



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Hak cipta milik UIN Suska Riau

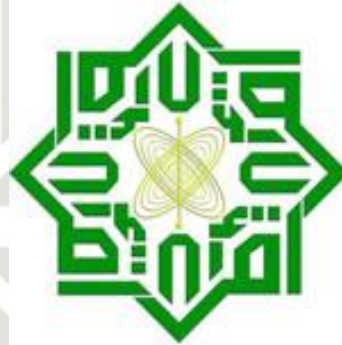
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

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

# PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HYBRID LINEAR QUADRATIC* REGULATOR (LQR)-PID UNTUK MENGENDALIKAN SUDUT PADA AERO PENDULUM

## TUGAS AKHIR

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



UIN SUSKA RIAU

Oleh :

**RIDHOWATUL AFDAL**

11555100376

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU  
PEKANBARU  
2022**

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

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HYBRID LINEAR QUADRATIC*  
REGULATOR (LQR)-PID UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA  
AERO PENDULUM**

**TUGAS AKHIR**

Oleh:

**RIDHOWATUL AFDAL**  
11555100376

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro  
di Pekanbaru, pada tanggal 18 Juli 2022

|   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>Ketua Program Studi</b></p> <div style="text-align: center;">  <p style="font-size: small;">Digitally<br/>signed by<br/>Zulfatri Aini<br/>Tanggal:<br/>2022.08.04<br/>13:47:02 WIB</p> </div> <p style="text-align: center;"><b><u>Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T</u></b><br/>NIP. 19721021 200604 2 001</p> | <p style="text-align: center;"><b>Pembimbing</b></p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><b><u>Jufrizel S.T., M.T</u></b><br/>NIP. 19740719 200604 1 001</p> |
|---|---|



Hak C

© H

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

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)*-PID UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA *AERO PENDULUM***



**TUGAS AKHIR**

Oleh:  
**RIDHOWATUL AFDAL**  
**11555100376**

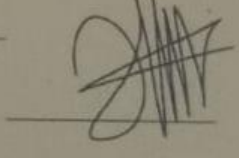
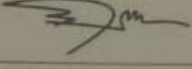
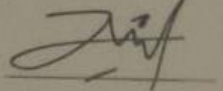
Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau di Pekanbaru, pada tanggal 18 Juli 2022

Pekanbaru, 18 Juli 2022

Mengesahkan,

|   |   |
|---|---|
| Dekan<br><br><u>Dr. Drs. Hartono, B.A., M.Pd</u><br>NIP. 19640301 199203 1 003 | Ketua Program Studi<br><br>Digitally signed by Zulfatri Aini<br>Tanggal: 2022.06.04 13:08:14 WIB<br><u>Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T</u><br>NIP. 19721021 200604 2 001 |
|---|---|

**DEWAN PENGUJI:**

|            |                              |   |  |
|------------|------------------------------|---|--|
| Ketua      | Rika Susanti, S.T, M.Eng.    |    |  |
| Sekretaris | Jufrizel., S.T., M.T.        |  |  |
| Anggota    | Putut Son Maria, S.ST., M.T. |   |  |
| Anggota    | Aulia Ullah, S.T., M.Eng.    |  |  |



## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Ridhowatul Afdal  
 NIM : 11555100376  
 Tempat, Tgl. Lahir : Duri, 19 Mei 1997  
 Fakultas/Pascasarjana : Sains dan Teknologi  
 Prodi : Teknik Elektro  
 Judul Skripsi :

PERANCANGAN SISTEM KENDALI HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR  
 (LQR)-PID UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulisan Skripsi 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 Skripsi saya ini, saya nyatakan bebas dari plagiat.
4. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penulisan Skripsi saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikianlah Surat Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 22 Juli 2022  
 Yang membuat pernyataan



Ridhowatul Afdal  
 NIM 11555100376

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



## LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan di perkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

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

© Hak cipta dimiliki UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



## HALAMAN PERSEMBAHAN

**Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang**

*Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia, maka wajib baginya berilmu, dan barangsiapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki keduanya, maka wajib baginya berilmu.*  
(HR. Tirmidzi)

Terima Kasih Ya Allah...

Sembah sujud serta syukurku kepada-Mu ya Allah, zat yang Maha Pengasih namun tak pernah pilih kasih dan Maha Penyayang yang kasih sayang-Nya tak terbilang. Engkau zat yang Maha membolak-balikkan hati, teguhkanlah hati ini di atas agama-Mu ya Allah. Lantunan sholawat beriring salam penggugah hati dan jiwa, menjadi persembahan penuh kerinduan pada sosok panutan umat, pembangun peradaban manusia yang beradab Nabi Besar Muhammad SAW.

*Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.*  
(QS: Al-Mujadilah 11)

Ku persembahkan karya ini untuk Papa tercinta, sosok pejuang dalam hidupku yang tak pernah mengenal kata lelah apalagi mengeluh serta Mama tersayang, malaikat tanpa sayap dalam hidupku yang tak kenal waktu siang dan malam selalu menjaga dan melindungi hingga aku bisa sampai seperti sekarang ini, Kakak tercinta, seluruh keluarga serta sahabat dan seluruh keluarga besar teknik elektro UIN SUSKA RIAU yang doanya senantiasa mengiringi setiap derap langkahku dalam meniti kesuksesan.

