

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 LEVEL PADA SISTEM
*STORAGE TANK***

TUGAS AKHIR

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



Oleh:

MUHAMMAD ZANDI
12250514228

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

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

2025

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGENDALI MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN LEVEL PADA SISTEM STORAGE TANK

TUGAS AKHIR

Oleh:

MUHAMMAD ZANDI
12250514228

sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro di Pekanbaru, Pada Tanggal Desember 2025

telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro di Pekanbaru, Pada Tanggal 24 Desember 2025.

Ketua

Pembimbing

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Pembimbing

Dr. H. Liliyati, S.T., M.Eng
NIP: 19781002200312 2 004

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

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

LEMBAR PENGESAHAN

PENGENDALI MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL
(MRAC) UNTUK PENGENDALIAN LEVEL PADA SISTEM
STORAGE TANK

TUGAS AKHIR

Oleh:

MUHAMMAD ZANDI
12250514228

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 24 Desember 2025

Pekanbaru, 24 Desember 2025

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro

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

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

Dewan Penguji :

Ketua : Ir. Oktaf Brilliant Kharisma, S.T., M.T

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

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

Anggota II : Hilman Zarory, 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.

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Zandi
NIM : 12250514228
Tempat/Tgl. Lahir : Koto Alam, 30 Mei 2002
Fakultas : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Artikel :

DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN LEVEL PADA SISTEM *STORAGE TANK*

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, 24 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Zandi
NIM. 12250514228

DESAIN PENGENDALI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN LEVEL PADA SISTEM *STORAGE TANK*

MUHAMMAD ZANDI

NIM.12250514228

Tanggal Sidang : 24 Desember 2025

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl.Soebrantas No.155 Pekanbaru

ABSTRAK

Storage tank merupakan komponen penting dalam proses industri yang berfungsi untuk menyimpan fluida dan menjaga kestabilan level cairan di dalamnya. Ketidakpastian pada output level cairan yang dihasilkan oleh tangki sering menyebabkan perubahan tinggi permukaan cairan yang tidak dapat diprediksi secara linier, sehingga berpotensi menimbulkan kondisi *overflow* maupun *dry*. Kondisi ini memerlukan sistem pengendalian yang mampu beradaptasi terhadap perubahan dinamika sistem agar level cairan tetap stabil. Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini merancang pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) dengan metode MIT Rule untuk mengendalikan level pada *storage tank* secara adaptif. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan prinsip keseimbangan massa, kemudian dilinearisasi dan direpresentasikan dalam bentuk *state-space* sebagai dasar desain kontrol. Pengujian dilakukan melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink dengan berbagai skenario, termasuk perubahan *setpoint*, gangguan, dan penambahan *noise*. Hasil simulasi menunjukkan MRAC mampu membuat keluaran mengikuti model referensi dengan stabil, memiliki *overshoot* rendah, *error steady-state* mendekati nol, serta respon cepat dalam mengatasi ketidakpastian output pada sistem. Dengan demikian, MRAC dapat dipertimbangkan sebagai metode kendali yang efektif dan adaptif untuk pengendalian level pada *storage tank*.

Kata Kunci : *Model Reference Adaptive Control, Storage Tank, Pengendalian Level*

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.

MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) CONTROL DESIGN FOR LEVEL CONTROL IN STORAGE TANK SYSTEM

MUHAMMAD ZANDI

Number Student.12250514228

Session Date : December 24, 2025

Electrical Engineering Study Program

Faculty of Science and Technology

Sultan Syarif Kasim Riau State Islamic University

Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

Storage tanks are essential components in industrial processes that store fluids and maintain stable liquid levels. Uncertainty in the liquid level output produced by the tank often causes unpredictable changes in liquid surface height, potentially causing overflow or dry conditions. This condition requires a control system that is able to adapt to changes in system dynamics to maintain stable liquid levels. Based on this need, this study designs a Model Reference Adaptive Control (MRAC) controller with the MIT Rule method to adaptively control the level in a storage tank. System modeling is carried out using the principle of mass balance, then linearized and represented in state-space form as the basis for control design. Testing is carried out through simulations using MATLAB/Simulink with various scenarios, including setpoint changes, disturbances, and the addition of noise. The simulation results show that MRAC is able to make the output follow the reference model stably has low overshoot, near-zero steady-state error, and fast response in overcoming output uncertainty in the system. Thus, MRAC can be considered as an effective and adaptive control method for level control in storage tanks.

Keywords: *Model Reference Adaptive Control, Storage Tank, Level Control*

LEMBAR PERSEMBAHAN



Di setiap langkah yang tertatih, selalu ada doa yang menguatkan.

Di setiap lelah yang datang, selalu ada kasih sayang yang menjaga.

Karya ini lahir dari perjalanan panjang yang tidak selalu mudah, namun selalu ditemani oleh cinta yang tulus dan dukungan yang tidak pernah padam.

Dengan sepenuh hati, karya ini penulis persembahkan kepada:

Ayahanda Musliadi, S.Pd dan **Ibunda Liza Yunengsih, S.Pd**, yang telah menjadi rumah bagi segala keluh dan harap, serta menjadi alasan penulis untuk terus berjuang dan tidak menyerah.

Semoga setiap halaman dalam karya ini menjadi saksi atas doa, pengorbanan, dan cinta yang mengiringi setiap langkah penulis, serta menjadi wujud bakti dan terima kasih yang tak pernah cukup terucap.

“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Qs. Al-Baqarah/2:286)

“Kesuksesan dan Kebahagiaan terletak pada diri sendiri. Tetaplah berbahagia karena kebahagiaanmu dan kamu yang akan membentuk karakter kuat untuk melawan kesulitan”

(Hellen Keller)

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

(Baskara Putra - Hindia)

“Jika HIMATE !!! Berkaryalah!!!

(HIMATE UINSUSKA RIAU)

“Disaat kamu merasa berada di fase yang membuatmu terpuruk maka disitulah dirimu mulai terbentuk”

(Muhammad Zandi)

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum wr.wb

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Desain Pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) Untuk Pengendalian Level Pada Sistem *Storage Tank*” tepat pada waktunya.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak menerima bimbingan, arahan, serta dukungan dari berbagai pihak yang memiliki pengetahuan dan pengalaman luas di bidangnya. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, atas segala rahmat, petunjuk, dan kemudahan yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Ayahanda Musliadi, S.Pd dan Ibunda Liza Yunengsih, S.Pd, atas doa, kasih sayang, dukungan, serta pengorbanan yang tiada henti sehingga menjadi sumber semangat terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dr. Liliana, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
4. Bapak Aulia Ulah, S.T., M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
5. Ibu Dr. Dian Mursyitah, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, serta pikiran dalam memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi yang sangat berharga selama penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Hasdi Radiles, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan arahan dan dukungan selama masa perkuliahan dari awal hingga akhir studi.
7. Kepada diri penulis sendiri, atas keteguhan, kesabaran, dan semangat untuk terus berjuang hingga tahap akhir penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Rekan-rekan seperjuangan Konsentrasi Instrumentasi Angkatan 2022, serta seluruh teman-teman yang turut memberikan bantuan, semangat, dan kerja sama selama proses penelitian dan penulisan laporan 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.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan karya ini di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi tambahan pengetahuan dalam bidang sistem kontrol.

Wassalamu'alaikum wr.wb

Pekanbaru, 24 Desember 2025

Penulis

MUHAMMAD ZANDI

NIM. 12250514228

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
LEMBAR PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR RUMUS	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Penelitian	I-4
1.4 Batasan Masalah	I-4
1.5 Manfaat penelitian	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1. Penelitian Terkait	II-1
2.2. Landasan Teori	II-2
2.2.1 <i>Storage Tank</i>	II-2
2.2.2 Model Matematis Sistem <i>Storage Tank</i>	II-4
2.3 <i>Model Reference Adaptive Control (MRAC)</i>	II-9
2.3.1 MIT <i>RULE</i>	II-10
2.4 Respon Transien Sistem Orde I	II-12
2.6 Penentu Performansi Sistem	II-13

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.

2.7 Software Matlab	II-14
BAB III METODE PENELITIAN	III-1
3.1 Diagram Alur Penelitian	III-Error! Bookmark not defined.
3.2 Tahapan Penelitian	III-2
3.3 Desain MRAC	III-7
3.3.1 Model Matematis Sistem (<i>Plant</i>) <i>Storage Tank</i>	III-7
3.3.2 Model Referensi MRAC $G_m(s)$	III-9
3.3.3 Merumuskan Hukum Kendali	III-10
3.3.4 Aturan MIT RULE	III-11
3.4 Desain PID	III-16
BAB IV HASIL DAN ANALISA	IV-1
4.1 Analisa Sistem <i>Storage Tank</i> kondisi <i>Open Loop</i>	IV-1
4.2 Pengujian dan Analisa pengendalian level dalam mencapai <i>setpoint</i>	IV-3
4.3 Pengujian dan Analisa pengendalian level terhadap gangguan (<i>disturbance</i>)	IV-10
4.3.1 Pengujian dan Analisa pengendalian level terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada <i>setpoint</i>	IV-10
4.3.2 Pengujian dan Analisa pengendalian level terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada sinyal output	IV-14
4.4 Pengujian dan Analisa pengendalian level setelah ditambahkan <i>Noise</i>	IV-20
BAB V PENUTUP	V-1
5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran	V-1
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur <i>Storage Tank</i>	II-3
Gambar 2.2 Sistem <i>Storage Tank</i>	II-4
Gambar 2.3 Pipa Keluaran <i>Storage Tank</i>	II-6
Gambar 2.4 Blok Diagram MRAC	II-10
Gambar 2.5 Skema MRAC dengan metode MIT RULE	II-12
Gambar 2.6 Logo Matlab	II-15
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian	III-2
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem <i>Storage Tank Open Loop</i>	III-4
Gambar 3.3 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem <i>Storage Tank</i> Secara <i>Open Loop</i>	III-6
Gambar 3.4 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem <i>Storage Tank</i> dengan MRAC	III-15
Gambar 3.5 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem <i>Storage Tank</i> dengan pengendali PID	III-17
Gambar 4.1 Respon keluaran <i>storage tank</i> kondisi secara <i>open loop</i>	IV-2
Gambar 4.2 Respon keluaran <i>storage tank</i> dengan pengendali MRAC	IV-3
Gambar 4.3 Respon keluaran <i>storage tank</i> dengan pengendali PID	IV-6
Gambar 4.4 Respon keluaran MRAC terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada <i>setpoint</i> ...	IV-8
Gambar 4.5 Respon keluaran PID terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada <i>setpoint</i>	IV-9
Gambar 4.6 Respon keluaran MRAC terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada sinyal output	IV-11
Gambar 4.7 Respon keluaran PID terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada sinyal output	IV-12
Gambar 4.8 Respon keluaran MRAC terhadap <i>noise</i>	IV-14
Gambar 4.9 Respon keluaran PID terhadap <i>noise</i>	IV-15

DAFTAR RUMUS

2.1	Persamaan Keseimbangan <i>Volume</i> pada <i>Storage Tank</i>	II-5
2.2	Persamaan Perhitungan <i>Volume</i> Tangki Silinder	II-5
2.3	Persamaan Turunan <i>Volume</i> terhadap Waktu.....	II-5
2.4	Substitusi Persamaan <i>Volume</i> ke dalam Persamaan Keseimbangan Aliran	II-5
2.5	Persamaan Dinamika Ketinggian Permukaan Cairan	II-5
2.6	Penyederhanaan Laju Aliran Masuk dan Keluar Cairan	II-5
2.7	Persamaan Diferensial Perubahan Level Cairan	II-5
2.8	Persamaan Tekanan Fluida pada Saluran Keluaran Tangki	II-6
2.9	Persamaan Tekanan Hidrostatik Berdasarkan Ketinggian Cairan	II-7
2.10	Persamaan Substitusi Tekanan Hidrostatik ke Tekanan Pipa Keluaran	II-7
2.11	Persamaan Penentuan Tekanan Akhir pada Ujung Pipa Keluaran	II-7
2.12	Persamaan Penentuan Konstanta Aliran (Koefisien Debit)	II-7
2.13	Persamaan Laju Aliran Keluaran Berdasarkan Ketinggian Permukaan	II-7
2.14	Persamaan Diferensial Model Dinamika Sistem <i>Storage Tank</i>	II-7
2.15	Persamaan Aproksimasi Menggunakan Deret Taylor Orde Pertama	II-7
2.16	Persamaan Linearisasi Fungsi Nonlinear Sistem	II-8
2.17	Persamaan Turunan Fungsi Nonlinear terhadap Variabel Sistem	II-8
2.18	Persamaan Penyederhanaan Hasil Linearisasi Sistem	II-8
2.19	Persamaan Dinamika Sistem Setelah Proses Linearisasi	II-8
2.20	Persamaan Diferensial Akhir Sistem <i>Storage Tank</i>	II-8
2.21	Model Matematis Sistem dalam Keadaan (<i>State Space Model</i>)	II-8
2.22	Persamaan Model Ruang Keadaan Sistem <i>Storage Tank</i>	II-8
2.23	Persamaan <i>Tracking Error</i> antara Model Referensi dan <i>Plant</i>	II-11
2.24	Persamaan Fungsi Kriteria Adaptasi pada Sistem MRAC	II-11
2.25	Persamaan Fungsi Kinerja MIT <i>Rule</i>	II-11
2.26	Persamaan Hukum Adaptasi MIT <i>Rule</i> untuk Penyesuaian Parameter	II-11
2.27	Persamaan Adaptasi Parameter MRAC terhadap Sinyal Kesalahan	II-11
2.28	Persamaan <i>Time Delay</i>	II-12
2.29	Persamaan <i>Rise Time</i>	II-12
2.30	Persamaan <i>Settling Time</i>	II-13
2.31	Persamaan <i>Error Steady State</i>	II-13

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:	
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.	
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.	
2. Diarangi mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.	
3.1 Persamaan Ruang Keadaan Sistem <i>Storage Tank</i>	III-3
3.2 Persamaan Model <i>State Space</i> dengan Matriks A, B, C, dan D	III-3
3.3 Persamaan Konversi <i>State Space</i> menjadi Fungsi Alih	III-7
3.4 Persamaan Luas Penampang Tangki Berdasarkan Diameter	III-8
3.5 Persamaan Perhitungan Konstanta Aliran Keluaran	III-8
3.6 Persamaan Hubungan Laju Aliran Masuk terhadap Ketinggian Cairan	III-8
3.7 Persamaan Model Linear Sistem <i>Storage Tank</i>	III-8
3.8 Persamaan Model Linearisasi Sistem Orde Satu	III-8
3.9 Persamaan Penentuan Nilai Konstanta k dan b pada Model Linear	III-8
3.10 Persamaan Linearisasi Sistem dengan Substitusi Nilai Konstanta k dan b	III-9
3.11 Persamaan Penyederhanaan Model Diferensial Sistem	III-9
3.12 Persamaan <i>Transformasi Laplace</i> pada Sistem <i>Storage Tank</i>	III-9
3.13 Persamaan Fungsi Alih Sistem <i>Storage Tank</i>	III-9
3.14 Persamaan Fungsi Alih <i>Plant</i> Sistem Orde Satu	III-9
3.15 Persamaan Fungsi Alih Model Referensi pada MRAC	III-9
3.16 Persamaan Hubungan antara <i>Settling Time</i> dan Konstanta Waktu Sistem	III-10
3.17 Persamaan Perhitungan Nilai Konstanta Waktu Berdasarkan <i>Settling Time</i>	III-10
3.18 Persamaan Model Referensi Sistem Orde Satu	III-10
3.19 Persamaan Hukum Kendali MRAC (<i>Control Law Equation</i>)	III-10
3.20 Persamaan Fungsi Alih <i>Plant</i> Setelah Penerapan Kendali MRAC	III-11
3.21 Persamaan <i>Plant</i> Terkontrol dengan Parameter Adaptif	III-11
3.22 Persamaan Diferensiasi terhadap Parameter Adaptif	III-11
3.23 Persamaan Hukum Adaptasi Parameter MRAC terhadap Sinyal <i>Error</i>	III-11
3.24 Persamaan pengendali PID dalam domain waktu	III-16
3.25 Persamaan pengendali PID dalam domain Laplace	III-16

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Sistem <i>Storage Tank</i>	II-7
Tabel 3.1 Blok-Blok Simulink.....	III-4
Tabel 3.2 Algoritma Sistem <i>Storage Tank</i> Secara <i>Open Loop</i>	III-6
Tabel 3.3 Algoritma Sistem <i>Storage Tank</i> dengan pengendali MRAC	III-7
Tabel 3.1 Parameter PID hasil tuning.....	III-16
Tabel 4.1 Hasil Pengujian <i>storage tank</i> dengan pengendali MRAC.....	IV-4
Tabel 4.2 Hasil Pengujian <i>storage tank</i> dengan pengendali PID	IV-6
Tabel 4.3 Hasil Pengujian MRAC terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada <i>setpoint</i>	IV-9
Tabel 4.4 Hasil Pengujian PID terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada <i>setpoint</i>	IV-11
Tabel 4.5 Hasil Pengujian MRAC terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada output	IV-14
Tabel 4.6 Hasil Pengujian PID terhadap gangguan (<i>disturbance</i>) pada output.....	IV-16

DAFTAR SINGKATAN

MRAC	= <i>Model Reference Adaptive Control</i>
LQG	= <i>Linear Quadratic Gaussian</i>
FLC	= <i>Fuzzy Logic Controller</i>
PID	= <i>Proportional Integral Derivative</i>
MIT	= <i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MATLAB	= <i>Matrix Laboratory</i>
DC	= <i>Direct Current</i>
SISO	= <i>Single Input Single Output</i>
ESS	= <i>Error Steady-State</i>
SS	= <i>Steady-State</i>
T _s	= <i>Settling Time</i>
TF	= <i>Transfer Function</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tangki penyimpanan (*storage tank*) merupakan salah satu komponen penting dalam rekayasa proses yang digunakan pada skala kecil maupun industri besar. Aplikasinya banyak dijumpai pada berbagai sektor industri, terutama industri kimia seperti minyak dan gas, petrokimia, serta polimer. Secara umum, *storage tank* berperan sebagai wadah untuk menampung beragam cairan maupun bahan kimia sesuai kebutuhan operasional industri [1]. Proses penyimpanan cairan pada dunia industri dalam skala besar merupakan kebutuhan utama yang tidak dapat dihindari sehingga memerlukan *storage tank* sebagai media penyimpanan material baik berupa benda padat, cair maupun gas [2]. *Storage tank* tidak hanya memiliki peran menjadi tempat penyimpanan bagi produk dan bahan baku tetapi juga menjaga kelancaran ketersediaan produk dan bahan baku serta dapat menjaga produk atau bahan baku dari kontaminan (kontaminan tersebut dapat menurunkan kualitas dari produk atau bahan baku) [3].

