

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 MODEL *REFERENCE ADAPTIVE CONTROL*
(MRAC) UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA SISTEM *STIRRER*
*TANK HEATER***

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

RISKY KURNIAWAN
12250512796

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

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

2025

LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN PENGENDALI MODEL *REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (*IRAC*) UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA SISTEM *STIRRER* *TANK HEATER*

TUGAS AKHIR

Oleh:

Oleh:

RISKY KURNIAWAN

12250512796

122505

telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro

di Pekanbaru, Pada Tanggal 30 Januari 2025

Pekanbaru, Pada Tanggal 30 Januari 2025

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Ketua

ktro



Dr. Hj. Liliana, S.T., M.Eng

NIP: 19781012 200312 2 004

NIP:

Pembimbing

Pembimbing



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

NIP: 19870906 201503 2 006

UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN PENGENDALI MODEL *REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA SISTEM *STIRRER* *TANK HEATER*

TUGAS AKHIR

Oleh :

RISKY KURNIAWAN

12250512796

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 30 Desember 2025

Pekanbaru, 30 Desember 2025

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

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

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

Dewan Penguji :

Ketua : Dr. Hj. Liliana, ST., M.Eng.

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

Anggota I : Hilman Zarory, S.T., M.Eng.

Anggota II : Aulia Ullah, S.T., M.Eng.

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 izin dari Dekan Fakultas Tugas Akhir ini harus memperoleh 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.

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 : Risky Kurniawan
NIM : 12250512796
Tempat/Tgl. Lahir : Perawang, 21 Maret 2004
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

DESAIN PENGENDALI MODEL *REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA SISTEM *STIRRER TANK HEATER*

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, 30 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,



Risky Kurniawan
NIM. 12250512796

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.

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang

Setiap kesulitan selalu berjalan beriringan dengan kemudahan. Tidak ada proses yang sepenuhnya gelap, dan tidak ada perjuangan yang dibiarkan tanpa jalan keluar. Apa pun yang terasa berat hari ini bukanlah akhir, melainkan bagian dari perjalanan yang sedang membentuk keteguhan dan kedewasaan.

(Q.S. Al-Insyirah: 5–6)

Dengan penuh rasa syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karya tugas akhir ini saya persembahkan sebagai hasil dari perjalanan panjang yang penuh proses, pembelajaran, serta ketekunan. Tugas akhir ini bukan sekadar pemenuhan kewajiban akademik, melainkan bukti bahwa setiap langkah kecil, kesabaran, dan usaha yang terus dijaga pada akhirnya membawa saya sampai pada titik ini.

Karya ini saya persembahkan kepada orang tua dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan kepercayaan tanpa henti. Segala pengorbanan, kesabaran, dan kasih sayang yang diberikan menjadi kekuatan utama dalam menghadapi setiap tantangan selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Saya juga mempersembahkan karya ini kepada dosen pembimbing dan seluruh dosen yang telah memberikan ilmu, arahan, serta bimbingan selama masa perkuliahan. Setiap masukan dan kritik yang diberikan menjadi bagian penting dalam penyempurnaan karya ini.

Terselalu, karya ini saya persembahkan kepada teman-teman dan seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, semangat, serta kebersamaan dalam proses penyusunan tugas akhir ini. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat dan menjadi pengingat bahwa setiap proses memiliki waktunya masing-masing untuk dihargai.

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

(Baskara Putra – Hindia)

Risky Kurniawan

30 Desember 2025

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 MODEL *REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN SUHU PADA SISTEM *STIRRER TANK HEATER*

RISKY KURNIAWAN
12250512796

Tanggal Sidang : 30 Desember 2025

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

ABSTRAK

Stirrer Tank Heater (STH) merupakan sistem pemanas cairan dengan karakteristik termal yang lambat dan tanpa mekanisme pendinginan, sehingga diperlukan pengendali yang mampu menjaga suhu tetap stabil tanpa *overshoot* berlebih. Penelitian ini merancang dan menguji pengendali Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) untuk mengatur suhu STH berdasarkan pemodelan sistem dan simulasi. Model referensi dirancang dengan konstanta waktu 350 detik sebagai hasil *tuning* untuk mendapatkan respon yang cepat namun tetap stabil. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa gangguan serta dengan gangguan pada sinyal *input* dan sinyal *output*, termasuk gangguan *step-up*, *step-down*, dan *noise* 6%. Hasil simulasi tanpa gangguan menunjukkan bahwa MRAC mampu mengikuti *setpoint* dengan baik, ditandai *rise time* 759 detik, *time delay* 250 detik, *settling time* 1370 detik, *overshoot* 0%, dan *error steady-state* 0 °C. Pada gangguan *step-up* dan *step-down*, sistem tetap stabil dan MRAC mampu mengoreksi perubahan mendadak sehingga suhu kembali menuju nilai referensi. Secara keseluruhan, MRAC terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi tracking suhu, mempertahankan kestabilan pada sistem STH.

Kata Kunci: Model *Reference Adaptive Control* (MRAC), *Stirrer Tank Heater* (STH), Pengendalian Suhu, Model Referensi, Gangguan (*Disturbance*), *Noise*, Sistem Termal.

MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) DESIGN FOR TEMPERATURE CONTROL IN STIRRER TANK HEATER SYSTEM

RISKY KURNIAWAN

12250512796

Hearing Date: December 30, 2025

Program of Electrical Engineering

Faculty of Science and Technology

UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas KM 15 No. 155, Pekanbaru

ABSTRACT

Stirrer Tank Heater (STH) is a liquid heating system with slow thermal characteristics and no cooling mechanism, so a controller capable of maintaining a stable temperature without excessive overshoot is required. This study designed and tested a Model Reference Adaptive Control (MRAC) controller to regulate the STH temperature based on system modeling and simulation. The reference model was designed with a time constant of 350 seconds as a tuning result to obtain a fast but stable response. Testing was carried out under undisturbed conditions and with disturbances in the input and output signals, including step-up, step-down and 6% noise. The results of the undisturbed simulation showed that the MRAC was able to follow the setpoint well, marked by a rise time of 759 seconds, a time delay of 250 seconds, a settling time of 1370 seconds, an overshoot of 0%, and a steady-state error of 0 °C. Under step-up and step-down disturbances, the system remained stable and the MRAC was able to correct sudden changes so that the temperature returned to the reference value. Overall, the MRAC proved effective in improving the accuracy of temperature tracking, maintaining stability in the STH system.

Keywords: *Model Reference Adaptive Control (MRAC), Stirrer Tank Heater (STH), Temperature Control, Reference Model, Disturbance, Noise, Thermal System.*

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.

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Assalamu'alaikum wr.wb.

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, yang telah memungkinkan penulis untuk menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini tepat waktu. Dengan izin Allah SWT, penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Desain Pengendali Model Reference Adaptive Control (MRAC) Untuk Pengendalian Suhu Pada Sistem Stirrer Tank Heater”**.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh bimbingan, arahan, serta dukungan yang sangat berarti dari berbagai pihak sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, dengan rahmat dan hidayah-Nya, telah memberikan segala yang terbaik serta petunjuk, sehingga proses penyusunan laporan ini dapat berjalan dengan lancar.
2. Kepada kedua orang tua tercinta, ayahanda Mufti Ahmad dan ibunda Pera Wati, penulis mengucapkan terima kasih atas doa, pengorbanan, ketulusan, kepercayaan, serta dukungan yang senantiasa menyertai setiap langkah penulis, sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Ibu Prof. Dr. Hj. Leny Nofianti MS, SE, M.Si, Ak, CA, selaku Rektor UIN Suska Riau, beserta seluruh staf dan jajarannya.
4. Ibu Dr. Yuslenita Muda, S.Si., M.Sc, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau, beserta seluruh staf dan jajarannya.
5. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
6. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN Suska Riau.
7. Ibu Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu dan pemikirannya dengan tulus dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat bermanfaat, sehingga penulis dapat lebih memahami dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Bapak Hilman Zarory, S.T., M.Eng selaku Dosen Penguji 1 yang telah memberikan kritik dan saran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

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.

99. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng selaku Dosen Penguji 2 yang telah memberikan kritik dan saran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng, selaku Dosen Pembimbing Akademik penulis selama perkuliahan dari awal hingga akhir semester.
11. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada diri sendiri yang telah menjadi pribadi yang terus berusaha, tidak lelah mencoba, dan menjalani perjuangan tanpa henti hingga mampu bertahan sejauh ini. Penulis bangga pada diri sendiri dan berkomitmen untuk terus berkembang menjadi pribadi yang lebih baik dari hari ke hari, hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
12. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada sahabat penulis Nurul Anisa, Diana Ayu Safitri, dan Rafy Aditya atas segala bantuan, perhatian, serta dukungan moril dan doa yang terus diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini. Kehadiran dan semangat yang diberikan menjadi penyemangat tersendiri bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik mungkin.
13. Teman-teman seperjuangan dalam Konsentrasi Instrumentasi 2022, serta teman-teman teknik elektro angkatan 2022 lainnya yang telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Juga kepada teman-teman lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu, memberikan dorongan, motivasi, dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

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

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pekanbaru, 30 Desember 2025

Penulis

Risky Kurniawan
NIM. 12250512796

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	iv
LEMBAR PERNYATAAN	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvi
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>Stirrer Tank Heater</i> (STH)	II-3
2.2.2 Model Matematis Sistem STH	II-4
2.3 Pengendalian Sistem	II-7
2.3.1 <i>Model Reference Adaptive Control</i> (MRAC)	II-7
2.3.2 <i>MIT Rule</i>	II-8
2.3.3 Penentuan Model Referensi pada MRAC	II-10
2.4 Performansi Sistem Kendali	II-11
2.4.1 <i>Delay Time</i> (Td)	II-12

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.

2.4.2 Rise Time (T_r)	II-12
2.4.3 Settling Time (T_s)	II-12
2.4.4 Error Steady-State (E_{ss})	II-12
2.5 Matlab.....	II-13
BAB III METODE PENELITIAN.....	III-1
3.1 Prosedur Alur Penelitian.....	III-1
3.2 Tahapan Penelitian.....	III-2
BAB IV HASIL DAN ANALISA.....	IV-1
4.1 Analisa Hasil Pengujian Sistem STH dengan <i>Open Loop</i>	IV-1
4.2 Analisa Hasil Pengujian Sistem STH dengan Pengendali MRAC	IV-2
4.2.1 Pengujian Sistem STH dengan MRAC Berdasarkan Model Referensi Pendekatan Fisik	IV-3
4.2.2 Pengujian Sistem STH dengan MRAC Berdasarkan Model Referensi Target Performansi	IV-5
4.3 Analisa Hasil Pengujian Adaptasi Sistem STH dengan MRAC terhadap Gangguan Suhu Lingkungan melalui Variasi Parameter Sistem	IV-9
4.3.1 Pengujian Adaptasi Sistem STH terhadap Gangguan Suhu Lingkungan dengan Variasi Hambatan Termal 50%	IV-9
4.3.2 Pengujian Adaptasi Sistem STH terhadap Gangguan Suhu Lingkungan dengan Variasi Hambatan Termal 100%	IV-10
4.4 Analisa Hasil Pengujian Sistem STH dengan MRAC Terhadap Perubahan Setpoint	IV-11
4.5 Analisa Hasil Pengujian Sistem STH dengan Pengendali MRAC Terhadap Gangguan (<i>Disturbance</i>) pada <i>Output</i>	IV-14
4.6 Analisa Hasil Sistem STH dengan MRAC Terhadap <i>Noise</i>	IV-16
BAB V PENUTUP	V-1
5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran	V-1
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Skema STH.....	II-3
Gambar 2.2 Blok Diagram MRAC.....	II-8
Gambar 2.3 Skema MRAC dengan Metode MIT <i>Rule</i> Dua Gain.....	II-9
Gambar 2.4 Matlab R2024a.....	II-13
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Diagram Alur Penelitian	III-2
Gambar 3.2 Blok Diagram <i>Open Loop</i> Sistem STH	III-5
Gambar 3.3 Blok <i>Simulink Open Loop</i> Sistem STH	III-6
Gambar 3.4 Desain <i>Simulink</i> MRAC	III-11
Gambar 4.1 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan <i>Output</i> Keluarannya	IV-2
Gambar 4.2 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan MRAC dengan Model Fisik <i>Plant</i>	IV-4
Gambar 4.3 Respons Suhu STH dengan MRAC dengan Model Fisik <i>Plant</i> pada Tampilan Diperbesar	IV-4
Gambar 4.4 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan MRAC pada Model Performansi ..	IV-6
Gambar 4.5 Hasil Keluaran (<i>u</i>) Sinyal Kendali	IV-7
Gambar 4.6 Hasil Respon Suhu Sistem STH dengan MRAC pada Variasi Hambatan Termal 50%	IV-10
Gambar 4.7 Hasil Respon Suhu Sistem STH dengan MRAC pada Variasi Hambatan Termal 100%	IV-11
Gambar 4.8 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan MRAC Terhadap Perubahan <i>Setpoint</i>	IV-12
Gambar 4.9 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan MRAC Terhadap Gangguan Pada <i>Sinyal Output</i>	IV-14
Gambar 4.10 Hasil Pengujian Simulasi STH dengan MRAC Terhadap <i>Noise</i>	IV-17

