PEMODELAN DAN RANCANG BANGUN SISTEM ROTARY INVERTED PENDULUM BERBASIS STM32 MENGGUNAKAN PENGENDALI PID DAN LQR

SKRIPSI

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Oleh:

RAFIDAL MUHAMMAD

NIM: D1021211109

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TANJUNGPURA

PONTIANAK

2025

PEMODELAN DAN RANCANG BANGUN SISTEM ROTARY INVERTED PENDULUM BERBASIS STM32 MENGGUNAKAN PENGENDALI PID DAN LQR

SKRIPSI

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Jurusan Teknik Elektro

Skripsi Diajukan Sebagai Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana
Dalam Bidang Teknik Elektro

Oleh:

RAFIDAL MUHAMMAD

NIM: D1021211109

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TANJUNGPURA

PONTIANAK

2025

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS,
DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon: (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email: ft@untan.ac.id Website: http://teknik.untan.ac.id

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rafidal Muhammad

NIM : D1021211109

Menyatakan bahwa dalam SKRIPSI yang berjudul "**Pemodelan dan Rancang Bangun Sistem Rotary Inverted Pendulum Berbasis STM32 Menggunakan Pengendali PID dan LQR**" tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi manapun. Sepanjang pengetahuan Saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Rujukan.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya. Saya sanggup menerima konsekuensi akademis dan hukum di kemudian hari apabila pernyataan yang dibuat ini tidak benar.

Pontianak, 25 Juli 2025



Rafidal Muhammad
NIM. D1021211109

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon: (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email: ft@untan.ac.id Website: http://teknik.untan.ac.id

SURAT KETERANGAN SELESAI PENULISAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping pada penulisan skripsi yang berjudul **"Pemodelan dan Rancang Bangun Sistem Rotary Inverted Pendulum Berbasis STM32 Menggunakan Pengendali PID dan LQR"** yang ditulis oleh mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

Nama : Rafidal Muhammad
NIM : D1021211109
Jurusan : Teknik
Prodi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Kendali

Demikian ini menerangkan bahwa mahasiswa tersebut telah menyelesaikan penulisan skripsinya.

Pontianak, 25 Juli 2025

Pembimbing Utama

Dr. Eng. Ir. Herry Hadary, S.T., M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197102281995121001

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Bomo Wibowo Sanjaya S.T., M.T., IPM.
NIP. 197404011999031003

KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS,
DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS TANJUNGPURA
FAKULTAS TEKNIK
Jalan Prof. Dr. H. Hadari Nawawi Pontianak 78124
Telepon: (0561) 740186, WA: +6282152280907
Email: ft@untan.ac.id Website: http://teknik.untan.ac.id

HALAMAN PENGESAHAN

PEMODELAN DAN RANCANG BANGUN SISTEM ROTARY INVERTED PENDULUM BERBASIS STM32 MENGGUNAKAN PENGENDALI PID DAN LQR

Jurusan Teknik Elektro
Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Oleh:

Rafidal Muhammad
NIM. D1021211109

Telah dipertahankan di depan Penguji Skripsi pada tanggal 25 Juli 2025
dan diterima sebagai satu diantara persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana.

Susunan Penguji Skripsi:

Pembimbing Utama,

Dr. Eng. Ir. Petry Hadary, S.T., M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 197102281995121001

Penguji Utama,

Prof. Dr.-Ing. Seno D. Panjaitan, S.T., M.T., IPM.
NIP. 197507162000121001

Pembimbing Kedua,

Dr. Ir. Bomo Wibowo Sanjaya, S.T., M.T., IPM
NIP. 197404011999031003

Penguji Kedua,

Hilda, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP. 196907091995012001

Pontianak, 25 Juli 2025
Dekan,

Dr. -Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM.
NIP. 196712231992031002

Skripsi ini didedikasikan untuk kedua orang tuaku dan kedua saudaraku yang telah memberikan semua hal kepadaku lebih daripada yang kuinginkan.

…

Skripsi ini juga tertulis terima kasih kepada abang-abang, kakak-kakak, serta kawan-kawan di Laboratorium DCC, HME-FT UNTAN,
Tim Robot FT-UNTAN dan tak lupa
Seluruh Mahasiswa Teknik Elektro Angkatan 2021.

…

"Apapun masalahnya, pasti ada jalan"

"Tidak ada musuh yang abadi, tidak ada kawan yang sejati"

"Pada akhirnya, orang yang paling peduli dengan kita adalah diri kita sendiri"

"*All truly strong people are kind*"

"… *And if you gaze long enough into the abyss, the abyss gazes also into you*"

…

Dari titisan ilmu-Mu kupersembahkan goresan tanganku

bagi ilmu pengetahuan Dunia

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan nikmat kesehatan dan kehidupan. Atas berkat rahmat dan kuasa Nya lah penulis diberikan kesanggupan dan kemudahan sehingga mampu menyusun dan menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul "Pemodelan dan Rancang Bangun Sistem *Rotary Inverted Pendulum* Berbasis STM32 Menggunakan Pengendali PID dan LQR" ini dengan baik.