Sistem *storage tank* pada proses industri memiliki karakteristik yang sangat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor *eksternal* maupun *internal*. Pada kenyataannya, laju aliran masuk (*inflow*) dan laju aliran keluar (*outflow*) tidak selalu konstan, melainkan dapat berubah secara tiba-tiba akibat fluktuasi tekanan, variasi kebutuhan proses hilir, ataupun adanya gangguan tak terduga dari lingkungan. Hal ini menimbulkan ketidakpastian (*uncertainty*) dalam model matematis *plant*, baik berupa perubahan parameter maupun adanya *disturbance* yang tidak dapat diprediksi sebelumnya [4]. Salah satu parameter krusial yang harus dikendalikan secara presisi pada *storage tank* adalah tinggi permukaan cairan (*liquid level*) [5]. Level cairan perlu dipertahankan pada ketinggian tertentu agar memenuhi syarat *volume*, sehingga proses industri dapat berlangsung sesuai dengan yang diharapkan [6]. Jika level cairan tidak dijaga dengan baik, dapat terjadi kondisi *overflow* (luber) yang berpotensi membahayakan lingkungan dan peralatan, atau sebaliknya, kondisi *dry* (kering) yang dapat mengganggu keberlangsungan proses industri [7]. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali yang andal untuk menjaga ketinggian cairan agar tetap berada dalam batas operasional yang diinginkan.

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.

Pada sistem *storage tank*, salah satu tantangan terbesar dalam menjaga kestabilan level cairan adalah kondisi *downstream* setelah tangki yang bersifat tidak pasti. Debit keluaran sering berubah-ubah karena kebutuhan proses selanjutnya tidak konstan. Dalam situasi tertentu, proses industri dapat memerlukan debit air besar sehingga level cairan dalam tangki menurun cepat, namun pada waktu lain konsumsi bisa sangat kecil, misalnya pada beban konsumen rumah tangga atau bagian proses yang sedang *idle*. Variasi kebutuhan ini menyebabkan ketidakseimbangan antara aliran masuk dan aliran keluar, sehingga fluktuasi level cairan sulit dihindari jika sistem tidak dilengkapi kontrol yang baik [8].

Ketidakpastian beban ini menunjukkan bahwa *storage tank* harus mampu berfungsi sebagai penyangga (*buffer*) untuk menghadapi perubahan kebutuhan debit. Apabila keluaran meningkat tiba-tiba, cairan dalam tangki akan turun dan dapat melewati batas aman. Sebaliknya, saat beban rendah, cairan dapat menumpuk sehingga level meningkat dan berpotensi melewati maksimum. Oleh karena itu, pendekatan kontrol menjadi hal penting untuk menjaga level tetap stabil walaupun terjadi perubahan permintaan cairan pada proses lanjutan [9].

Berbagai metode pengendalian telah diterapkan pada sistem *storage tank* untuk menjaga kestabilan level cairan. Pendekatan *Fuzzy Logic Controller* (FLC), misalnya, mampu memperbaiki respons transien dan mengurangi *overshoot*, tetapi perancangannya sangat bergantung pada penentuan aturan serta fungsi keanggotaan yang bersifat subyektif [10]. Metode *Model Predictive Control* (MPC) menawarkan kemampuan prediksi serta pengaturan batasan variabel secara simultan, meskipun implementasinya memerlukan model yang akurat dan komputasi yang relatif tinggi [11]. Di sisi lain, *Sliding Mode Control* (SMC) dikenal *robust* terhadap gangguan maupun variasi parameter, namun sering menimbulkan fenomena *chattering* yang dapat memengaruhi kinerja aktuator [12]. Adapun *Linear Quadratic Regulator* (LQR) efektif untuk sistem linier berbasis *state-space*, tetapi kurang optimal ketika diaplikasikan pada proses yang sangat nonlinier dan sulit diukur secara penuh [13]. Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa masih dibutuhkan strategi kendali yang mampu beradaptasi terhadap dinamika sistem sekaligus mudah diimplementasikan.

Keterbatasan pada penelitian terdahulu, mengantarkan penulis mengeksplorasi kendali adaptif, salah satunya penerapan metode kendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) karena di sistem *storage tank* memiliki dinamika yang dapat berubah akibat variasi aliran masuk, perubahan beban, ataupun kondisi operasi yang tidak pasti, MRAC

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.

mampu menyesuaikan parameter pengendali secara otomatis melalui mekanisme adaptasi, sehingga sistem tetap stabil dan kinerjanya terjaga meskipun terdapat ketidakpastian [14]. Kendali adaptif dipandang lebih sesuai, khususnya MRAC karena bekerja dengan prinsip membuat keluaran *plant* mengikuti perilaku model acuan (*reference model*) yang telah ditentukan sebelumnya. Model acuan ini dirancang untuk merepresentasikan karakteristik ideal sistem yang diharapkan, seperti *rise time* cepat, *overshoot* minimal, *settling time* singkat, dan kesalahan tunak mendekati nol. Melalui mekanisme adaptasi, parameter pengendali secara otomatis disesuaikan agar perbedaan antara keluaran sistem dan keluaran model acuan dapat diminimalkan [15].

Penelitian-penelitian terkait, menyebutkan MRAC dapat dipandang sebagai metode pengendalian yang menggabungkan sifat *robustness* dan *adaptability*. *Robustness* tercermin pada kemampuannya menjaga kestabilan meskipun parameter sistem mengalami variasi, sedangkan *adaptability* ditunjukkan melalui penyesuaian parameter pengendali yang berlangsung secara otomatis. Kombinasi kedua sifat ini menjadikan MRAC sangat sesuai untuk pengendalian level cairan pada *storage tank*, karena kestabilan level harus terjaga guna mencegah terjadinya *overflow* maupun kondisi kering yang dapat mengganggu proses industri [4, 16].

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan perancangan dan pengujian pengendali MRAC pada sistem *storage tank*. Tujuannya adalah dengan kemampuan adaptasi MRAC terhadap perubahan parameter sistem dan gangguan eksternal. Dengan adanya pengendali MRAC yang merupakan bentuk pendekatan yang lebih efektif. MRAC memastikan bahwa sistem tetap adaptif terhadap perubahan karakteristik *plant* maupun gangguan yang tidak dapat diprediksi. Pengendalian ini mampu menghasilkan strategi kendali yang tidak hanya sederhana dan praktis, tetapi juga *robust* dan adaptif, sehingga sesuai diterapkan pada sistem *storage tank* yang sifat dinamikanya sering berubah-ubah [4]. Dengan demikian penulis mengajukan penelitian Tugas Akhir dengan judul **“DESAIN PENGENDALI MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC) UNTUK PENGENDALIAN LEVEL PADA SISTEM STORAGE TANK”**.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana mengendalikan level menggunakan pengendali MRAC pada sistem *storage tank*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mendesain pengendali MRAC untuk mengendalikan level pada sistem *storage tank*.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini mencakup pada beberapa batasan yaitu:

1. Pemodelan sistem *storage tank* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya.
2. Pengendali yang digunakan ialah MRAC dengan metode MIT-RULE.
3. Pengendali lain yang digunakan ialah PID sebagai pembanding
4. Simulasi pengujian dilakukan menggunakan *simulink* Matlab2024b
5. Penelitian ini hanya sebatas simulasi tidak membahas pada *hardware* atau *plant* fisik secara langsung.

1.5 Manfaat penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian yang dilakukan yaitu :

1. Dapat digunakan sebagai acuan bagi penelitian berikutnya.
2. Memberikan solusi alternatif pengendalian level yang lebih *robust*

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini mengulas berbagai penelitian sebelumnya yang membahas teori-teori relevan dalam bidang terkait. Teori-teori tersebut diuji dan disajikan guna memperkuat landasan penelitian ini. Dalam bab ini, disertakan berbagai teori pendukung yang diperoleh dari tinjauan pustaka, mencakup referensi dari buku, jurnal ilmiah, serta literatur lainnya yang mendukung kajian penelitian ini.

2.1. Penelitian Terkait

Penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas sistem pengendalian level cairan, khususnya dengan pendekatan MRAC, memberikan landasan yang kuat dalam perancangan dan pengembangan sistem pada penelitian ini. Berikut adalah beberapa kajian literatur yang relevan.

Penelitian studi tentang *Level Control of Blast Furnace Gas Cleaning Tank System with Fuzzy Based Gain Regulation for Model Reference Adaptive Controller* mengusulkan penggunaan MRAC dengan regulasi *fuzzy gain* pada sistem *blast furnace gas cleaning tank*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendali MRAC mampu menjaga level cairan tetap stabil meskipun terjadi variasi pada *inflow* maupun gangguan eksternal, serta memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan pengendali PID konvensional. Penelitian serupa telah dilakukan pada sistem *coupled tank*, yang memperlihatkan bahwa MRAC menghasilkan respons yang lebih cepat dengan *error steady-state* yang lebih kecil dibandingkan *Fuzzy Logic Controller* [17, 18].

Penelitian terkait mengevaluasi pengendali adaptif pada sistem tiga tangki dan melaporkan bahwa MRAC menunjukkan kemampuan *tracking* yang lebih baik dibandingkan pengendali konvensional dalam menghadapi dinamika sistem yang kompleks [19]. Penelitian lainnya juga mengkaji penerapan aturan *MIT* dan *Lyapunov* pada MRAC untuk sistem tangki berinteraksi maupun tidak berinteraksi, dan hasilnya memperlihatkan bahwa MRAC tetap mampu menjaga stabilitas meskipun parameter sistem bervariasi secara signifikan [20].

Penelitian studi tentang Analisa Pengendalian Level Berbasis MRAC-PID pada Tangki *Hotwell Kondensor*. Dengan menggunakan pemodelan matematis, kendali MRAC-PID menunjukkan *overshoot* dan *error steady-state* yang jauh lebih rendah dibandingkan

kendali PI. Pengujian terhadap gangguan eksternal juga membuktikan bahwa MRAC-PID memiliki kemampuan adaptasi yang baik dalam mengembalikan sistem ke *setpoint* meskipun terjadi *overshoot* kecil. Temuan ini menegaskan keunggulan MRAC dalam pengendalian sistem dinamis. Sebagai perbandingan, MRAC menawarkan pendekatan adaptif yang memungkinkan parameter pengendali menyesuaikan diri secara otomatis berdasarkan *error* antara keluaran sistem dengan model acuan. Hal ini membuat MRAC lebih unggul dalam menghadapi variasi beban, perubahan kondisi operasi, maupun gangguan eksternal. [21].

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa MRAC memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan PID dan pengendali lainnya pada sistem dengan parameter yang tidak pasti. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan MRAC sebagai pendekatan utama untuk memberikan analisis perbandingan kinerja yang komprehensif pada sistem *storage tank*.

2.2. Landasan Teori

2.2.1 Storage Tank

Storage tank merupakan media penyimpanan cairan yang umum digunakan dalam berbagai sektor industri seperti kimia, farmasi, makanan, dan pengolahan air. Fungsi utama dari *storage tank* adalah menampung dan menyimpan cairan dalam jumlah besar, baik sebagai bahan baku maupun hasil proses [22]. Sistem ini umumnya dilengkapi dengan pengukuran level cairan untuk menjamin operasi yang aman dan efisien. Pengaturan level cairan dalam tangki menjadi penting agar tidak terjadi kondisi *overflow* (meluap) atau kekeangan (*dry run*), yang bisa menyebabkan gangguan sistem maupun kerusakan peralatan [2].

UIN SUSKA RIAU



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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

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



Gambar 2.1 Struktur *Storage Tank*

Pada gambar 2.1 diperlihatkan beberapa unit *storage tank* yang umum digunakan di industri untuk menyimpan cairan dalam jumlah besar, seperti minyak bumi, bahan kimia, dan cairan proses lainnya. Tangki-tangki ini umumnya dibangun dengan struktur silindris vertikal dan ditempatkan secara berderet di area penyimpanan utama (*tank farm*). Desain struktur seperti ini memungkinkan efisiensi ruang, kemudahan akses, dan kestabilan distribusi beban cairan. *Storage tank* memiliki beberapa komponen utama, antara lain:

- Rangka (*Frame Structure*)** Rangka merupakan struktur utama yang terdiri dari elemen-elemen terhubung seperti plat dasar, cincin penguat (*stiffeners*), dan elemen pendukung lainnya. Fungsinya adalah untuk menopang beban total dari cairan di dalam tangki serta menahan gaya eksternal seperti angin dan gempa [23].
- Pelat (*Plate Shell*)** Pelat baja berfungsi sebagai dinding utama dari *storage tank*. Material pelat harus dipilih berdasarkan kemampuan menahan tekanan hidrostatik dari fluida di dalam tangki serta ketahanannya terhadap korosi. Umumnya digunakan baja karbon rendah dengan perlakuan khusus seperti pelapisan anti karat untuk meningkatkan durabilitas struktur [24].
- Sistem Perpipaan (*Piping System*)** Sistem perpipaan berperan penting dalam proses pengisian dan pengeluaran fluida dari tangki. Pipa yang digunakan harus memiliki ketahanan tinggi terhadap tekanan dan korosi, serta mudah dalam proses fabrikasi seperti pengelasan. Sistem ini juga dilengkapi dengan katup pengaman dan sensor tekanan untuk mendukung aspek keselamatan operasional [25].

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

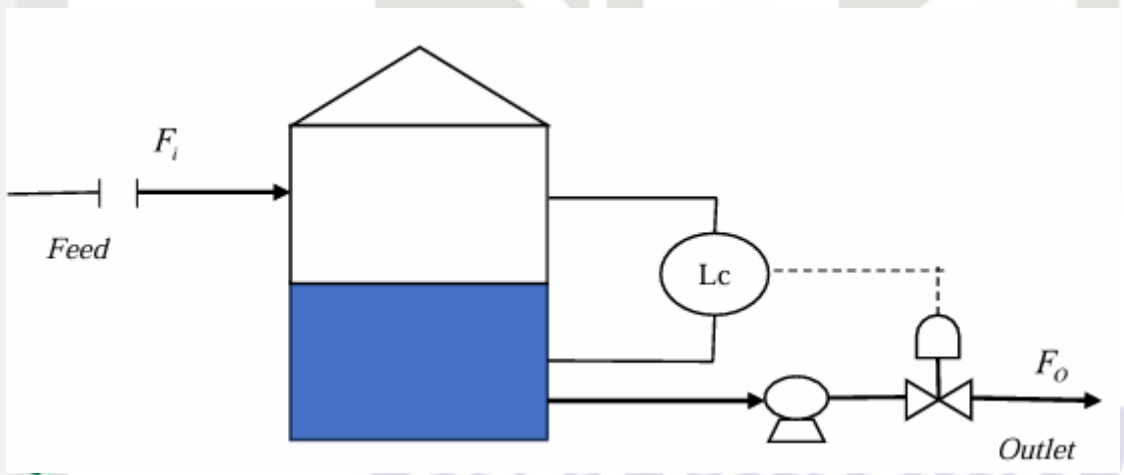
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

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

Namun demikian, penggunaan *storage tank* juga memiliki sejumlah kendala, terutama dalam hal pengendalian level cairan. Ketidakstabilan permukaan cairan akibat fluktuasi aliran masuk dan keluar dapat menyebabkan proses industri terganggu. Selain itu, potensi seperti kebocoran atau kesalahan dalam sistem kendali bisa berdampak negatif pada efisiensi sistem [26]. Untuk itu, diperlukan pendekatan kendali yang handal untuk menjaga kestabilan level cairan. Dalam konteks penelitian ini, simulasi berbasis pemodelan matematis digunakan untuk mengkaji efektivitas pengendalian level cairan, khususnya dengan pendekatan berbasis MRAC. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi performa pengendali terhadap skenario gangguan dan dinamika sistem yang bervariasi secara teoritis sebelum implementasi di sistem fisik [7].