DAFTAR RUMUS

Rumus	Halaman
2.9 Persamaan Sistem STH Orde Satu	II-6
2.7 Transformasi Laplace Persamaan STH	II-6
2.8 Fungsi Alih Transfer Function Sistem STH	II-6
3.12 Fungsi Alih Plant STH.....	III-8
3.14 Fungsi Alih Model Referensi.....	III-9
3.17 Persamaan <i>Error Tracking</i>	III-10
3.18 Persamaan <i>MIT Rule</i>	III-10
3.19 Persamaan Update Parameter θ_1	III-10
3.20 Persamaan Update Parameter θ_2	III-10

© 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.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Sistem STH.....	II-4
Tabel 3.1	Blok <i>Simulink</i>	III-5
Tabel 3.2	Algoritma Pemograman Sistem STH Secara <i>Open Loop</i>	III-6
Tabel 3.3	Algoritma Pemrograman Sistem STH dengan MRAC	III-11
Tabel 4.1	Hasil Pengujian STH dengan Pengendali MRAC	IV-8
Tabel 4.2	Hasil Pengujian STH dengan MRAC Terhadap Perubahan <i>Setpoint</i>	IV-13
Tabel 4.3	Hasil Pengujian STH dengan MRAC Terhadap Gangguan pada Sinyal <i>Output</i>	IV-15

DAFTAR SINGKATAN

STH	: <i>Stirrer Tank Heater</i>
MRAAC	: <i>Model Reference Adaptive Control</i>
MIT Rule	: <i>Massachusetts Institute of Technology Rule</i>
PID	: <i>Proportional Integral Derivative</i>
FLC	: <i>Fuzzy Logic Control</i>
MPC	: <i>Model Predictive Control</i>
LQR	: <i>Linear Quadratic Regulator</i>
CSTR	: <i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
MATLAB	: <i>Matrix Laboratory</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengendalian suhu menjadi aspek krusial dalam berbagai proses manufaktur, khususnya pada industri makanan, kimia, dan farmasi [1]. Pemanas memiliki peran penting dalam proses industri karena mampu meningkatkan efisiensi produksi sekaligus menghasilkan kualitas produk yang baik. Salah satu jenis pemanas yang umum digunakan di industri adalah *Stirrer Tank Heater* (STH) atau pemanas tangki berpengaduk. Sistem ini terdiri dari tangki, elemen pemanas, serta pengaduk yang berfungsi untuk menciptakan distribusi suhu yang lebih merata [2]. Penggunaan STH menjadi penting karena dapat menjaga kestabilan proses termal yang dibutuhkan dalam menghasilkan produk dengan kualitas konsisten [3], sehingga industri dapat memenuhi standar mutu yang tinggi serta mengurangi resiko kerugian akibat produk cacat.

STH berperan penting dalam industri kimia, terutama pada proses pemanasan dan pencampuran fluida di dalam tangki tertutup, di mana seluruh bahan baku dimasukkan dan kemudian diproses pada kondisi tertentu hingga diperoleh hasil akhir yang sesuai dengan kebutuhan produksi [2]. Suhu proses harus dijaga tetap stabil karena perubahan suhu yang kecil sekalipun dapat memengaruhi laju reaksi serta kualitas produk yang dihasilkan [4]. Tantangan pada sistem STH muncul akibat perubahan volume cairan, fluktuasi pasokan listrik yang memengaruhi kinerja elemen pemanas, serta perbedaan sifat termal bahan yang menyebabkan kebutuhan energi pemanasan menjadi bervariasi. Peningkatan viskositas fluida dapat menghambat aliran, sehingga energi panas yang dibutuhkan untuk menjaga suhu tetap merata menjadi lebih besar [5]. Selain itu, fenomena konveksi akibat pengadukan menyebabkan distribusi suhu di dalam tangki tidak selalu seragam, sehingga respon pemanasan menjadi lebih lambat dan pengendalian suhu menjadi kurang optimal apabila hanya menggunakan metode konvensional. Kondisi-kondisi tersebut merupakan permasalahan lain atau yang umum dijumpai pada sistem STH.

Namun demikian, permasalahan yang paling sering terjadi dan menjadi faktor utama penyebab perubahan suhu pada sistem STH adalah pengaruh perubahan suhu lingkungan yang dapat mempercepat atau memperlambat laju perpindahan panas dari tangki [6]. Lingkungan dengan suhu lebih rendah dari suhu operasi mempercepat hilangnya panas ke lingkungan, sedangkan lingkungan dengan suhu yang lebih tinggi dapat memperlambat

proses perpindahan panas sehingga kestabilan suhu terganggu. Perbedaan suhu antara tangki dan lingkungan ini bertindak sebagai gangguan konstan yang sulit diprediksi [7], sehingga menyebabkan karakteristik termal sistem berubah dari kondisi desain awal. Selain itu, variasi kondisi ruangan, kelembapan, serta gangguan pada sensor suhu turut menambah ketidakpastian parameter sistem dan memengaruhi performansi pengendalian secara keseluruhan.

Gangguan-gangguan tersebut juga diperkuat oleh faktor dinamika proses seperti turbulensi pengadukan dan kondisi fluida yang berubah selama pemanasan, sehingga respon STH sering menyimpang dari model yang diasumsikan. Di sisi lain, ketidakpastian parameter sistem seperti koefisien perpindahan panas [8], kapasitas panas spesifik, dan konduktivitas termal cairan turut menambah kompleksitas. Apabila ketidakpastian ini tidak diantisipasi, suhu dalam tangki dapat menyimpang dari *setpoint*, menyebabkan kualitas produk menurun, efisiensi energi berkurang, dan biaya produksi meningkat. Oleh sebab itu, karena adanya gangguan, maka pengendalian jadi tidak stabil. Sehingga diperlukan kontrol pengendali yang mampu beradaptasi untuk mempertahankan performa kendali suhu meskipun terjadi perubahan kondisi proses maupun gangguan yang tidak terduga.

Pengendalian suhu pada sistem STH pada awalnya banyak menggunakan pengendali konvensional, khususnya PID (Proportional-Integral-Derivative) [2], karena algoritmanya sederhana dan mudah diterapkan. Namun, PID memiliki keterbatasan mendasar berupa parameter kontrol yang tetap sehingga kurang adaptif terhadap perubahan dinamika sistem [9]. Pada proses pemanasan STH, perubahan viskositas fluida, variasi laju perpindahan panas, serta dinamika pencampuran menyebabkan parameter sistem tidak konstan sepanjang operasi. Ketika kondisi proses berubah, PID tidak mampu menyesuaikan parameter kendalinya secara otomatis, sehingga respon menjadi lambat, overshoot meningkat, atau bahkan muncul *offset* pada keadaan tunak. Penelitian pada sistem *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) [10] juga menunjukkan bahwa PID kesulitan menghadapi gangguan tiba-tiba dan ketidakpastian parameter. Oleh karena itu, dibutuhkan pengendali adaptif yang mampu menyesuaikan parameter secara *real-time* agar performa kendali tetap stabil dan akurat meskipun terjadi perubahan kondisi sistem.

Mengatasi kelemahan PID, peneliti mulai mengembangkan pendekatan kendali cerdas. Salah satunya adalah *Fuzzy logic control* (FLC) yang menggunakan aturan linguistik sebagai dasar pengambilan keputusan, alih-alih model matematis yang presisi [11]. Pendekatan ini lebih fleksibel dalam menangani variasi sistem karena tidak membutuhkan model detail.

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.

Berbagai studi mengatakan bahwa FLC memiliki kemampuan *tracking setpoint* dan penolakan gangguan [12] yang lebih baik dibanding PID konvensional, terutama saat terdapat ketidakpastian model atau fluktuasi lingkungan. Meski demikian, FLC juga memiliki kelemahan berupa waktu naik (*rise time*) yang relatif lambat serta kesulitan dalam analisis matematis, karena sifat logikanya yang kabur (*fuzzy*) membuat tuning pengendali lebih bersifat *trial and error* [13].

Pendekatan lain yang semakin banyak digunakan adalah *Model Predictive Control* (MPC) [14]. MPC termasuk dalam pengendali prediktif berbasis model yang menentukan sinyal kendali dengan memprediksi respon sistem di masa depan menggunakan model matematis, lalu menyelesaikan optimasi pada setiap langkah waktu untuk menghasilkan aksi kendali optimal [15]. Keunggulan utama MPC adalah kemampuannya menangani kendala pada variabel proses maupun aktuator, serta kinerjanya yang adaptif terhadap perubahan kondisi dinamis sistem [16]. Namun, MPC juga memiliki kelemahan berupa perhitungan yang kompleks dan kebutuhan daya komputasi yang tinggi, sehingga sulit diterapkan pada sistem dengan respon cepat atau perangkat keras terbatas. Selain itu, performa MPC sangat bergantung pada keakuratan model, sehingga bila model tidak sesuai kondisi nyata maka hasil kendali bisa menyimpang dan berpotensi tidak stabil [17].

Dari keterbatasan pengendali sebelumnya yang sangat bergantung pada keakuratan model, diperlukan pendekatan kendali yang mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan karakteristik sistem. Pada sistem Stirrer Tank Heater, suhu dapat berubah akibat pengaruh lingkungan dan ketidakpastian parameter proses, sehingga pengendali adaptif menjadi solusi yang sesuai untuk mengatasi permasalahan tersebut. Pengendali adaptif memiliki berbagai jenis seperti *Adaptive PID*, *Self-Tuning Regulator* (STR), *Model Predictive Adaptive Control* (MPAC) dan *Model Reference Adaptive Control* (MRAC). *Adaptive PID* masih terbatas oleh sifat dasar PID sehingga kurang efektif menghadapi perubahan parameter yang besar [18]. STR membutuhkan proses identifikasi parameter yang akurat [19], sementara pada sistem STH parameter proses cenderung berubah secara dinamis sehingga metode ini kurang sesuai. MPAC menawarkan performa kuat, namun memerlukan komputasi tinggi dan model matematis yang detail sehingga tidak efisien untuk sistem orde rendah [20]. Dengan karakter adaptasi yang sederhana namun efektif, MRAC lebih mampu mengikuti perubahan karakteristik sistem secara cepat dan stabil.

Model Reference Adaptive Control (MRAC) bekerja dengan membandingkan keluaran sistem terhadap model referensi, kemudian menyesuaikan parameter kendali secara real-

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.

time agar respon sistem mengikuti perilaku model tersebut [21]. Mekanisme ini membuat MRAC lebih tangguh menghadapi variasi beban, gangguan eksternal, maupun perubahan sifat fluida sehingga kestabilan suhu tetap terjaga [22]. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa MRAC mampu meningkatkan performa transien, kestabilan, dan kemampuan tracking. MRAC terbukti mempertahankan tracking suhu dengan baik meskipun terjadi perubahan parameter proses [23].

Berdasarkan kelemahan pengendali lainnya serta bukti keberhasilan dari penelitian sebelumnya, MRAC dinilai sebagai pendekatan yang paling tepat untuk diterapkan pada STH. Kemampuan adaptasinya terhadap perubahan beban, kondisi lingkungan, dan ketidakpastian parameter menjadikan MRAC solusi efektif untuk menjaga kestabilan suhu proses pemanasan. Oleh karena itu, penulis mengajukan judul tugas akhir **“Desain Pengendali Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) untuk Pengendalian Suhu pada Sistem *Stirrer Tank Heater*”**, dengan fokus pada perancangan sistem kendali adaptif berbasis MRAC yang mampu menjaga suhu proses secara stabil, responsif, dan efisien melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana performansi Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) dapat mengendalikan suhu pada sistem *Stirrer Tank Heater*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah menganalisis dan mengendalikan suhu pada sistem *Stirrer Tank Heater* menggunakan *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) agar suhu dapat dicapai dan dipertahankan sesuai nilai referensi.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink.
2. Sistem digunakan adalah *Stirrer Tank Heater* dengan model matematis orde satu.
3. Fokus penelitian ini adalah kontrol suhu, bukan kontrol aliran, ataupun tekanan.
4. Metode adaptasi yang dipakai adalah *MIT Rule*.

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.

5. Analisis difokuskan pada performa kendali suhu.
6. Tidak ada pendingin aktif, hanya pendingin alami pada sistem STH ini.
7. Gangguan yang diuji dalam penelitian ini dibatasi pada variasi beban panas dan penambahan *noise* pada sistem.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif sistem kendali suhu yang adaptif dan responsif.
2. Menambah referensi teknis dalam penerapan MRAC di sistem termal industri.
3. Meningkatkan pemahaman dalam penerapan simulasi kontrol adaptif menggunakan MATLAB/Simulink.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian tugas akhir ini, penulis melakukan tinjauan literatur yang berkaitan dengan pengendalian suhu pada sistem *Stirrer Tank Heater* (STH) maupun sistem termal sejenis. Tinjauan ini bertujuan memberikan gambaran mengenai metode kendali yang telah banyak digunakan, sekaligus menilai kelebihan dan keterbatasannya. Dengan demikian, penelitian yang dilakukan dapat diarahkan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan yang belum teratasi, khususnya terkait kestabilan suhu, perubahan beban, serta pengaruh gangguan eksternal. Selain itu, batas maksimal temperatur pada sistem STH juga ditentukan oleh material konstruksi tangki. Karena spesifikasi material tidak tersedia, batas temperatur maksimum dirujuk secara umum bahwa material tangki industri mampu menahan panas jauh di atas suhu operasi penelitian, sehingga batas panas material tidak menjadi pembatas dalam studi ini.