Dalam penelitian ini membahas tentang model matematika dari suatu sistem *rotary inverted pendulum* (RIP). Dari model tersebut dicari suatu kombinasi pengendali dinamika *swing-up* menggunakan pengendali *double-feedback* PID dan dinamika kestabilan menggunakan pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR) untuk diterapkan ke dalam sistem. Kerja dari pengendali kemudian diterapkan dalam rancang bangun sistem menggunakan mikrokontroler STM32.

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini penulis mengalami berbagai hambatan. Namun, semua hal itu dapat dilalui berkat bantuan dan bimbingan serta pengarahan dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Dengan segala kerendahan hati, penulis ucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ing. Ir. Slamet Widodo, M.T., IPM. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak.
2. Bapak Prof. Dr.-Ing. Seno D. Panjaitan, S.T., M.T., IPM, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura dan selaku Dosen Penguji Utama Tugas Akhir.
3. Bapak Elang Derdian Marindani, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
4. Bapak Muhammad Saleh, S.T., M.T., selaku Ketua Kelompok Pengajar Teknik Kendali Program Studi Teknik Elektro Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
5. Bapak Dr. Eng. Ir. Ferry Hadary, S.T., M.Eng., IPM., ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Utama Tugas Akhir dan selaku Kepala Laboratorium Kendali Digital dan Komputasi.
6. Bapak Dr. Ir. Bomo Wibowo Sanjaya, S.T., M.T., IPM., selaku Dosen Pembimbing Pendamping Tugas Akhir.

7. Ibu Hilda, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., Selaku Dosen Penguji Pendamping Tugas Akhir.
8. Bapak Dr. Redi Ratiandi Yacoub, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik.
9. Kedua orang tua dan abang kakak tercinta yang selalu mendo'akan dan mendukung penulis dalam menempuh studi dan menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Laboratorium Kendali Digital dan Komputasi yang telah menyediakan fasilitas dalam menyelesaikan studi penulis.
11. Abang-abang serta Kakak-kakak Mahasiswa dan Alumni Teknik Elektro UNTAN yang telah mendampingi dan memberikan masukan selama perkuliahan dan kegiatan penulis.
12. Seluruh kawan-kawan Mahasiswa Teknik Elektro Angkatan 2021 yang sudah menjadi teman seperjuangan dalam perkuliahan ini sejak awal.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tugas akhir ini masih banyak terdapat kekurangan-kekurangan akibat keterbatasan pengetahuan yang dimiliki. Untuk itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangatlah dibutuhkan penulis untuk memperbaiki kekurangan-kekurangan pada tugas akhir ini. Akhir kata, penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Pontianak, 25 Juli 2025

Rafidal Muhammad
NIM. D1021211109

ABSTRAK

Inverted pendulum merupakan sistem yang digunakan secara luas dalam penelitian kendali otomatis karena karakteristiknya yang tidak stabil, nonlinear, dan *underactuated*. Sistem ini memiliki tiga permasalahan utama yaitu *swing-up*, stabilisasi, dan *tracking*. Penelitian ini mengusulkan metode kombinasi kendali *Dual-Feedback* PID dan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk mengatasi dinamika *swing-up* dan stabilisasi pada sistem *Rotary Inverted Pendulum* (RIP). Metode *Dual-Feedback* PID digunakan untuk mengendalikan dua variabel secara simultan, yaitu sudut lengan dan sudut pendulum selama proses *swing-up*. Sementara itu, metode LQR digunakan untuk menstabilkan pendulum pada posisi tegak setelah mencapai titik keseimbangan.

Pemodelan matematis sistem dilakukan menggunakan pendekatan Lagrange dan disimulasikan serta diturunkan parameter pengendaliannya menggunakan MATLAB. Pengendali diimplementasikan secara praktikal pada mikrokontroler STM32 dan ditampilkan melalui komunikasi serial ke komputer. Hasil implementasi menunjukkan bahwa metode *Dual-Feedback* PID dapat menghasilkan waktu naik (t_r) cukup singkat yakni sebesar 1.7 sekon dengan osilasi rendah dan kecepatan motor minimal. Pengendali LQR dengan nilai *state feedback gain matrix* $K = 10^5$ [0.0999 1.6460 0.0629 0.1941] menunjukkan performa stabilisasi yang cepat dan *error steady state* kurang dari 3%. Secara keseluruhan, kombinasi kendali PID-LQR menghasilkan respons sistem RIP yang cepat, stabil, dan mampu mengatasi dinamika nonlinear dan keterbatasan aktuator secara efektif.