2.2.2 Model Matematis Sistem *Storage Tank*

Pemodelan matematis pada sistem *storage tank* dilakukan dengan menurunkan persamaan berdasarkan hukum kesetaraan *volume*. Secara umum, sistem ini merepresentasikan dinamika perubahan ketinggian cairan di dalam tangki sebagai hasil dari perbedaan antara laju aliran masuk dan keluar. Dengan mengasumsikan bentuk tangki sebagai silinder vertikal dan sistem yang hanya memiliki satu inlet dan satu outlet [6], maka dinamika sistem dapat digambarkan melalui Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Sistem *Storage Tank* [27]

Secara prinsip, perubahan *volume* cairan di dalam tangki ditentukan oleh selisih antara laju aliran masuk dan laju aliran keluar [28]. Berdasarkan prinsip kesetaraan *volume* tersebut, sistem ini dapat dimodelkan secara matematis dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\frac{dV(t)}{dt} = F_i(t) - F_o(t) \quad (2.1)$$

Karena tangki dimodelkan berbentuk silinder atau bentuknya dianggap tidak berubah, maka *volume* cairan yang terkandung di dalam tangki dapat dituliskan sebagai:

$$V = Ah(t) \quad (2.2)$$

Besarnya *volume* dalam tangki ditentukan melalui hasil kali luas penampang tangki (A) dengan ketinggian cairan (h) di dalamnya. Dengan demikian, bentuk turunan persamaan (2.2) terhadap waktu dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dV(t)}{dt} = A \frac{dh(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Sehingga:

$$dV(t) = Adh(t) \quad (2.4)$$

Langkah berikutnya adalah mensubstitusikan persamaan (2.1) ke dalam persamaan (2.4), sehingga diperoleh bentuk persamaan sebagai berikut:

$$A \frac{dh(t)}{dt} = F_i(t) - F_o(t) \quad (2.5)$$

Dengan :

$h(t)$ = ketinggian cairan dalam tangki

$F_i(t)$ = laju aliran masuk (*inflow*)

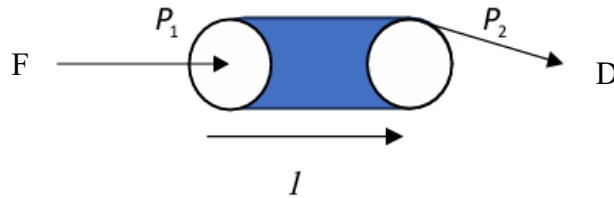
$F_o(t)$ = laju aliran keluar (*outflow*)

Agar persamaan lebih sederhana, aliran masuk (F_i) dan aliran keluar (F_o) dibagi dengan luas penampang A , Dengan demikian, persamaan dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{F_i(t)}{A} - \frac{F_o(t)}{A} \quad (2.6)$$

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} F_i(t) - \frac{1}{A} F_o(t) \quad (2.7)$$

Besarnya kecepatan aliran keluar F_o ditentukan oleh ketinggian cairan dalam tangki (h) dan ukuran diameter pipa keluaran (D). Nilai konstanta (c) diturunkan melalui ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pipa Keluaran *Storage Tank* [29]

Gambar 2.3 memperlihatkan skema pipa keluaran dari tangki, di mana fluida mengalir dari tekanan P_1 pada ujung pipa yang terhubung ke dasar tangki menuju tekanan P_2 pada sisi keluaran pipa. Berdasarkan ilustrasi tersebut, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_o(t) = \frac{D}{pl} \sqrt{P(t)} \quad (2.8)$$

Dimana $P_1 \gg P_2$ menunjukkan bahwa laju aliran keluar dari tangki sepenuhnya dipengaruhi oleh tekanan hidrostatik yang ditentukan oleh ketinggian cairan.

$$P_1 = \text{Tekanan didasar tangki} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$P_2 = \text{Tekanan di ujung pipa keluaran} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$F = \text{laju Aliran} \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

$$D = \text{Diameter Pipa} (m)$$

$$l = \text{Panjang Saluran Pipa} (m)$$

$$F_o = \text{laju Aliran Keluar} \left(\frac{m}{h} \right)$$

$$P = \text{Tekanan di awal pipa keluaran} (Kg / m^3)$$

$$pl = \text{gabungan pengaruh kekentalan fluida} (P) \text{ dan panjang pipa} (l)$$

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.

Mengacu pada persamaan (2.8), jika disubstitusikan dengan rumus tekanan hidrostatik [30], maka persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P(t) = p gh(t) \quad (2.9)$$

Dengan mensubstitusikan $P(t)$ ke dalam Persamaan (2.8), maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$F_o(t) = \frac{D}{pl} \sqrt{p gh(t)} \quad (2.10)$$

$$F_o(t) = \frac{D}{pl} \sqrt{p gh(t)} \quad (2.11)$$

Oleh karena itu, kecepatan aliran keluaran (F_o) bergantung pada level cairan di dalam tangki (h) dimensi diameter pipa (D) dan konstanta (c), dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{D}{pl} \sqrt{pg} = c \quad (2.12)$$

Oleh karena itu, persamaan (2.12) dapat dinyatakan dalam bentuk berikut:

$$F_o(t) = c \sqrt{h(t)} \quad (2.13)$$

Selanjutnya, persamaan differensial (2.13) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.7), sehingga diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} F_i(t) - \frac{c \sqrt{h(t)}}{A} \quad (2.14)$$

Persamaan (2.14) menunjukkan bahwa model matematis *storage tank* tidak linear, sehingga dibutuhkan proses linearisasi guna menyederhanakan persamaan. Salah satu metode yang digunakan adalah pendekatan deret *taylor* [31], dengan bentuk sebagai berikut:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} (x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad (2.15)$$

Berdasarkan teori deret *taylor*, proses linearisasi dapat diperoleh dengan menggunakan pendekatan orde pertama. Persamaan (2.14) menunjukkan fungsi yang dipengaruhi oleh variabel (h) dan (F_i), yang dapat dituliskan sebagai berikut:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

$$f(x(t)) = f(h(t), F_1(t)) + \left(\frac{\partial f(x)}{\partial h} \right)_{h=h_0} (h(t) - h_0(t)) + \left(\frac{\partial f(x)}{\partial F_i} \right)_{F_i=F_{i0}} (F_1(t) - F_{i0}(t)) \quad (2.16)$$

$$f(x(t)) = \frac{1}{A} F_{i0}(t) - \frac{c}{A} \sqrt{h_0(t)} - \frac{1}{2} \frac{c}{A} h(t)^{-1/2} (h(t)) + \frac{1}{A} (F_1(t) - F_{i0}(t)) \quad (2.17)$$

$$f(x(t)) = \frac{1}{A} F_{i0}(t) - \frac{c}{A} \sqrt{h_0(t)} - \frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} - \frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} h_0(t) + \frac{1}{A} F_i(t) - \frac{1}{A} F_{i0}(t) \quad (2.18)$$

$$f(x(t)) = -\frac{c}{A} \sqrt{h_0(t)} - \frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} h_0(t) - \frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} + \frac{1}{A} F_i(t) \quad (2.19)$$

$$f(x(t)) = -\frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} h(t) + \frac{1}{A} F_i(t) \quad (2.20)$$

Tahap berikutnya adalah mengubah model matematis diferensial menjadi bentuk persamaan *state space*, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, persamaan (2.20) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \left(-\frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} \right) x(t) + \left(\frac{1}{A} \right) u(t) \\ y(t) &= (1)x(t) + (0)u(t) \end{aligned} \quad (2.22)$$

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

$$A = \left[-\frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} \right]$$

$$B = \left[\frac{1}{A} \right]$$

$$C = [1]$$

$$D = [0]$$

Pada persamaan (2.22), notasi matriks A yang semula digunakan untuk menggambarkan sistem *storage tank* diganti dengan A_1 . Hal ini dilakukan untuk membedakan penggunaannya dari simbol A yang telah didefinisikan sebelumnya sebagai luas penampang tangki. Rincian parameter-parameter sistem *storage tank* yang dipakai dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Parameter sistem *storage tank* [27]

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Diameter Tanki	d	1 m	m
Ketinggian Cairan Dalam Tangki	h	0.75 m	m
Luas Penampang Tanki	A	$\frac{\pi}{4}d^2 \approx 0.785\text{ m}^2$	m^2
Laju Aliran Masuk	F_i	$0.4\text{ m}^3 / \text{s}$	m^3 / s
Konstanta	c	$\frac{1.8}{90}\sqrt{0.6} \approx 0.0154919$	-

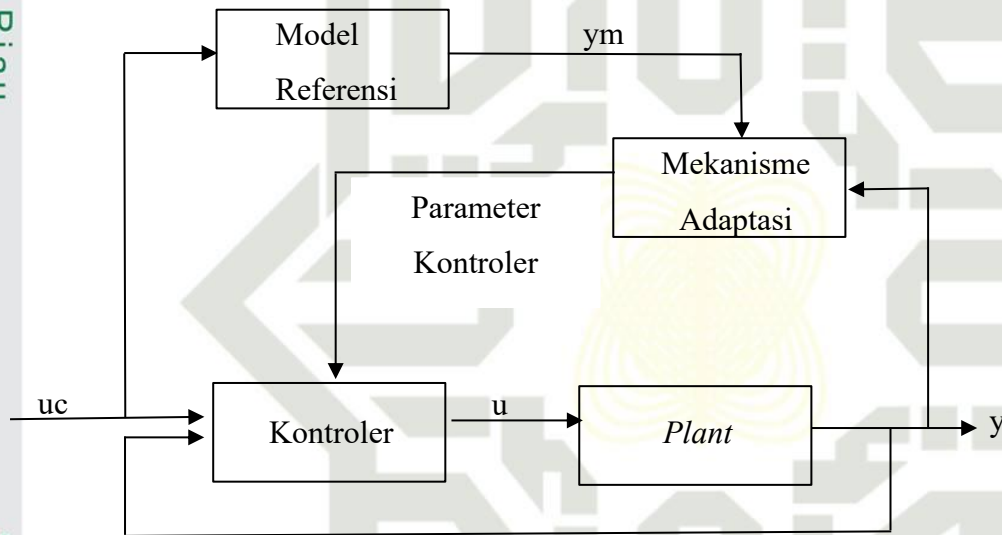
Tabel 2.1 memuat parameter-parameter yang dipakai dalam pemodelan matematis sistem *storage tank*. Data tersebut menjadi landasan utama dalam menganalisis serta menggambarkan perilaku sistem yang bersifat non-linear.

2.3 Model Reference Adaptive Control (MRAC)

MRAC merupakan salah satu metode pengendalian adaptif yang dirancang agar keluaran dari suatu sistem (*plant*) dapat mengikuti keluaran dari model acuan yang telah ditentukan. Pendekatan ini sangat berguna dalam pengendalian sistem yang memiliki parameter tidak pasti atau mengalami perubahan selama proses berlangsung. Prinsip dasar MRAC adalah meminimalkan kesalahan (*error*) antara keluaran sistem dengan model acuan secara *real-time*, melalui penyesuaian parameter pengendali secara adaptif. Dengan demikian, MRAC mampu meningkatkan kinerja sistem dalam menghadapi gangguan dan ketidakpastian tanpa perlu mengetahui model sistem secara lengkap sebelumnya [32].

Diagram blok sistem MRAC ditunjukkan pada gambar 2.4. Secara umum, sistem ini terdiri dari tiga blok utama, yaitu blok model referensi, blok pengendali adaptif, dan blok mekanisme adaptasi. Blok model referensi berfungsi sebagai representasi matematis yang

menentukan respon yang diinginkan dari sistem kendali adaptif. Blok ini menerima masukan berupa set point uc dan menghasilkan keluaran ym yang memiliki karakteristik sesuai dengan perilaku yang diharapkan. Blok mekanisme adaptasi merepresentasikan hubungan matematis yang menggambarkan perubahan parameter yang perlu dilakukan untuk meminimalkan kesalahan pelacakan (*tracking error*). Blok ini menerima sinyal dari keluaran model *plant* dan model referensi, kemudian menghitung parameter kendali yang sesuai. Hasil perhitungan tersebut dikirimkan ke pengendali adaptif. Pengendali adaptif selanjutnya menghasilkan sinyal kendali yang digunakan untuk mengatur *plant*, sehingga keluaran *plant* dapat mengikuti perilaku model referensi secara optimal [32].



Gambar 2.4 Blok Diagram Pengendali MRAC [33]

Pada sistem MRAC terdapat dua mekanisme loop, yakni *inner loop* dan *outer loop*. *Inner loop* adalah lintasan umpan balik antara *plant* dan kendali, sedangkan *outer loop* digunakan untuk mengubah parameter kendali berdasarkan perbedaan antara keluaran *plant* dan model referensi ($e = y - ym$). Dengan menekan sinyal *error*, sistem diharapkan mampu menghasilkan keluaran yang mengikuti model acuannya. Penentuan parameter adaptif dalam MRAC dapat dilakukan dengan memanfaatkan metode *MIT Rule* [34].

2.3.1 MIT RULE

MIT Rule merupakan salah satu pendekatan dalam MRAC selain metode kestabilan *Lyapunov*. Metode ini dipilih karena bentuk persamaan matematisnya relatif sederhana dan tidak terlalu kompleks. Pada sistem *loop* tertutup, parameter pengendali yang dapat

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.

disesuaikan dilambangkan dengan θ . Respon sistem ditentukan oleh model yang menghasilkan keluaran y_m , sedangkan keluaran proses dinotasikan sebagai y . Besarnya *error* didefinisikan sebagai selisih antara keluaran proses y dan keluaran model y_m [35]. Fungsi kinerja yang digunakan pada MIT Rule umumnya berbentuk kuadrat dari *error* antara keluaran sistem nyata (*plant*) dan keluaran model referensi. *Error* tersebut didefinisikan sebagai:

$$e(t) = y(t) - y_m(t) \quad (2.23)$$

Sehingga fungsi kinerjanya dapat ditulis:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2(t) \quad (2.24)$$

Tujuan utama dari MIT Rule adalah mencari nilai parameter adaptif θ yang dapat meminimalkan fungsi kinerja tersebut. Proses adaptasi parameter dilakukan dengan menghitung turunan fungsi kinerja terhadap parameter, yang menghasilkan persamaan:

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.25)$$

Dengan mensubstitusikan fungsi kinerja ke dalam persamaan di atas, diperoleh:

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma e(t) \frac{\partial e(t)}{\partial \theta} \quad (2.26)$$

Karena *error* bergantung pada keluaran sistem, maka turunan *error* terhadap parameter dapat digantikan dengan sensitivitas keluaran sistem terhadap parameter, sehingga persamaan menjadi:

$$\dot{\theta}(t) = -\gamma e(t) \frac{\partial y(t)}{\partial \theta} \quad (2.27)$$

Parameter γ dalam persamaan ini dikenal sebagai *adaptation gain*. Besarnya nilai γ sangat berpengaruh terhadap perilaku sistem adaptif. Nilai yang terlalu besar akan menyebabkan respon adaptasi cepat, tetapi dapat menimbulkan osilasi bahkan ketidakstabilan. Sebaliknya, nilai yang terlalu kecil membuat sistem lebih stabil, namun memperlambat proses adaptasi.

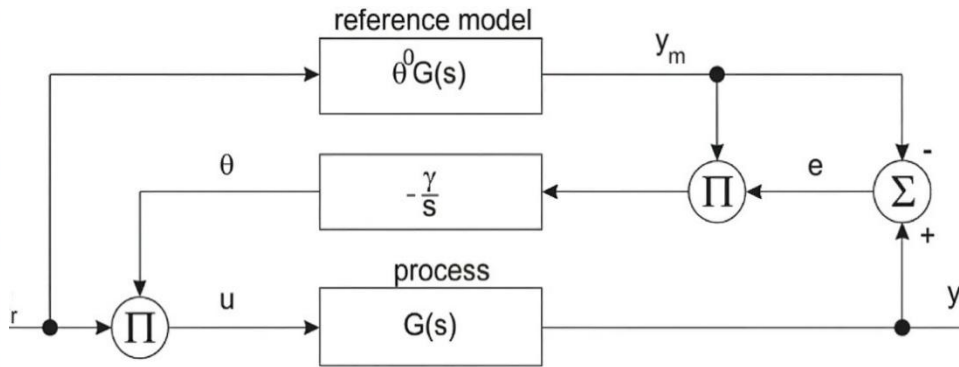
Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

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

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

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

Dengan cara ini, MIT Rule memungkinkan penyesuaian parameter kendali secara berulang-ulang berdasarkan *error* yang terjadi, sehingga keluaran *plant* dapat mengikuti dinamika model referensi secara lebih akurat.



Gambar 2.5 Skema MRAC dengan Metode MIT Rule [36]

2.4 Respon Transien Sistem Orde I

Karakteristik sistem orde pertama sepenuhnya ditentukan oleh konstanta waktu (τ) dan penguatan sistem (K), yang menjadi faktor utama dalam menentukan cepat atau lambatnya respon sistem terhadap masukan. Pada banyak kasus sistem kendali praktis, respon transien menuju keadaan *steady* berlangsung monoton tanpa adanya osilasi. Hal ini terjadi karena sistem orde pertama hanya memiliki satu energi penyimpanan sehingga tidak memungkinkan terbentuknya dinamika osilasi. Terdapat beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan.

a) Waktu Tunda (*Delay Time*)

Pada sistem orde satu, waktu tunda (*delay time*) umumnya tidak didefinisikan secara jelas, karena respon langsung mulai naik sejak $t_d = 0$. Namun, untuk pendekatan penelitian, waktu tunda bisa diperkirakan saat tanggapan mulai meninggalkan kondisi awal secara signifikan.

$$t_d(3\%) \approx \tau \ln 12 \quad (2.28)$$

b) Waktu Naik (*Rise Time*)

Waktu naik pada sistem orde 1 adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk naik dari 10% menuju 90% dari nilai akhir.

$$\begin{aligned} t_r(5\% - 95\%) &\approx \tau \ln 19 \\ t_r(10\% - 90\%) &\approx \tau \ln 19 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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

c) Waktu Keadaan Steady (*Settling Time*)

Waktu keadaan steady adalah waktu yang dibutuhkan sistem untuk tetap berada dalam rentang tertentu (misalnya $\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$) dari nilai akhirnya. Semakin kecil nilai konstanta waktu (τ) semakin cepat sistem mencapai keadaan *steady*.

$$\begin{aligned} t_s (\pm 3\%) &\approx 5\tau \\ t_s (\pm 4\%) &\approx 2\tau \\ t_s (\pm 5\%) &\approx 0.5\tau \end{aligned} \quad (2.30)$$

d) Error Steady State (*Ess*)

Error steady state (*Ess*) merupakan besaran kesalahan yang tersisa antara sinyal masukan dan keluaran sistem ketika waktu telah mencapai keadaan tunak. Analisis *Ess* dilakukan dengan memanfaatkan Teorema Nilai Akhir (*Final Value Theorem*).

$$e_{ss} = R_{ss} - C_{ss} \quad (2.31)$$

Respon transien sistem orde I menjelaskan perilaku awal sistem ketika menerima masukan hingga mencapai kondisi tunak. Parameter seperti *time constant*, *rise time*, dan *settling time* memberikan gambaran mengenai kecepatan dan kestabilan respon alami sistem tanpa pengaruh pengendali. Namun, dalam sistem nyata seperti *storage tank*, respon alami tersebut sering belum memenuhi spesifikasi yang diinginkan, terutama terhadap perubahan setpoint atau gangguan. Oleh karena itu, diperlukan analisis kriteria performansi sistem untuk menilai sejauh mana penerapan pengendali, seperti MRAC, mampu memperbaiki respon transien agar sistem bekerja lebih cepat, stabil, dan akurat terhadap referensi.