Sistem pengendalian suhu pada STH awalnya banyak menggunakan metode konvensional seperti PID [2] merancang pemodelan dinamik dan pengendalian STH menggunakan PID, namun hasilnya menunjukkan bahwa meskipun sederhana dan mudah diterapkan, pengendali ini sulit menjaga kestabilan suhu jika terjadi variasi beban maupun perubahan lingkungan. Penelitian lain pada sistem reaktor tangki berpengaduk berkesinambungan (CSTR) juga memperlihatkan bahwa optimasi PID dengan jaringan saraf RBF mampu memperbaiki performa respon, terutama dalam menurunkan *overshoot* [10]. Meskipun demikian, kelemahan utama pendekatan ini adalah sifatnya yang tidak adaptif secara *real-time*, sehingga performa kendali menurun ketika karakteristik *plant* berubah signifikan.

Upaya peningkatan lain dilakukan dengan mengombinasikan PID dengan logika *fuzzy* dan algoritma genetika pada sistem STH. Metode hibrid ini terbukti dapat memperbaiki waktu pencapaian *setpoint* dan mengurangi *overshoot* dibandingkan PID murni [11]. Akan tetapi, proses optimasi yang dilakukan secara *offline* membuat metode ini tetap kurang responsif dalam menghadapi perubahan mendadak pada kondisi sistem. Selain itu, tuning pengendali berbasis *fuzzy* memerlukan *trial and error* yang cukup rumit, sehingga penerapannya pada skala industri tidak selalu praktis.

Pendekatan berbeda dilakukan dengan membandingkan beberapa metode kendali pada sistem pemanas berbasis MATLAB. Dalam penelitian tersebut, performa PID, *Model*

Predictive Control (MPC), dan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) diuji secara bersamaan [24]. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa MPC memberikan presisi lebih baik dibanding PID, sementara LQR menghasilkan kestabilan yang lebih baik pada kondisi tertentu. Penelitian lain juga mendukung temuan ini, di mana MPC pada sistem STH terbukti presisi, namun menuntut perhitungan kompleks dan ketergantungan tinggi pada model matematis yang akurat [14]. Kompleksitas inilah yang menjadi hambatan utama penerapan MPC di sistem industri yang bersifat dinamis.

Dari uraian penelitian-penelitian sebelumnya dapat disimpulkan bahwa pengendali konvensional maupun metode optimasi masih memiliki keterbatasan dalam menghadapi dinamika sistem yang berubah-ubah [25]. PID memang sederhana dan mudah digunakan, namun kurang adaptif ketika terjadi perubahan parameter proses. Metode optimasi seperti *fuzzy* dan jaringan saraf dapat meningkatkan performa, tetapi umumnya hanya melakukan penyetelan awal dan tidak mampu menyesuaikan parameter secara *real-time*. Sementara itu, MPC menawarkan kontrol yang presisi namun membutuhkan komputasi besar serta model matematis yang detail, sehingga kurang efisien untuk sistem orde rendah seperti STH. Kondisi ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih fleksibel dan mampu beradaptasi terhadap dinamika sistem secara langsung.

Melihat keterbatasan tersebut, pendekatan kontrol adaptif menjadi pilihan yang lebih relevan karena mampu mengubah parameter pengendalian secara otomatis sesuai kondisi proses. Di antara berbagai metode adaptif, Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) dipilih karena bekerja dengan memaksa keluaran sistem mengikuti model referensi yang telah ditentukan, sehingga lebih terstruktur dan tidak terlalu bergantung pada akurasi model plant. MRAC juga mampu menyesuaikan parameter secara terus-menerus berdasarkan *error*, sehingga cocok untuk STH yang memiliki dinamika berubah akibat variasi beban termal dan kondisi pengadukan. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada perancangan pengendali MRAC menggunakan MATLAB/*Simulink* untuk menghasilkan sistem yang lebih adaptif, responsif, dan stabil terhadap perubahan proses maupun gangguan eksternal.

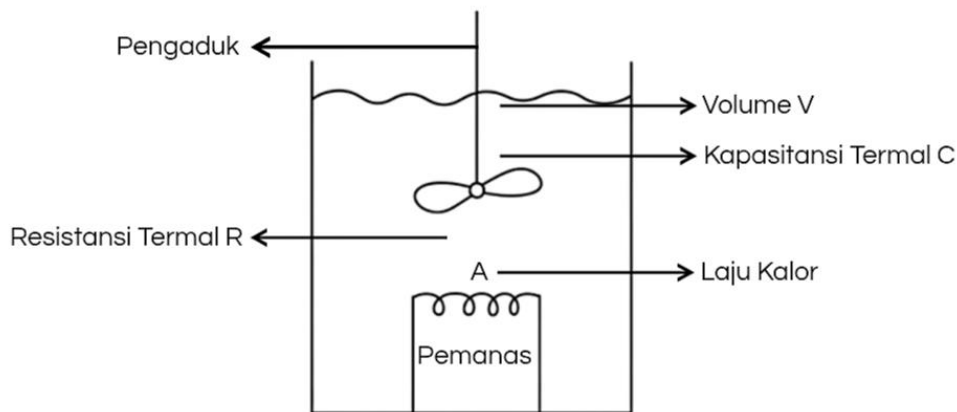
Berdasarkan penelitian sebelumnya, belum ditemukan penerapan MRAC pada sistem STH yang mempertimbangkan perubahan parameter dan gangguan seperti variasi beban panas serta noise. Penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah tersebut melalui perancangan dan simulasi pengendali MRAC yang mampu menjaga kestabilan suhu pada kondisi proses yang berubah-ubah.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Stirrer Tank Heater (STH)

Stirrer Tank Heater (STH) adalah suatu tangki yang berfungsi sebagai wadah pemanas fluida proses dengan dilengkapi pengaduk dan komponen pemanas. Proses pemanasan pada alat ini diperlukan untuk mendapatkan serta menjaga suhu fluida sesuai dengan yang diinginkan. Pengaduk berperan penting dalam mempercepat sekaligus meratakan proses pemanasan, dan untuk komponen pemanasnya berupa koil. STH banyak digunakan dalam berbagai proses kimia, salah satunya pada pembuatan biodiesel. Proses pada STH adalah fluida yang ada dalam tangki kemudian diaduk dan dipanaskan secara bersamaan. Fluida proses yang ada di dalam tangki menerima panas dari fluida pemanas yang berada di dalam koil. Suhu fluida dalam tangki dapat berubah yang disebabkan oleh perubahan laju kalor atau suhu masuk fluida pemanas. Oleh karena itu pada STH diperlukan pengendali suhu untuk menjaga suhu operasi sesuai yang diinginkan [2].

STH ini diperlakukan sebagai sistem *batch*, yaitu tanpa aliran massa masuk maupun keluar [11]. Dengan asumsi ini, jumlah fluida di dalam tangki dianggap tetap, sehingga perubahan suhu sepenuhnya dipengaruhi oleh panas dari elemen pemanas dan panas yang hilang ke lingkungan. Asumsi *batch* ini dipilih untuk menyederhanakan proses pemanasan ke dalam bentuk model termal orde satu, sehingga hubungan antara panas masuk dan perubahan suhu dapat dianalisis secara lebih jelas. Dalam model ini, dinamika suhu ditentukan oleh laju perpindahan panas masuk dan panas hilang [26], serta sifat termal fluida seperti kapasitas termal dan resistansi termal yang menggambarkan kemampuan fluida menyimpan dan melepaskan energi panas. Efek ketidakpastian akibat perubahan kondisi nyata tetap dipertimbangkan melalui gangguan atau *noise* termal pada laju panas keluar, sehingga perilaku sistem fisik tetap terwakili dalam model yang lebih sederhana.



Gambar 2.1 Skema STH

Gambar 2.1 menunjukkan skema sistem STH yang digunakan dalam penelitian ini. Sistem terdiri dari sebuah tangki berisi fluida dengan volume V yang dipanaskan menggunakan elemen pemanas dan dilengkapi dengan pengaduk untuk memastikan fluida tercampur secara merata. Daya pemanas yang diberikan ke sistem dinyatakan sebagai masukan A , yang berfungsi sebagai sumber energi panas untuk menaikkan suhu fluida di dalam tangki. Akibat proses pemanasan, suhu fluida di dalam tangki meningkat dan dinyatakan sebagai keluaran total sistem dengan Bo .

Selama proses pemanasan berlangsung, tidak seluruh energi panas yang diberikan tersimpan di dalam fluida, melainkan sebagian berpindah ke lingkungan sekitar melalui dinding tangki akibat adanya perbedaan suhu antara fluida dan lingkungan. Perpindahan panas ini dimodelkan sebagai laju panas ke lingkungan A_0 dan dipengaruhi oleh resistansi termal sistem R , yang merepresentasikan hambatan perpindahan panas dari fluida ke lingkungan. Kemampuan fluida dalam menyimpan energi panas dinyatakan oleh kapasitas termal sistem C , yang bergantung pada massa fluida dan kalor jenisnya.

2.2.2 Model Matematis Sistem STH

Pemodelan matematis sistem STH dilakukan untuk merepresentasikan hubungan antara masukan berupa daya pemanas dan keluaran berupa suhu fluida di dalam tangki. Pemodelan ini disusun berdasarkan hukum kekekalan energi [17], di mana energi panas yang diberikan oleh elemen pemanas akan diserap oleh fluida dan sebagian lainnya berpindah ke lingkungan sekitar akibat adanya perbedaan suhu antara fluida dan lingkungan. Dengan mengacu pada skema sistem pada Gambar 2.1, diasumsikan bahwa fluida di dalam tangki tercampur secara homogen akibat adanya pengaduk, kapasitas panas fluida dianggap konstan, serta proses pemanasan berlangsung dalam kondisi *steady*. Berdasarkan asumsi-asumsi tersebut, dinamika perubahan suhu fluida di dalam tangki dapat dimodelkan menggunakan pendekatan neraca energi sebagai dasar dalam penyusunan model matematis sistem STH.

Tabel 2.1 Parameter Sistem STH[27, 28]

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
<i>Volume</i>	V	1	m ³
Resistansi termal	R	0.000165	°C/W

Massa Fluida	M	1000	kg
Kalor jenis fluida	C_j	4.18	J/kg·°C
Kapasitansi termal	C	4.180000	J/°C

Tabel 2.1 menunjukkan parameter-parameter utama yang digunakan dalam pemodelan sistem STH, yaitu kapasitansi termal dan resistansi termal yang merepresentasikan karakteristik fisik proses pemanasan fluida di dalam tangki. Kapasitansi termal C menunjukkan kemampuan fluida dalam menyimpan energi panas sehingga mempengaruhi kecepatan perubahan suhu, sedangkan resistansi termal R menggambarkan hambatan perpindahan panas dari fluida ke lingkungan. Nilai parameter yang digunakan dipilih untuk merepresentasikan perilaku dinamis sistem STH secara realistis dalam simulasi.

Kapasitansi termal sistem didefinisikan sebagai hasil perkalian antara massa fluida dan kalor jenisnya, yang dinyatakan dengan:

$$C = MC_j \quad (2.1)$$

di mana M adalah massa fluida dan C_j adalah kalor jenis fluida. Besarnya nilai C menunjukkan kemampuan fluida dalam menyimpan energi panas. Dan Resistansi termal sistem didefinisikan sebagai hambatan perpindahan panas dari fluida ke lingkungan dan dinyatakan sebagai:

$$R = \frac{B_o}{A_o} = \frac{1}{GC_j} \quad (2.2)$$

Resistansi termal ini menggambarkan seberapa besar panas yang dapat dilepaskan ke lingkungan akibat perbedaan suhu. Semakin kecil nilai R , semakin besar laju perpindahan panas keluar dari sistem. Berdasarkan hukum kekekalan energi, selisih antara panas yang masuk ke sistem dan panas yang keluar ke lingkungan akan menyebabkan perubahan energi panas yang tersimpan di dalam fluida. Hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$C \frac{B_o}{dt} = A_i - A_o \quad (2.3)$$

di mana A_i adalah panas yang masuk ke sistem dan A_o adalah panas yang keluar ke lingkungan. Panas yang keluar dimodelkan sebanding dengan suhu fluida dan resistansi termal sistem, sehingga dapat dituliskan sebagai:

$$A_o = \frac{B_o}{R} \quad (2.4)$$

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.