*Dan katakanlah: "Ya Tuhan-ku, masukkan aku ketempat masuk yang benar dan keluarkanlah (pula) aku ketempat keluar yang benar dan berilah aku disisi-Mu kekuasaan yang dapat menolongku."*  
(QS: Al-Isra 80)

| Ridhowatul Afdal |

| 18 Juli 2022 |

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





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

# PERANCANGAN SISTEM KENDALI *HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)-PID* UNTUK MENGENDALIKAN SUDUT PADA AERO PENDULUM

**RIDHOWATUL AFDAL**

**NIM: 11555100376**

Tanggal Sidang: 18 Juli 2022

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas No.155 Pekanbaru

## ABSTRAK

*Aero Pendulum* merupakan perangkat yang dirancang sebagai salah satu implementasi nyata pada proses pengendalian sikap terbang pada UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) yang diujung pendulumnya dipasang sebuah motor, dengan lengan yang memiliki titik ayun dan bergerak secara aero dinamis. Permasalahan yang terdapat pada saat memulai percobaan *aero pendulum* secara *open loop*, yang masih mendapatkan osilasi dan stabilitas posisi sudut saat mencapai sudut yang diinginkan. Penelitian ini memiliki tujuan yakni merancang kendali *Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID* sebagai pengendali posisi sudut pada *Aero Pendulum*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan kendali LQR-PID mampu bekerja dengan baik dalam penanganan *Overshoot*, *Error Steady state*, hingga kembali menuju *setpoint* yang diinginkan. Pengujian menggunakan *setpoint* 45°, 60° dan 90°, dengan respon terbaik pada sudut 45° dengan *Delay Time (Td)* = 0.1216 detik, *Settling Time (Ts)* = 0.6235 detik, *Maximum Overshoot* = 0 % dan *Ess* = 0°. Hasil yang baik juga didapatkan saat melakukan pengujian dengan perubahan *setpoint*. Sistem mampu mempertahankan kestabilan. Namun, didapatkannya nilai *error steady state* sebesar 0.047°.

**Kata Kunci:** *Aero Pendulum, UAV, (LQR)-PID, Setpoint, Sudut*

UIN SUSKA RIAU



**DESIGN OF CONTROL SYSTEM OF HYBRID LINEAR QUADRATIC  
REGULATOR (LQR)-PID TO CONTROL ANGLE ON  
AERO PENDULUM**

**RIDHOWATUL AFDAL**

**Student Number : 11555100376**

*Date of Final Exam : July 18<sup>th</sup>, 2021*

*Department of Electrical Engineering  
Faculty of Science of Technology  
State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau  
Soebrantas St. Number. 155 Pekanbaru*

**ABSTRACT**

*The Aero Pendulum is a device designed as one of the real implementations of the flight attitude control process on a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) with a motor attached to the end of the pendulum, with an arm that has a swing point and moves aero dynamically. The problem is when starting the open loop aero pendulum experiment, which still gets oscillations and stability of the angle position when it reaches the desired angle. This study has the aim of designing a Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID control as a controller for the angle position of the Aero Pendulum. Based on research conducted, LQR-PID control is able to work well in handling Overshoot, Error Steady state, until it returns to the desired setpoint. The test uses setpoint 45°, 60° and 90° with the best response at an angle of 45° with Delay Time (Td) = 0.1216 seconds, Settling Time (Ts) = 0.6235 seconds, Maximum Overshoot = 0% and Ess = 0°. Good results are also obtained when testing with setpoint changes. system is able to maintain stability. However, the steady state error value is 0.047°.*

**Key Word:** Aero Pendulum, UAV, (LQR)-PID, Setpoint, Angle

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





## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut di contoh dan menjadi teladan bagi kita semua. Atas Ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Perancangan Sistem Kendali *Hybrid Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID* Untuk Mengendalikan Posisi Sudut Pada *Aero Pendulum*”.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada di sekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA Riau harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ayah, ibu, abang dan adik tercinta yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Khairunnas Rajab, M.Ag., selaku Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
3. Bapak Dr. Drs. Hartono., B.A., M.Pd., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
4. Ibu Zulfatri Aini S.T, M.T., selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
5. Bapak Sutoyo, S.T, M.T selaku sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
6. Bapak Jufrizel, S.T, M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah meluangkan banyak waktu untuk diskusi dan bertukar kepikiran kepada penulis.

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



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

1. Bapak Putut Son Maria, S.ST., M.T. Selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir sekaligus dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

2. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng. Selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran yang sangat membangun terhadap penulis

3. Ibu Ewi Ismaeredah, S.Kom., M.Kom selaku pembimbing akademik yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan masukan perihal perkuliahan dari awal masuk hingga saat ini.

10. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.

11. Kepada Keluarga Besar M Noer yang telah memberikan dorongan motivasi serta kritik dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

12. Putri Olivia Brigita yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan dorongan ke penulis dalam berbagi hal dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

13. Keluarga Angkatan 2015 seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

14. Sahabat Pejuang Skripsi Tugas Akhir Anak Kos Abak Temben (Yogi Abdul Rahman, Muhammad Taufik, Rizky Bayu Nanda) yang telah memberikan dukungan, dorongan, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga dukungan yang telah diberi baik moril maupun materil mendapat balasan yang berupa pahala dari Allah SWT, dan harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya. Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 18 Juli 2022  
 Penulis,

Ridhowatul Afdal  
 NIM. 11555100376



**DAFTAR ISI**

**LEMBAR PERSETUJUAN ..... ii**

**LEMBAR PENGESAHAN ..... iii**

**SURAT PERNYATAAN ..... iv**

**LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL ..... v**

**PALAMAN PERSEMBAHAN ..... vi**

**ABSTRAK ..... vii**

**ABSTRACT ..... viii**

**KATA PENGANTAR ..... ix**

**DAFTAR ISI ..... xi**

**DAFTAR GAMBAR ..... xiii**

**DAFTAR TABEL ..... xv**

**DAFTAR RUMUS ..... xvi**

**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-3

    1.4. Batasan Masalah ..... I-3

    1.5. Manfaat Penelitian ..... I-4

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA ..... II-1**

    2.1 Penelitian Terkait ..... II-1

    2.2 Dasar Teori ..... II-2

        2.2.1 Aero Pendulum ..... II-2

        2.2.2 Model Matematika Aero Pendulum ..... II-3

        2.2.3 Linear Quadratic Regulator (LQR) ..... II-5

    2.3 Sistem Kendali PID ..... II-8

        2.3.1 Pengendali Proportional (P) ..... II-9

        2.3.2 Pengendali Integrative (I) ..... II-9

        2.3.3 Pengendali Derivative (D) ..... II-10

    2.4 Identifikasi Sistem ..... II-10

- Hak Cipta Ditinjau dan Disetujui oleh Universitas Islam Sumatera Utara
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 mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.