2.6 Penentu Performansi Sistem

Dalam penelitian pengendalian level cairan pada sistem *storage tank* menggunakan pengendali MRAC, penilaian performansi sistem difokuskan pada beberapa parameter utama yang mencerminkan kecepatan respon, kestabilan sistem, serta ketepatan pengendalian terhadap perubahan *setpoint* maupun gangguan aliran.

Parameter pertama yang menjadi acuan adalah waktu sampling (*time sampling*), yaitu interval pengambilan data selama proses simulasi berlangsung. Nilai waktu sampling yang tepat memastikan dinamika perubahan tinggi cairan dapat direkam dengan akurat tanpa menyebabkan beban komputasi berlebih. Selanjutnya, waktu tunda (*delay time*) menunjukkan seberapa cepat sistem mulai memberikan respon terhadap perubahan input. Nilai waktu tunda yang kecil menandakan sistem memiliki respon yang cepat dan adaptif

terhadap variasi *inflow*.

Waktu naik (*rise time*) menggambarkan kecepatan sistem dalam mencapai nilai referensi awal, di mana nilai *rise time* yang lebih singkat menunjukkan bahwa pengendali mampu mempercepat proses pengisian cairan menuju *setpoint*. Setelah itu, waktu keadaan tunak (*settling time*) menjadi indikator kestabilan sistem. Semakin kecil nilai *settling time*, semakin cepat sistem mencapai kondisi stabil setelah terjadi perubahan input atau gangguan.

Overshoot juga menjadi aspek penting karena menunjukkan sejauh mana tinggi cairan melampaui nilai *setpoint* sebelum mencapai kestabilan. Pada sistem *storage tank*, *overshoot* yang besar dapat menyebabkan *overflow*, sehingga pengendali yang baik harus mampu meminimalkan nilai *overshoot* tersebut. Kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) kemudian digunakan untuk mengukur selisih antara nilai keluaran sistem dan referensi pada kondisi tunak. Nilai *steady-state error* yang mendekati nol menunjukkan bahwa pengendali MRAC mampu mempertahankan level cairan secara tepat sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan.

Penilaian ketepatan pelacakan terhadap model referensi secara kuantitatif, digunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai RMSE yang kecil menunjukkan bahwa keluaran sistem mengikuti model referensi dengan tingkat *error* yang rendah sepanjang simulasi. Di sisi lain, aspek *control effort* juga diperhatikan untuk menilai efisiensi pengendalian. Parameter ini menunjukkan besar usaha kendali atau energi aktuasi yang dikeluarkan oleh sistem untuk menjaga kestabilan level cairan. *Control effort* yang stabil dan tidak berosilasi menandakan sistem bekerja secara efisien tanpa memberikan beban berlebih pada aktuator.

Secara keseluruhan, sistem *storage tank* dengan pengendali MRAC dikatakan memiliki performansi yang baik apabila memenuhi beberapa kriteria utama, yaitu memiliki respon yang cepat dan stabil, tidak terjadi *overshoot* signifikan, kesalahan keadaan tunak mendekati nol, nilai RMSE kecil, serta *control effort* yang efisien dan tidak berosilasi. Pemenuhan kriteria tersebut menunjukkan bahwa pengendali MRAC mampu memberikan pengendalian level cairan yang presisi, adaptif, dan stabil terhadap variasi parameter maupun gangguan eksternal [37].

2.7 Software Matlab

MATLAB singkatan dari (*Matrix Laboratory*) merupakan sebuah platform komputasi numerik yang digunakan untuk pemrograman, analisis data, perhitungan

matematika, pemodelan, pembuatan grafik, serta pengembangan komputasi. Perangkat lunak ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1970, awalnya untuk menyelesaikan permasalahan persamaan aljabar linier. Seiring perkembangan teknologi, fungsi dan kinerja MATLAB terus ditingkatkan sehingga kini menjadi salah satu perangkat lunak komputasi yang paling banyak digunakan di bidang akademik maupun industri [38]. MATLAB dikembangkan oleh *MathWorks Inc* dan memiliki kemampuan untuk mengintegrasikan pemrograman, komputasi, serta visualisasi dalam satu lingkungan kerja yang intuitif. Dalam dunia pendidikan, MATLAB banyak dimanfaatkan untuk pembelajaran pemrograman matematika, teknik, dan sains tingkat lanjut. Sementara di dunia industri, MATLAB digunakan secara luas untuk penelitian serta analisis produk [39].



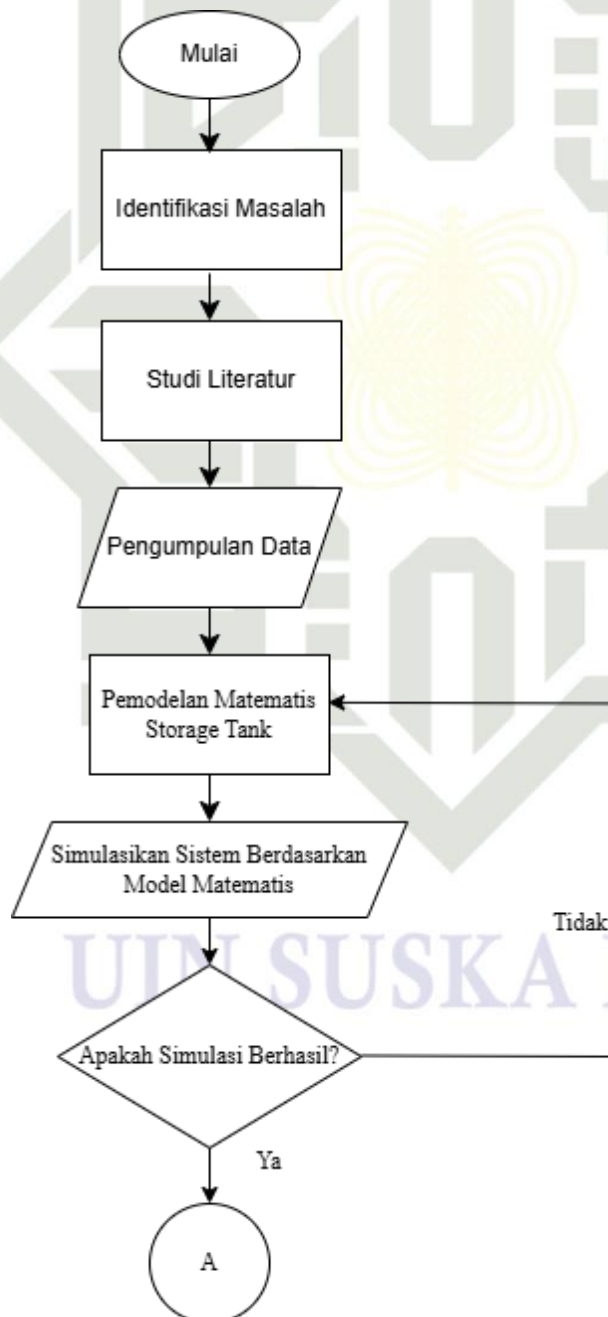
Gambar 2.6 Logo Matlab

Lingkungan kerja MATLAB terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain *Command Window/Editor*, *Current Directory*, *Command History*, *Workspace*, dan *Simulink* [40]. *Command Window* merupakan area utama untuk memasukkan perintah dan melihat hasil output secara langsung, sedangkan Editor digunakan untuk menulis, mengedit, dan menyimpan skrip atau fungsi dengan dukungan fitur seperti penyorotan sintaks, indentasi otomatis, dan debugging. *Current Directory* berfungsi sebagai lokasi penyimpanan file proyek, memudahkan pengelolaan skrip dan data. *Command History* mencatat seluruh perintah yang telah dijalankan, sehingga memudahkan pengguna untuk mengulangi atau memodifikasi perintah sebelumnya. *Workspace* menyimpan seluruh variabel yang aktif selama sesi, memungkinkan pengguna untuk memantau dan memodifikasi data secara langsung. Simulink adalah lingkungan simulasi berbasis grafis yang terintegrasi dengan MATLAB, digunakan untuk memodelkan, mensimulasikan, dan menganalisis sistem dinamis melalui diagram blok. Setiap blok mewakili komponen sistem, seperti integrator, *transfer function*, dan sumber sinyal. Simulink banyak digunakan dalam pengendalian sistem, pemrosesan sinyal, serta komunikasi. Dalam simulasi sistem motor DC, berbagai blok diagram Simulink digunakan untuk membangun model dan mengamati respon sistem terhadap masukan yang diberikan.

3.1

Diagram Alur Penelitian

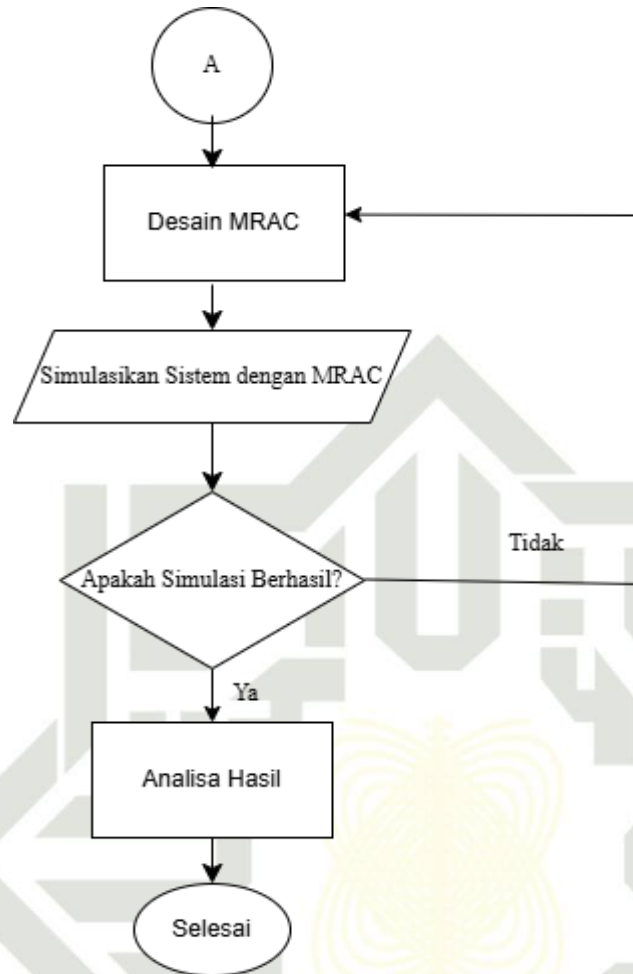
Dalam penelitian ini, diperlukan sebuah diagram alur yang berfungsi untuk menggambarkan langkah-langkah penelitian secara sistematis. Diagram ini membantu peneliti dalam memvisualisasikan urutan kegiatan, mulai dari tahap identifikasi masalah hingga tahap akhir penelitian, sehingga setiap proses dapat terstruktur dengan jelas dan terarah.



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

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 Diagram Alur Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Berdasarkan gambar 3.1 proses yang dilakukan telah memenuhi tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Langkah awal dalam penelitian ini adalah melakukan identifikasi permasalahan pada sistem *storage tank*. Setelah permasalahan tersebut teridentifikasi, diterapkan metode pengendalian berbasis MRAC yang bertujuan untuk meningkatkan respons dinamis sistem. Penerapan metode ini diharapkan mampu menjaga kestabilan level cairan sehingga selama proses operasi tidak terjadi luapan (*overflow*) maupun kekosongan (*empty tank*) pada *storage tank*.

2. Studi Literatur

Tahap selanjutnya adalah melakukan studi literatur untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan teori

storage tank dan pengendali MRAC. Informasi tersebut dikumpulkan dari berbagai sumber terpercaya, antara lain buku teks, jurnal ilmiah, artikel, serta referensi relevan lainnya yang mendukung landasan teori penelitian ini.

3. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data diperoleh dari jurnal dan hasil studi terdahulu yang berkaitan dengan *storage tank*. Data tersebut dimanfaatkan untuk membangun pemodelan matematis beserta parameter-parameter relevan.

4. Pemodelan Matematis Sistem *storage tank*

Pemodelan matematis sistem *storage tank* disusun berdasarkan variabel-variabel hasil pengumpulan data, kemudian diuji menggunakan perangkat lunak yang telah ditetapkan. Proses pemodelan dimulai dari persamaan (2.1) hingga (2.20). Karena persamaan (2.14) menunjukkan sifat non-linear, dilakukan linearisasi menggunakan deret *taylor* orde pertama sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2.15). Hasil linearisasi yang dituliskan pada persamaan (2.20) menghasilkan bentuk state-space dengan matriks A_{-1} , B , C , dan D . Setelah ruang keadaan (*state space equation*) diperoleh, parameter yang tertera pada Tabel 2.1 disubstitusikan ke dalam model yang menghasilkan persamaan di bawah ini.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D(t)\end{aligned}\quad (3.1)$$

Maka

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \left(-\frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} \right) x(t) + \left(\frac{1}{A} \right) u(t) \\ y(t) &= (1)x(t) + (0)u(t)\end{aligned}\quad (3.2)$$

MATRIKS A

MATRIKS B

MATRIKS C

MATRIKS D

$$A_{-1} = \left[-\frac{c}{2A\sqrt{h(t)}} \right]$$

$$B = \left[\frac{1}{A} \right]$$

$$C = [1]$$

$$D = [0]$$

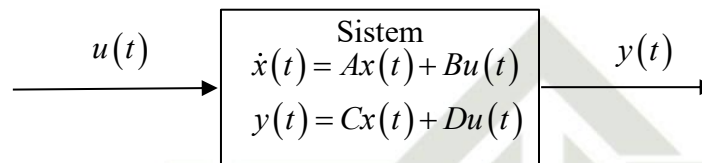
Dari persamaan ruang keadaan (*state space equation*) pada persamaan (3.2) yang telah diperoleh akan diimplementasikan menggunakan MATLAB.

5. Validasi Model Matematis

Validasi model matematis dilakukan dengan mensimulasikan model tersebut dalam

kondisi *loop* terbuka menggunakan Matlab.

Mengacu pada Persamaan (2.12), model sistem *storage tank* dalam kondisi *open loop* direpresentasikan menggunakan diagram blok pada Simulink. Pembangunan model tersebut memanfaatkan komponen-komponen Simulink yang telah disesuaikan dengan karakteristik sistem, sebagaimana tercantum pada tabel 3.1.



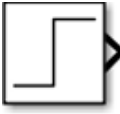
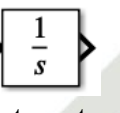
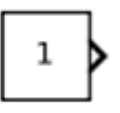
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem *Storage Tank Open loop*

Selanjutnya, respons sistem yang diperoleh dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu untuk memastikan kesesuaiannya. Setelah itu, dilakukan analisi terhadap respons sistem yang dihasilkan guna mengevaluasi kinerja model yang telah dikembangkan. Berdasarkan persamaan umum dalam bentuk fungsi alih, dibangun model simulasi sistem *storage tank* secara *loop* terbuka menggunakan *Simulink*. Adapun rancangan blok *Simulink* yang digunakan ditunjukkan sebagai berikut.

Tabel 3 .1 Blok Simulink

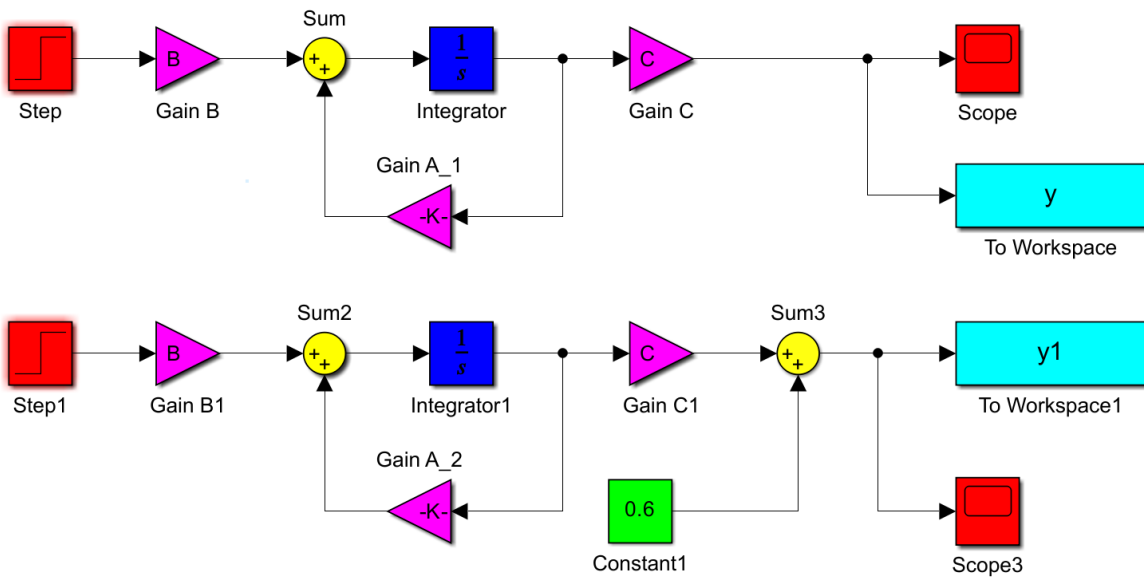
No.	Gambar blok simulink	Keterangan
1.	 To Workspace	Digunakan untuk menyimpan hasil simulasi ataupun analisis sistem ke dalam Matlab yang berupa variabel, struktur data, maupun respon sistem yang akan digunakan untuk analisi lebih lanjut.
2.	 Sum	Sebuah elemen untuk menambahkan atau mengurangi dua atau lebih sinyal
3.	 Scope	Digunakan untuk menampilkan sinyal input sehubungan dengan waktu simulasi yang akan dilakukan.