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.4) ke Persamaan (2.3), diperoleh:

$$C \frac{dB_o}{dt} = A_i - \frac{B_o}{R} \quad (2.5)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa perubahan suhu sistem dipengaruhi oleh masukan panas A dan panas yang hilang ke lingkungan. Dengan mengalikan kedua ruas Persamaan (2.5) dengan R , diperoleh bentuk standar sistem orde satu sebagai berikut:

$$RC \frac{dB_o}{dt} + B_o = RA_i \quad (2.6)$$

Selanjutnya, Persamaan (2.6) ditransformasikan ke dalam domain Laplace dengan asumsi kondisi awal nol, sehingga diperoleh:

$$RCsB_o(s) + B_o(s) = RA_i(s) \quad (2.7)$$

Dari persamaan tersebut, fungsi alih sistem STH dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{B_o(s)}{A_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \quad (2.8)$$

Fungsi alih ini menunjukkan bahwa sistem STH merupakan sistem orde satu, dengan konstanta waktu sebesar $\tau = RC$. Nilai konstanta waktu yang besar menunjukkan bahwa sistem memiliki respon yang lambat, sesuai dengan karakteristik fisik sistem pemanas fluida. Bentuk lain dari Persamaan (2.7) dapat dituliskan kembali sebagai bentuk state space dari persamaan diferensial ini adalah :

$$RC \frac{dB_o(s)}{dt} + B_o(s) = RA_i(s) \quad (2.9)$$

Dengan membagi kedua ruas Persamaan (2.9) dengan RC , diperoleh:

$$\frac{dB_o(s)}{dt} = -\frac{1}{RC} B_o(s) + \frac{1}{C} A_i(s) \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) menunjukkan bentuk standar sistem dinamis orde satu yang siap direpresentasikan dalam bentuk state space. Dengan mendefinisikan variabel keadaan sebagai $x = B_o$ dan masukan sistem sebagai $u(t) = A_i(t)$, maka model state space sistem dapat dituliskan sebagai:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.11)$$

$$y = Cx(t) + Du(t) \quad (2.12)$$

dengan matriks parameter sistem sebagai berikut:

$$A = \left[-\frac{1}{RC} \right], B = \left[\frac{1}{C} \right], C = [1], D = [0] \quad (2.13)$$

Representasi ruang keadaan digunakan untuk menggambarkan dinamika sistem STH dalam bentuk matriks keadaan dan matriks masukan, sehingga model dapat digunakan secara umum dalam analisis sistem dinamis. Model matematis sistem STH menunjukkan bahwa dinamika suhu bersifat lambat akibat adanya inersia termal yang besar pada fluida dan tangki. Secara fisik, kondisi ini mengindikasikan bahwa respon alami sistem terhadap perubahan suhu bersifat lambat akibat energi panas yang masuk terlebih dahulu diserap oleh fluida dan material tangki, sehingga tanpa strategi pengendalian yang tepat. Oleh karena itu, tanpa pengendali yang sesuai, penambahan daya pemanas yang besar tidak diikuti oleh kenaikan suhu yang cepat.

Karakteristik tersebut dapat diamati dari perilaku sistem pada kondisi tanpa pengendali, di mana peningkatan daya pemanas pada tangki M_j dalam kisaran belasan ribu hingga ratusan ribu satuan daya tidak langsung diikuti oleh kenaikan suhu yang sebanding, sehingga respon suhu sistem tetap berlangsung secara lambat. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem STH memiliki respon alami yang lambat dan sulit mencapai suhu referensi secara cepat tanpa bantuan pengendali. Kondisi ini menunjukkan perlunya strategi pengendalian yang mampu mengatur besarnya daya pemanas secara adaptif agar energi panas dapat dimanfaatkan secara efektif sesuai dengan kondisi sistem dan keterbatasan fisiknya [14].

2.3 Pengendalian Sistem

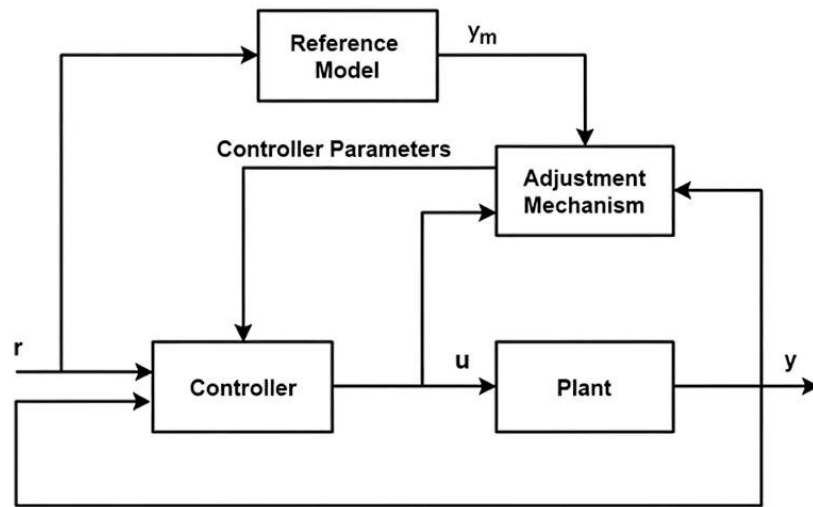
2.3.1 Model Reference Adaptive Control (MRAC)

Model Reference Adaptive Control (MRAC) adalah metode pengendalian adaptif yang dirancang untuk memastikan respons *output* sistem (*plant*) mengikuti perilaku dari model referensi yang telah ditentukan. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya beroperasi tanpa perlu mengetahui secara lengkap atau pasti parameter *plant*, karena MRAC secara dinamis menyesuaikan parameter kontroler secara *real-time* [29]. Dengan pendekatan ini, sistem mampu mempertahankan kestabilan dan performa yang baik, bahkan saat terjadi perubahan parameter, ketidakpastian model, atau gangguan eksternal.

Dalam penelitian ini, MRAC diterapkan untuk mengendalikan suhu pada STH sistem orde satu dengan respons lambat yang sangat sensitif terhadap fluktuasi daya pemanas dan suhu lingkungan [30]. Dengan MRAC, respons *plant* dikendalikan agar mengikuti model referensi yang lebih cepat dan stabil, sehingga suhu cairan dalam tangki dapat dipertahankan

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.

pada nilai *setpoint* yang diinginkan secara akurat. Blok diagram dari skema MRAC ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.2. Blok Diagram MRAC

Sistem MRAC bekerja dengan menggunakan model referensi sebagai acuan respons ideal. Model ini menerima input dari sinyal *setpoint* r dan menghasilkan keluaran referensi y_m . Sementara itu, keluaran nyata dari *plant* (suhu cairan dalam tangki) diukur dan dibandingkan dengan y_m sehingga diperoleh *signal error* $e = y_m - y$. *Error* ini digunakan oleh *adaptive law* untuk menyesuaikan parameter pengendali secara *real-time*. Dengan cara ini, parameter kontroler terus diperbarui agar *error* semakin kecil dan respon *plant* dapat mengikuti model referensi. Hasil penyesuaian parameter tersebut membentuk sinyal kontrol u yang dikirimkan kembali ke *plant*.

2.3.2 MIT Rule

MIT Rule merupakan salah satu metode adaptasi yang digunakan dalam MRAC yang bertujuan untuk meminimalkan *error* antara keluaran *plant* aktual y dengan keluaran model referensi y_m . Prinsip utama dari metode ini adalah memperbarui parameter pengendali, yang dilambangkan dengan θ , secara adaptif berdasarkan gradien dari fungsi kerugian (*loss function*), sehingga sistem dapat beradaptasi terhadap ketidakpastian dan perubahan dinamis *plant* [21]. Fungsi kerugian didefinisikan sebagai:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.14)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Dengan $e = y - y_m$ merupakan selisih antara keluaran sistem dan keluaran model referensi. Untuk meminimalkan nilai J , perubahan parameter θ dilakukan searah dengan gradien negatif dari fungsi kerugian, yang dinyatakan dengan:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.15)$$

Persamaan tersebut dikenal sebagai aturan MIT (MIT Rule). Turunan parsial $\frac{d\theta}{dt}$ disebut sebagai turunan kepekaan (*sensitivity derivative*), yang menggambarkan sejauh mana *error* pada sistem dipengaruhi oleh parameter yang dapat disesuaikan (*adjustable parameters*). Apabila diasumsikan bahwa perubahan parameter berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan perubahan variabel lain dalam sistem, maka nilai $\frac{d\theta}{dt}$ dianggap konstan.

Untuk penggunaan dua gain nilai *error* didefinisikan sebagai berikut :

$$e = y - y_m = \theta_1 r + \theta_2 y - y_m \quad (2.16)$$

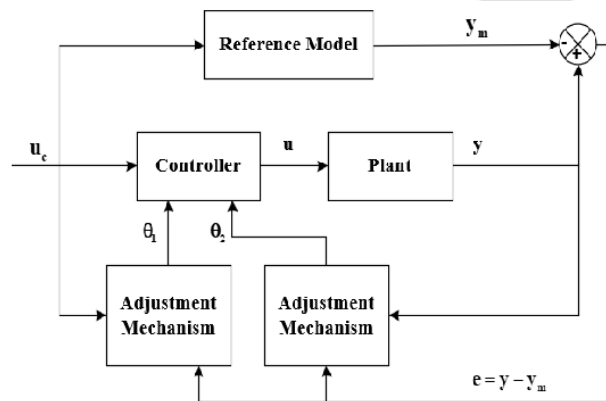
Turunan kepekaan terhadap masing-masing parameter diberikan oleh:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_1} = r, \quad \frac{\partial e}{\partial \theta_2} = y \quad (2.17)$$

Sehingga hukum adaptasi MIT *Rule* untuk dua parameter gain dituliskan sebagai:

$$\dot{\theta}_1 = -\gamma_1 e r, \quad \dot{\theta}_2 = -\gamma_2 e y \quad (2.18)$$

Berdasarkan persamaan (2.19), hubungan antara model referensi, plant, dan mekanisme adaptasi dapat digambarkan pada blok diagram MRAC dengan metode MIT *Rule* seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.3 Skema MRAC dengan Metode MIT *Rule*

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 2.3 menunjukkan skema MRAC dengan metode MIT Rule, di mana keluaran *plant* diupayakan mengikuti keluaran model referensi melalui penyesuaian parameter pengendali secara adaptif. Proses adaptasi didasarkan pada *sinyal error* antara keluaran *plant* dan model referensi, yang digunakan untuk memperbarui parameter pengendali berdasarkan gradien *error*. Meskipun memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan, metode MIT Rule memiliki keterbatasan berupa sensitivitas terhadap pemilihan gain adaptasi dan amplitudo sinyal masukan, di mana gain yang terlalu besar dapat menyebabkan osilasi, sedangkan amplitudo sinyal yang kecil dapat memperlambat proses adaptasi.

Karena respon sistem pada penelitian ini merupakan sistem orde satu, maka model referensi yang digunakan juga dibentuk berdasarkan karakteristik sistem orde satu agar sesuai dengan perilaku *plant* yang dikendalikan. Model referensi tersebut dinyatakan dengan persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\dot{y}_m + a_m y_m = b_m r \quad (2.19)$$

di mana y_m merupakan keluaran model referensi, r adalah sinyal referensi (*setpoint*), sedangkan a_m dan b_m masing-masing merupakan parameter konstanta waktu dan penguatan dari model referensi. Dengan menerapkan transformasi *Laplace* dan mengasumsikan kondisi awal nol, maka persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$(s + a_m) Y_m(s) = b_m R(s) \quad (2.20)$$

Sehingga diperoleh fungsi alih model referensi sebagai berikut:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{b_m}{s + a_m} \quad (2.21)$$

Fungsi alih $G_m(s)$ ini merepresentasikan respon ideal yang diharapkan dari sistem, di mana nilai a_m berperan dalam menentukan kecepatan respon (konstanta waktu), sedangkan b_m menentukan penguatan *steady-state* dari model. Parameter tersebut dipilih sedemikian rupa agar respon model referensi lebih cepat dan stabil dibandingkan respon *plant*, sehingga keluaran sistem dapat mengikuti perilaku model referensi dengan akurasi yang lebih baik.

2.3.3 Penentuan Model Referensi pada MRAC

Pada MRAC, model referensi merupakan elemen utama yang merepresentasikan perilaku dinamis ideal yang ingin dicapai oleh sistem kendali. Penentuan model referensi pada MRAC tidak bertujuan untuk meniru karakteristik fisik sistem secara langsung, tetapi

ditetapkan berdasarkan target performansi yang diinginkan, seperti kecepatan respon, kestabilan, dan kemampuan tracking terhadap *setpoint*. Model referensi menjadi acuan yang harus diikuti oleh sistem melalui mekanisme adaptasi untuk mencapai performansi yang lebih baik daripada sistem *open-loop* [31, 32].

Meskipun model referensi ditentukan berdasarkan performansi, keterkaitan dengan sistem fisik tetap penting dan terlihat melalui sinyal kendali adaptif u . Jika model referensi terlalu agresif, mekanisme adaptasi akan menghasilkan sinyal kendali yang besar untuk memaksa *plant* mengikuti respon ideal tersebut. Pada aplikasi nyata, kondisi seperti itu berpotensi melebihi batas kemampuan aktuator, sehingga menghasilkan sinyal kendali yang tidak realistis dan tidak dapat direalisasikan secara fisik [32], [33]. Dalam konteks sistem STH, sinyal kendali u secara fisik merepresentasikan daya pemanas yang diberikan ke fluida dalam tangki. Secara prinsip termodinamika, percepatan kenaikan suhu hanya dapat dicapai dengan peningkatan suplai energi panas. Oleh karena itu, model referensi yang menuntut respon suhu lebih cepat secara langsung akan menuntut daya pemanas yang lebih besar juga. Oleh sebab itu, pemilihan model referensi MRAC harus mempertimbangkan keseimbangan antara performansi yang diinginkan dan keterbatasan fisik sistem agar sinyal kendali yang dihasilkan tetap realistis dan dapat memicu respon sistem secara stabil [33].

