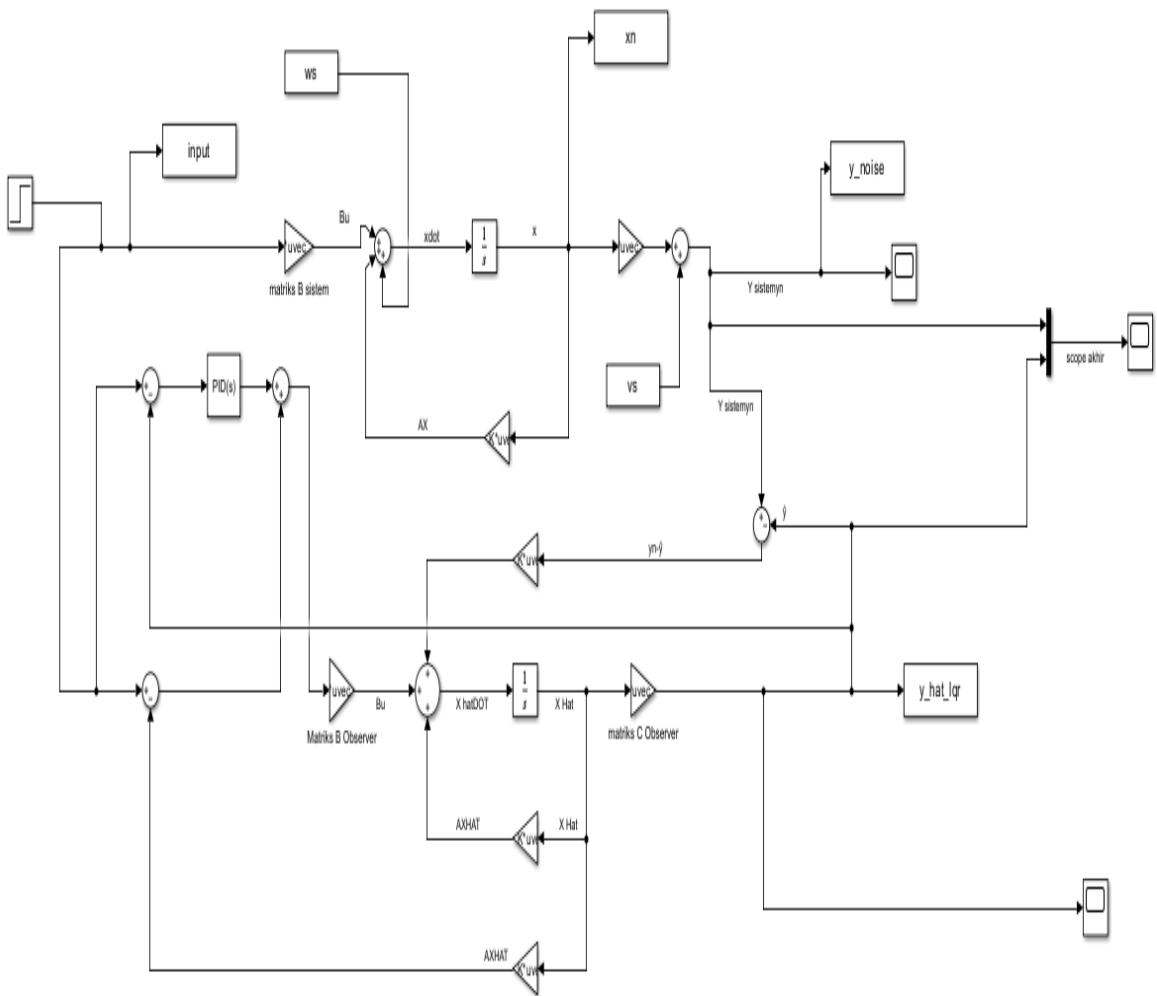
$$[K, s, e] = lqr(sys, Q, R) \quad (3.17)$$

Setelah mendapatkan gain K_f dan sudah mendapatkan nilai LQR, selanjutnya dapat dirancang LQG pada sistem STH menggunakan blok-blok simulink pada Tabel 3.1 berikut adalah tampilan dari rangkaian blok *Simulink* pada sistem STH dengan menggunakan *noise* (w) dan (v), dan menggunakan LQG yang telah dirancang menggunakan *Simulink* MATLAB sebagai berikut:



Hak Cipta Uinmuangui Unang-Unaang

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.