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

4.	 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.
5.	 Gain	Gain digunakan untuk memperkuat atau mengalikan sinyal masukan dengan suatu nilai tertentu yang bersifat konstan, namun dapat disesuaikan sesuai kebutuhan. Nilai gain tersebut dapat direpresentasikan dalam bentuk bilangan skalar, vektor, maupun matriks,
6.	 Integrator	Integrator berfungsi untuk melakukan proses integrasi terhadap sinyal masukan secara kontinu terhadap waktu. Komponen ini digunakan untuk menurunkan <i>error steady-state</i> pada sistem kendali, sehingga keluaran sistem dapat mengikuti nilai referensi dengan lebih akurat.
7.	 Constant	Constant digunakan untuk menghasilkan sinyal dengan nilai tetap atau konstan pada model simulasi. Komponen ini sering dipakai sebagai masukan referensi (<i>setpoint</i>) ataupun sebagai parameter sistem yang tidak berubah terhadap waktu, sehingga memudahkan dalam pengujian respon dinamis suatu <i>plant</i> .

Tabel 3.1 di atas menjelaskan berbagai jenis blok dalam Simulink yang digunakan dalam proses perancangan model simulasi sistem *storage tank* menggunakan perangkat lunak MATLAB. Setiap blok memiliki peran tertentu dalam merepresentasikan persamaan matematis yang mendasari dinamika sistem [41]. Berdasarkan konfigurasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.1, maka dirancang rangkaian Simulink untuk sistem *storage tank* dalam kondisi *open loop*, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 3.3 berikut ini.

Ha



Gambar 3.3 Rangkaian *Simulink* Sistem *Storage Tank* secara *Open Loop*

Blok diagram *Simulink* dari sistem *storage tank* dalam kondisi *open loop* ditunjukkan pada Gambar 3.3, dan dijalankan dengan algoritma pemrograman Tabel 3.2 sebagaimana tercantum berikut.

Tabel 3.2 Algoritma Pemrograman secarta *Open Loop*

Algoritma Pemrograman Sistem <i>Storage Tank</i> secara <i>Open Loop</i>	
1.	Melakukan inisialisasi dengan perintah <code>clc</code> ; <code>clear all</code> ; <code>close all</code> ; untuk mengosongkan <i>command window</i> , menghapus variabel yang tersimpan pada <i>workspace</i> , serta menutup seluruh jendela <i>figure</i> yang masih aktif.
2.	Menentukan parameter waktu simulasi, yaitu waktu awal = 0 menit, waktu <i>sampling</i> = 1 menit, dan waktu akhir = 360 menit.
3.	Mendefinisikan parameter-parameter sistem <i>storage tank</i> sesuai data pada Tabel 2.1.
4.	Menetapkan kondisi awal sistem dengan nilai <code>init = 0</code> .
5.	Menyusun matriks keadaan sistem (A_1, B, C, D) yang merujuk pada persamaan (20).
6.	Menjalankan program <i>Simulink</i> MATLAB dengan nama " <i>Storage_Tank_statespace_openloop</i> ".
7.	Menyimpan hasil simulasi <i>open loop</i> dalam sebuah file dengan nama

“Storage_Tank_openloop”.

8. Plot untuk memperlihatkan grafik

Algoritma tersebut merupakan pemrograman untuk sistem *storage tank* dalam kondisi *open loop*.

3.3 Desain MRAC

3.3.1 Model Matematis Sistem (Plant) Storage Tank

Sebelum merancang pengendali MRAC, perlu disusun terlebih dahulu bentuk *transfer function* dari sistem *storage tank*. Penyusunan algoritma pemrograman pada tahap ini bertujuan untuk mentransformasikan model fisik tangki ke dalam bentuk matematis yang dapat dianalisis serta digunakan pada perangkat lunak simulasi. Langkah-langkah dalam algoritma ini mencakup inisialisasi sistem, pendefinisian parameter fisik, konversi persamaan *state-space* ke bentuk fungsi alih, hingga verifikasi melalui simulasi. Hasil dari tahap ini menghasilkan model *transfer function* yang menjadi dasar bagi perancangan pengendali adaptif maupun konvensional. langkah berikutnya adalah mengubahnya ke dalam representasi fungsi alih (*Transfer Function*) yang dapat digunakan dalam perancangan pengendali MRAC, model dalam bentuk *state-space* perlu dikonversi ke bentuk fungsi alih (*transfer function*) [42]. Konversi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan umum:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (3.3)$$

Pada penelitian ini, dilakukan penurunan model matematis untuk sistem *storage tank* dengan terlebih dahulu mendefinisikan variabel-variabel yang digunakan. Berdasarkan persamaan (3.4), diperoleh persamaan umum yang merepresentasikan dinamika sistem. Selanjutnya, *Transformasi Laplace* diaplikasikan pada persamaan (2.31) untuk membentuk fungsi alih. Data parameter yang telah diperoleh dikumpulkan dan disubstitusikan ke dalam model matematis tersebut untuk dilakukan pengujian menggunakan perangkat lunak MATLAB. Proses pengujian diawali dengan memasukkan nilai numerik dari tabel 2.1. Berdasarkan data parameter pada Tabel 2.1, diameter tangki diketahui sebesar $d = 1 \text{ m}$, dengan demikian, luas penampang tangki dapat dihitung 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.

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} 1^2 \approx 0.785 m^2 \quad (3.4)$$

Nilai konstanta aliran keluar dihitung sebagai:

$$c = \frac{1.8}{90} \sqrt{0.6} \approx 0.0154919 \quad (3.5)$$

Selanjutnya, dari persamaan (2.20) diubah ke dalam bentuk *transfer function* dan juga memasukkan parameter yang terdapat pada tabel 2.1.

$$f(x(t)) = -\frac{0.0154919}{2(0.785)\sqrt{0.75}} h(t) + \frac{1}{0.785} \cdot 0.4 m^2 / s \quad (3.6)$$

Maka:

$$f(x(t)) = -0.01139 \sqrt{h(t)} + 1.273 F_i(t) \quad (3.7)$$

Persamaan (3.7) menunjukkan bahwa perubahan ketinggian tangki $h(t)$ dipengaruhi oleh dua komponen, yaitu aliran keluar sebanding dengan $\sqrt{h(t)}$, serta aliran masuk yang berbanding lurus dengan laju masukan $F_i(t)$. Namun, masih berbentuk nonlinear oleh karena itu, dilakukan proses linearisasi pada titik ketinggian tangki $h = 0.75 m$ sehingga persamaan dapat menjadi sistem orde satu yang linear.

$$\frac{dh(t)}{dt} = -kh(t) + bF_i(t) \quad (3.8)$$

Dimana:

k = konstanta redaman (berhubungan dengan laju aliran keluar),

b = konstanta penguatan (berhubungan dengan laju aliran masuk).

Dengan parameter k dan b yang diperoleh dari penyederhanaan konstanta dan nilai parameternya sebagai berikut:

$$k = 0.01139, \quad b = 1.273 \quad (3.9)$$

Selanjutnya, dengan mensubstitusikan nilai k dan b ke dalam persamaan (3.9), diperoleh:

$$\frac{dh(t)}{dt} - 0.01139 h(t) + 1.273 F_i(t) \quad (3.10)$$

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.

Persamaan diferensial (3.11) kemudian dipindah ruas menjadi:

$$\frac{dh(t)}{dt} + 0.01139 h(t) = 1.273F_i(t) \quad (3.11)$$

Kemudian dilakukan *Transformasi Laplace* untuk merubah domain waktu (t) ke domain frekuensi (s), sehingga diperoleh:

$$sH(s) + 0.01139H(s) = 1.273F_i(s) \quad (3.12)$$

Selanjutnya persamaan (3.13) dikali silang dan dapatlah bentuk fungsi alih (*transfer function*) dari perbandingan antara keluaran $H(s)$ dan masukan $F_i(s)$:

$$\frac{H(s)}{F_i(s)} = \frac{1.273}{s + 0.01139} \quad (3.13)$$

Dengan demikian, fungsi alih sistem *storage tank* hasil linearisasi diperoleh:

$$G_p(s) = \frac{1.273}{s + 0.01139} \quad (3.14)$$

Fungsi alih ini menunjukkan bahwa sistem *storage tank* dapat direpresentasikan sebagai sistem orde satu dengan konstanta penguatan sebesar 1.273 dan konstanta waktu

$$\frac{1}{0.01139} \approx 87.796 \text{ detik.}$$

3.3.2 Model Referensi MRAC $G_m(s)$

Model referensi pada penelitian ini dirancang dalam bentuk sistem orde satu. Sistem orde satu dipilih karena memiliki representasi paling sederhana dalam mendeskripsikan respon dinamik yang stabil, sekaligus memudahkan proses adaptasi parameter pada pengendali MRAC, berbeda dengan sistem orde dua yang dapat menimbulkan *overshoot* dan osilasi. Persamaan umum sistem orde satu dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.15)$$

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.

Parameter τ berhubungan langsung dengan *settling time* (t_s), yaitu waktu yang dibutuhkan keluaran sistem untuk mencapai $\pm 2\%$ dari nilai keadaan tunak. Berdasarkan literatur, *settling time* untuk sistem orde satu dapat diperkirakan dengan hubungan:

$$t_s \approx 4\tau \quad (3.16)$$

Dengan demikian, apabila ditentukan target *settling time* sebesar $t_s = 20$ menit, maka nilai konstanta waktu yang digunakan adalah:

$$\tau = \frac{t_s}{4} = 5 \quad (3.17)$$

Sehingga diperoleh model referensi orde satu:

$$G_m(s) = \frac{1}{5s + 1} \quad (3.18)$$

3.3.3 Merumuskan Hukum Kendali

Hukum kendali didefinisikan untuk mengatur agar keluaran sistem dapat mengikuti perilaku model referensi secara adaptif. Pada sistem orde satu, hukum kendali dinyatakan dalam bentuk hubungan linier antara sinyal referensi dan parameter adaptif, yaitu:

$$u(t) = \theta(t)r(t) \quad (3.19)$$

dengan:

$u(t)$ sinyal kendali yang diberikan kepada *plant*

$r(t)$ input referensi,

$y(t)$ keluaran *plant*,

$\theta(t)$ parameter adaptif

Pada sistem orde satu seperti *storage tank*, hanya diperlukan satu parameter adaptif karena keluaran sistem bergantung langsung terhadap sinyal masukan tanpa adanya elemen diferensial orde tinggi. Dengan demikian, parameter adaptif $\theta(t)$ digunakan untuk menyesuaikan penguatan antara input referensi dan keluaran sistem agar *plant* dapat meniru respon model referensi. Nilai $\theta(t)$ akan berubah secara otomatis berdasarkan adaptasi yang ditetapkan untuk meminimalkan *error* pelacakan antara keluaran *plant* dan model referensi.

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.

3.3.4 Aturan MIT RULE

Perancangan hukum adaptasi, digunakan pendekatan MIT Rule (*Massachusetts Institute of Technology Rule*) yang secara prinsip bertujuan untuk meminimalkan *error* antara keluaran sistem dengan keluaran model referensi yang terdapat pada persamaan 2.23, dimana $y(t)$ adalah keluaran *plant* dan $y_m(t)$ adalah keluaran model referensi. Untuk mencapai kondisi dimana $e(t)$ mendekati nol, digunakan fungsi kriteria berbentuk kuadrat dari *error* yang bisa dilihat pada persamaan 2.24. Sehingga fungsi ini dipilih karena bersifat positif dan memberikan bobot lebih besar pada *error* yang berukuran besar, sehingga secara matematis memudahkan proses optimasi. Prinsip dasar MIT Rule adalah melakukan penyesuaian parameter adaptif $\theta(t)$ dengan arah yang berlawanan terhadap gradien fungsi kriteria pada persamaan 2.25 dengan γ adalah konstanta positif yang disebut gain adaptasi, yang berfungsi mengatur kecepatan konvergensi parameter. Untuk *plant* yang telah diperoleh dari hasil linearisasi sistem *storage tank*, fungsi alih dinyatakan sebagai:

$$G_p(s) = \frac{1.273}{s + 0.01139} \quad (3.20)$$

Sehingga persamaan *plant* terkontrol dari persamaan 3.19 :

$$\dot{y}(t) = -0.01139 y(t) + 1.273 \theta(t) r(t) \quad (3.21)$$

Untuk memperoleh hukum adaptasi, diperlukan turunan sensitivitas keluaran terhadap parameter θ . Dengan diferensiasi, diperoleh:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = \frac{\partial y}{\partial \theta} = 1.273 r(t) \quad (3.22)$$

Sehingga hukum adaptasi parameter adalah:

$$\dot{\theta}(t) = -1.273 \gamma e(t) r(t) \quad (3.23)$$

Dalam pendekatan ini, sinyal kendali tidak hanya bergantung pada input referensi, tetapi juga memperhitungkan keluaran *plant*. Dengan demikian, terdapat parameter adaptif θ yang diperbarui secara simultan. Parameter θ berfungsi menyesuaikan penguatan sinyal referensi agar keluaran *plant* mampu melacak model referensi. Aturan pembaruan kedua parameter adaptif mengikuti prinsip MIT Rule, sehingga setiap parameter diperbarui secara

proporsional terhadap *error* pelacakan dan sensitivitas *error* terhadap parameter tersebut.

Penerapan hukum adaptasi MIT *Rule* pada penelitian ini, konstanta γ (*adaptation gain*) berperan sebagai pengatur laju adaptasi parameter pengendali γ menentukan seberapa cepat parameter adaptif berubah menanggapi *error* antara keluaran *plant* dan keluaran model referensi. Untuk konfigurasi yang digunakan *plant* orde satu dan model referensi orde satu pemilihan γ harus mempertimbangkan keseimbangan antara kecepatan penyesuaian dan kestabilan transien. Nilai γ yang terlalu besar akan mempercepat adaptasi tetapi cenderung memicu *overshoot* dan osilasi, sedangkan nilai yang terlalu kecil memperlambat konvergensi sehingga tracking menjadi lamban. Berdasarkan pengujian simulasi MATLAB/Simulink pada sistem *storage tank* dengan *plant* orde 1 dan model referensi orde 1, diperoleh bahwa $\gamma = 2000$ memberikan kompromi terbaik. Pada nilai ini sistem menunjukkan pengurangan osilasi transien dibanding γ yang lebih besar ataupun yang lebih kecil, sekaligus mempertahankan laju konvergensi yang memadai sehingga *steady-state error* mendekati nol.

Langkah selanjutnya adalah merancang sistem pada penelitian ini ditambahkan metode MRAC. Dengan penerapan MRAC, parameter kendali dapat menyesuaikan secara adaptif terhadap variasi kondisi sistem, sehingga respon yang dihasilkan lebih optimal dan lebih *robust*. Blok-blok tersebut telah disusun secara sistematis berdasarkan rancangan awal yang mengacu pada parameter hasil pemodelan, sehingga pengendali dapat bekerja secara optimal dalam menjaga level cairan pada *storage tank*. Daftar lengkap blok yang digunakan beserta fungsi masing-masing disajikan pada tabel 3.1.

Algoritma yang digunakan pada rangkaian *storage tank* dengan pengendali MRAC ini dirancang untuk mengatur level cairan secara adaptif. Proses dimulai dengan sinyal referensi yang menjadi acuan level cairan yang diinginkan. Sinyal ini dibandingkan dengan keluaran sistem aktual, menghasilkan *error* yang digunakan untuk penyesuaian parameter adaptif. MRAC berfungsi mengestimasi parameter sistem melalui blok *model reference* dan mekanisme pembaruan parameter menggunakan hukum adaptasi berbasis *gradient*. Dengan integrasi ini, sistem mampu beradaptasi terhadap perubahan dinamika proses dan gangguan eksternal, sekaligus mempertahankan performa pengendalian yang optimal sesuai spesifikasi yang telah ditentukan. Berikut ini adalah algoritma pemrograman sistem dengan pengendali MRAC.