2.4 Performansi Sistem Kendali

Performansi sistem kendali merupakan ukuran untuk menilai kualitas respon sistem terhadap masukan yang diberikan, khususnya masukan tangga (*step input*). Evaluasi performansi dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merespons perubahan masukan, mencapai kondisi stabil, serta mengikuti nilai referensi dengan tingkat ketelitian yang diharapkan. Penilaian performansi 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 [34].

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, serta memiliki tingkat ketelitian yang tinggi [34, 35]. 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.

2.4.1 Delay Time (T_d)

Delay time (T_d) adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai sekitar 50% dari nilai keadaan tunaknya pertama kali. Parameter ini menggambarkan kecepatan awal sistem merespons masukan. Nilai T_d yang kecil menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon awal dengan cepat terhadap perubahan masukan yang diberikan [35].

2.4.2 Rise Time (T_r)

Rise time (T_r) merupakan waktu yang diperlukan respon sistem untuk naik dari kondisi awal menuju nilai tertentu dari keadaan tunak. Secara umum, *rise time* didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai sekitar 90% hingga 95% dari nilai keadaan tunak. Parameter ini digunakan untuk menilai kecepatan sistem dalam mendekati nilai referensi.

2.4.3 Settling Time (T_s)

Settling time (T_s) 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 tunak. Parameter T_s menunjukkan kemampuan sistem dalam mencapai kondisi stabil setelah adanya perubahan masukan.

2.4.4 Error Steady-State (E_{ss})

Error steady-state (E_{ss}) 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 E_{ss} yang kecil menunjukkan bahwa sistem memiliki akurasi yang baik pada kondisi tunak.

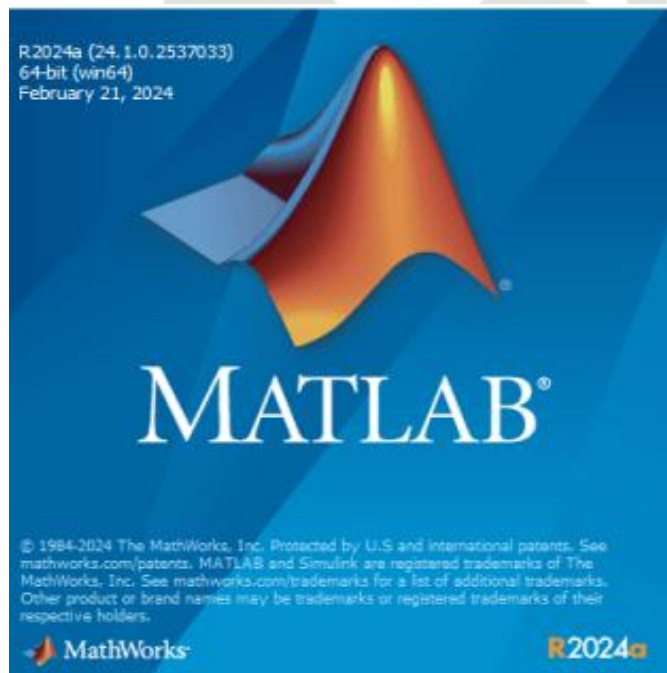
2.4.5 Overshoot

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[35].

2.5 Matlab

MATLAB (*Matrix Laboratory*) merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dikembangkan untuk mendukung komputasi numerik, analisis matematis, dan pemodelan sistem secara efisien. Perangkat lunak ini banyak digunakan di bidang teknik, sains, dan industri karena memiliki kemampuan utama dalam mengolah data berbasis matriks, menyelesaikan perhitungan kompleks, serta melakukan simulasi sistem dengan cepat. MATLAB juga dilengkapi dengan berbagai *toolbox* khusus seperti kontrol sistem, pemrosesan sinyal, komunikasi, dan *machine learning*, yang memudahkan peneliti maupun praktisi dalam menyesuaikan kebutuhan aplikasi. Keunggulan lain yang dimiliki MATLAB adalah sifatnya yang interaktif, dukungan visualisasi data yang baik, serta integrasi dengan Simulink yang memungkinkan pemodelan sistem secara grafis berbasis blok diagram. Dengan fleksibilitas tersebut, MATLAB tidak hanya digunakan sebagai alat bantu akademik, tetapi juga menjadi standar industri dalam pengembangan sistem kendali, analisis data, dan simulasi proses yang membutuhkan ketelitian serta kecepatan perhitungan tinggi [20].



Gambar 2.4 Matlab R2024a

MATLAB banyak digunakan di bidang teknik, sains, dan industri karena memiliki kemampuan utama dalam mengolah data berbasis matriks, menyelesaikan perhitungan matematis kompleks, serta melakukan simulasi sistem dengan cepat. Keunggulan lain yang dimiliki MATLAB adalah sifatnya yang interaktif, sehingga memudahkan pengguna dalam menulis perintah, melihat hasil, dan melakukan perbaikan secara langsung [36].

Gambar 2.4 menunjukkan tampilan logo matlab R2024a. Matlab, yang dikembangkan oleh MathWorks Inc, memungkinkan pengguna untuk menggabungkan pemrograman, komputasi, dan visualisasi dalam lingkungan kerja yang mudah digunakan. Di dunia pendidikan, matlab sering digunakan sebagai media pembelajaran untuk mata pelajaran matematika, teknik, dan ilmu pengetahuan, baik di tingkat dasar maupun lanjutan. Sementara itu, di sektor industri, matlab menjadi pilihan yang populer untuk melakukan penelitian, pengembangan, dan analisis produk industri [37].

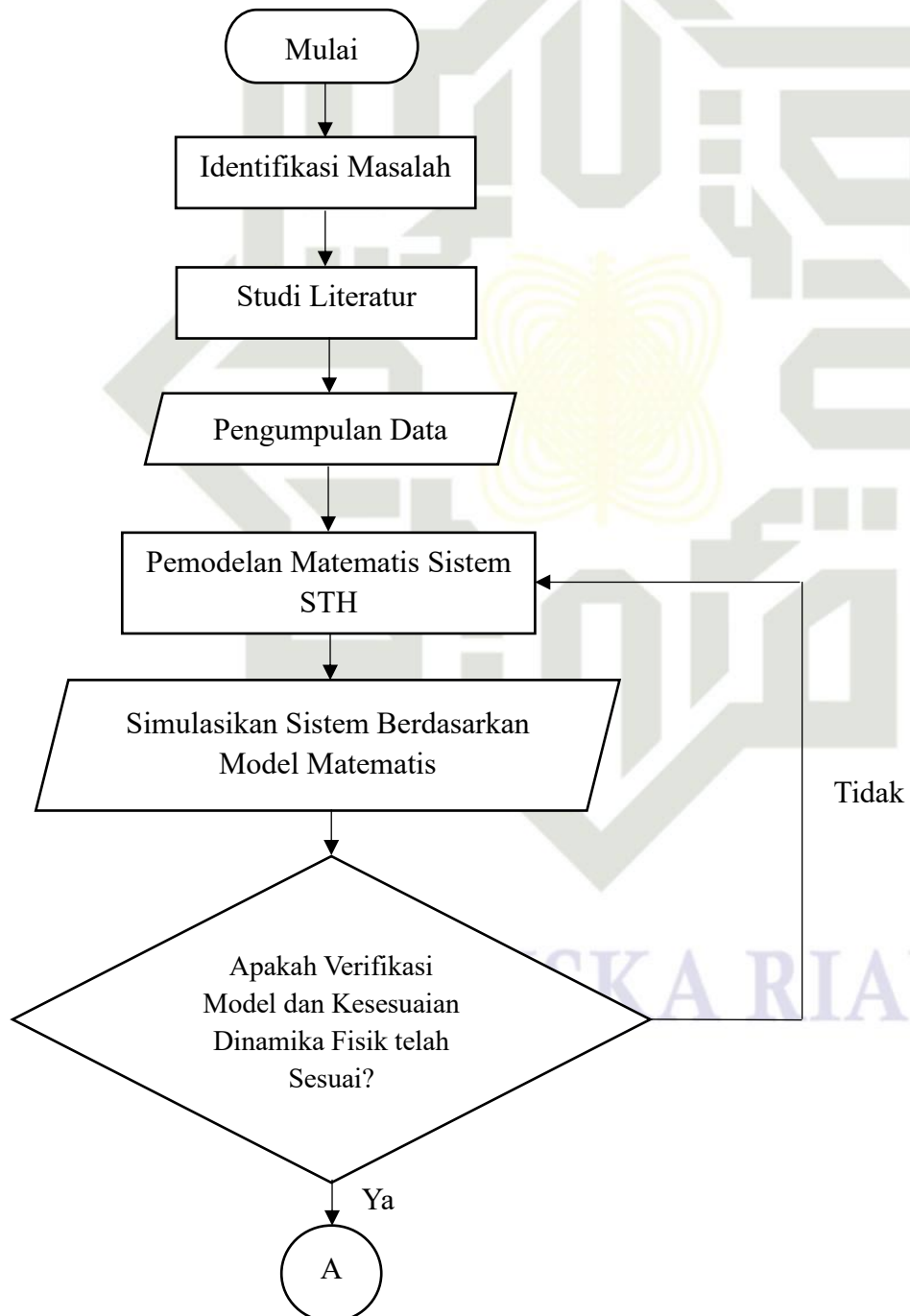
Pada Matlab sendiri terdapat beberapa bagian penting yang digunakan dalam menjalankan program, yaitu:

1. *Command window* digunakan untuk mengetikkan fungsi yang diinginkan.
2. *Command history* berfungsi yang telas digunakan sebelumnya dapat kembali.
3. *Workspace* digunakan untuk membuat variabel yang ada dalam Matlab [38].

UIN SUSKA RIAU

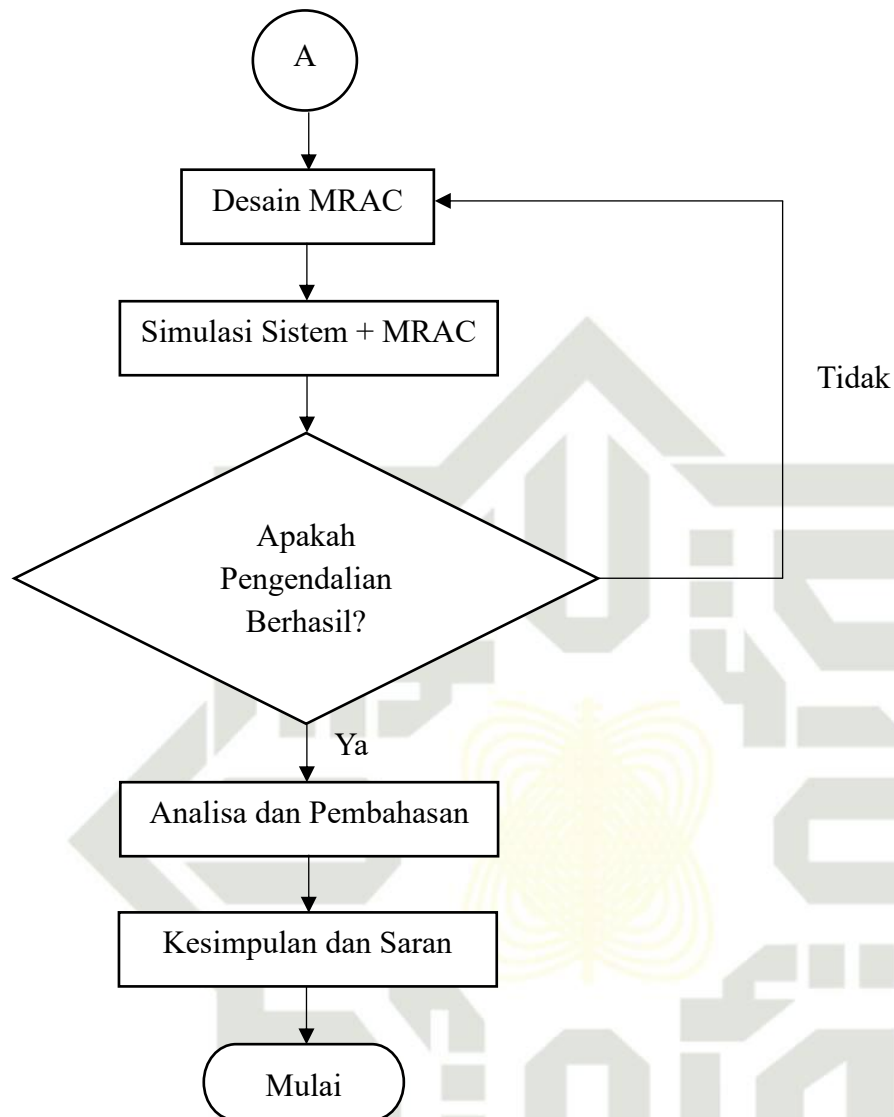
3.1 Prosedur Alur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang tersusun secara sistematis, mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perumusan tujuan, hingga pemodelan dan perancangan sistem. Seluruh rangkaian langkah penelitian tersebut dapat digambarkan melalui *flowchart* berikut :



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



Gambar 3.1 *Flowchart* Diagram Alur Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Berdasarkan alur penelitian pada *flowchart* di atas, langkah-langkah yang ditempuh dalam penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Penelitian ini diawali dengan pengenalan dan perumusan masalah pada sistem STH. Permasalahan yang muncul adalah kesulitan menjaga kestabilan suhu ketika terjadi perubahan beban, gangguan eksternal, maupun ketidakpastian parameter sistem. Pengendali konvensional seperti PID sering kali tidak mampu beradaptasi dengan kondisi dinamis

tersebut sehingga performa sistem menjadi menurun. Untuk itu, diperlukan metode kendali yang lebih responsif dan mampu menyesuaikan diri, salah satunya adalah MRAC.