## DAFTAR GAMBAR

|   | Halaman |
|---|---------|
| Gambar 2.1. <i>Aero Pendulum</i> .....  | II-2    |
| Gambar 2.2. <i>Sistematis Aero Pendulum</i> .....                                       | II-3    |
| Gambar 2.3. <i>Blok Diagram Sistem Aero Pendulum</i> .....                              | II-4    |
| Gambar 2.4. <i>Sistem Kendali dengan Skema Kendali Optimal LQR</i> .....                | II-8    |
| Gambar 2.5. <i>Blok Diagram Pengendali PID</i> .....                                    | II-9    |
| Gambar 2.6. <i>Respon Waktu Orde 2</i> .....  | II-10   |
| Gambar 2.7. <i>Kurva untuk Interpolasi Linier</i> .....                                 | II-12   |
| Gambar 2.8. <i>Ikon Matlab</i> .....  | II-13   |
| Gambar 2.9. <i>Tampilan Model Simulink pada Matlab</i> .....                            | II-14   |
| Gambar 2.10. <i>Kotak Dialog Simulink Library</i> .....                                 | II-14   |
| Gambar 3.1. <i>Flowchart Penelitian</i> .....   | III-1   |
| Gambar 3.2. <i>Rangkaian Aero Pendulum secara Open Loop</i> .....                       | III-4   |
| Gambar 3.3. <i>Respon Open Loop sistem keseimbangan sudut pada Aero Pendulum</i> .....  | III-4   |
| Gambar 3.4. <i>blok diagram Aero Pendulum menggunakan pengendali LQR</i> .....          | III-6   |
| Gambar 3.5. <i>Rangkaian Aero Pendulum menggunakan pengendali LQR</i> .....             | III-6   |
| Gambar 3.6. <i>Program M-file Aero Pendulum Menggunakan pengendali LQR</i> .....        | III-7   |
| Gambar 3.7. <i>Rangkaian Pengendali LQR-PID</i> .....                                   | III-9   |
| Gambar 3.8. <i>Rangkaian Pengendali LQR-PD dengan Gangguan</i> .....                    | III-11  |
| Gambar 4.1. <i>Rangkaian Open Loop sistem posisi sudut Aero Pendulum</i> .....          | IV-2    |
| Gambar 4.2. <i>Respon Open Loop sistem posisi sudut Aero Pendulum</i> .....             | IV-2    |
| Gambar 4.3. <i>Data Delay Time 50% secara open loop</i> .....                           | IV-3    |
| Gambar 4.4. <i>Data Settling Time 98% secara open loop</i> .....                        | IV-3    |
| Gambar 4.5. <i>Data Rise Time 5% secara open loop</i> .....                             | IV-4    |
| Gambar 4.6. <i>Data Rise Time 95% secara open loop</i> .....                            | IV-4    |
| Gambar 4.7. <i>Rangkaian Pada Aero Pendulum menggunakan pengendali LQR</i> .....        | IV-6    |
| Gambar 4.8. <i>respon keluaran pada aero pendulum menggunakan pengendali LQR</i> .....  | IV-6    |
| Gambar 4.9. <i>Data delay time 50% Pengendali LQR</i> .....                             | IV-7    |
| Gambar 4.10 <i>Data settling time 98% Pengendali LQR</i> .....                          | IV-7    |
| Gambar 4.11. <i>Data Rise Time 5% pengendali LQR</i> .....                              | IV-8    |
| Gambar 4.12. <i>Data Rise Time 95% pengendali LQR</i> .....                             | IV-8    |
| Gambar 4.13. <i>Respon Pengendali LQR-PID pada posisi sudut 45° Aero Pendulum</i> ..... | IV-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 mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



|              |  |       |
|--------------|--|-------|
| Gambar 4.14. | Data <i>Delay Time</i> 50% Pengendali LQR-PID .....                                | IV-11 |
| Gambar 4.15. | Data <i>Settling Time</i> 98% Pengendali LQR-PID.....                              | IV-11 |
| Gambar 4.16. | Data <i>Rise Time</i> 5% Pengendali LQR-PID.....                                   | IV-12 |
| Gambar 4.17. | Data <i>Rise Time</i> 95% Pengendali LQR-PID.....                                  | IV-12 |
| Gambar 4.18. | Respon Pengendali LQR-PID pada posisi sudut 60° <i>Aero Pendulum</i> .....         | IV-14 |
| Gambar 4.19. | Data <i>Delay Time</i> 50% Pengendali LQR-PID .....                                | IV-14 |
| Gambar 4.20. | Data <i>Settling Time</i> 98% Pengendali LQR-PID.....                              | IV-15 |
| Gambar 4.21. | Data <i>Rise Time</i> 5% Pengendali LQR-PID.....                                   | IV-15 |
| Gambar 4.22. | Data <i>Rise Time</i> 95% Pengendali LQR-PID.....                                  | IV-16 |
| Gambar 4.23. | Respon Pengendali LQR-PID pada posisi sudut 90° <i>Aero Pendulum</i> .....         | IV-17 |
| Gambar 4.24. | Data <i>Delay Time</i> 50% Pengendali LQR-PID .....                                | IV-18 |
| Gambar 4.25. | Data <i>Settling Time</i> 98% Pengendali LQR-PID.....                              | IV-18 |
| Gambar 4.26. | Data <i>Rise Time</i> 5% Pengendali LQR-PID .....                                  | IV-19 |
| Gambar 4.27. | Data <i>Rise Time</i> 95% Pengendali LQR-PID .....                                 | IV-19 |
| Gambar 4.28. | Rangkaian Pengendali LQR-PID dengan perubahan setpoint.....                        | IV-21 |
| Gambar 4.29. | Respon Pengendali LQR-PID dengan perubahan posisi sudut <i>Aero Pendulum</i> ..... | IV-22 |