Gambar 3.4 Simulink MATLAB Sistem STH Menggunakan LQG

7. Simulasi LQG-PID pada Sistem STH dan Pengujian

Pengujian kekokohan LQG sebagai pengendali dilakukan dengan menambahkan gangguan berupa noise proses maupun noise pengukuran pada sistem. Simulasi ini bertujuan untuk menguji sejauh mana pengendali LQG mampu menjaga kestabilan suhu pada sistem STH meskipun terdapat gangguan, serta menilai sensitivitas kinerja LQG terhadap perubahan kondisi sistem. Algoritma LQG yang digunakan menggabungkan kemampuan estimasi Kalman Filter dan optimasi regulasi LQR sehingga dapat menghasilkan pengendalian suhu yang lebih robust pada sistem dengan ketidakpastian.

Tabel 3.6 Pemograman LQG-PID

Algoritma Pemograman LQG-PID	
1	Memberi nama program sistem LQG-PID STH.
2	Membuat perintah <code>clc</code> ; <code>clear all</code> ; <code>close all</code> ; (membersihkan <i>comand window</i> , menghapus variabel di <i>baseworkspace</i> dan menutup jendela <i>figure</i> yang masih terbuka).
3	Mendefinisikan waktu simulasi: waktu mulai (<code>t_start</code>), waktu sampling (<code>Ts</code>), dan waktu akhir (<code>T_end</code>).
4	Mendefinisikan parameter sistem dari <i>file</i> <code>data_system.mat</code> .
5	Mendefinisikan parameter PID (K_p, K_i, K_d).
6	Memanggil data <i>noise</i> dari <i>file</i> <code>data_noise.mat</code> .
7	Membuat sinyal <i>timeseries</i> untuk <i>noise</i> proses dan <i>noise</i> pengukuran.
8	Menentukan kovariansi proses Q dan kovariansi pengukuran R dari nilai σ_w dan σ_v .
9	Menyusun model <i>kalman filter</i> dengan mendefinisikan matriks B_f dan D_f , lalu membentuk sistem <i>state-space</i> <code>sys_Kf</code> .
10	Menghitung gain K_f menggunakan fungsi <i>kalman</i> pada MATLAB.
11	Mendefinisikan kondisi awal sistem.
12	Menjalankan simulasi <i>Simulink</i> untuk <i>kalman filter</i> dengan <i>file</i> <code>Sistem_kalman.slx</code> dan <code>PID_LQG.slx</code> untuk sistem LQR.
13	Membuat plot respon sistem dengan kontrol LQG-PID (LQR + Kalman Filter)
End	

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis sistem pengendali suhu pada *Stirred Tank Heater* (STH) dengan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)-PID, dapat ditarik tiga kesimpulan utama:

1. Penerapan pengendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) mampu meningkatkan stabilitas sistem STH serta mereduksi pengaruh *noise* pada proses dan pengukuran dibandingkan sistem tanpa pengendali. Namun, hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendali LQG masih menghasilkan *steady-state error*, sehingga keluaran sistem belum sepenuhnya mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan.
2. Penerapan pengendali gabungan *Linear Quadratic Gaussian–Proportional Integral Derivative* (LQG–PID) terbukti mampu meningkatkan performa pengendalian suhu sistem STH secara signifikan. Penambahan aksi integral dari pengendali PID berhasil menghilangkan *steady-state error*, menghasilkan respons yang stabil, waktu penetapan yang lebih cepat, serta akurasi tinggi meskipun sistem dipengaruhi oleh *noise*.
3. Pengujian dengan *setpoint* 30 °C, pengendali LQG – PID menghasilkan respon yang cepat dan stabil dengan nilai *rise time* sebesar 2,2 menit, *settling time* 4,17 menit, *time delay* 0,35 menit, serta *steady-state error* yang mendekati nol, sehingga suhu dapat dicapai secara akurat tanpa fluktuasi.
4. Pengujian dengan *setpoint* 90 °C, pengendali LQG – PID menunjukkan performa yang stabil dengan *overshoot* sebesar 0%, *rise time* 2,27 menit, *settling time* 6,58 menit, dan *time delay* 0,8 menit, yang menandakan kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan suhu pada *setpoint* tinggi.