2. Studi Literatur

Studi ini bertujuan mengumpulkan berbagai referensi dari penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan pengendalian suhu pada sistem termal, khususnya *Stirrer Tank Heater* (STH). Kajian difokuskan pada metode kendali yang telah banyak digunakan, seperti PID, *Fuzzy Logic Control* (FLC), *Model Predictive Control* (MPC), dan MRAC. Dari hasil telaah tersebut diperoleh gambaran mengenai kelebihan dan kelemahan masing-masing metode, sekaligus alasan mengapa MRAC dipilih sebagai pendekatan yang paling sesuai untuk penelitian ini.

3. Pengumpulan Data

Setelah permasalahan dan metode terpilih, dilakukan pengumpulan data mengenai karakteristik fisik dan dinamik sistem STH. Data ini digunakan untuk membentuk model matematis orde rendah yang dapat merepresentasikan perilaku sistem. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan prinsip perpindahan panas dan dinamika termal. Model matematis yang diperoleh akan dijadikan dasar dalam perancangan simulasi dan pengendali.

4. Pemodelan Matematis Sistem STH

Melakukan penurunan model matematis pada sistem STH adalah langkah selanjutnya dalam penelitian ini. Kemudian data parameter yang sudah dikumpulkan disubstitusikan ke dalam model matematis untuk dilakukan pengujian menggunakan *software* MATLAB. Dimulai dari persamaan (2.1) hingga persamaan (2.16) pada Bab II diperoleh model matematis sistem STH. Model matematis diturunkan berdasarkan hukum kekekalan energi pada persamaan (2.1). Selanjutnya pada persamaan (2.7) hingga (2.9) diperoleh persamaan diferensial yang menyatakan perubahan suhu output $b_o(t)$ terhadap masukan pemanasan kalori $A_i(t)$. Dengan menyusun ulang diperoleh bentuk standar persamaan diferensial pada persamaan (2.10).

Persamaan diferensial tersebut kemudian ditransformasikan ke dalam *domain* Laplace sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2.11), sehingga diperoleh fungsi alih sistem pada persamaan (2.12):

$$\frac{B_o(s)}{A_i(s)} = \frac{R}{RC_s + 1} \quad (3.1)$$

Selain itu, persamaan diferensial pada (2.10) juga dapat dituliskan ke dalam bentuk *state*

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.

Dengan menggunakan rumus umum pada persamaan (2.13), diperoleh representasi *state space* sistem sebagai berikut:

$$A = \left[-\frac{1}{RC} \right], B = \left[\frac{1}{C} \right], C = [1], D = [0] \quad (3.2)$$

Selanjutnya, dilakukan substitusi nilai parameter pada Tabel (2.1). Diketahui massa fluida $M = 1000$ kg, kalor jenis fluida $C_j = 4.18$ J/kg·°C, sehingga diperoleh kapasitas termal:

$$C = MC_j = 1000 \times 4180 = 4180000 \text{ J / } ^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

Resistansi termal diketahui $R = 0.000165$ K/W. Dengan demikian konstanta waktu sistem adalah:

$$\tau = RC = 0.000165 \times 4180000 = 690.7 \text{ s} \quad (3.4)$$

dan penguatan statis sistem:

$$K = R = 0.000165 \quad (3.5)$$

Maka fungsi alih sistem dengan parameter aktual menjadi:

$$\frac{B_o(s)}{A_i(s)} = \frac{0.000165}{689.7s + 1} \quad (3.6)$$

Sementara itu, bentuk *state space* dengan nilai parameter adalah:

$$A = \left[-\frac{1}{RC} \right] = \left[-1.4499 \times 10^{-3} \right], B = \left[\frac{1}{C} \right] = \left[2.3923 \times 10^{-7} \right], C = [1], D = [0] \quad (3.7)$$

Dengan demikian, diperoleh model matematis sistem STH dalam bentuk fungsi alih dan *state space*. Model ini menjadi dasar dalam perancangan simulasi dan pengendali MRAC pada tahap penelitian berikutnya.

5. Pengujian Sistem STH

Tahap pengujian sistem dilakukan setelah model matematis STH berhasil diturunkan dan direpresentasikan dalam bentuk fungsi alih. Fungsi alih tersebut menjadi dasar untuk mengetahui bagaimana respon dinamik sistem ketika diberikan masukan tertentu tanpa adanya aksi pengendali. Simulasi dilaksanakan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink R2024a dengan interval waktu sampling sebesar 0,1 detik. Pada tahap ini sistem diuji dalam kondisi *open loop*, sehingga respon yang dihasilkan murni berasal dari

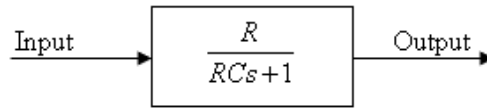
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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

karakteristik internal STH. Dengan cara ini dapat diamati apakah sistem berada pada kondisi stabil, sekaligus dianalisis parameter respon transiennya seperti waktu naik, waktu tunak, serta bentuk kurva keluaran terhadap masukan. Blok diagram *open loop* dari sistem STH yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada gambar berikut:

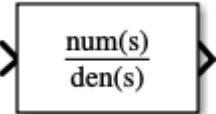


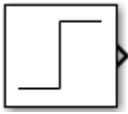
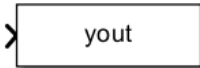
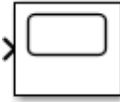
Gambar 3.2 Blok Diagram *Open Loop* Sistem STH

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa respon keluaran sistem telah sesuai dengan karakteristik yang diperoleh dari pemodelan matematis. Proses pengujian dilakukan berdasarkan fungsi alih system STH dengan parameter yang telah ditentukan pada Tabel 2.1. Simulasi sistem dalam kondisi *open loop* disusun menggunakan blok-blok pada lingkungan MATLAB/*Simulink*, sehingga dapat diamati respon alami *plant* sebelum diberikan pengendali.

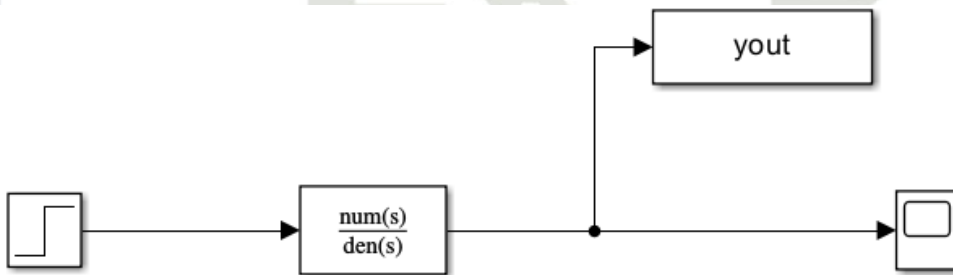
Berdasarkan Gambar 3.2, rangkaian simulasi sistem STH dalam kondisi *open loop* dapat disusun menggunakan blok-blok *Simulink* pada MATLAB sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Blok *Simulink*

Nama	Blok Simulink	Keterangan
Transfer Function		Blok <i>Transfer Function</i> digunakan untuk merepresentasikan model matematis sistem dalam bentuk fungsi alih pada <i>Domain Laplace</i> . Blok ini menerima sinyal <i>input</i> kemudian menghasilkan <i>output</i> sesuai dengan persamaan fungsi alih yang ditentukan oleh pembilang (numerator) dan penyebut (denominator). <i>Transfer Function</i> berfungsi untuk menggambarkan perilaku dinamik sistem linear berdasarkan parameter yang telah ditetapkan.

Step		Blok <i>Step</i> adalah salah satu jenis blok sinyal yang digunakan untuk menyediakan sinyal tangga atau langkah ke dalam model <i>simulink</i> . menghasilkan sinyal yang berubah dari nilai awal ke nilai yang ditentukan pada waktu tertentu, dan tetap pada nilai tersebut setelahnya
To Workspace		Digunakan untuk menyimpan hasil simulasi ataupun analisis sistem kedalam <i>workspace</i> matlab yang berupa variabel, struktur data atau respon sistem yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut.
Scope		Digunakan untuk tampilan sinyal <i>input</i> sehubungan dengan waktu simulasi yang dilakukan.

Berdasarkan Gambar 3.2 dapat dibuat rangkaian simulink sistem STH secara *open loop* berdasarkan Tabel 3.1 diatas dengan menggunakan blok *simulink* pada matlab dibawah ini.



Gambar 3.3 Blok *Simulink Open Loop* Sistem STH

Langkah-langkah simulasi *open loop* pada rangkaian Gambar 3.3 dapat dijelaskan melalui algoritma yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Algoritma Pemrograman Sistem STH Secara *Open Loop*

Algoritma 1 : Sistem STH dalam Mode Loop Terbuka
Langkah-Langkah Inisialisasi: Tentukan parameter waktu simulasi: waktu mulai, waktu sampling, dan waktu akhir.

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.

Masukkan parameter fisik sistem sesuai dengan Tabel 2.1 (massa fluida, kalor jenis, resistansi termal, kapasitas termal, laju alir, dan densitas).
Definisikan model matematis sistem berdasarkan persamaan diferensial (2.10) atau fungsi alih pada persamaan (2.12).
Tetapkan kondisi awal suhu sistem pada keadaan tunak (output awal = 0).
Bangun model <i>Simulink open loop</i> sesuai blok diagram Gambar 3.2 dengan menggunakan blok <i>Transfer Function</i> , <i>Step</i> , <i>Scope</i> , dan <i>To Workspace</i> .
Jalankan simulasi <i>open loop</i> untuk memperoleh respon sistem terhadap masukan tangga (<i>step input</i>).
Simpan hasil simulasi ke <i>workspace</i> MATLAB untuk dianalisis lebih lanjut.
Buat <i>plot</i> respon suhu keluaran terhadap waktu untuk mengamati karakteristik transien sistem (waktu naik, waktu tunak, dan kestabilan).
End

6. Desain Perancangan Pengendali MRAC dengan Metode *MIT Rule*

Untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sistem STH, diperlukan model matematis yang menggambarkan hubungan antara laju pemanasan kalor yang diberikan oleh elemen pemanas terhadap perubahan suhu fluida di dalam tangki. Model ini menjadi dasar dalam perancangan sistem pengendali adaptif MRAC.

Prinsip dasarnya adalah hukum kekekalan energi, di mana energi panas yang masuk ke dalam sistem sebagian akan diserap oleh fluida dan sebagian lagi hilang ke lingkungan. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan dengan persamaan diferensial linear orde satu berikut:

$$RC \frac{dB_o(t)}{dt} + B_o(t) = RA_i(t) \quad (3.8)$$

Persamaan (3.1) menunjukkan bahwa perubahan suhu di dalam tangki dipengaruhi oleh nilai tahanan termal dan kapasitas panas sistem. Untuk menyederhanakan, didefinisikan beberapa variabel baru sebagai berikut:

$$y(t) = B_o(t), \quad u(t) = A_i(t), \quad \tau = RC, \quad K=R$$

di mana $y(t)$ adalah suhu keluaran sistem dan $u(t)$ merupakan sinyal masukan yang berasal dari daya pemanas yang dikendalikan secara elektrik untuk mengatur jumlah energi panas

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.

yang masuk ke fluida. Dengan kata lain, $u(t)$ berperan sebagai variabel kendali yang menentukan besar kecilnya pemanasan pada sistem.