Kata kunci: *rotary inverted pendulum, dual-feedback PID, linear quadratic regulator, swing-up, stabilisasi, mikrokontroler STM32*

ABSTRACT

The inverted pendulum is widely used in automatic control research due to its highly unstable, nonlinear, and underactuated characteristics. It presents three main challenges: swing-up, stabilization, and tracking. This study proposes a combination of Dual-Feedback PID and Linear Quadratic Regulator (LQR) control methods to handle the swing-up and stabilization dynamics of a Rotary Inverted Pendulum (RIP) system. The Dual-Feedback PID controller is used to simultaneously control the pendulum and arm angles during the swing-up phase. Meanwhile, the LQR method is applied to stabilize the pendulum in the upright position once the balance point is reached.

The system's mathematical model is derived using the Lagrangian approach and control parameters are obtained through MATLAB. The controllers are implemented practically on an STM32 microcontroller, with system behavior monitored via serial communication to a computer. The results show that the Dual-Feedback PID method achieves a quick rise time (t_r) of 1.7 seconds with low oscillation and minimum motor speed. The LQR controller, with gain matrix $K = 10^5$ [0.0999 1.6460 0.0629 0.1941], demonstrates fast stabilization and a steady-state error of less than 3%. Overall, the PID-LQR control combination provides a fast, stable system response capable of addressing both nonlinear dynamics and actuator limitations effectively.

Kata kunci: *rotary inverted pendulum, dual-feedback PID, linear quadratic regulator, swing-up, stabilization, STM32 microcontroller*

DAFTAR ISI

PRAKATA vii
ABSTRAK ix
ABSTRACT x
DAFTAR ISI xi
DAFTAR GAMBAR xiv
DAFTAR TABEL xvi
DAFTAR KODE PROGRAM xvii
DAFTAR LAMPIRAN xviii
GLOSARIUM xix
BAB I. PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 3
1.3. Tujuan Penelitian 4
1.4. Pembatasan Masalah 4
1.5. Sistematika Penulisan 4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1. Dasar Teori 6
2.1.1. Hukum Newton 6
2.1.2. Energi 8
2.1.3. Metode *Lagrange* 9
2.1.4. Representasi Ruang Keadaan (*State Space*) Sistem Kendali 10
2.1.5. Konsep Sistem Kendali Optimal Menggunakan Metode *Linear Quadratic Regulator* (LQR) 11
2.1.6. Konsep Kendali Sistem Nonlinear Menggunakan Pengendali *Dual-Feedback* PID 12
2.2. Penelitian Terdahulu 13
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN 16
3.1. Komponen Hardware 16
3.1.1. STM32F411CEU6 16
3.1.2. Rotary Encoder 17
3.1.3. Motor DC 18

3.1.4. Motor Driver BTS7960 19
3.1.5. Power Supply 12V 3A 20
3.2. Komponen Software 20
3.2.1. STM32 Cube IDE 20
3.2.2. Processing 21
3.2.3. MATLAB 21
3.3. Alur Penelitian 22
3.3.1. Studi Literatur 24
3.3.2. Pemodelan dan Simulasi 31
3.3.3. Rancang Bangun Sistem 36
3.3.4. Rancang Bangun Pengendali 37
3.3.5. Pengambilan Data 41
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN 43
4.1. Pengujian Pengendali Dinamika *Swing-Up* Sistem RIP Menggunakan Pengendali *Dual-Feedback* PID 43
4.1.1. Parameter *Dual-Feedback* PID Paling Optimal Untuk Pengendalian Dinamika *Swing Up* Sistem RIP 43
4.1.2. Pengujian variasi nilai K_{P1} pada Pengendali *Swing-Up* Menggunakan *Dual-Feedback* PID 44
4.1.3. Pengujian variasi nilai K_{P2} pada Pengendali *Swing-Up* Menggunakan *Dual-Feedback* PID 46
4.1.4. Pengujian variasi nilai K_{I1} pada Pengendali *Swing-Up* Menggunakan *Dual-Feedback* PID 48
4.1.5. Pengujian variasi nilai K_{I2} pada Pengendali *Swing-Up* Menggunakan *Dual-Feedback* PID 50
4.1.6. Pengujian Variasi Nilai K_{D1} dan K_{D2} Pada Pengendali *Swing-Up* Menggunakan *Dual-Feedback* PID 51
4.2. Pengujian Pengendali Dinamika Kestabilan Sistem RIP Menggunakan Pengendali LQR. 54
4.2.1. Pengujian Simulasi Variasi Nilai Q dan R Terhadap Kestabilan Menggunakan Simulink 55