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





## DAFTAR TABEL

|   | Halaman |
|---|---------|
| Tabel 1.1. Spesifikasi sistem <i>Aero Pendulum</i> .....                      | II-5    |
| Tabel 1.2. Matriks R konstan dengan analisa IAE .....                         | III-3   |
| Tabel 1.3. Tabel penalaan PID menggunakan metode Heuristic .....              | III-7   |
| Tabel 4.1. Respon waktu sistem secara <i>Open Loop</i> .....                  | III-10  |
| Tabel 4.2. Respon waktu system dengan pengendali LQR .....                    | IV-5    |
| Tabel 4.3. Respon waktu system dengan pengendali LQR-PID pada sudut 45° ..... | IV-9    |
| Tabel 4.4. Respon waktu system dengan pengendali LQR-PID pada sudut 60° ..... | IV-13   |
| Tabel 4.5. Respon waktu system dengan pengendali LQR-PID pada sudut 90° ..... | IV-17   |
| Tabel 4.6. Respon waktu system dengan pengendali LQR-PID pada sudut 90° ..... | IV-20   |

© Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

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

UIN SUSKA RIAU



## DAFTAR RUMUS

|  | Halaman |
|--|---------|
| Rumus 2.1. Model Matematika <i>aero pendulum</i> .....     | II-3    |
| Rumus 2.2. Pengendali LQR .....                            | II-3    |
| Rumus 2.3. Sistem kendali PID .....                        | II-3    |
| Rumus 2.4. <i>Maximum Overshoot</i> .....                  | II-3    |
| Rumus 2.5. Kriteria Integral Absolute of Error (IAE) ..... | II-3    |
| Rumus 2.6. Interpolasi Linear .....                        | II-4    |
| Rumus 2.7. Fungsi Alih .....                               | II-4    |
| Rumus 2.8. Plan Linear .....                               | II-5    |
| Rumus 2.9. Indek Performasi .....                          | II-6    |
| Rumus 2.10 Persamaan Hamilton .....                        | II-6    |
| Rumus 2.11. Persamaan <i>State</i> .....                   | II-6    |
| Rumus 2.12. Persamaan <i>Constate</i> .....                | II-6    |
| Rumus 2.13. Persamaan Kondisi <i>Stationer</i> .....       | II-6    |
| Rumus 2.14. Persamaan Syarat Batas .....                   | II-7    |
| Rumus 3.1. Persamaan fungsi Alih .....                     | III-4   |
| Rumus 3.2. Persamaan Transfer Fungsi .....                 | III-5   |

© Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

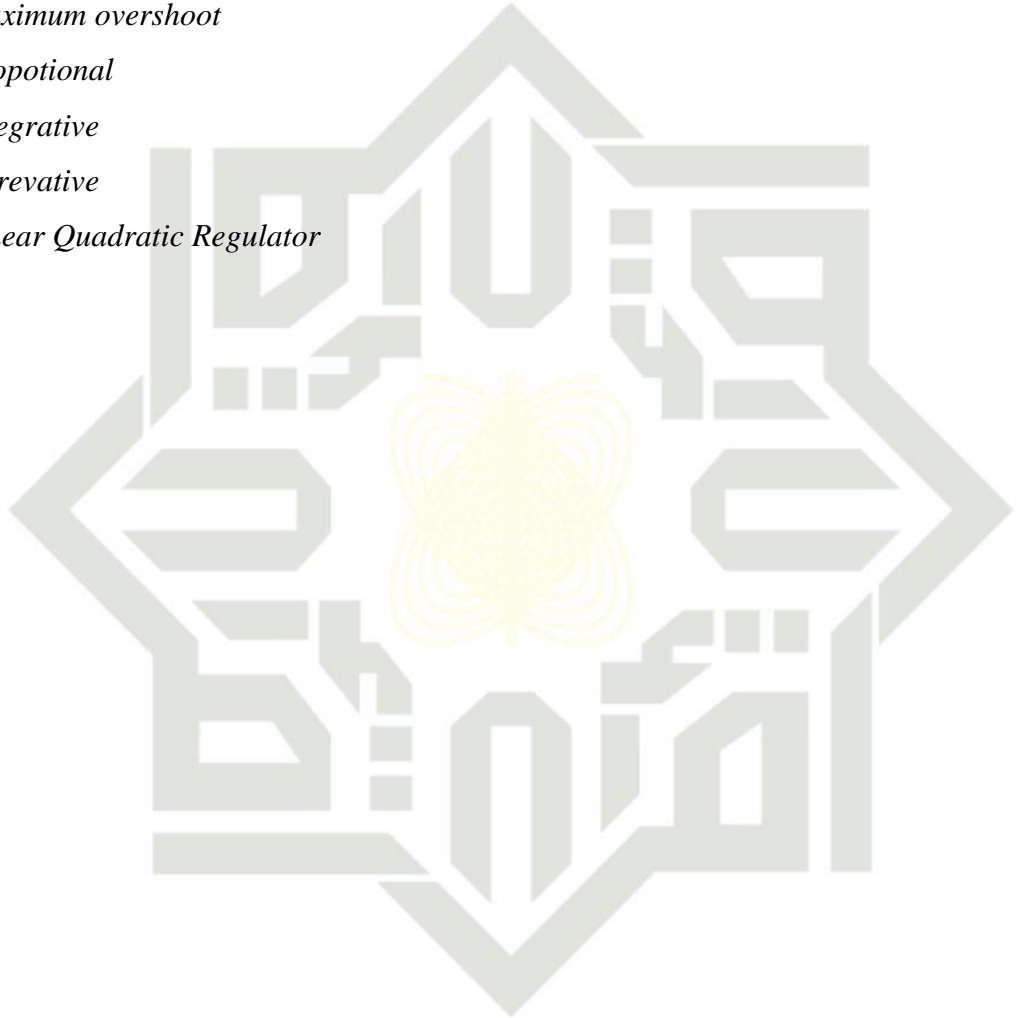
Hak Cipta Milik UIN Suska Riau

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



## DAFTAR SINGKATAN

- = *Direct Current*
- = *Delay Time*
- = *Rise Time*
- = *Matrix Laboratory*
- = *Maximum overshoot*
- = *Propotional*
- = *Integrative*
- = *Derevative*
- = *Linear Quadratic Regulator*