Dengan menggantikan definisi di atas ke dalam Persamaan (3.8), diperoleh:

$$\tau \dot{y}(t) + y(t) = Ku(t) \quad (3.9)$$

Transformasi Laplace dengan asumsi kondisi awal nol memberikan:

$$(\tau s + 1)Y(s) = KU(s) \quad (3.10)$$

Sehingga fungsi alih plant dapat dituliskan sebagai:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.11)$$

Dengan mensubstitusikan nilai parameter yang digunakan pada sistem, diperoleh fungsi alih plant dalam bentuk numerik sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{0.000165}{689.7s + 1} \quad (3.12)$$

Setelah itu, sebagai acuan perilaku sistem yang diinginkan, digunakan model referensi dengan karakteristik orde satu yang ideal. Model referensi ini merepresentasikan respon suhu yang diharapkan terhadap perubahan sinyal referensi yang diambil dari persamaan 2.22 dituliskan sebagai:

$$G_m(s) = \frac{b_m}{s + a_m} \quad (3.13)$$

Dengan parameter model yang telah ditetapkan, perancangan model referensi pada penelitian ini dilakukan menggunakan dua pendekatan, yaitu pendekatan yang logis secara fisik dan pendekatan yang ditentukan berdasarkan target performansi. Kedua pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa perancangan pengendali MRAC tidak hanya mempertimbangkan karakteristik termal sistem STH tetapi juga mampu menghasilkan performansi respon yang lebih baik sesuai dengan tujuan pengendalian.

a. Pendekatan model referensi yang logis secara fisik

Model referensi pertama ditentukan berdasarkan logika fisik sistem termal STH. Model ini disusun dengan mempertimbangkan bahwa dinamika suhu sistem bersifat lambat akibat adanya inersia termal pada fluida dan tangki. Oleh karena itu, konstanta waktu model ditetapkan sebesar 350 s dengan penguatan statis sebesar 0,004, sehingga model referensi pertama dinyatakan sebagai :

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.

$$G_m(s) = \frac{0.004}{350s + 1} \quad (3.14)$$

Model ini merepresentasikan respon sistem yang realistis secara fisik dan mencerminkan dinamika termal alami tanpa tuntutan percepatan respon yang tinggi. Namun demikian, model referensi yang sepenuhnya mengikuti karakteristik fisik sistem belum mampu mencerminkan performansi respon yang diinginkan dalam sistem kendali adaptif MRAC. Hal ini disebabkan karena model referensi pada MRAC tidak dimaksudkan untuk meniru *plant* secara langsung, melainkan untuk merepresentasikan perilaku dinamis ideal yang ingin dicapai oleh sistem. Jika penguatan model referensi terlalu kecil karena mengikuti nilai fisik sistem, maka respon keluaran model referensi menjadi lambat dan beramplitudo rendah, sehingga mekanisme adaptasi tidak mampu mendorong sistem untuk menghasilkan respon yang lebih cepat dan signifikan.

b. Pendekatan model referensi berdasarkan target performansi

Oleh karena itu, dirancang model referensi kedua yang ditentukan berdasarkan target performansi sistem kendali. Model ini bertujuan untuk merepresentasikan respon suhu yang lebih cepat dan stabil dibandingkan respon alami sistem, tanpa terikat langsung pada nilai penguatan statis sistem fisik. Model referensi kedua dirumuskan dengan konstanta waktu yang sama, namun dengan gain sebesar 1, sehingga dinyatakan sebagai :

$$G_m(s) = \frac{1}{350s + 1} \quad (3.15)$$

Dengan adanya dua model referensi tersebut, perancangan MRAC pada sistem STH dapat menjembatani perbedaan antara keterbatasan fisik sistem dan target performansi pengendalian. Model referensi pertama digunakan untuk menunjukkan batasan respon sistem secara termal, sedangkan model referensi kedua digunakan sebagai acuan performansi yang diinginkan sesuai teori MRAC yang telah dijelaskan pada Bab II. Melalui mekanisme adaptasi, sistem kendali mampu menyesuaikan besarnya sinyal kendali secara dinamis sehingga respon suhu dapat ditingkatkan secara signifikan tanpa mengabaikan keterbatasan fisik sistem.

Penentuan konstanta waktu model referensi sebesar 350 s didasarkan pada kebutuhan percepatan respons sistem agar mencapai *setpoint* 30 °C secara lebih cepat namun tetap realistis. Hasil pengujian *open-loop* menunjukkan bahwa sistem STH memiliki respon alami

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

yang lambat, yang mencerminkan dinamika termal yang besar akibat volume fluida yang besar serta adanya isolasi termal pada tangki. Oleh karena itu, model referensi dengan konstanta waktu 350 s dipilih sebagai target respons yang lebih cepat namun masih stabil berdasarkan hasil simulasi. Gain model referensi ditetapkan sebesar gain = 1 agar model referensi merepresentasikan perilaku dinamis yang diinginkan untuk mencapai *setpoint* secara langsung tanpa peredaman amplitudo, sehingga mekanisme adaptasi MRAC terdorong menghasilkan respon sistem yang aktif menuju *setpoint*. Melalui mekanisme adaptasi tersebut, daya pemanas ditingkatkan secara adaptif pada fase awal pemanasan untuk mempercepat kenaikan suhu, kemudian diturunkan secara bertahap saat mendekati *setpoint* guna menjaga kestabilan, dengan tetap berada dalam batas fisik sistem karena daya maksimum tangki mencapai 150 kW [39].

Untuk memastikan keluaran plant dapat mengikuti keluaran model referensi, digunakan struktur pengendali adaptif yang memiliki bentuk linear terhadap sinyal referensi dan keluaran sistem, yaitu:

$$u(t) = \theta_1(t)r(t) + \theta_2(t)y(t) \quad (3.16)$$

Selisih antara keluaran plant dan model referensi didefinisikan sebagai sinyal *error* pelacakan:

$$e(t) = y(t) - y_m(t) \quad (3.17)$$

Sinyal *error* ini digunakan untuk memperbarui parameter adaptif dengan prinsip *MIT Rule*, di mana fungsi biayanya didefinisikan sebagai:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (3.18)$$

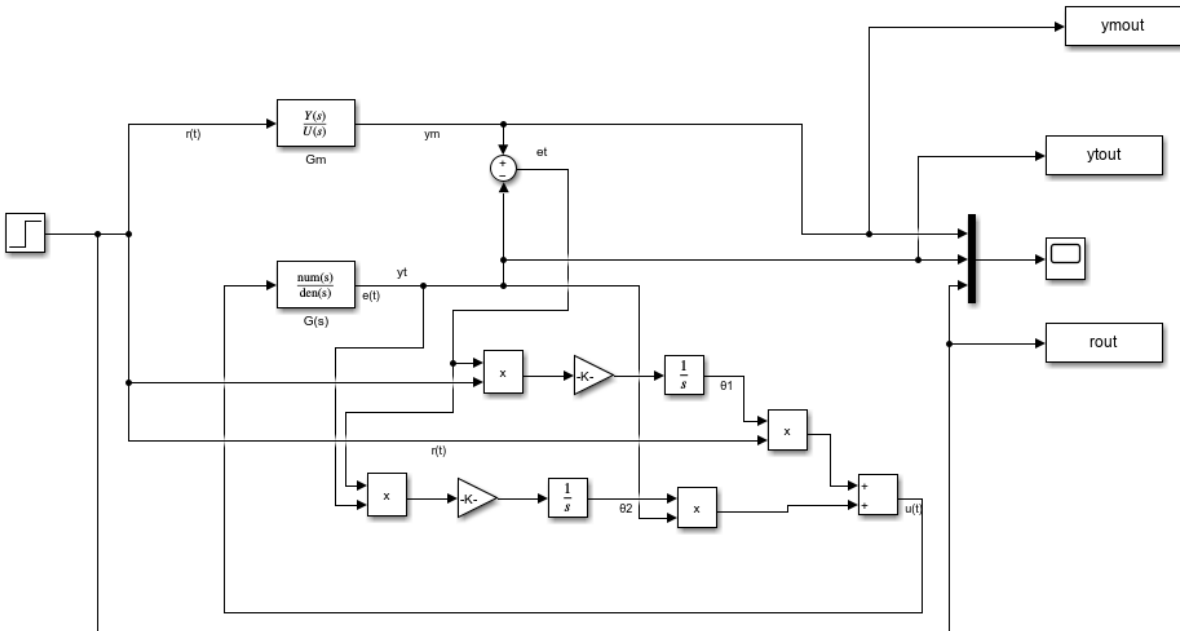
Berdasarkan metode gradien, hukum adaptasi parameter dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{d\theta_1(t)}{dt} = -\gamma e(t)r(t) \quad (3.19)$$

$$\frac{d\theta_2(t)}{dt} = -\gamma e(t)y(t) \quad (3.20)$$

Pada penelitian ini digunakan dua nilai gamma (γ_1 dan γ_2) yang memiliki fungsi berbeda. Gamma pertama (γ_1) mengatur kecepatan adaptasi agar keluaran plant cepat mengikuti model referensi, sedangkan gamma kedua (γ_2) berfungsi menjaga stabilitas agar perubahan parameter tidak menimbulkan osilasi. Nilai gamma dibuat berbeda karena setiap parameter adaptif memiliki sensitivitas yang tidak sama terhadap *error*, sehingga membutuhkan kecepatan adaptasi yang berbeda pula.

Persamaan diatas menjadi dasar dari representasi matematis plant yang digunakan dalam perancangan MRAC. Hubungan lengkap antara plant, model referensi, sinyal kontrol, serta mekanisme adaptasi ditunjukkan pada gambar simulink MRAC berikut.



Gambar 3.4 Desain *Simulink* MRAC

Tabel 3.3 Algoritma Pemrograman Sistem STH dengan MRAC

Algoritma 2 : Sistem STH dengan MRAC

Langkah-Langkah Inisialisasi:

1. Tentukan parameter waktu simulasi: waktu mulai, waktu sampling, dan waktu akhir.
- Masukkan parameter fisik sistem STH sesuai dengan Tabel 2.1 (massa fluida, kalor jenis, resistansi termal, kapasitas termal, laju alir, dan densitas).
- Definisikan fungsi alih *plant* STH sesuai persamaan (2.19), serta fungsi alih model referensi sesuai persamaan (2.21).
- Tetapkan kondisi awal sistem serta parameter adaptasi awal (θ_1, θ_2) pada nilai nol.
- Bangun model *Simulink* MRAC sesuai blok diagram pada Gambar 3.5 dengan menambahkan blok *plant*, model referensi, *error*, hukum adaptasi MIT *Rule*, serta pembentuk sinyal kontrol.
- Jalankan simulasi MRAC untuk mengamati respon sistem terhadap masukan tangga (*step input*).

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

Simpan hasil simulasi ke *workspace* MATLAB untuk dianalisis lebih lanjut dengan nama variabel “data_mrac”.

Buat plot untuk menampilkan perbandingan keluaran sistem dengan model referensi, sinyal *error*, serta parameter adaptasi.

End

7. Analisa Hasil

Setelah perancangan dan simulasi yang dilakukan, tahap ini menganalisis hasil pengujian dan membandingkan hasilnya dengan tujuan yang diharapkan.

8. Kesimpulan

Setelah seluruh tahapan dilakukan dan hasil simulasi menunjukkan bahwa perancangan pengendali MRAC pada sistem STH dapat bekerja sesuai dengan model referensi, maka dapat ditarik kesimpulan untuk menguatkan gagasan ini dan dijadikan acuan bagi penelitian selanjutnya.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pemodelan, dan simulasi pengendalian suhu pada sistem *Stirrer Tank Heater* (STH) menggunakan metode *Model Reference Adaptive Control* (MRAC), dapat disimpulkan bahwa pengendali MRAC mampu bekerja secara efektif dalam mengendalikan suhu sehingga keluaran sistem dapat dicapai dan dipertahankan sesuai dengan nilai referensi dan model referensi yang ditetapkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa MRAC mampu menjaga kestabilan sistem serta mempertahankan kemampuan tracking yang baik, baik pada kondisi operasi normal, saat terjadi perubahan *setpoint*, maupun ketika sistem diberikan gangguan pada sinyal keluaran serta gangguan berupa *noise*. Meskipun gangguan dan perubahan *setpoint* menyebabkan deviasi sementara pada respons transien, seperti perlambatan respon akibat karakteristik termal dan inersia panas pada STH, mekanisme adaptasi MRAC mampu menyesuaikan parameter kendali secara bertahap untuk mengoreksi pengaruh tersebut. Hal ini ditunjukkan dengan kemampuan sistem dalam kembali mengikuti nilai referensi dan menekan *error steady-state* hingga mendekati nol pada kondisi tunak akhir. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk menganalisis dan mengendalikan suhu sistem STH menggunakan MRAC agar suhu dapat mengikuti dan mempertahankan nilai referensi telah tercapai, dengan tetap mempertimbangkan keterbatasan yang berasal dari dinamika fisik dan inersia termal proses pemanasan.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar pengendali MRAC diuji pada sistem STH secara fisik agar kinerjanya dapat dibandingkan dengan kondisi nyata. Selain itu, mekanisme adaptasi perlu dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap gangguan mendadak dan *noise*, mengingat STH tidak memiliki sistem pendinginan sehingga suhu tidak boleh melampaui *setpoint* secara berlebihan. Penambahan filter sinyal, pembatasan laju adaptasi, serta komparasi dengan pengendali lain seperti PID adaptif atau pengendali robust dapat dipertimbangkan guna memperoleh respon yang lebih stabil dan sesuai dengan karakteristik termal STH.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. O. Ginting, "Optimalisasi Pengelolaan Suhu dalam Proses Inbound Produk Farmasi di Cold Storage untuk Meminimalkan Risiko Ekskursi Suhu: Dampak Ekskursi Suhu pada Kualitas Produk Farmasi," *IdeaLogist Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 137-151, 2024.
- [2] A. Wahid, I. G. E. P. Putra, F. F. Adicandra, A. P. Prasetyo, and Y. Wiranoto, "Pemodelan Dinamik Dan Pengendalian Proses Stirred Tank Heater Menggunakan Sistem Dinamik," *Sinergi*, vol. 21, no. 2, pp. 83-90, 2017.
- [3] G. Awuah, H. S. Ramaswamy, and A. Economides, "Thermal processing and quality: Principles and overview," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 46, no. 6, pp. 584-602, 2007.
- [4] Y. A. Septiati and M. Karmini, *Bioplastik Berbasis Pati Kulit Singkong: Karakteristik Dan Kemampuan Melindungi Makanan*. Penerbit NEM, 2023.
- [5] E. S. Ariyanti and A. Mulyono, "Otomatisasi Pengukuran koefisien viskositas zat cair menggunakan gelombang ultrasonik," *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 2010.
- [6] R. K. Sebayang, O. Zebua, and N. Soedjarwanto, "Perancangan Sistem Pengaturan Suhu Kandang Ayam Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 4, no. 3, 2016.
- [7] B. Dhiya'Ushofa, L. Anifah, and E. Endryansyah, "Sistem Kendali Kecepatan Putaran Motor DC pada Conveyor dengan Metode Kontrol PID," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 332-342, 2022.
- [8] E. P. Hastuti, M. Subekti, S. Dibyo, and M. D. Isnaini, "Optimasi Desain Termohidrolika Teras Dan Sistem Pendingin Reaktor Riset Inovatif Daya Tinggi," *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, vol. 17, no. 3, pp. 127-140, 2015.
- [9] H. Hermono, "Perancangan Prototipe Sistem Kestabilan Kapal Untuk Perawatan Anjungan Offshore Dengan Metode Pid Zieger Nichols," Universitas Islam Sultan Agung, 2022.
- [10] X. Shi, H. Zhao, and Z. Fan, "Parameter optimization of nonlinear PID controller using RBF neural network for continuous stirred tank reactor," *Measurement and Control*, vol. 56, no. 9-10, pp. 1835-1843, 2023.