Tabel 3.3 Algoritma Pemrograman dengan pengendalian MRAC

Algoritma Pemrograman Sistem <i>Storage Tank</i> dengan Pengendali MRAC	
1.	Inisialisasi program dengan membersihkan variabel, <i>command window</i> , dan grafik (perintah <code>clc; clear; close all;</code>).
2.	Menetapkan waktu awal (T_{st}), waktu akhir (T_{end}), dan interval waktu atau <i>sampling time</i> (T_s) untuk membentuk vektor waktu T yang digunakan pada simulasi.
3.	Mendefinisikan sinyal masukan (<i>input step</i>) yang merepresentasikan nilai referensi atau <i>setpoint</i> ketinggian cairan dalam tangki, $u = 0.75$ m.
4.	Menentukan parameter-parameter fisik <i>storage tank</i> , meliputi diameter tangki (D), konstanta aliran (c), luas penampang (A), serta tinggi awal cairan (h_0). Parameter ini digunakan untuk membentuk model matematis sistem.
5.	Menurunkan fungsi alih (<i>transfer function</i>) sistem <i>storage tank</i> dari persamaan matematis yang telah diperoleh, sehingga didapatkan model dinamis <i>plant</i> dalam domain Laplace.
6.	Menentukan <i>reference model</i> berupa sistem orde satu dengan parameter penguatan statis (K) dan konstanta waktu (τ), sehingga fungsi alih model referensi dinyatakan pada persamaan 3.15. Model ini menjadi acuan yang harus diikuti oleh keluaran sistem.
7.	Menetapkan nilai awal parameter adaptif $\theta(0)$ serta laju adaptasi (γ). Nilai $\theta(0)$ biasanya dimulai dari nol, sedangkan γ ditentukan melalui proses <i>tuning</i> agar sistem memiliki kecepatan adaptasi yang baik tanpa kehilangan stabilitas.
8.	Menyusun hukum adaptasi MRAC dalam bentuk persamaan pembaruan parameter adaptif seperti pada persamaan 2.27
9.	Membangun diagram <i>Simulink</i> yang terdiri dari blok <i>plant</i> , blok model referensi, blok perhitungan <i>error</i> , hukum adaptasi (update θ), serta blok pembentuk sinyal kendali
10.	Menjalankan simulasi menggunakan file model <i>Simulink</i> MRAC_storagetank.slx dengan waktu simulasi yang telah ditentukan.
11.	Menampilkan grafik perbandingan antara keluaran <i>plant</i> $y(t)$ dan keluaran model referensi $y_r(t)$ untuk mengevaluasi kinerja <i>tracking</i> serta kestabilan sistem.
End	

Algoritma pengendalian pada sistem *storage tank* berbasis MRAC pada prinsipnya dikembangkan untuk memastikan keluaran sistem mampu mengikuti dinamika model

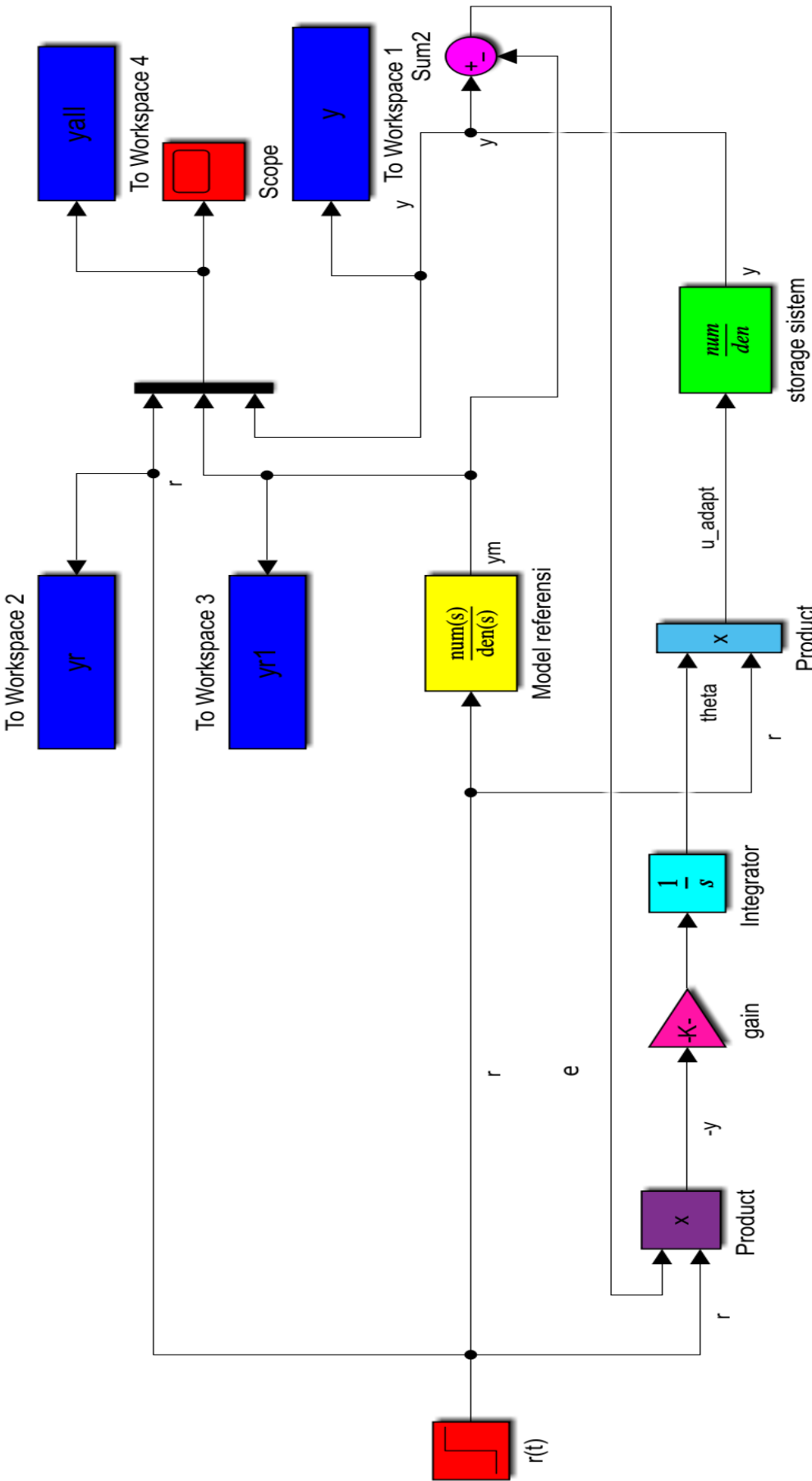
referensi secara adaptif. Berbeda dengan kendali konvensional yang bersifat statis, MRAC memiliki kemampuan memperbarui parameter kendali secara hukum adaptasi yang bersumber dari perbedaan antara respon *plant* dan model acuan. Dengan demikian, pengendali ini tetap mampu menjaga kestabilan serta mempertahankan kinerja meskipun sistem mengalami ketidakpastian parameter maupun gangguan dari luar.

Dalam penerapannya, model referensi yang digunakan pada sistem *storage tank* umumnya berbentuk sistem orde satu dengan rasio redaman dan frekuensi alami tertentu, sehingga dapat menggambarkan respon ideal yang diinginkan. Ketika terdapat deviasi antara keluaran *plant* dan keluaran model, hukum adaptasi bekerja untuk menyesuaikan parameter kendali sehingga respon *plant* bergerak mengikuti pola model referensi tersebut. Hal ini memungkinkan sistem menghasilkan pengendalian yang lebih stabil, cepat, dan presisi dalam mempertahankan level cairan di dalam tangki.

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 3.4 Rangkaian Simulink Sistem Storage Tank dengan pengendali MRAC

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.

Penerapan algoritma MRAC menghasilkan struktur kendali tertutup adaptif, dimana keluaran *storage tank* dibandingkan dengan keluaran model referensi. Selisih keduanya dijadikan sebagai sinyal *error* yang kemudian digunakan untuk memperbarui parameter pengendali secara berkelanjutan. Dengan cara ini, sistem memperoleh manfaat sekaligus, yaitu kemampuan peningkatan ketahanan (*robustness*) melalui proses adaptasi MRAC.

3.4 Desain PID

Kontroler PID merupakan salah satu pengendali yang paling umum digunakan karena memiliki struktur yang sederhana namun mampu meningkatkan kualitas respon sistem. Aksi PID terdiri dari tiga komponen, yaitu proportional (P) yang berfungsi mempercepat respon, integral (I) yang menghilangkan *error* keadaan tunak, serta derivative (D) yang meningkatkan redaman untuk mengurangi *overshoot* dan osilasi. Pada penelitian ini, kontrol PID dijadikan sebagai pembanding dengan pengendali MRAC. Secara matematis, bentuk umum pengendali PID dalam domain waktu yaitu :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.24)$$

lalu dalam domain Laplace ialah:

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad (3.25)$$

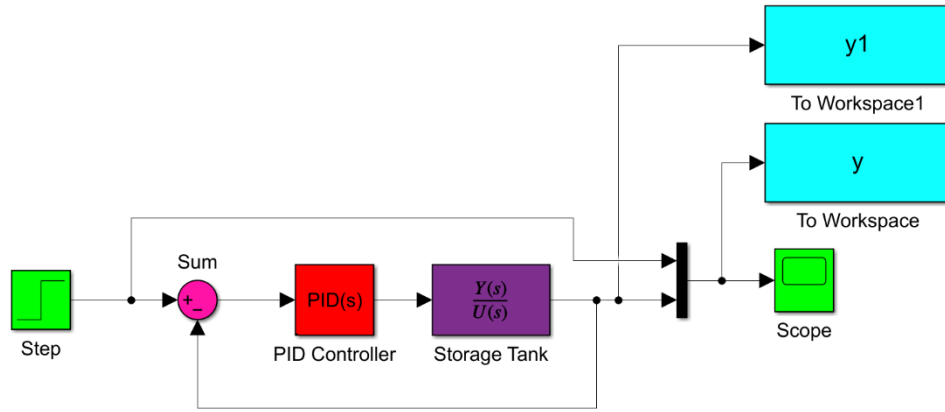
Nilai K_p , K_i , dan K_d masing-masing merepresentasikan penguatan untuk aksi proporsional, integral, dan derivatif. Penyetelan parameter PID dilakukan menggunakan metode tuning pada MATLAB hingga diperoleh kombinasi nilai yang memberikan kinerja paling optimal, meliputi waktu naik yang cepat, *overshoot* yang rendah, serta *error* keadaan tunak yang sangat kecil. Melalui proses tuning, diperoleh parameter PID sebagai berikut:

Tabel 3.1 Parameter PID hasil tuning

Parameter	Nilai
K_p	0.352406249459202
K_i	0.0443975783185454
K_d	0.192142644012153

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 parameter yang telah diperoleh, langkah selanjutnya adalah membangun atau menyusun model sistem *storage tank* yang dilengkapi dengan pengendali PID seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.5 Rangkaian *Simulink Sistem Storage Tank* dengan pengendali PID

Penerapan kontrol PID dilakukan di lingkungan Simulink dengan memanfaatkan blok PID Controller. Blok ini diintegrasikan dengan model matematis *storage tank* dalam konfigurasi *loop* tertutup, di mana sinyal *error* dihitung sebagai selisih antara nilai referensi tegangan dan keluaran sistem. Nilai parameter K_p , K_i dan K_d yang telah ditetapkan dimasukkan ke dalam blok PID, kemudian simulasi dijalankan untuk memperoleh respon sistem yang akan digunakan sebagai acuan dalam menilai kinerja pengendalian.

Tabel 3.5 Desain PID pada sistem *storage tank*

Algoritma Pemrograman Sistem <i>Storage Tank</i> dengan Pengendali PID	
Inisialisasi:	Tentukan parameter kontrol PID K_p , K_i , K_d , <i>time start</i> , <i>time sampling</i> , <i>time end</i> , dan indeks waktu.
Mulai	Definisikan model matematis sistem <i>storage tank</i> dalam bentuk fungsi alih sesuai persamaan 3.14. Definisikan <i>error system</i> untuk mejadi bahan <i>input</i> untuk PID. Rancang kontroler PID menggunakan “PID Controller” Hubungkan <i>input step</i> ke PID Controller dan masukkan nilai hasil tuning pada parameter PID.

End

Jalankan simulasi untuk memperoleh *scope* berupa hasil respon sistem PID dengan *storage tank*.

Jika hasil *scope* mencapai *setpoint* maka simpan data hasil grafik untuk menjadi acuan untuk menentukan nilai PID.

Dalam penentuan parameter kontrol PID pada penelitian ini digunakan metode tuning otomatis MATLAB, yang memungkinkan proses penalaan dilakukan secara sistematis dan efisien tanpa perlu melakukan pengaturan manual yang berulang. Melalui fitur *PID Tuner*, MATLAB secara otomatis melakukan *linearization* terhadap model *storage tank*, kemudian menghitung nilai parameter K_p , K_i dan K_d yang optimal berdasarkan karakteristik dinamis sistem.

Proses tuning otomatis ini bekerja dengan mencari kombinasi parameter yang memenuhi kriteria performansi tertentu, seperti *rise time* yang cepat, *overshoot* yang rendah, serta *error* keadaan tunak mendekati nol. MATLAB juga menyediakan kemampuan untuk menyesuaikan tingkat *robustness* dan *transient response*, sehingga parameter yang dihasilkan tidak hanya memberikan respon cepat tetapi juga tetap stabil terhadap variasi kondisi sistem. Dengan menggunakan metode tuning otomatis, proses penalaan menjadi lebih akurat, konsisten, dan mudah direproduksi dibandingkan pendekatan heuristik manual. Hasil tuning dari MATLAB kemudian diadopsi sebagai parameter PID yang digunakan dalam simulasi sistem *storage tank*.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian melalui simulasi, pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) telah berhasil dirancang untuk pengendalian level pada sistem *storage tank*. Pengendali MRAC mampu mengarahkan keluaran sistem agar mengikuti model referensi yang telah ditetapkan, sehingga level cairan dapat dipertahankan sesuai dengan nilai yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme adaptasi pada MRAC dapat bekerja dengan baik dalam menghadapi dinamika sistem yang berubah.

Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa pengendali MRAC mampu beradaptasi terhadap adanya gangguan dan ketidakpastian pada sistem, dengan respon yang stabil dan kesalahan keadaan tunak yang relatif kecil. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk mendesain pengendali MRAC dalam mengendalikan level pada sistem *storage tank* telah tercapai.

5.2 Saran

Pengembangan penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan kualitas pengendalian melalui pengayaan skenario simulasi, khususnya dengan penambahan mekanisme pendukung pada struktur MRAC seperti penyaringan sinyal atau pendekatan *observer* dalam lingkungan simulasi. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan ketahanan sistem terhadap *noise* pengukuran, memperbaiki akurasi *tracking*, serta menurunkan nilai *overshoot* dan *error steady state* pada berbagai kondisi gangguan yang diuji secara numerik.

Penelitian lanjutan juga dapat diarahkan pada eksplorasi variasi parameter adaptasi MRAC dan tingkat gangguan yang lebih luas dalam simulasi, sehingga pengaruh perubahan parameter terhadap kestabilan dan performansi sistem dapat dianalisis secara lebih komprehensif. Selain itu, perbandingan kinerja MRAC dengan metode kendali adaptif atau robust lainnya pada *platform* simulasi yang sama dapat dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai keunggulan dan keterbatasan masing-masing pendekatan dalam pengendalian level *storage tank*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Alida and A. P. Anjastara, "Penentuan Waktu Pemakaian Storage Tank Melalui Analisa Data Hasil Pengukuran Ultrasonic Thickness Pada Tangki Tep-028 Di Stasiun Pengumpul Jemenang PT Pertamina Ep Asset 2 Field Limau," *Jurnal Teknik Patra Akademika*, vol. 11, no. 02, pp. 26-32, 2020.
- [2] A. A. Permana, B. Yuwono, and G. G. R. Gunadi, "Proses Pengujian Material Pada Pembuatan Storage Tank Kapasitas 250 BBL yang Mengacu Pada Bill of Material (BOM) di PT Mudalaya Energy Indonesia," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, 2023, no. 1, pp. 868-877.
- [3] R. A. Widyowanti and M. P. Bimantio, "Evaluasi Kinerja Storage Tank (Tangki Timbun) di PT. XYZ Sumatera Utara, menggunakan Metode Statistical Proces Control (SPC)," *AGROFORETECH*, vol. 2, no. 3, pp. 1543-1555, 2024.
- [4] Y. K. Putra and O. Yuliani, "Model Reference Adaptive Control Untuk Pengaturan Proses Tinggi Permukaan Shperical Tank," *JMTE (Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro)*, vol. 4, no. 2, pp. 40-49, 2023.
- [5] Z. AZRA, "Desain Pengendalian Level Pada Couple Tank Dengan Pole Placement-Fuzzy Sugeno," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.
- [6] Q. A. Mahmood, A. T. Nawaf, and S. A. Mohamedali, "Simulation and Performance Of Liquid Level Controllers For Linear Tank," *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, vol. 82, no. 3, 2020.
- [7] F. A. Nugroho, P. D. Permatasari, and H. E. G. Prasetya, "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Level Pada Tangki Penyimpanan Menggunakan Degree Of Freedom Analysis Dengan Tunning PID Berdasarkan Metode Cohen-Coon," *Setrum: Sistem Kendali-Tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer*, vol. 9, no. 2, 2020.
- [8] R. I. Putri, H. M. Setiawan, B. Setiawan, and S. H. Wibowo, "Desain Sistem Kontrol Level Cairan Dengan Metode PID Berbasis PLC," *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*, vol. 6, no. 2, pp. 195-209, 2022.
- [9] I. Hajar, D. J. Damiri, and M. T. B. Sitorus, "Automatic Water Level and Pressure Control System Prototype Design Using Programmable Logic Controller and Human Machine Interface," *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 108-118, 2023.
- [10] H. Shahid *et al.*, "Design of a fuzzy logic based controller for fluid level application,"

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

- [11] K. Montaluisa, L. Vargas, J. Llanos, and P. Velasco, "Model Predictive Control for Level Control of a Conical Tank," *Processes*, vol. 12, no. 8, p. 1702, 2024.
- [12] V. Chaudhari, B. Tamhane, and S. Kurode, "Robust liquid level control of quadruple tank system-second order sliding mode approach," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 1, pp. 7-12, 2020.
- [13] S. Zarghoon *et al.*, "Full-state feedback LQR with integral gain for control of induction heating of steel billet," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 55, p. 101721, 2024.
- [14] D. Gupta, A. Kumar, and V. K. Giri, "Investigations on MIT and Lyapunov Rule-Based Modified MRAC for Noninteracting and Interacting Two-Tank Coupled Systems," *FME Transactions*, vol. 52, no. 2, 2024.
- [15] S. Selvaraj, R. Thiyagarajan, and T. Rajavenkatesan, "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.
- [16] P. Zhou and X. Gao, "Model Reference Adaptive Control Based on Transformed Scalar Error for the Three-Tank Level Control System," in *Chinese Intelligent Systems Conference*, 2019: Springer, pp. 679-688.
- [17] Ö. Aslan, A. Altan, and R. Hacıoğlu, "Level control of blast furnace gas cleaning tank system with fuzzy based gain regulation for model reference adaptive controller," *Processes*, vol. 10, no. 12, p. 2503, 2022.
- [18] P. G. G. Keerthana and J. Gnanasoundharam, "Comparison of PI controller, model reference adaptive controller and fuzzy logic controller for coupled tank system," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 12, pp. 1-5, 2016.
- [19] D. Cartes and L. Wu, "Experimental Evaluation Of Adaptive Three-Tank Level Control," *ISA transactions*, vol. 44, no. 2, pp. 283-293, 2005.
- [20] D. Gupta, A. Kumar, and V. K. Giri, "Effect of adaptation gain and reference model in MIT and Lyapunov rule-based model reference adaptive control for first-and second-order systems," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 46, no. 9, pp. 1635-1654, 2024.
- [21] Y. N. Adhe, P. S. Maria, H. Zarory, and J. ST, "Analisa Pengendalian Level Berbasis MRAC-PID pada Tangki Hotwell Kondensor," *CYCLOTRON*, vol. 5, no. 2, 2022.