4.2.2. Implementasi Nilai Optimal *State-Feedback Gain Matriks* Hasil Simulasi Pengendali LQR Pada Sistem Asli. 58
4.3. Performa Pengendali Gabungan PID-LQR pada Dinamika *Swing-Up* dan Stabilisasi Sistem RIP 61
BAB V. PENUTUP 65
5.1. Kesimpulan 65
5.2. Saran 65
DAFTAR RUJUKAN 67
LAMPIRAN 69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Sistem massa pada ujung pegas 10
Gambar 2.2. Diagram blok dari sistem linear waktu kontinyu yang direpresentasikan dalam bentuk ruang keadaan. 11
Gambar 3.1. Bentuk STM32 16
Gambar 3.2. Konfigurasi Pin STM32 17
Gambar 3.3. Encoder 22 ppr (kiri) dan 1000 ppr (kanan) 17
Gambar 3.4. Motor DC ZGB42RH 19
Gambar 3.5. Driver Motor BTS7960 19
Gambar 3.6. Power Supply Unit 20
Gambar 3.7. Tampilan STM32 Cube IDE 21
Gambar 3.8. Tampilan program Processing 21
Gambar 3.9. Tampilan MATLAB 22
Gambar 3.10. Alur penelitian 22
Gambar 3.11. Komponen sistem RIP 24
Gambar 3.12. Energi dan variabel dalam pergerakan RIP 26
Gambar 3.13. Tampilan hasil perhitungan MATLAB 34
Gambar 3.14. Tampilan model sistem dan pengendali di Simulink 35
Gambar 3.15. Perbandingan kurva model dan sistem asli pada pendulum 36
Gambar 3.16. Rancangan kerangka sistem RIP 37
Gambar 3.17. Wiring perangkat pengendali 38
Gambar 3.18. Rangkaian PCB 38
Gambar 3.19. Tampilan kurva data parameter melalui komunikasi serial 42
Gambar 4.1. sistem dengan nilai parameter PID optimal yang telah di-*tuning* 44
Gambar 4.2. Grafik variasi dua nilai K_{P1} berbeda yakni (a) 15; dan (b) 45 pada pengendali *Dual-Feedback* PID 46
Gambar 4.3. Grafik variasi dua nilai K_{P2} berbeda yakni (a) 10; dan (b) 30 pada pengendali *Dual-Feedback* PID 47
Gambar 4.4. Grafik variasi dua nilai K_{I1} berbeda yakni (a) 3.5; dan (b) 10.5 pada pengendali *Dual-Feedback* PID 49
Gambar 4.5. Grafik variasi dua nilai K_{I2} berbeda yakni (a) 5; dan (b) 15 pada pengendali *Dual-Feedback* PID 51

Gambar 4.6. Grafik respon sistem setelah diberikan nilai K_D pada (a) K_{D1} = 3.5; dan (b) K_{D2} = 3.5 pada pengendali *Dual-Feedback* PID 53
Gambar 4.7. Gambar respon sistem pada variasi pertama matriks Q dan R..... 56
Gambar 4.8. Gambar respon sistem pada nilai q_{11} = 100000..... 57
Gambar 4.9. Gambar respon sistem pada variasi nilai $q_{22,}$ $q_{33,}$ dan q_{44} 57
Gambar 4.10. Gambar respon sistem dengan nilai R = 0.1..... 58
Gambar 4.11. Grafik respon sistem RIP terhadap pengendali LQR dengan nilai K berdasarkan hasil simulasi..... 59
Gambar 4.12. Grafik sudut pendulum pada pengujian (a) 60
Gambar 4.13. Grafik sudut lengan pada pengujian (a) 60
Gambar 4.14. Grafik performa respon sistem disaat diberi gangguan (a) grafik output sistem; dan (b) grafik variabel yang dikendalikan..... 61
Gambar 4.15. Grafik performa respon sistem kendali PID-LQR (a) grafik keseluruhan *output* sistem; dan (b) grafik variabel yang dikendalikan..... 63
Gambar 4.16. Grafik pengendali sistem RIP menggunakan PID-LQR disaat terjadi gangguan sehingga keluar dari nilai *error steady state* 64

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi STM32F411CEU6 17
Tabel 3.2. Spesifikasi encoder pendulum 18
Tabel 3.3. Spesifikasi encoder motor 18
Tabel 3.4. Spesifikasi motor DC 19
Tabel 3.5. Spesifikasi driver motor BTS7960 20
Tabel 3.6. Jadwal Penelitian 23
Tabel 3.7. Parameter mekanik dan elektrik sistem 25
Tabel 4.1. Performa sistem pada nilai parameter optimal *dual-feedback* PID 44
Tabel 4.2. Hasil pengujian variasi nilai K_{P1} 45
Tabel 4.3. Hasil pengujian variasi nilai K_{P2} 47
Tabel 4.4. Hasil pengujian variasi nilai K_{I1} 48
Tabel 4.5. Hasil pengujian variasi nilai K_{I2} 50
Tabel 4.6. Hasil pengujian variasi nilai K_{D1} dan K_{D2} 52
Tabel 4.7. Nilai matriks Q dan R beserta hasil nilai matriks K 55
Tabel 4.8. Karakteristik respon sistem terhadap variasi nilai matriks K 56
Tabel 4.9. Karakteristik respon sistem pengendali gabungan PID-LQR 62