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.

- [11] N. I. Septiani, I. Bayusari, T. Haiyunnisa, and B. Y. Suprpto, "Optimization of PID control parameters with genetic algorithm plus fuzzy logic in stirred tank heater temperature control process," in *2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, 2017: IEEE, pp. 61-66.
- [12] K. A. Danapalasingam, "Robust fuzzy logic stabilization with disturbance elimination," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, no. 1, p. 171597, 2014.
- [13] L. Ibarra and C. Webb, "Advantages of Fuzzy Control While Dealing with Complex/Unknown Model Dynamics: A Quadcopter," *New Applications of Artificial Intelligence*, p. 93, 2016.
- [14] A. R. Ridwan, I. I. Azad, and M. I. S. Bony, "A simulink modeling to develop a control system of stirred tank heater with multifarious operating conditions," *International Journal of Computer Applications*, vol. 57, no. 21, 2012.
- [15] M. H. Arrosyid, B. Rahmat, and H. E. Wahanani, "Model Predictive Control (MPC) pada Sistem Kendali Suhu ITCLAB dan Pemantauannya menggunakan Internet of Things (IOT)," *Jusifor: Jurnal Sistem Informasi dan Informatika*, vol. 3, no. 1, pp. 1-9, 2024.
- [16] M. H. Pratama, N. Busaeri, And A. Andang, "Analisis Sensitivitas Time Sampling Terhadap Karakteristik Pensaklaran Active Power Filter Terhubung Jaringan Menggunakan Model Predictive Control," *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, Vol. 13, No. 3, 2025.
- [17] Q. Zhang, L. Wang, W. Xu, H. Su, and L. Xie, "Nonlinear sparse variational Bayesian learning based model predictive control with application to PEMFC temperature control," *Control Engineering Practice*, vol. 148, p. 105952, 2024.
- [18] S. Vega, M. Vasquez-Guevara, and O. Camacho, "A Comparison of Adaptive PID, Adaptive Dual-PID and Adaptive Fractional PID Controllers for a Nonlinear System with Variable Parameters A Comparison of Adaptive PID, Adaptive Dual-PID and Adaptive Fractional PID Controllers for a Nonlinear System with V," *Res. Publ. Connect*, vol. 1, pp. 166-177, 2024.
- [19] M. Elloumi and S. Kamoun, "Design of self-tuning regulator for large-scale interconnected Hammerstein systems," *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2016, no. 1, p. 6769714, 2016.
- [20] M. Tanaskovic, L. Fagiano, and V. Gligorovski, "Adaptive model predictive control for linear time varying MIMO systems," *Automatica*, vol. 105, pp. 237-245, 2019.

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.

- [21] S. A. E. M. S. Aji, E. Mahendra, and B. F. Hidayatulail, "Analisis Model Reference Adaptive Control (MRAC) dengan MIT Rule pada Suhu Mesin Sealer," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 11, no. 2, pp. 464-472, 2024.
- [22] Y. P. Yuda, "Analisa Pengaruh PID Pada Pengendali Mrac dengan Penambahan Nilai Gamma Pada Sistem Pendingin Jamur Merang Untuk Mengendalikan Temperatur," universitas islam negeri sultan syarif kasim riau, 2019.
- [23] A. A. Saputri, "Perancangan Sistem Pengendalian Level Berbasis Model Reference Adaptive Control (Mrac) Pada Kolom Distilasi," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [24] A. Budiyanto, "Perbandingan Metode PID, MPC, dan LQR pada Sistem Pemanas Air Bottle Washer Berbasis Matlab," 2020.
- [25] S. M. Andriami *Et Al.*, "Pemodelan Sistem Ifoc Kendali Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Neuro Fuzzy Controller," *Jurnal Pendidikan Teknik Elektro Undiksha*, Vol. 14, No. 1, Pp. 110-125, 2025.
- [26] A. W. S. Putra, G. Putra, and D. M. M. Noor, "Sistem Dinamik Model Perubahan Suhu Di Media Terisolasi Pada Termos Air Panas," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi "SainTek"*, 2024, vol. 1, no. 2, pp. 57-66.
- [27] M. D. Surindra, "Analisis Perbandingan Respon Transfer Function Stirrer Tank Heater dengan Variasi Fluida Menggunakan Matlab Simulink," *Rekayasa*, vol. 16, no. 1, pp. 25-31, 2021.
- [28] M. D. Surindra, "Studi Analisis Sistem Fisik Thermal Dengan Pemodelan Stirrer Tank Heater Menggunakan Simulink Matlab," *Eksergi Jurnal Teknik Energi*, pp. 57-66, 2021.
- [29] S. Al Farizi and W. Wahyudi, "Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontroler PID Adaptif Berbasis Model Reference Adaptive Control (MRAC)," *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 185-195, 2024.
- [30] D. I. Lestari, "Perancangan Dan Uji Kinerja Sistem Pengendalian Temperatur Pada Microferm Fermentor," Politeknik Negeri Sriwijaya, 2018.
- [31] A. Amron, M. H. A. Jalil, R. Hamdan, N. S. Salehin, and R. Ngadengon, "Comparative Study of Model Reference Adaptive Control (MRAC) and PID Controller for Regulation Temperature of Steam Distillation System," *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 621-628, 2021.

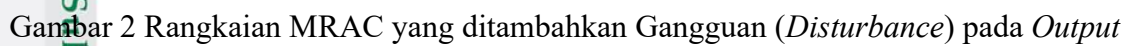
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

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.

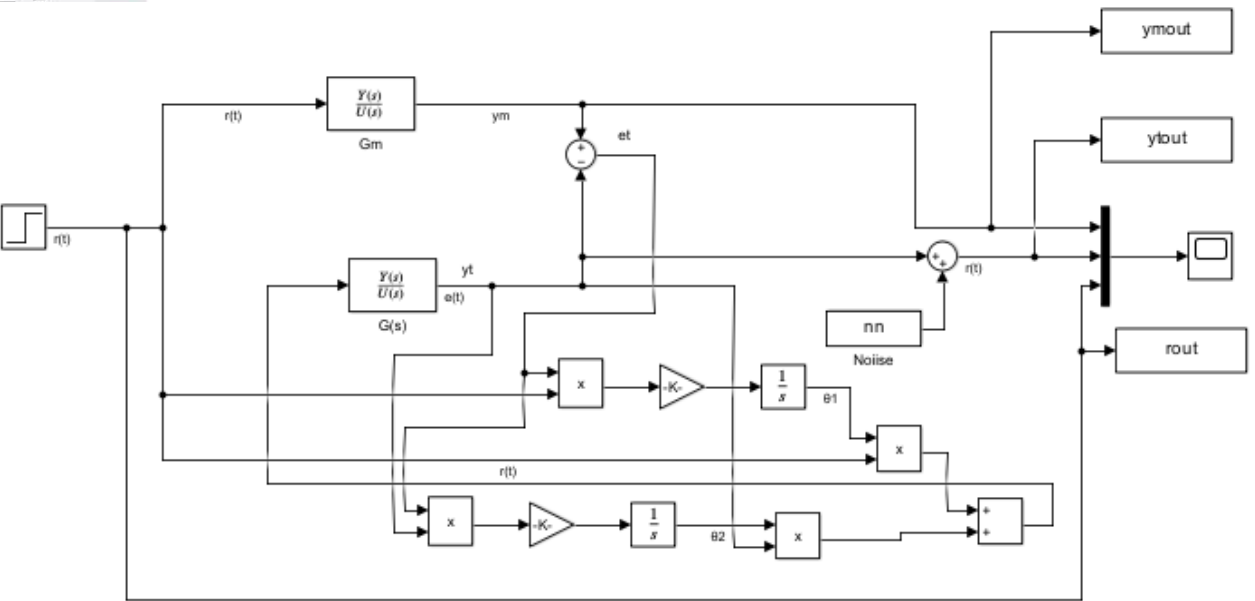
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- [32] M. A. Mufhaddhal, E. Susanto, and M. R. Rosa, "Model Reference Adaptive Control of a DC Motor Speed with Encoder using Hardware in the Loop," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 14, no. 2.
- [33] S. Selvaraj and R. Thiyagarajan, "A Model Reference Adaptive Controller based Flamingo Search Algorithm for Liquid Level Control in Non-Linear Conical Tank System," *Measurement Science Review*, vol. 25, no. 3, pp. 100-109, 2025.
- [34] A. Al, F. Usmanto, A. Premadi, A. Effendi, and A. Bachtiar, "Optimalisasi Sistem Kendali Hexacopter," *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, vol. 3, no. 2, pp. 160-172, 2025.
- [35] 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.
- [36] A. Tjolleng, *Pengantar Pemrograman Matlab*. Elex Media Komputindo, 2017.
- [37] N. Kurnia Apriyanti, "Performansi Estimasi Kecepatan Sistem Motor Direct Current Menggunakan Luenberger Observer," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
- [38] Y. Yudhi Fariztian, "Performansi Luenberger Observer dalam Mengestimasi Konsentrasi pada Continuoius Stirred Tank Reactor (CSTR)," UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU, 2024.
- [39] Y. Mats. "Central Water Heater Capacity 1000 Liter, Diameter 1000 mm Dimensions 2000×1220 mm | eau chauffage " You Mats.
<https://www.youmats.com/en/plumbing/water-heaters/central-water-heater-capacity-1000-liter-diameter-1000-mm-dimensions-20001220-mm-170/i>.
(accessed.

Sultan Syarif Kasim Riau



1.
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan penadaiikan, 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 Rangkaian MRAC yang ditambahkan Noise

ilis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Risky Kurniawan lahir di Perawang pada tanggal 21 Maret 2004, penulis anak ketiga dari enam bersaudara dari pasangan Mufti Ahmad dan Pera Wati. Penulis berdomisili di Kabupaten Kampar, Provinsi Riau, dengan alamat Dusun III Kubu Cubadak, Desa Simpang Petai, Kecamatan Rumbio Jaya. Pendidikan penulis dimulai dari TK YPPI Perawang yang diselesaikan pada tahun 2010, kemudian dilanjutkan ke SD Negeri 009 Simpang Petai hingga lulus pada tahun 2016. Lalu, Pendidikan menengah

pertama ditempuh di SMP Negeri 1 Rumbio Jaya dan diselesaikan pada tahun 2019, selanjutnya penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Kampar Timur pada tahun 2022. Setelah menyelesaikan pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau pada tahun 2022, dengan mengambil konsentrasi Elektronika Instrumentasi dan menyelesaikan masa studi pada tahun 2025. Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan akademik dan pernah terlibat dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATE).

Dengan ketekunan dan motivasi yang tinggi serta semangat untuk terus belajar, penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir ini dan diharapkan mampu memberikan manfaat serta kontribusi bagi pihak-pihak yang membutuhkan. Akhir kata, penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikannya Tugas Akhir yang berjudul **“Desain Pengendali Model *Reference Adaptive Control* (MRAC) untuk Pengendalian Suhu pada Sistem *Stirrer Tank Heater*.”**

No. HP : 085265679560

Email : rizkykurniawan78046@gmail.com

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.