- [22] J. Li and C. Yang, "Design Issue Analysis and Operation Effect Evaluation of Large-Scale Storage Tank," *Water*, vol. 16, no. 8, p. 1097, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/8/1097>.
- [23] S. Montazeri, M. Elyasi, and A. Moradpour, "Investigating the Energy Absorption, SEA and Crushing Performance Of Holed and Grooved Thin-Walled Tubes Under Axial Loading With Different Materials," *Thin-Walled Structures*, vol. 131, pp. 646-653, 2018/10/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.07.024>.
- [24] J. M. Gallego, J. Michels, and C. Czaderski, "Influence Of The Asphalt Pavement on the Short-Term Static Strength and Long-Term Behaviour Of RC Slabs Strengthened With Externally Bonded CFRP strips," *Engineering Structures*, vol. 150, pp. 481-496, 2017/11/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.063>.
- [25] N. Nippatla and L. Philip, "Electrocoagulation-Floatation Assisted Pulsed Power Plasma Technology for the Complete Mineralization of Potentially Toxic Dyes and Real Textile Wastewater," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 125, pp. 143-156, 2019/05/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.012>.
- [26] M. Chaithra, A. Krishnamoorthy, and A. R. Avinash, "A Review on the Modelling Techniques of Liquid Storage Tanks Considering Fluid–Structure–Soil Interaction Effects with a Focus on the Mitigation of Seismic Effects through Base Isolation Techniques," *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 11040, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/11040>.
- [27] S. P. Sari, "Deteksi Kesalahan Menggunakan Luanberger Observer Pada Sistem Storage Tank," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau 2025.
- [28] D. Mursyitah, A. Faizal, H. Zarory, and S. P. Sari, "Fault Detection In Storage Tank System Using Luenbeger Observer (LO): Simulation-Based Validation," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, pp. 135-142, 2025.
- [29] Y. Yudhi Fariztian, "Performansi Luenberger Observer dalam Mengestimasi Konsentrasi pada Continuius Stirred Tank Reactor (CSTR)," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2024.
- [30] P. Ongga, Y. Sanwaty, F. S. Rondonuwu, and W. H. Kristiyanto, "Konsepsi mahasiswa tentang tekanan hidrostatik," in *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, Dan Penerapan MIPA*, 2009, pp. 181-185.
- [31] I. F. Putra, M. Syafwan, M. R. Helmi, and A. Nazra, "Bentuk Eksplisit Rumus Beda Maju Dan Beda Mundur Untuk Turunan Ke-N Dengan Orde Ketelitian Ke-N

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

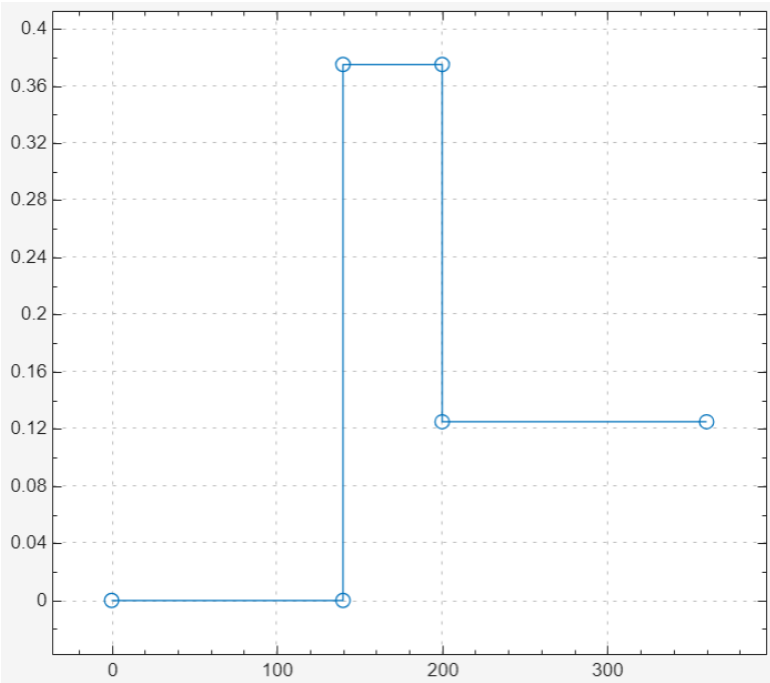
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- Berdasarkan Deret Taylor," *Jurnal Lebesgue: Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika, Matematika dan Statistika*, vol. 4, no. 3, pp. 1675-1686, 2023.
- [32] A. B. R. W. Ardam, "Pengendali Proportional Integral (PI) Berbasis Model Reference Adaptive Control (MRAC) untuk Pengendalian Motor Brushless Direct Current (BLDC)," Universitas Hasanuddin, 2023.
- [33] N. Gemeli, "Desain Pengendali Model Reference Adaptive Control (MRAC) Dengan Kombinasi PID Untuk Mengendalikan Tekanan Pada Modul Training Pressure Process Rig 38-714," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2018.
- [34] I. Barkana, "Adaptive Control? But Is So Simple! A Tribute To the Efficiency, Simplicity And Beauty Of Adaptive Control," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 83, no. 1, pp. 3-34, 2016.
- [35] G. L. S. S. Vius, "Desain Pengendali Model Reference Adaptive Control (MRAC) - PID Untuk Mengendalikan Sistem Suspensi Seperempat Kendaraan," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2019.
- [36] M. Muhammad, "Desain Kendali Hybrid Model Reference Adaptive Control (MRAC) - PID Untuk Mengendalikan Automatic Voltage Regulator," Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, 2023.
- [37] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Pearson / Prentice Hall., 2009–2010.
- [38] A. Tjolleng, *Pengantar Pemrograman Matlab*. Elex Media Komputindo, 2017.
- [39] I. T. Yuniastuti, "Pemrograman MATLAB Aplikasi Pada Bidang Elektro," ed: UNIPMA Pres, 2021.
- [40] B. Cahyono, "Penggunaan Software Matrix Laboratory (MATLAB) dalam Pembelajaran Aljabar Linier," *Jurnal Phenomenon*, vol. 1, no. 1, pp. 45-62, 2013.
- [41] D. Mursyitah, A. Faizal, and S. P. Sari, "Algorithm Design and Programming the Luenberger Observer for level estimation in a Storage Tank System," *Indonesian Journal of Informatic Research and Software Engineering (IJIRSE)*, vol. 5, no. 1, pp. 79-87, 2025.
- [42] B. Porter, "Transfer Function Matrices and State-Space Representations Of Multivariable Linear Systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 2, no. 4, pp. 435-441, 1972/01/01 1972, doi: 10.1080/00207727208920210.

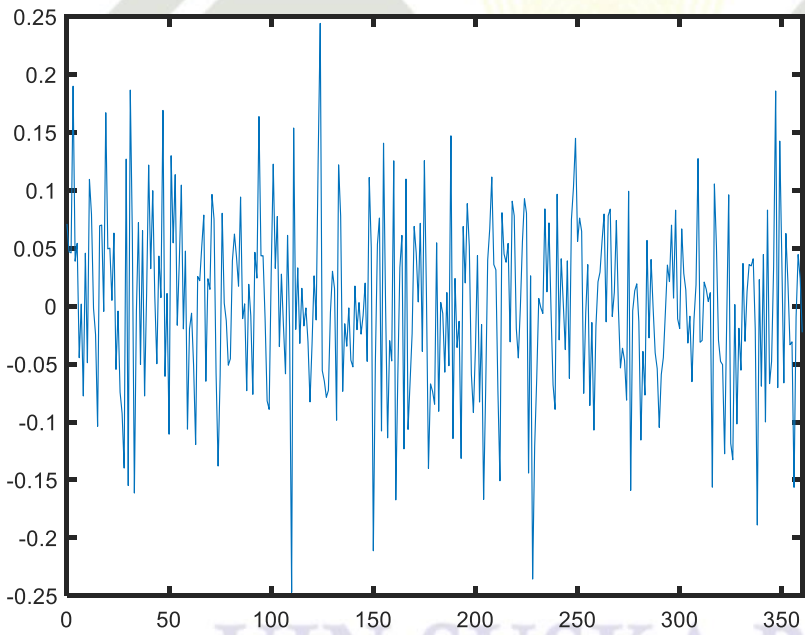
Gambar 3 Rangkaian MRAC yang ditambahkan gangguan *Noise* 6%

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.

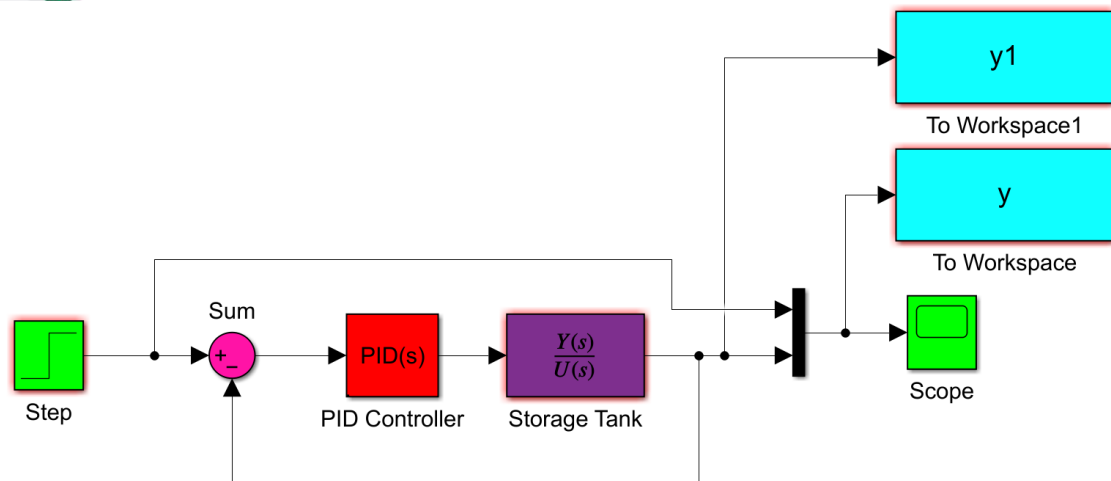


Gambar 4 gangguan (*Disturbance*) waktu 0-360 menit

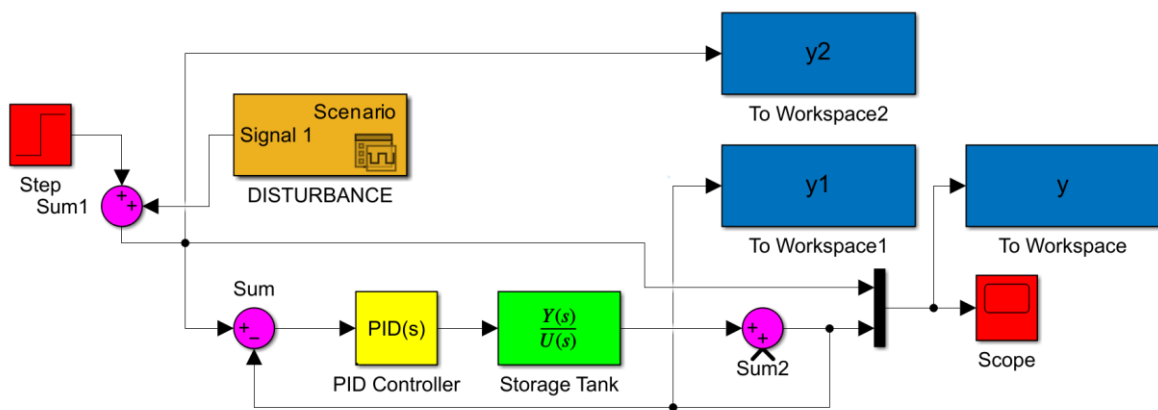


Gambar 5 *Noise* Pengukuran 6%

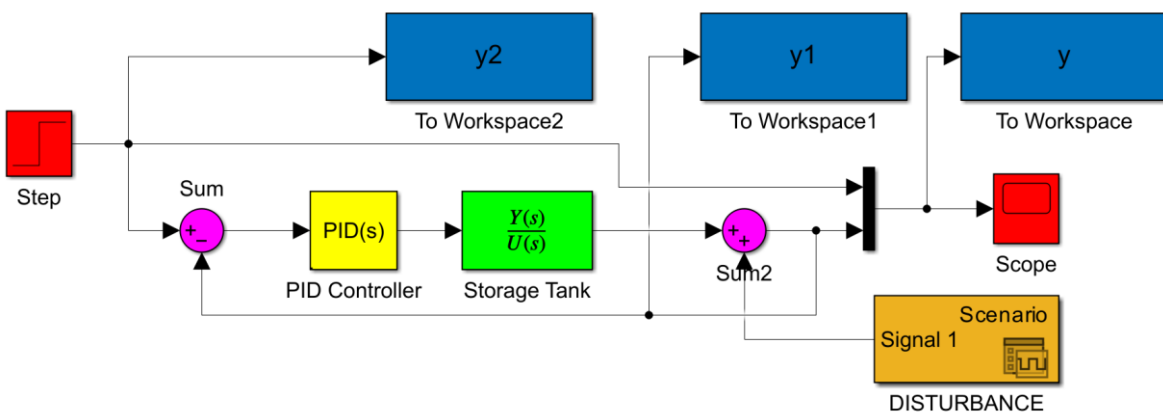
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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



Gambar 6 Rangkaian sistem *storage tank* dengan pengendali PID



Gambar 7 Rangkaian PID yang ditambahkan gangguan (*Disturbance*) pada *setpoint*



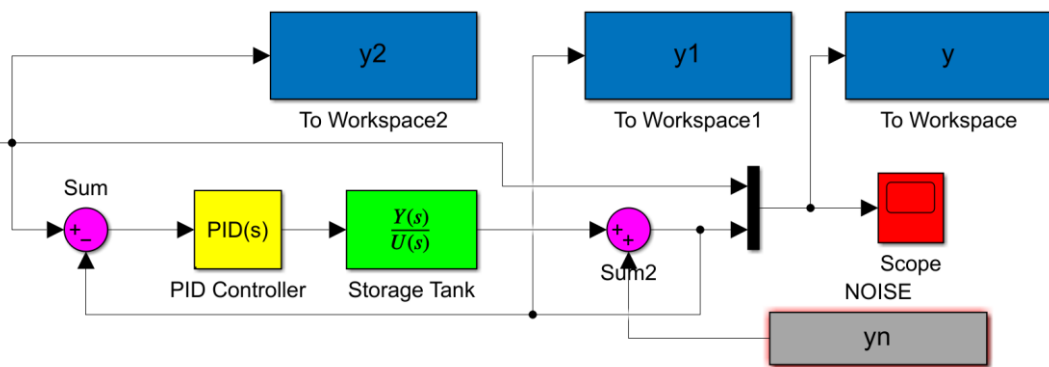
Gambar 8 Rangkaian PID yang ditambahkan gangguan (*Disturbance*) pada output

Hak Cipta Uinunggi Unga-unga

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

Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau



Gambar 8 Rangkaian PID yang ditambahkan gangguan *Noise* 6%

```
%% program storagetank system
clear all; close all; clc;

%% time
T_start = 0;
T_end = 360;
Ts = 1;
T=T_start:Ts:T_end;
step_time = 0;

%% kondisi sistem awal
init = 0;

%% parameter
d = 1;
h = 0.75;
ht = 1.2;
A = pi/4*d^2;
c = 1.8/sqrt(0.6)/60;
inp = 0.4;

%% matriks
A_1=[1/2*(-c/A/(sqrt(h)))];
B=[1/A];
C=[1];

%% panggil simulink
sim('Storage_Tank_openloop')
y_sys=y';

%% plot
plot(T,y_sys,'r','LineWidth',1)
xlim([0 360]);
grid;
% legend('Output Storage', 'Setpoint');
xlabel('Time (m)'); ylabel('level (m)'); grid on;
save datasistem
set(gca, 'LineWidth', 2.0);
```

Codingan Sistem *Storage Tank Open Loop*

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.

```
%% clear histori
clc; clear; close all;

%% Waktu simulasi
T_st = 0;
Ts = 1;
T_end = 360;
T = T_st : Ts : T_end;
u = 0.75;

%% Parameter
d = 1;
h = 0.75;
A = pi/4*d^2;
c = 1.8/sqrt(0.6)/60;
inp = 0.4;

%% matriks
A_1 = [1/2*(-c/A/(sqrt(h)))];
B = [1/A];
C = [1];
D = [0];

%% definisikan plant TF
[num, den] = ss2tf(A_1, B, C, D);
% num=[1.273];
% den=[1 0.01139];

%% Model Referensi orde 1
K = 1; % gain model referensi
ts_target = 20; % target settling time (menit)
tau = ts_target/4; % rumus tau = ts/4

num_m = K;
den_m = [tau 1];
Gm = tf(num_m, den_m);

%% Inisialisasi parameter adaptasi
gamma = 2000;

%% Simulink
% load datanoise.mat
% yn =timeseries(v,T);
sim("MRAC_storagetank_.slx");

%% Plot hasil
% return
figure()
plot(T, y, 'r', T, yr, 'k', T, yr1, 'y--','LineWidth', 1.5);
xlim([0 360]);
legend('Output Sistem Setelah Dikendalikan', 'Setpoint', 'Model Referensi');
xlabel('Time (m)'); ylabel('Level (m)'); grid on;
grid on
```

Codingan MRAC

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.

```

%% program storagetank system
clear all; close all; clc;
%% time
T_start = 0;
T_end = 360;
Ts = 1;
T=T_start:Ts:T_end;
step_time = 0;
u=0.75
%% kondisi sistem awal
init = 0;

%% parameter
d = 1;
h = 0.75;
ht = 1.2;
A = pi/4*d^2;
c = 1.8/sqrt(0.6)/60;
inp = 0.4;

%% matriks
A_1=[1/2*(-c/A/(sqrt(h)))];
B=[1/A];
C=[1];
D=[0]

%% definisikan plant TF
[num, den] = ss2tf(A_1, B, C, D);
%% panggil simulink
sim('Storage_Tank_PID')
%% ambil data dari timeseries
% T = y.Time;
% y = y.Data;

%% plot
figure()
plot(T, y(:,1), 'b--','LineWidth',1);
hold on;
plot(T, y(:,2), 'r','LineWidth',1);
xlim([0 360])
grid on
legend('Setpoint','Output Pengendali PID')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Level (m)')

grid;
% legend('Output Storage', 'Setpoint');
xlabel('Time (m)'); ylabel('level (m)'); grid on;

```

Codingan PID

- Hak Cipta Uinungu Uaang-Uaang**
1. Diarar gaurup sabagian atau seluruh karya tuils ini tanpa mearaturnkan dan mearbuarakan sumber.
 - a. Paurupaan hara untuk kapaurangan paaurikan, paaurian, paaurian karya ilmiah, paaurian laporan, paaurian kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Paurupaan arak mearukan kapaurangan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Diarar mearumarkan dan mearbuarakan sabagian atau seluruh karya tuils ini dalam bentuk apaaur tanpa izin UIN Suska Riau.