DAFTAR KODE PROGRAM

Kode Program 3.1. Perhitungan Dinamika Stabilisasi Sistem RIP 32
Kode Program 3.2. Nilai matriks A, B, dan K 33
Kode Program 3.3. Program pembacaan sensor 39
Kode Program 3.4. Program perhitungan integral dan turunan 39
Kode Program 3.5. Program dinamika *swing-up* 40
Kode Program 3.6. Implementasi kendali menggunakan nilai *state-feedback* K 41

DAFTAR LAMPIRAN

KODE PROGRAM A-1
HASIL PROGRAM B-1
FOTO SISTEM ROTARY INVERTED PENDULUM C-1
MODEL MATEMATIS SISTEM DAN PENGENDALI D-1
DESAIN SISTEM ROTARY INVERTED PENDULUM E-1

GLOSARIUM

Aktuator	Komponen mekanik atau elektronik yang mengubah sinyal kontrol menjadi gerakan fisik, seperti motor atau servo, untuk menggerakkan suatu sistem.
Controllable (terkendali)	Suatu sistem disebut terkendali apabila dimungkinkan untuk membawa sistem dari keadaan awal ke keadaan akhir tertentu dalam waktu terbatas dengan masukan yang sesuai.
Closed loop system (Sistem loop tertutup)	Sistem kendali yang menggunakan umpan balik (*feedback*) dari keluaran untuk mengatur masukan guna mencapai respons yang diinginkan.
Diagram blok	Representasi grafis dari aliran sinyal dalam sistem kendali yang menunjukkan hubungan antar komponen fungsional menggunakan blok-blok.
Disturbance (Gangguan)	Sinyal atau faktor luar yang tidak diinginkan dan dapat mempengaruhi kinerja sistem, biasanya tidak dapat dikendalikan.
Error (Galat)	Selisih antara sinyal referensi (*setpoint*) dan keluaran aktual sistem, yang digunakan untuk menyesuaikan masukan melalui kendali.
Feedback (Umpan balik)	Proses mengukur keluaran sistem dan menggunakannya kembali sebagai bagian dari masukan untuk mengoreksi kinerja sistem.
Hardware (Perangkat keras)	Komponen fisik dari sistem, seperti sensor, aktuator, mikrokontroler, dan rangkaian elektronik lainnya.

Horizontal	Arah mendatar atau sejajar dengan permukaan tanah; sering menjadi referensi dalam sistem mekanik atau robotik untuk posisi dasar.
Input (Masukan)	Sinyal atau gaya yang diberikan ke sistem untuk mempengaruhi perilaku atau keluaran sistem.
Inverted Pendulum (Pendulum terbalik)	Sistem dinamis klasik yang terdiri dari batang yang diposisikan secara vertikal di atas titik tumpu dan dikendalikan agar tetap seimbang. Sistem ini sering digunakan sebagai studi kasus kendali karena sifatnya yang tidak stabil dan nonlinear.
Kriteria	Ukuran atau tolok ukur yang digunakan untuk menilai performa suatu sistem, seperti waktu naik, kesalahan *steady-state*, atau energi kendali.
Lagrange	Metode dalam mekanika analitik yang digunakan untuk menurunkan persamaan gerak sistem fisika berdasarkan energi kinetik dan energi potensial.
Linear	Sifat sistem yang memenuhi prinsip superposisi dan homogenitas; sistem di mana keluaran berbanding lurus dengan masukan.
Linear Quadratic Regulator (LQR)	Teknik kendali optimal yang digunakan untuk mengatur sistem dinamis linear dengan meminimalkan fungsi biaya kuadrat dari status dan masukan sistem.
MATLAB (Matrix Laboratory)	Bahasa pemrograman dan lingkungan komputasi numerik yang digunakan secara luas dalam teknik