UIN SUSKA RIAU

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
C  
D  
LQR

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





## BAB I PENDAHULUAN

### 1. Latar Belakang

Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat sekarang ini sudah maju dan berkembang pesat. Perkembangan pada saat ini terjadi untuk memenuhi permasalahan yang terjadi sehingga kemajuan ini bertujuan untuk mempermudah permasalahan tersebut. Perkembangan ini berpengaruh terhadap beberapa hal yaitu salah satunya dibidang penerbangan yang mengkaji perkembangan pesawat tak berawak atau *Unmanned Aerial Vechine* (UAV)[1]. *Unmanned Aerial Vechine* (UAV) merupakan pesawat tanpa awak yang dapat dikendalikan dari jarak jauh dimana pilot tidak lagi dipergunakan untuk mengoperasikannya atau dapat mengendalikan dirinya sendiri melalui rancangan program komputer[2].

*Aero pendulum* merupakan pendulum dengan baling-baling disalah satu ujungnya (lengan bebas). Baling-baling tersebut digerakkan oleh motor arus searah (DC) yang menghasilkan gaya dorong untuk menyesuaikan posisi pendulum sesuai dengan besar tegangan yang diberikan[3]. *Aero pendulum* terdiri dari dua posisi ekuilibrium yaitu stabil dan tidak stabil. Posisi stabil adalah posisi pendulum mengarah ke *setpoint* dan dapat mempertahankan nilai yang telah diberikan dan posisi tidak stabil adalah posisi pendulum tidak berada pada *setpoint* yang telah ditentukan[2]. Permasalahan mendasar pada *Aero Pendulum* yaitu pada kestabilan terbangnya, dimana hasil respon sistem memiliki osilasi dan *overshoot* sehingga dibutuhkan pengendali pada sistem *Aero Pendulum* yang nantinya mampu menyesuaikan *setpoint* yang diberikan.

Penelitian yang telah membahas tentang sistem *Aero pendulum*. Salah satunya pengendalian sudut pada *aero pendulum* menggunakan pengendali PID dengan metode *genetic algorithm optimization*. Nilai yang diperoleh menggunakan metode optimasi yaitu  $K_p$  0.91,  $K_i$  6.529, dan  $K_d$  sebesar 0.65. Dengan data analisa respon respon *settling time* 3.379 detik, *time delay* 1.457 detik dan *rise time* 4.054 detik. Namun hasil respon masih memiliki *error steady state* 0.0116% pada sudut  $45^\circ$ [2].

Kemudian penelitian yang serupa menggunakan Kontroller PID dengan metode *Tyreus-Luyben* dalam mengendalikan sudut pada *aero pendulum*. Nilai diperoleh menggunakan metode tuning *Tyreus-Luyben* yaitu  $K_p$  0.0313,  $K_i$  0.0355, dan  $K_d$  0.002 sehingga menghasilkan respon dengan *setpoint*  $60^\circ$  yaitu *time delay* 14.49 detik, *rise time*



0.95 detik, *settling time* 62.74 detik. namun hasil respon pada sistem ini memiliki *overshoot* sebesar  $60.8^\circ$  dan *error steady state* sebesar 0.1% [4].

Penelitian selanjutnya menggunakan controller *adaptive neuro fuzzy inference sistem* (ANFIS) dalam mengendalikan sudut pada *aero pendulum*. Kendali ANFIS digunakan untuk mengontrol suatu sistem dengan pergerakan yang kurang baik. Hasil respon keluaran dengan menggunakan ANFIS didapatkan *rise time* 0.8903 detik, *settling time* 1.1035 detik, *time peak* 1.1484 detik. Pada controller menggunakan ANFIS masih adanya *overshoot* sebesar 0.4868 % dan *error steady state* 0.006% [5].

Dari beberapa penelitian diatas dan hasil simulasi dari penguji secara *open loop* pada *aero pendulum* menunjukkan hasil respon keluaran yang beresilasi sangat besar. Studi pustaka pada penelitian diatas menunjukkan beberapa pengendali belum menunjukan hasil yang bagus dalam kestabilan sistem karena pada penelitian diatas masih memiliki *overshoot* dan *error steady state*. Sementara kestabilan sistem merupakan faktor penting pada *aero pendulum* saat posisi sudut yang diinginkan. Oleh karena itu, diperlukannya pengendali yang mampu meredam *error steady state* dan mampu mencapai keadaan stabil dalam permasalahan kestabilan sistem ini. Maka dari itu pengendali yang dipilih adalah pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Pengendali LQR dipilih didasari adanya keunggulan bersifat *Regulator* yang terdapat pada LQR. *Regulator* sebagai pengendalian agar system tetap konstan dan dapat bertahan pada keadaan *setpoint* [6]. Pengendali LQR dengan menggunakan IAE diharapkan dapat menjaga kestabilan sistem *aero pendulum* dari awal hingga akhir. Sehingga, dapat memperthankan nilai *setpoint* yang telah diberikan [7]. Namun, berdasarkan hasil uji simulasi pra penelitian *aero pendulum* belum didapatkan hasil yang diharapkan. Karena berdasarkan simulasi hasil pra penelitian, sistem mampu mencapai *setpoint* yang ditentukan namun, masih terdapat osilasi pada sistem Ketika mencapai *setpoint*. Oleh karena itu, pada penelitian ini menggunakan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) akan dikombinasikan dengan pengendali PID.