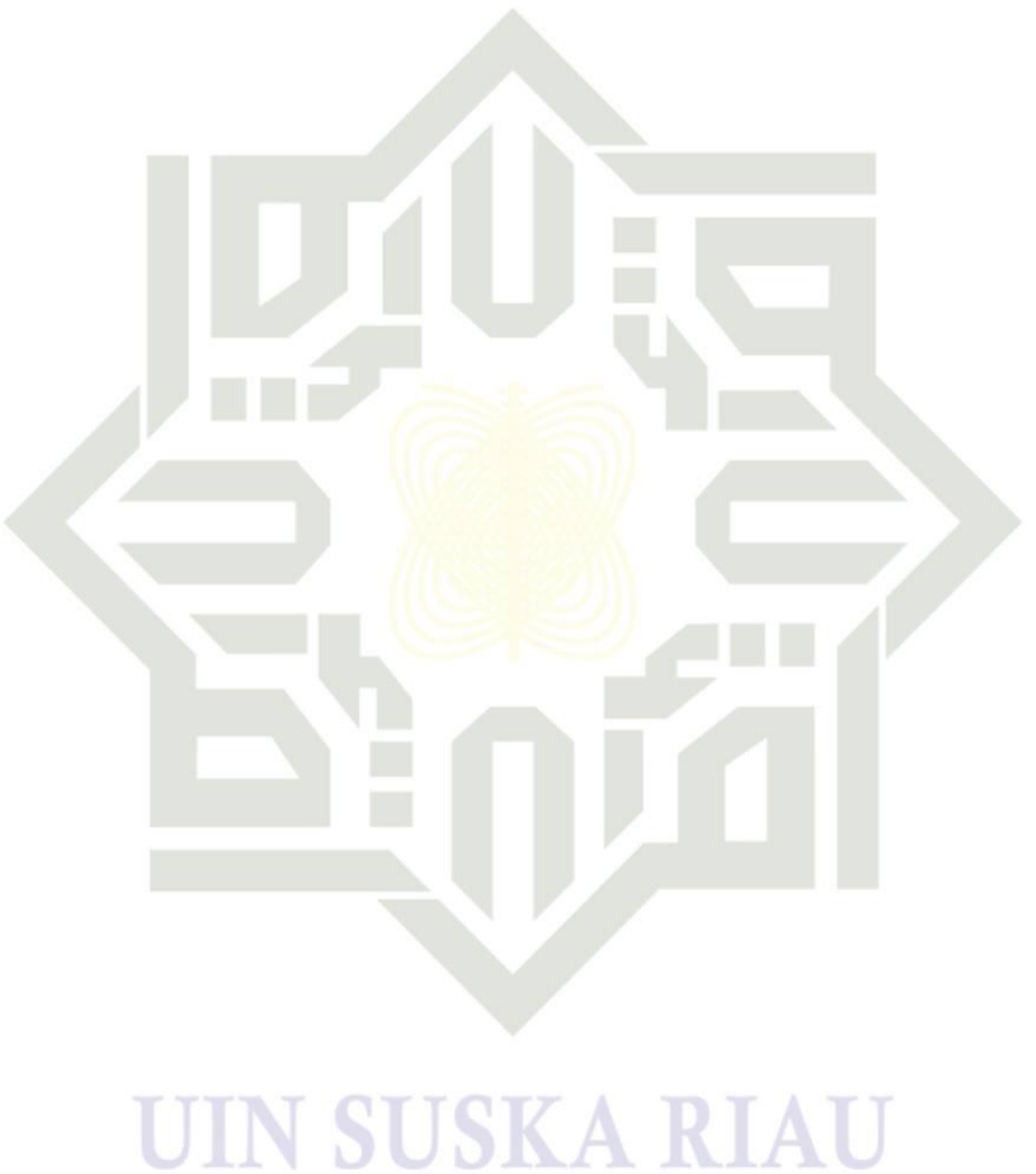
5.2 Saran

1. Perbandingan dengan pengendali *Hybrid* Lain: Penelitian selanjutnya dapat membandingkan kinerja pengendali LQG-PID dengan pengendali optimal *hybrid* lainnya, seperti *Linear Quadratic Gaussian-Linear Quadratic Integral* (LQG-LQI), untuk mengidentifikasi desain pengendali yang paling tangguh.
2. Analisis Robustness: Perlu dilakukan analisis lebih lanjut mengenai kekokohan