	dan sains untuk simulasi, analisis data, dan desain kendali.
Matriks	Representasi data dalam bentuk *array* dua dimensi, digunakan dalam sistem linear dan model keadaan (*state-space*).
MIMO (*multiple input multiple output*)	Sistem kendali yang memiliki lebih dari satu masukan dan lebih dari satu keluaran; umum dalam sistem kompleks seperti robotika dan jaringan komunikasi.
Mikrokontroler	Unit komputasi kecil dalam satu *chip* yang digunakan untuk mengendalikan perangkat elektronik melalui pemrosesan sinyal dan kendali *real-time*.
Nonlinear	Sistem yang tidak memenuhi prinsip superposisi; hubungan antara *input* dan *output* bersifat kompleks dan tidak linier, sering kali lebih sulit dianalisis dan dikendalikan.
Observable (Teramati)	Sifat suatu sistem di mana kondisi internal (*state*) dapat ditentukan dari keluaran (*output*) sistem dalam rentang waktu tertentu.
Open Loop System (Sistem loop terbuka)	Sistem kendali yang bekerja tanpa menggunakan umpan balik; masukan diberikan tanpa memperhatikan respon atau keluaran sistem.
PID (*Proportional-Integral-Derivative*)	Jenis pengendali umpan balik yang menggunakan gabungan dari tiga aksi kendali: proporsional terhadap *error* saat ini, integral dari *error* masa lalu, dan turunan dari perubahan *error*, untuk

	mencapai kestabilan dan performa yang diinginkan.
Osilasi	Gerakan naik-turun atau bolak-balik secara periodik dalam sistem, yang bisa terjadi akibat ketidakseimbangan dalam kendali atau sebagai respon alami sistem.
Output (Keluaran)	Respon atau hasil dari suatu sistem setelah menerima masukan; biasanya merupakan variabel yang diinginkan untuk dikendalikan.
Overshoot	Selisih antara nilai puncak dan nilai akhir terhadap nilai akhir sistem. Menunjukkan seberapa besar sistem melewati target sebelum akhirnya stabil.
Peak time (waktu puncak)	Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai maksimum (puncak) pertama dari respons sistem. Biasanya terjadi saat sistem mengalami *overshoot*.
Pendulum (Bandul)	Objek yang digantung dan dapat berayun bebas di bawah pengaruh gravitasi; dalam konteks sistem kontrol, sering dijadikan objek studi untuk kestabilan dan dinamika.
Plant	Objek fisik atau sistem nyata yang dikendalikan dalam suatu sistem kendali, seperti motor, robot, atau pendulum.
Rise time (waktu naik)	Waktu yang dibutuhkan keluaran sistem untuk naik dari 10% ke 90% dari nilai akhir. Parameter ini mengukur seberapa cepat sistem mulai merespons.

Sensor	Perangkat yang digunakan untuk mengukur besaran fisik seperti posisi, kecepatan, atau suhu dan mengubahnya menjadi sinyal listrik untuk diproses lebih lanjut.
Setpoint (Titik acuan)	Nilai referensi atau target yang diinginkan dari keluaran sistem; sistem kendali akan berusaha meminimalkan *error* terhadap nilai ini.
Settling time (Waktu pulih)	Waktu yang dibutuhkan respons sistem untuk tetap berada dalam ambang batas tertentu dari nilai akhir (keadaan stabil). Ini menunjukkan seberapa cepat sistem dapat stabil.
Simulasi	Proses meniru perilaku sistem *real-time* secara virtual dengan menggunakan model matematika untuk mengamati performa sebelum implementasi fisik.
Sistem Kendali	Suatu sistem yang dirancang untuk mengatur perilaku dari sistem lain (*plant*) agar mencapai performa tertentu sesuai tujuan melalui pengendalian masukan.
Software (Perangkat lunak)	Program komputer yang digunakan untuk merancang, menyimulasikan, dan mengimplementasikan sistem kendali, seperti MATLAB, Simulink, atau *firmware* mikrokontroler.
Stabilisasi	Proses atau tindakan mengatur sistem agar berada dalam kondisi setimbang atau tidak mengalami divergensi meskipun ada gangguan.

State Space (Ruang keadaan)	Representasi matematis sistem dinamis menggunakan vektor keadaan (*state vector*) yang mencakup seluruh informasi sistem pada waktu tertentu.
Steady-state error	Perbedaan antara nilai keluaran akhir dengan nilai referensi yang diharapkan setelah sistem mencapai kestabilan. Ini menilai akurasi sistem jangka panjang.
Swing Up	Strategi atau metode untuk mengayunkan pendulum dari posisi bawah (stabil) menuju posisi atas (tidak stabil) sebagai tahap awal sebelum dikendalikan untuk tetap seimbang.
Trial and Error	Metode eksperimen yang dilakukan dengan mencoba berbagai pendekatan, mencatat hasilnya, dan memperbaiki kesalahan hingga mencapai hasil yang diinginkan.
Variabel Terkendali	Besaran fisik atau parameter sistem yang ingin dikontrol agar mengikuti nilai referensi, seperti sudut pendulum, posisi lengan, atau kecepatan motor.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem kendali otomatis atau *automatic control system* adalah cabang ilmu matematika terapan yang mempelajari dinamika suatu sistem proses yang dapat terjadi secara alami ataupun buatan dan memanipulasi parameter tertentu pada dinamika tersebut agar dapat bekerja sesuai dengan harapan [1]. *Automatic control system* memegang peranan penting dalam kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi terapan. Peran penting tersebut terdapat dalam sistem kompleks seperti sistem autopilot pesawat terbang, lintasan roket, manipulator robotik, proses manufaktur, pengendalian tekanan dan temperatur pada proses produksi, hingga kendali pesawat antariksa.