Penelitian menggunakan kendali hybrid LQR-PD pada kecepatan motor *brushless DC*. Sistem motor *brushless DC* dengan pengendali LQR menghasilkan respon keluaran *time delay* 0.00106 detik, *settling time* 0.00536 detik, *rise time* 0.00393 detik, dan *error steady state* 0.3%. Pada saat penambahan PD pada pengendali LQR hasil respon keluaran sangat cepat dibandingkan hanya menggunakan pengendali LQR saja, hasil respon keluaran LQR-PD yaitu *time delay* 0.00045 detik, *settling time* 0.00228 detik, *rise time* 0.00168 detik dan tidak adanya *error steady state* maupun *overshoot* yang terjadi pada sistem ini [8].

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





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

Pada penelitian yang menggunakan kendali hybrid LQR-PID terlihat bahwa *error steady state* yang ada pada pengendali LQR sudah menjadi 0%. Pengendali PID berperan untuk mengatasi kelemahan dari pengendali LQR. Pada pra simulasi menggunakan pengendali LQR pada sistem aero pendulum yang menimbulkan osilasi dan *error steady state* pada sistem ini, dimana pengendali kendali *proporsional* (P) mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kendali *integral* (I) mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kendali *derivative* (D) mempunyai keunggulan untuk memperkecil *overshoot* dan osilasi [9].

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan. Penulis akan mengkombinasikan pengendali LQR-PID dalam menjaga kestabilan pada sistem *aero pendulum*. Maka penulis akan mengajukan judul Tugas Akhir yaitu “**PERANCANGAN KENDALI HYBRID LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)-PID UNTUK MENGENDALIKAN SUDUT PADA AERO PENDULUM**”.

**1.2. Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana merancang kendali LQR terhadap sistem *aero pendulum* yang masih menghasilkan osilasi?
2. Bagaimana performansi kendali LQR setelah ditambahkan PID sistem *aero pendulum* dalam mengatasi osilasi yang terjadi?

**1.3. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

- Menghasilkan hasil keluaran respon tanpa adanya *overshoot*, *error steady state* dan osilasi saat ditambahkan kendali PID pada LQR dalam menjaga keseimbangan sistem *aero pendulum*
- Mengetahui performansi kendali LQR-PID dalam perubahan setpoint *aero pendulum*

**1.4. Batasan Masalah**

Pada penelitian ini, penulis membuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Permodelan sistem *aero pendulum* yang di gunakan adalah model sistem yang diturunkan dari persamaan matematis pada jurnal yang di rujuk yang berjudul “Desain





Sistem Kontroller PID Tyreus-Luyben Pada Kendali Sudut *Aero Pendulum* Berbasis Labview”

2. Tidak membahas *hardware* pada *aero pendulum*

3. Aplikasi yang digunakan untuk simulasi menggunakan MATLAB

**5. Manfaat Penelitian**

1. Menghasilkan rancangan sistem kendali LQR untuk mengedalikan keseimbangan pada *aero pendulum*

2. Meningkatkan perfomasi keseimbangan pada *aero pendulum* yang kemudian bisa diterapkan pada sistem yang sebenarnya.

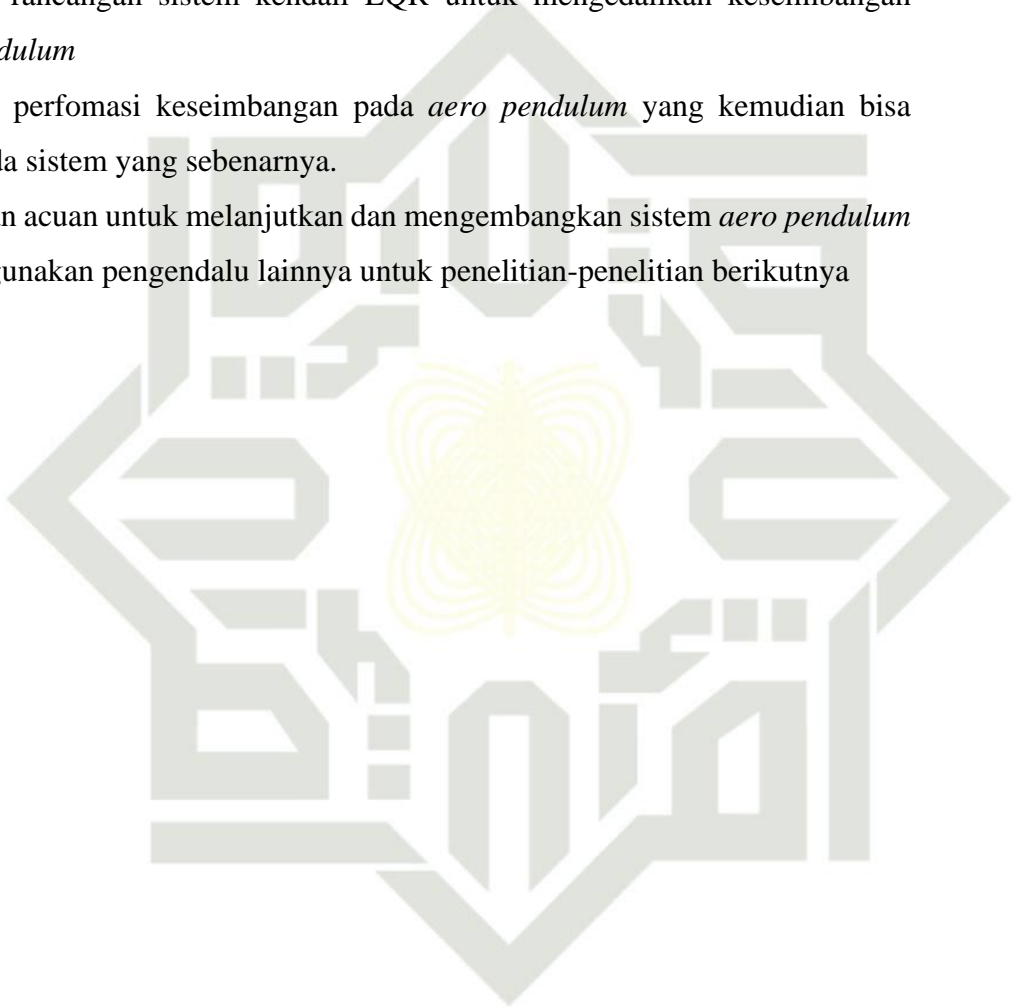
3. Dapat dijadikan acuan untuk melanjutkan dan mengembangkan sistem *aero pendulum* dengan menggunakan pengendalu lainnya untuk penelitian-penelitian berikutnya

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

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

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

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



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 1. Penelitian Terkait

Dalam penelitian Tugas akhir perlu dilakukannya studi literatur yang merupakan pencarian teori-teori dan referensi yang relevan dengan kasus dan permasalahan yang akan diselesaikan. Teori dan referensi ini didapatkan melalui jurnal, paper, buku dan sumber lainnya.