(*robustness*) pengendali LQG-PID terhadap variasi parameter sistem (misalnya perubahan laju alir atau parameter termal) untuk memastikan kinerja yang konsisten dalam berbagai kondisi operasi

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. 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. W. Bequette, *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall Professional, 2003.
- [2] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle III, *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [3] S. A. Sukarno, N. Lilansa, N. W. Nugraha, and A. F. Rifai, "Rancang Bangun Grapical User Interface Pada Sistem Kendali Suhu Nirkabel Pemanas Tangki Berpengaduk Kontinyu," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 1, 2024.
- [4] M. H. H. Deifalla and G. A. Gasmelseed, "Genetic algorithm-based PID optimization for ethyl acetate saponification in a continuous stirred tank reactor," *American Journal of Chemical Engineering*, vol. 12, pp. 123-131, 2024.
- [5] Z. Wang, H. Wang, and Z. Du, "Deep Neural Network Model Based on Process Mechanism Applied to Predictive Control of Distillation Processes," *Processes*, vol. 13, no. 3, p. 811, 2025.
- [6] M. Derakhshannia and S. S. Moosapour, "Finite-time sliding mode control for continuous stirred tank reactor based on disturbance observer," *Iran. J. Chem. Chem. Eng. Research Article Vol*, vol. 41, no. 11, 2022.
- [7] M. Tao, T. Gao, X. Li, and K. Li, "Broad learning aided model predictive control with application to continuous stirred tank heater," *Frontiers in Control Engineering*, vol. 2, p. 788492, 2021.
- [8] D. Mukherjee, G. L. Raja, P. Kundu, and A. Ghosh, "Design of optimal fractional order Lyapunov based model reference adaptive control scheme for CSTR," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 1, pp. 436-441, 2022.
- [9] A. Gupta, A. Gu, and J. Berant, "Diagonal state spaces are as effective as structured state spaces," *Advances in neural information processing systems*, vol. 35, pp. 22982-22994, 2022.
- [10] S. J. Chacko, P. Neeraj, and R. J. Abraham, "Optimizing LQR controllers: A comparative study," *Results in Control and Optimization*, vol. 14, p. 100387, 2024.
- [11] R. Büchi, *State Space Control, LQR and Observer: step by step introduction, with Matlab examples*. Books on Demand, 2010.

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.
- [12] P. L. dos Santos, T. A. Perdicoúlis, P. A. Salgado, and J. C. Azevedo, "Kalman filter for noise reduction of Li-Ion cell discharge current," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 9582-9587, 2023.
 - [13] I. Hudati, N. I. Wijayakusuma, A. Y. Ismail, A. A. P. Barus, and H. Budianto, "Kontrol motor dc dengan kendali linear quadratic regulator dan filter kalman menggunakan gui matlab," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan*, vol. 4, no. 1, 2023.
 - [14] S. Sovi Pebriani, "Performansi Estimasi Kecepatan Motor DC Menggunakan Kalman-Bucy Sebagai State Observer," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
 - [15] Y. Tang, Y. Zheng, and N. Li, "Analysis of the optimization landscape of linear quadratic gaussian (LQG) control," in *Learning for Dynamics and Control*, 2021: PMLR, pp. 599-610.
 - [16] M. D. Surindra, "Studi Analisis Sistem Fisik Thermal Dengan Pemodelan Stirrer Tank Heater Menggunakan SIMULINK MATLAB," *Eksergi Jurnal Teknik Energi*, pp. 57-66, 2021.
 - [17] E. H. Abdel-Gawad, M. M. Taha, M. A. Abdel-Kawi, G. H. Sedahmed, and M. A. El-Naggar, "Mass and heat transfer in stirred tank equipped with a horizontal tubular cruciform baffle," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 178, pp. 514-522, 2022.
 - [18] E. N. Demirhan, K. Ç. Coşkun, and C. Kasnakoğlu, "LQI Control Design with LQG Regulator via UKF for a Fixed-Wing Aircraft," in *2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2020: IEEE, pp. 25-30.
 - [19] A. W. Putra, "Perancangan Kendali LQR-PD Untuk Pengendalian Sumbu Elevasi Gun Pada Turret-Gun Kaliber 20 Milimeter," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2020.
 - [20] G. Yu, "Implementation of kalman filter approach for active noise control by using matlab: Dynamic noise cancellation," *arXiv preprint arXiv:2402.06896*, 2024.
 - [21] E. N. Firdausi, "Pengaplikasian Kontroler PID Pada Sistem Kontrol Level Ketinggian Air Tandon Penguin 1500 Liter Menggunakan MATLAB," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [22] P. Mohindru, "Review on PID, fuzzy and hybrid fuzzy PID controllers for controlling non-linear dynamic behaviour of chemical plants," *Artificial Intelligence Review*, vol. 57, no. 4, p. 97, 2024.
- [23] F. Lewis, "Applied Optimal Control and Estimation, Digital Design and Implementation. Prentics Hall," *Inc., Englewood Cliffs, NJ, USA*, 1992.
- [24] J. Dofela, "Desain Kendali Optimal Metode Linear Quadratic Gaussian (LQG) Untuk Pengendalian Sistem Suspensi Kendaraan Seperempat," Universitas Islam Negri Sultan Syarif Kasim Riau, 2019.
- [25] M. R. Pradana, D. Aristoni, R. H. Triyanto, U. Yuliatin, and S. H. Budi, "Cascade flow rate-temperature control system design based on PID controller using direct synthesis tuning method," *Jurnal Polimesin*, vol. 22, no. 6, pp. 654-661, 2024.
- [26] M. Mohammadzaheri and M. Ghodsi, "An Enhanced Smith-Predictor-based Control System for delayed MIMO Processes and its Use on a CSTR with Multiple Time-delays," in *2023 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 2023: IEEE, pp. 1-6.
- [27] I. T. Yuniahastuti, "Pemograman MATLAB Aplikasi pada bidang Elektro," ed: UNIPMA Press, 2021.