Perancangan *automatic control system* dapat diterapkan pada sistem *inverted pendulum*. *Inverted pendulum* adalah suatu sistem yang bertujuan untuk menstabilkan suatu beban di atas titik tumpu yang dapat dikendalikan. Sistem ini biasa muncul dalam beberapa variasi seperti *cart inverted pendulum, double inverted pendulum,* dan *rotary inverted pendulum* (RIP). Terdapat tiga permasalahan dinamika yang terdapat pada sistem inverted pendulum, yakni *swing-up, stabilization,* dan *tracking*. Dinamika pada sistem *inverted pendulum* memiliki karakteristik yang (1) non-linier; (2) *underactuated*; (3) multi-variabel; dan (4) ketidakstabilan tinggi [2][3]. Dinamika yang kompleks ini menjadikan *inverted pendulum* sebagai salah satu permasalahan yang menarik dalam bidang riset *control theory* sehingga sering digunakan sebagai media analisis performa berbagai macam pengendali hingga pengembangan algoritma pengendali baru. Contoh dinamika sistem serupa terdapat pada keseimbangan berjalan manusia, mahkluk bipedal, *damping* pada bangunan tahan gempa, aerodinamika rudal, *segway* dan robot humanoid [4].

Pengendalian sistem *inverted pendulum* memerlukan model matematis sebagai analisa pengendali yang dapat digunakan pada sistem tersebut. Tahapan pemodelan matematis penelitian ini mengacu pada artikel oleh [5], [6], dan [7]. Adapun dinamika sistem yang terdapat pada sistem *inverted pendulum* yakni *swing-up*, *stabilization,* dan *tracking* yang dapat memerlukan pengendali berbeda-beda

berdasarkan target kendali yang diinginkan. Penelitian terdahulu mengenai *inverted pendulum* telah banyak berupaya dalam menerapkan berbagai macam algoritma pengendali. Metode penggunaan pengendali linear seperti *proportional-integral-derivative* atau PID *control* untuk dinamika pengendalian stabilisasi. Pendekatan non-linear telah diaplikasikan seperti stabilisasi menggunakan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan *Model Predictive Control (MPC)* [5]. Bahkan belakangan ini, penggunaan pengendali berbasis sistem cerdas seperti *Fuzzy Logic Control* [8] dan *Machine Learning* [9] sudah mulai banyak diterapkan. Umumnya pengendali yang digunakan pada dinamika kestabilan linear seperti pengendali LQR, perlu dikombinasikan dengan pengendali lain yang dapat bekerja secara nonlinear pada dinamika *swing up*.

Dinamika proses *swing up* pada *inverted pendulum* memiliki permasalahan yang unik. Pengendali yang digunakan pada proses *swing-up inverted pendulum* pada penelitian terdahulu telah menggunakan metode PID *controller* dengan memanfaatkan osilasi disaat terjadi ketidakstabilan [8], kesulitan metode ini tentunya pada ketidakstabilan metode *tuning*. Metode lain yakni dengan *energy-based controller* (EBC) yang diciptakan untuk dinamika *swing-up* pada sistem seperti *inverted pendulum.* Metode ini banyak digunakan dikarenakan sistem kerja yang sederhana dan persamaan yang mudah diturunkan menggunakan hukum fisika dengan waktu *swing-up* yang dibutuhkan yakni sebesar 3 detik [10]. Penelitian lain menggunakan *neural network control* (NNC) dengan model EBC pada proses *swing-up* memperoleh kenaikan performa waktu dari 3.1 detik pada model EBC menjadi 2.8 menggunakan metode EBC-NNC [11]. Walaupun begitu sinyal kendali pada proses *swing-up* menggunakan metode EBC cukup besar melebihi nilai saturasi aktuator dan sangat berosilasi. Selain itu metode EBC juga memerlukan pengetahuan mendetail tentang parameter sistem untuk energi sistem. Metode lain yang telah diimplementasikan yakni menggunakan s*liding-mode control* (SMC) dan menunjukkan peningkatan waktu *swing-up* menjadi 1.53 detik [12]. Walaupun begitu sinyal kendali proses ini cukup besar pula dan memerlukan kecepatan penuh aktuator.