Ada beberapa penelitian yang telah membahas tentang sistem *Aero pendulum*. Salah satunya pengendalian sudut pada *aero pendulum* menggunakan pengendali PID dengan metode *genetic algorithm optimization*. Nilai yang diperoleh menggunakan metode optimasi yaitu  $K_p$  0.91,  $K_i$  6.529, dan  $K_d$  sebesar 0.65. Dengan data analisa respon respon *settling time* 3.379 detik, *time delay* 1.457 detik dan *rise time* 4.054 detik. Namun hasil respon masih memiliki *error steady state* 0.0116% pada sudut  $45^\circ$  [2].

Kemudian penelitian yang serupa menggunakan Kontroler PID dengan metode *Tyres-Luyben* dalam mengendalikan sudut pada *aero pendulum*. Nilai diperoleh menggunakan metode tuning *Tyres-Luyben* yaitu  $K_p$  0.0313,  $K_i$  0.0355, dan  $K_d$  0.002 sehingga menghasilkan respon dengan setpoint  $60^\circ$  yaitu *time delay* 14.49 detik, *rise time* 45.95 detik, *settling time* 62.74 detik. Namun, hasil respon pada sistem ini memiliki *overshoot* sebesar  $60.8^\circ$  dan *error steady state* sebesar 0.1% [4].

Penelitian selanjutnya menggunakan kontroler *adaptive neuro fuzzy inference sistem* (ANFIS) dalam mengendalikan sudut pada *aero pendulum*. Kendali ANFIS digunakan untuk mengontrol suatu sistem dengan pergerakan yang kurang baik. Hasil respon keluaran dengan menggunakan ANFIS didapatkan *rise time* 0.8903 detik, *settling time* 1.1035 detik, *time peak* 1.1484 detik. Pada kontroler menggunakan ANFIS masih adanya *overshoot* sebesar 0.4868 % dan *error steady state* 0.006% [5]

Penelitian menggunakan kendali hybrid LQR-PD pada kecepatan motor *brushless DC*. Sistem motor *brushless DC* dengan pengendali LQR menghasilkan respon keluaran *time delay* 0.00106 detik, *settling time* 0.00536 detik, *rise time* 0.00393 detik, dan *error steady state* 0.3%. Pada saat penambahan PD pada pengendali LQR hasil respon keluaran sangat cepat dibandingkan hanya menggunakan pengendali LQR saja, hasil respon keluaran LQR-PD yaitu *time delay* 0.00045 detik, *settling time* 0.00228 detik, *rise time* 0.00168 detik dan tidak adanya *error steady state* maupun *overshoot* yang terjadi pada sistem ini [8].

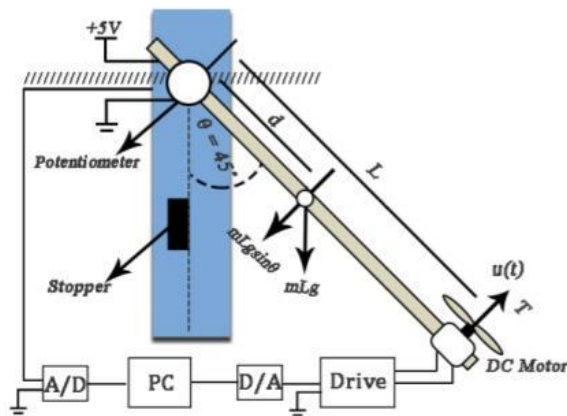
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

Berdasarkan pada hasil dari penelitian diatas yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan beberapa pengendali telah digunakan pada sistem ini. Hasil keluaran yang diperoleh dari beberapa pengendali sudah baik walaupun masih terdapat *error steady state*, *overshoot* dan osilasi. Maka dari itu pengendali yang dipakai selain menghilangkan *error steady state*, *overshoot* dan osilasi, dapat menjaga performa sistem dalam keadaan stabil. Oleh karena itu penulis mengajukan melakukan penelitian dalam menganalisis identifikasi keseimbangan pada *aero pendulum* dengan menggunakan pengendali LQR-PID.

## 2. Dasar Teori

### 2.2.1 Aero Pendulum

*Aero pendulum* merupakan pendulum mekanik yang memiliki baling-baling disalah satu ujungnya (lengan bebas), sehingga pendulum berayun disalah satu titik tetap dengan menggunakan aerodinamik yang dihasilkan oleh baling-baling. *Aero pendulum* terdiri dari 2 posisi ekuilibrium yaitu stabil dan tidak stabil. Posisi stabil adalah posisi pendulum mengarah ke setpoint dan mempertahankan nilai tersebut. Sedangkan, posisi tidak stabil adalah posisi pendulum tidak berada pada setpoint yang ditentukan. *Aero pendulum* digerakkan oleh motor arus searah (DC) yang menghasilkan gaya dorong untuk menyesuaikan posisi pendulum sesuai dengan besar tegangan yang diberikan[3].