1	XX program storagetank system	48	ylabel('Level (m)')
2	clear all; close all; clc;	49	
3	XX time	50	%% PLOT ZONA
4	T_start = 0;	51	% --- Garis batas sesi ---
5	T_end = 360;	52	h1 = xline(140,'m--','LineWidth',1);
6	Ts = 0.01;	53	h2 = xline(280,'m--','LineWidth',1);
7	T=T_start:Ts:T_end;	54	set(h1,'HandleVisibility','off');
8	stop_time = 0;	55	set(h2,'HandleVisibility','off');
9	u=0.75;	56	
10		57	% --- Label sesi (posisi Y sesuaikan sendiri) ---
11	%% kondisi sistem awal	58	text(70, 0.5, 'I','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi I
12	init = 0;	59	text(170, 0.5, 'II','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi II
13		60	text(280, 0.5, 'III','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi III
14	%% parameter	61	hold(ax,'off');
15	d = 1;	62	
16	h = 0.75;	63	%% ----- INFO PARAMETER RESPON (MANUAL) -----
17	ht = 1.2;	64	% Semua parameter dihitung manual berbasis definisi teori
18	A = pi/4*d^2;	65	% Tr : rise time 10%-90%
19	c = 1.8/sqrt(0.6)/60;	66	% Td : time delay 50%
20		67	% Ts : settling time 45%
21	%% matriks	68	% ESS : steady-state error (rata-rata akhir)
22	A_1=[1/2*(-c/A/(sqrt(h)))];	69	% OVS : overshoot (% terhadap referensi)
23	B=[1/A];	70	
24	C=[1];	71	t = T;
25	D=[0];	72	segTime = [0 140; % Sesi I
26		73	141 200; % Sesi II
27	%% definisikan plant TF	74	280 360]; % Sesi III
28	[num, den] = ss2tf(A_1, B, C, D);	75	
29		76	segName = {'Sesi I','Sesi II','Sesi III'};
30	%% panggil simulink	77	
31	sim('Storage_Tank_PID_DISTURBANCE_INPUT.slx')	78	for k = 1:3
32		79	t0 = segTime(k,1);
33	%% plot	80	t1 = segTime(k,2);
34	figure()	81	
35	ax = axes;	82	% ----- Ambil data per sesi -----
36	hold(ax,'on');	130	end
37	set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.5);	131	
38	grid(ax,'on'); box(ax,'on');	132	% ----- OVERSHOOT -----
39		133	if Delta > 0 % step naik
40	plot(T, y(:,1), 'b--','LineWidth',1);	134	y_peak = max(y_seg);
41	hold on;	135	if y_peak > y_ss
42	plot(T, y(:,2), 'r','LineWidth',1);	136	Overshoot = (y_peak - y_ss)/abs(Delta)*100;
43	xlim([0 360]);	137	else
44	grid on;	138	Overshoot = 0;
45	legend('show','Location','southeast','FontSize',11);	139	end
46	legend('Setpoint','Output Pengendali PID')	140	else % step turun
47	xlabel('Time (s)')	141	Overshoot = 0; % tidak didefinisikan
83	idx = (t >= t0) & (t < t1);	142	end
84	t_seg = t(idx) - t0; % waktu lokal	143	
85	y_seg = y1(idx); % output	144	% ----- STEADY-STATE ERROR -----
86	r_seg = y2(idx); % referensi	145	idx_ss = t_seg >= 0.7*t_seg(end); % 30% akhir sesi
87		146	ESS = y_ss - mean(y_seg(idx_ss));
88	% ----- Nilai dasar -----	147	
89	y0 = y_seg(1);	148	% ----- OUTPUT -----
90	y_ss = mean(r_seg(end-10:end)); % referensi akhir	149	fprintf('=== %s (t = %.1f s s.d. %.1f s) ==\n', segName{k}, t0, t1);
91	Delta = y_ss - y0;	150	fprintf('Overshoot = %.3f %\n', Overshoot);
92		151	fprintf('Rise time (Tr) = %.3f s\n', Tr);
93	% ----- RISE TIME (10% - 90%) -----	152	fprintf('Settling time (Ts) = %.3f s\n', Ts);
94	y10 = y0 + 0.10*Delta;	153	fprintf('Time delay (Td) = %.3f s\n', Td);
95	y90 = y0 + 0.90*Delta;	154	fprintf('ESS = %.4f V\n\n', ESS);
96		155	end
97	k10 = find((y_seg - y10).*sign(Delta) >= 0, 1, 'first');	156	set(gca, 'LineWidth', 2.0);
98	k90 = find((y_seg - y90).*sign(Delta) >= 0, 1, 'first');		
99			
100	if isempty(k10) isempty(k90)		
101	Tr = NaN;		
102	else		
103	Tr = t_seg(k90) - t_seg(k10);		
104	end		
105			
106	% ----- TIME DELAY (50%) -----		
107	y50 = y0 + 0.50*Delta;		
108	k50 = find((y_seg - y50).*sign(Delta) >= 0, 1, 'first');		
109			
110	if isempty(k50)		
111	Td = NaN;		
112	else		
113	Td = t_seg(k50);		
114	end		
115			
116	% ----- SETTLING TIME (45%) -----		
117	band = 0.05*abs(Delta);		
118	err = abs(y_seg - y_ss);		
119			
120	idx_out = find(err > band);		
121	if isempty(idx_out)		
122	Ts = 0;		
123	else		
124	last_out = idx_out(end);		
125	if last_out == length(t_seg)		
126	Ts = NaN;		
127	else		
128	Ts = t_seg(last_out+1);		
129	end		

Codingan PID Disturbance Input

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tuils ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
2. Diarangi mengutip hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
3. Diarangi mengutip tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
4. Diarangi mengutip sebagian dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tuils ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Uinungni Unga-Unga

```

1  %% program storagetank system
2  clear all; close all; clc;
3  %% time
4  T_start = 0;
5  T_end = 360;
6  Ts = 0.01;
7  T_start:Ts:T_end;
8  stop_time = 0;
9  u=0.75;
10
11 %% kondisi sistem awal
12 init = 0;
13
14 %% parameter
15 d = 1;
16 h = 0.75;
17 ht = 1.2;
18 A = pi/4*d^2;
19 c = 1.8/sqrt(0.6)/60;
20
21 %% matriks
22 A_1=[1/2*(-c/A/(sqrt(h)))]];
23 B=[1/A];
24 C=[1];
25 D=[0];
26
27 %% definisikan plant TF
28 [num, den] = ss2tf(A_1, B, C, D);
29
30 %% panggil simulink
31 sim('STORAGE_TANK_PID_DISTURBANCE_OUTPUT.slx')
32
33 %% plot
34 figure()
35 ax = axes;
36 hold(ax,'on');
37 set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.5);
38 grid(ax,'on'); box(ax,'on');
39
40 tout = tout(1:size(y,1));
41
42 plot(tout, y(:,1), 'b--','LineWidth',1);
43 hold on;
44 plot(tout, y(:,2), 'r','LineWidth',1);
45 xlim([0 360]);
46 grid on
47 legend('show','Location','southeast','FontSize',11);
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140

```

```

48  legend('Setpoint','Output Pengendali PID')
49  xlabel('Time (s)')
50  ylabel('Level (m)')
51
52 %% PLOT ZONA
53 % --- Garis batas sesi ---
54 h1 = xline(140,'m--','LineWidth',1);
55 h2 = xline(200,'m--','LineWidth',1);
56 set(h1,'HandleVisibility','off');
57 set(h2,'HandleVisibility','off');
58
59 % --- Label sesi (posisi Y sesuaikan sendiri) ---
60 text(70, 0.5, 'I','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi I
61 text(170, 0.5, 'II','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi II
62 text(280, 0.5, 'III','FontSize',14,'FontWeight','bold'); % Sesi III
63 hold(ax,'off');
64
65 %% ----- INFO PARAMETER RESPON (MANUAL) -----
66 % Semua parameter dihitung manual berbasis definisi teori
67 % Tr : rise time 10%-90%
68 % Td : time delay 50%
69 % Ts : settling time ±5%
70 % ESS : steady-state error (rata-rata akhir)
71 % OVS : overshoot (% terhadap referensi)
72
73 t = T;
74 segTime = [ 0 140; % Sesi I
75            140 200; % Sesi II
76            200 360]; % Sesi III
77
78 segName = {'Sesi I','Sesi II','Sesi III'};
79
80 for k = 1:3
81     t0 = segTime(k,1);
82     t1 = segTime(k,2);
83
84     % ----- Ambil data per sesi -----
85     t = tout; % INI KUNCINYA
86     idx = (t >= t0) & (t < t1);
87     if ~any(idx), continue; end
88
89     t_seg = t(idx) - t0; % waktu lokal
90     y_seg = y1(idx); % output
91     r_seg = y2(idx); % referensi
92
93     % ----- Nilai dasar -----
94
95     if y_peak > y_ss
96         Overshoot = (y_peak - y_ss)/abs(Delta)*100;
97     else
98         Overshoot = 0;
99     end
100     % step turun
101     Overshoot = 0; % tidak didefinisikan
102 end
103
104 % ----- STEADY-STATE ERROR -----
105 idx_ss = t_seg >= 0.7*t_seg(end); % 30% akhir sesi
106 ESS = y_ss - mean(y_seg(idx_ss));
107
108 % ----- OUTPUT -----
109 fprintf('--- %s (t = %s s d. %s s) ---\n', segName(k), t0, t1);
110 fprintf('Overshoot = %.3f %\n', Overshoot);
111 fprintf('Rise time (Tr) = %.3f s\n', Tr);
112 fprintf('Settling time (Ts) = %.3f s\n', Ts);
113 fprintf('Time delay (Td) = %.3f s\n', Td);
114 fprintf('ESS = %.4f V\n', ESS);
115
116 end
117 set(gca,'LineWidth',2.0);

```

Codingan PID Disturbance Output

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.

Hak Cipta Uinunggi Unga-Unga

```

1  %% program storagetank system
2  clear all; close all; clc;
3  %% time
4  T_start = 0;
5  T_end = 360;
6  Ts = 0.01;
7  T=T_start:Ts:T_end;
8  step_time = 0;
9  u=0.75;
10
11 %% kondisi sistem awal
12 init = 0;
13
14 %% parameter
15 d = 1;
16 h = 0.75;
17 ht = 1.2;
18 A = pi/4*d^2;
19 c = 1.8/sqrt(0.6)/60;
20
21 %% matriks
22 A_1=[1/2*(-c/A/(sqrt(h)))]';
23 B=[1/A];
24 C=[1];
25 D=[0];
26
27 %% definisikan plant TF
28 [num, den] = ss2tf(A_1, B, C, D);
29
30 %% panggil simulink
31 load data_noise_06.mat
32 T_noise = linspace(0, T(end), length(v));
33 v_interp = interp1(T_noise, v, T, 'linear', 'extrap');
34 yn = timeseries(v_interp, T);
35 sim('PID_NOISE.slx')
36
37 %% plot
38 figure()
39 ax = axes;
40 hold(ax,'on');
41 set(ax,'FontSize',12,'LineWidth',1.5);
42 grid(ax,'on'); box(ax,'on');
43
44 plot(T, y(:,1), 'b--','LineWidth',1);
45 hold on;
46 plot(T, y(:,2), 'r','LineWidth',1);
47 xlim([0 360])
48
49 xlim([0 360])
50 grid on
51 xlabel('Time (minute)')
52 ylabel('Level (m)')
53 legend('Setpoint','Output PID')
54
55 %% RMSE
56 % -----
57 % PERHITUNGAN RMSE DATA ARRAY SIMULINK
58 % -----
59
60 % Di Workspace:
61 % y : 361x2 double -> [waktu, output_sistem]
62 % y1 : 361x1 double -> [model_referensi]
63
64 t_1 = y(:,1); % waktu (0..360), kalau mau dipakai
65 y_out = y(:,2); % output sistem (garis merah)
66 y_ref = y2(:); % model referensi (garis kuning)
67
68 % Pastikan panjangnya sama
69 if length(y_out) ~= length(y_ref)
70     error('Panjang y dan y1 tidak sama!');
71 end
72
73 % Hitung RMSE
74 error_sig = y1 - y2;
75 RMSE = sqrt(mean(error_sig.^2));
76
77 % Tampilkan hasil
78 fprintf('\n-----\n');
79 fprintf('RMSE = %.6f meter\n', RMSE);
80 fprintf('-----\n');
81 set(gca, 'LineWidth', 2.0);
82

```

Codingan PID Noise 6%

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.

Hitungan Manual MRAC

$$\begin{aligned} \tau &= 63.2\% \times 0.75 & T_r &= \tau \ln 9 & T_s &= 4\tau & T_d &= \tau \ln(2) \\ &= 0.474 \text{ meter} & &= 4.996 \times \ln 9 & &= 4 \times 4.996 & &= 4.996 \times 0.693 \\ &= 4.996 \text{ menit} & &= 10.977 \text{ menit} & &= 19.984 \text{ menit} & &= 3.462 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Overshoot} &= \frac{y_{peak} - y_{ss}}{Y_{ss}} \times 100\% \\ &= \frac{0.7515 - 0.75}{0.75} \times 100\% \\ &= 0.248\% \end{aligned}$$

Hitungan Manual PID

$$\begin{aligned} \tau &= 63.2\% \times 0.75 & T_r &= \tau \ln 9 & T_s &= 4\tau & T_d &= \tau \ln(2) \\ &= 0.474 \text{ meter} & &= 1.7944 \times \ln 9 & &= 4 \times 1.7994 & &= 1.7944 \times 0.693 \\ &= 1.7944 \text{ menit} & &= 3.943 \text{ menit} & &= 7.1776 \text{ menit} & &= 1.2435 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Overshoot} &= \frac{y_{peak} - y_{ss}}{Y_{ss}} \times 100\% \\ &= \frac{0.8156 - 0.75}{0.75} \times 100\% \\ &= 8.746\% \end{aligned}$$

UIN SUSKA RIAU



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Muhammad Zandi dilahirkan di Koto Alam, Provinsi Sumatera Barat, pada tanggal 30 Mei 2002. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Musliadi dan Ibu Liza Yunengsih, serta memiliki satu orang saudara. Saat ini, penulis berdomisili di Koto Alam, Kecamatan Pangkalan Koto Baru, Kabupaten Lima Puluh Kota. Pendidikan formal penulis dimulai di TK Pertiwi Koto Alam dan diselesaikan pada tahun 2009. Selanjutnya, penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 01 Koto Alam dan lulus pada tahun

2015. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan menengah pertama di MTsN 1 Kota Payakumbuh dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2018. Pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Negeri 3 Nan Kodok dengan peminatan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) dan diselesaikan pada tahun 2021. Setelah menyelesaikan pendidikan menengah atas, penulis melanjutkan studi pada tahun 2022 di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi. Pada semester lima, penulis memilih konsentrasi Elektronika Instrumentasi.

Dengan izin dan rahmat Allah SWT serta didukung oleh ketekunan dan semangat belajar yang tinggi, penulis berhasil menyelesaikan studi dan lulus pada tahun 2025. Penulis berharap tugas akhir yang berjudul **“Desain Pengendali *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) untuk Pengendalian Level pada Sistem *Storage Tank*”**

NO HP : 0821-6946-6967

Email : muhammadzandi123@gmail.com

UIN SUSKA RIAU