Metode pengendalian kestabilan menggunakan pengendali yang hanya dapat bekerja pada kondisi linear, dan kekurangan pengendalian *swing up* dalam

memperhatikan keterbatasan sistem (osilasi, saturasi aktuator, ketidakpastian parameter) memerlukan solusi kombinasi pengendali yang tepat yakni dapat bekerja dalam kondisi linear ataupun nonlinear, nilai kontrol yang kecil, osilasi rendah, dan tidak bergantung pada banyak parameter. Penelitian ini mengusulkan pengembangan metode *Dual-Feedback* PID sebagai alternatif pada pengendalian *swing-up* sistem *rotary inverted pendulum* (RIP) mengkombinasikannya dengan pengendalian kestabilan RIP menggunakan metode LQR.

Metode *Dual-Feedback* PID merupakan metode pengendalian dengan dua pengendali PID yang dihubungkan satu sama lain sehingga dapat mengendalikan lebih dari satu variabel. Pengendalian menggunakan metode ini bertujuan untuk mengendalikan posisi pendulum dan lengan pendulum untuk mencapai titik pendulum terbalik dan memperhatikan perputaran lengan secara bersamaan. Penelitian ini dimulai dengan menganalisis dinamika sistem RIP yang tidak stabil dan nonlinear untuk kemudian menurunkan persamaan model matematis sistem RIP. Selanjutnya menentukan nilai *state feedback gain matrix K* untuk pengendali LQR menggunakan alat bantu MATLAB. Kemudian mengimplementasikan pengendalian dinamika *swing-up* menggunakan metode *Dual-Feedback PID* dan stabilisasi menggunakan pengendali LQR pada sistem RIP secara praktikal pada mikrokontroler digital STM32 sehingga karakteristik sistem dapat diamati menggunakan komunikasi serial dengan perangkat komputer. Adapun pengendali yang akan digunakan menggunakan dua metode, yakni (1) proses *swing*-up menggunakan *Dual-Feedback* PID *control* [13]; dan (2) stabilisasi menggunakan LQR *control* [10], [14].

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana metode dalam mengendalikan dinamika nonlinear *swing up* dan dinamika linear kestabilan pada sistem *Rotary Inverted Pendulum* (RIP)?
2. Bagaimana pengaruh respon sistem *Rotary Inverted Pendulum* (RIP) yang dibangun terhadap metode kombinasi pengendali *swing-up* dan kestabilan menggunakan metode PID-LQR yang diusulkan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan di atas, adapun tujuan yang ingin didapat dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Menciptakan metode kombinasi pengendali proses *swing-up* dan kestabilan sistem *Rotary Inverted Pendulum* (RIP).
2. Mengidentifikasi pengaruh metode kombinasi pengendali *swing-up* menggunakan *Dual-Feedback* PID dan pengendali kestabilan menggunakan metode LQR terhadap respon sistem *Rotary Inverted Pendulum* (RIP).

1.4. Pembatasan Masalah

Agar permasalahan dari penelitian tugas akhir ini tidak meluas dan pembahasan lebih terarah, maka perlu diberikan suatu pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Metode pengendalian yang digunakan yakni pengendali *dual-feedback* PID untuk proses *swing-up*. Sedangkan untuk proses stabilisasi, pengendali yang digunakan yakni pengendali LQR.
2. Simulasi dan rancang bangun pada pengendali dibuat pada domain diskrit tanpa memperhitungkan resolusi pembacaan sensor *encoder* dan *starting voltage* aktuator motor, sedangkan sistem RIP pada domain kontinu.
3. Harga nilai K_p, K_i, dan K_d diperoleh menggunakan metode *trial and error* pada sistem yang telah dibangun. Sedangkan nilai *state-feedback gain Matrix* K didapat berdasarkan nilai matriks Q dan R menggunakan metode *trial and error* pada simulasi sistem.

1.5. Sistematika Penulisan

Agar penulisan pada penelitian tugas akhir ini sistematis, maka penulisan akan dibagi menjadi beberapa bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan beberapa penelitian sejenis yang sudah dilakukan sebelumnya dan menjelaskan mengenai teori dasar yang berhubungan dengan penelitian yang dilaksanakan.

BAB III PEMBUATAN SISTEM INVERTED PENDULUM

Bab ini berisi metoda pembuatan sistem inverted pendulum menggunakan mikrokontroler STM32 dan pemodelan dari dinamika sistem yang telah dibuat dalam bentuk simulasi program MATLAB.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisi pembahasan mengenai perbandingan parameter sistem berdasarkan hasil simulasi dan implementasi tiap-tiap metoda kendali.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat setelah melakukan penelitian tugas akhir ini. Dalam bab ini juga berisi saran-saran pengembangan lebih lanjut tentang topik yang berkaitan.