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.

LAMPIRAN

```
%% Bersihkan Workspace dan Command Window
clear all; close all; clc;

%% Waktu Simulasi
Ts = 0.01;
T_end = 30;
t = 0:Ts:T_end;

%% Parameter Sistem Termal
R = 0.000165;
c = 4180;
% v = 1000;
h1 = 15000; %% watt yang dibutuhkan
b0 = 30; % setpoint suhu

%% Matriks State-Space
A = -1 / (R * c);
B = 1 / c;
C = 1;
D = 0;

%% Simulasi Simulink
IC = 0;
sim('StirrerTank'); % Pastikan ini sesuai nama file modelmu
x_simulink= x_simulink';
y_simulink= y_simulink';
%% Plot perbandingan
figure;
ax = axes;          % buat axes handle
hold(ax,'on');
plot(ax, t, y_simulink, 'b', 'LineWidth', 1.5);
%plot(t, x_simulink, 'b', LineWidth=1.5);
xlabel(ax, 'Menit (waktu)');
ylabel(ax, 'suhu(°C)');

grid (ax, 'on');
box(ax,'on');      % === BOX STYLING ===
set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.2);
hold(ax,'off');
save data_system
```

Gambar 1 Program *Open Loop STH*

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.

```
%% membangun noise
%% clear histori
clc;clear all;close all;
%% load data
load data_system
yn = y_simulink';
xn = x_simulink';
xn = xn';
yn = yn';
%% sigma w dan v
sigma_w = max (xn)* 0.10; %6%
sigma_v = max (yn)* 0.10;
%% signal random
rw=randn(size(xn));
rv=randn(size(yn));
%% normalisasi noise
q_w=(rw-(mean(rw'))'*ones(1, length(xn)))./((std(rw'))'*ones(1,length(xn)));
q_v=(rv-(mean(rv'))'*ones(1, length(yn)))./((std(rv'))'*ones(1,length(yn)));
w = q_w.*sigma_w;
v = q_v.*sigma_v;
save datanoise
```

Gambar 2 Program untuk meembuat *Noise*

```
%% Sistem Open Loop STH
%% Bersihkan Workspace dan Command Window
clear all; close all; clc;
%% load sistem
load data_system.mat
%% Simulasi Simulink
load datanoise.mat
vs=timeseries(v,t);
ws=timeseries(w,t);
IC = 0;
sim('StirrerTank_noise2.slx'); % Pastikan ini sesuai nama file modelmu
%% Plot perbandingan
figure;
plot(t, yn, 'b', LineWidth=1.5);
grid on;
figure;
plot(t, xn, 'b', LineWidth=1.5);
xlabel('MENIT');
ylabel('suhu(derajat)');
grid
```

Gambar 3 Program *Open Loop dengan Noise*

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.

```

%% Bersihkan Workspace dan Command Window
clear all; close all; clc;
% load data sistem
load data_system.mat
%% tambahkan noise
load datanoise.mat
ws=timeseries(w,t);
vs=timeseries(v,t);
% R=[sigma_w];
% Q=[sigma_v];
var_sigma_w = sigma_w.^2;% membuat kovariansi pengukuran Q
Q = var_sigma_w;% Matriks 1 x 1 Q
var_sigma_v = sigma_v.^2;% membuat kovariansi pengukuran R
R_k = var_sigma_v;
%% kalman gain
Bf=[B eye(1,1)];
Df=[D zeros(1,1)];
sys_kf=ss(A,Bf,C,Df)
%% Kalman Gain (manual)
% Kf = 0.5; % Disesuaikan dengan tuning Kalman atau hasil perhitungan
[kalmf,Kf,P]=kalman(sys_kf,Q,R_k);
rmse = sqrt(mean((yn - b0).^2));
fprintf('RMSE = %.4f °C\n', rmse);
%% Inisialisasi Kondisi Awal
IC = 0;
%% Jalankan Simulasi Simulink
sim('Sistem_kalman.slx'); % Harus menghasilkan variabel: yn, xn, y_hat
xn = xn';
yn = yn';
y_hat = y_hat';
x_hat = x_hat';
%% Jalankan Simulasi Simulink lqr
Q_lqr= Q;
R_lqr= R;
sys=ss(A,B,C,D);
[K,s,e]=lqr(sys_kf,Q_lqr,R_lqr);
sim('LQG_saja.slx')
y_hat_lqg=y_hat_lqg';
input=input';
%% plot
figure(1)
plot(t, yn, 'r--',t,y_hat,'b','LineWidth', 1);
xlabel('Menit (waktu)');
ylabel('suhu( °C)');
legend('noise acak', 'respon sistem');
grid
figure(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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

```
ax = axes;           % buat axes handle
hold(ax,'on');
plot(ax, t, y_hat_lqg, 'r--', t, input,'b','LineWidth', 1);
ylim ([0 100])
legend(ax, 'Respon Sistem', 'Setpoint');
xlabel(ax, 'Menit (waktu)');
ylabel(ax, 'suhu( °C)');
grid (ax, 'ON');
box(ax,'on');        % === BOX STYLING ===
set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.2);
hold(ax,'off');
save data_LQG
```

Gambar 4 Gambar Program dari LQG Pada Sistem Stirrer Tank

```
%% Bersihkan Workspace dan Command Window

clear all; close all; clc;

% load data sistem
load data_system.mat

% Parameter PID
Kp = 2.68772898364669;
Ki = 5.86476918918027;
Kd = 0.0933717196462403;

%% tambahkan noise
load datanoise.mat
ws=timeseries(w,t);
vs=timeseries(v,t);

% R=[sigma_w];
% Q=[sigma_v];
var_sigma_w = sigma_w.^2;% membuat kovariansi pengukuran Q
Q = var_sigma_w;% Matriks 1 x 1 Q
var_sigma_v = sigma_v.^2;% membuat kovariansi pengukuran R
R_k = var_sigma_v;

%% kalman gain
Bf=[B eye(1,1)];
```

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.

```

Df=[D zeros(1,1)];
sys_kf=ss(A,Bf,C,Df);

%% Kalman Gain (manual)

% Kf = 0.5; % Disesuaikan dengan tuning Kalman atau hasil perhitungan
[kalmf,Kf,P]=kalman(sys_kf,Q,R_k);

%% Info Grafik

info = stepinfo(yn, t); % Rise time, settling time, peak time, overshoot
rise_time    = info.RiseTime
format compact
settling_time = info.SettlingTime
format compact
peak_time     = info.PeakTime
format compact
overshoot     = info.Overshoot
format compact

% Error steady-state (Ess)
r_final = b0(end); % referensi
y_final = yn(end); % output
ess = abs(r_final - y_final)
format compact

% Time delay (50% steady-state point)
half_value = 0.5 * y_final;
idx_delay = find(yn >= half_value, 1);
time_delay = t(idx_delay)
format compact

%% Inisialisasi Kondisi Awal
IC = 0;

%% Jalankan Simulasi Simulink

sim('Sistem_kalman.slx'); % Harus menghasilkan variabel: yn, xn, y_hat

```

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.

```
xn = xn';
yn = yn';
y_hat = y_hat';
x_hat = x_hat';

%% Jalankan Simulasi Simulink lqr

Q_lqr= Q;
R_lqr= R;
sys=ss(A,B,C,D);
[K,s,e]=lqr(sys_kf,Q_lqr,R_lqr);
sim('PID_LQG.slx')
y_hat_lqr=y_hat_lqr';
input=input';

%% plot
figure(1)
ax = axes;          % buat axes handle
hold(ax,'on');
plot(ax, t, yn, 'r--',t,y_hat,'b','LineWidth', 1);
xlabel (ax, 'waktu');
ylabel (ax, 'suhu');
legend(ax, 'noise acak', 'respon sistem');
grid

figure(2)
ax = axes;          % buat axes handle
hold(ax,'on');
plot(ax, t, y_hat_lqr, 'r--', t, input,'b','LineWidth', 1);
ylim ([0 100])
xlabel(ax, 'Menit (waktu)');
ylabel(ax, 'suhu(°C)');
legend(ax, 'Respon Sistem', 'Setpoint');
grid (ax, 'ON');
```


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.

```
box(ax,'on');      % === BOX STYLING ===

set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.2);

hold(ax,'off');

save data_LQG-PID
```

Gambar 5 Gambar Program dari LQG-PID Pada Sistem Stirrer Tank

```
%% Bersihkan Workspace dan Command Window
clear all; close all; clc;
load data_system.mat
%% tambahkan noise
load datanoise.mat
ws=timeseries(w,t);
vs=timeseries(v,t);
%% Inisialisasi Kondisi Awal
IC = 0;
%% Jalankan Simulasi Simulink
sim('Pid_only.slx');
t = t';
sp = 30 * ones(size(t));
% menghitung nilai RMSE
rmse = sqrt(mean((y_PID - sp).^2));
fprintf('RMSE PID = %.4f °C\n', rmse);
% mrnghitung performansi
y_norm = y_PID / sp(1);
info = stepinfo(y_norm, t);
RiseTime   = info.RiseTime;
SettlingTime = info.SettlingTime;
Overshoot  = info.Overshoot;
% Time Delay (10%)
idx_delay = find(y_PID >= 0.1*sp(1), 1, 'first');
TimeDelay = t(idx_delay);
Hasil_PID = table(TimeDelay, RiseTime, SettlingTime, Overshoot, rmse, ...
'VariableNames',{'TimeDelay_min','RiseTime_min','SettlingTime_min','Overshoot_percent','RMSE_C'});
disp('=== PERFORMANSI SISTEM PID ===');
disp(Hasil_PID);

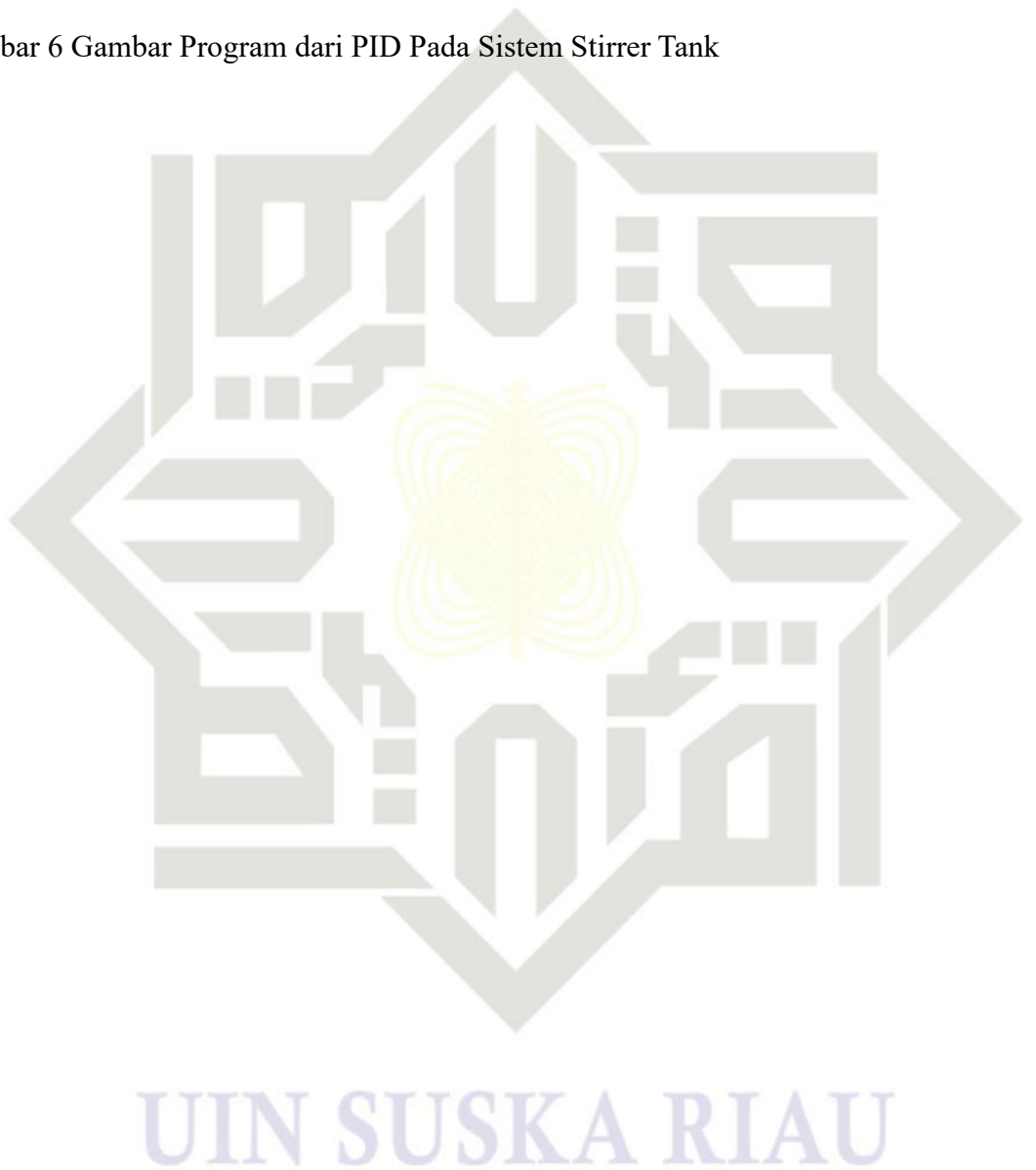
%% Plot perbandingan
figure;
ax = axes;      % buat axes handle
hold(ax,'on');
plot(ax, t, y_PID, 'b', 'LineWidth', 1.5);
ylim ([0 35])
%plot(t, x_simulink, 'b', LineWidth=1.5);
```

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

```
xlabel(ax, 'Menit (waktu)');  
ylabel(ax, 'suhu(°C)');  
legend(ax, 'PID', 'Setpoint');  
grid (ax, 'on');  
box(ax,'on');      % === BOX STYLING ===  
set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.2);  
hold(ax,'off');  
save data_PID
```

Gambar 6 Gambar Program dari PID Pada Sistem Stirrer Tank





DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Widi Avandi, lahir di Perawang 18 Agustus 2002 ,ayah bernama Edi Susanto dan nama ibu Dewi Andrianis. Penulis pertama kali menempuh jenjang pendidikan berumur 7 tahun yaitu di SDS YPPI, waktu itu tahun 2010 dan selesai pada tahun 2016, dan pada tahun yang sama juga penulis melanjutkan sekolah menengah pertama di SMPS YPPI dan menyelesaikan pendidikannya pada tahun 2018. Pada tahun yang sama juga

penulis melanjutkan pendikan di SMKS YPPI dan waktu waktu SMK saya mengambil jurusan Otomasi Industri karna sesuai minat penulis. Pada 2022 penulis selesai pendidikan di SMK dan pada tahun yang sama juga penulis diterima di melanjutkan pendididkan ke perguruan tinggi lulus melalui jalur CAT Mandiri 2022 diprodi pilihan pertama yaitu Teknik Elektro UIN Suska Riau dan sampai sekarang. Pada semester 5, penulis memilih kosentrasi pada bidang Elektronika Instrumentasi. Penulis Berhasil menyelesaikan studi pada tahun 2026.

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

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikan tugas akhir ini yang berjudul “**Desain Pengendali dan Simulasi Sistem Pengendali Suhu pada *Stirred Tank Heater Menggunakan Linear Quadratic Gaussian (LQG)-PID***”.

No HP : 0887-4278-0917
Email : widiavandi18@gmail.com

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.