Gambar 2.1 *aero pendulum*[10]

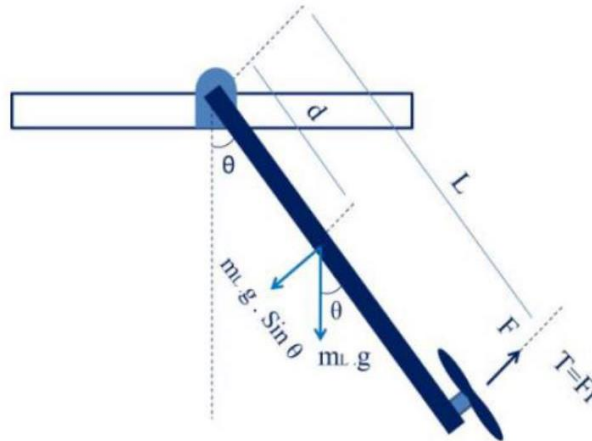
Pada gambar 2.1,  $u(t)$  merupakan masukan kontrol dan sudut yang terletak di antara lengan bandul dengan sumbu vertikal adalah variabel kontrol. Saat tegangan telah ditetapkan, baling-baling pada bandul akan berputar dan menghasilkan torsi  $T$  sebagai penak pendulum[11][12].





2.2 Model Matematika Aero Pendulum

Aero pendulum yang memiliki motor berbaling-baing di satu ujungnya, dan ujung lainnya berada pada satu titik pumpu. Sehingga saat motor berputar akan menghasilkan gaya dorong dan membuat pendulum terangkat. Saat motor diberikan tegangan, baling baling berputar dan menghasilkan torsi T untuk menarik pendulum. Gambar 2.2 berikut merupakan gambaran dari diagram sistematis dari *aero pendulum*.



Gambar 2.2 sistematis aero pendulum

Pada gambar 2.2 menunjukkan bahwa terdapatnya batang silinder yang poros nya berada di tengah. Oleh karena itu, dapat diketahui adanya momen inersia yaitu:

$$J = \frac{1}{3} ML^2 \tag{2.1}$$

Berdasarkan hukum Newton dan momentum sudut, persamaan sistem dapat dijabarkan menjadi persamaan berikut:

$$J \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + m_l \cdot g \cdot d \cdot \theta = T \tag{2.2}$$

Dari persamaan (2.2), akan dilakukan transformasi Laplace dengan domain (s), sehingga menjadi persamaan berikut ini:

$$J \cdot s \theta(s) + c \cdot s \theta(s) + m_l \cdot g \cdot d \cdot \theta(s) = T(s) \tag{2.3}$$

Dari persamaan (2.3) tersenut dilakukan pemindahan ruas, maka didapatkan fungsi alih sebagai berikut:

$$\theta \left( J \cdot s^2 + c \cdot s + m_l \cdot g \cdot d \right) = T(s) \tag{2.4}$$

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J \cdot s^2 + c \cdot s + m_l \cdot g \cdot d}$$

Dari fungsi alih diatas dilakukan penyederhanaan dengan membagi persamaan dengan J sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{\frac{1}{J}}{J \cdot s^2 + c \cdot s + \frac{m_l \cdot g \cdot d}{J}}$$

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



Penjelasan:

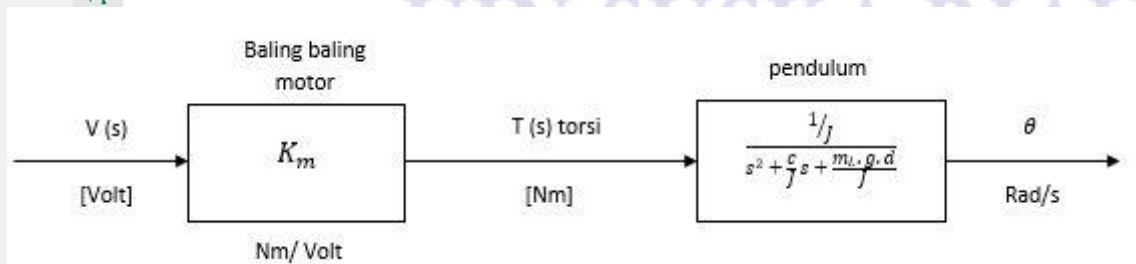
- $\theta$  = sudut (Derajat)
- $\theta(s)$  = sudut dalam domain waktu (*Laplace*)
- $\dot{\theta}$  = kecepatan sudut (rad/s)
- $J$  = momen inersia ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^2$ )
- $\ddot{\theta}$  = percepatan sudut ( $\text{rad}/\text{s}^2$ )
- $K_m$  = koefisien motor propeller
- $g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
- $m$  = berat bandul ( $\text{Kg}$ )
- $L$  = Panjang lengan
- $c$  = koefisien redaman ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ )
- $d$  = jarak ujung lengan ke titik tumpu (m)

Hasil dari persamaan diatas terdapat gaya dorong yang dihasilkan, dimana gaya dorong bukan merupakan *variable* yang digunakan untuk dikontrol, karena pada sistem tersebut menggunakan tegangan yang dimasukkan, sehingga persamaa tegangan motor *brushless* DC dengan gaya dorong, dapat dijabarkan sebagai berikut[5]:

$$T(s) = K_m \cdot V(s) \tag{2.6}$$

Dimana:

- $K_m$  = kecepatan putaran baling-baling motor ( $\frac{\text{rad}/\text{s}}{v}$ )
- $T(s)$  = gaya angkat dalam domain waktu yang dihasilkan oleh motor *brushless* DC ( $\text{Nm}/\text{Kg}$ )
- $V(s)$  = tegangan dalam domain waktu yang diberikan ke motor *brushless* DC (Volt)



Gambar 2.3 blok diagram sistem *aero pendulum*

Dari blok diagram pada gambar 2.3, maka didapatkan fungsi alih sebagai berikut:

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



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

$$\frac{Km/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_L g d}{J}} \quad (2.7)$$

Dalam menentukan fungsi alih suatu sistem, perlu diketahui spesifikasi dari sistem tersebut. Berikut ini merupakan tabel spesifikasi fisik dari plant sistem *aero pendulum*.

Tabel 2.1 spesifikasi sistem *aero pendulum*[13]

| No. | Parameter                      | Spesifikasi | Satuan               |
|-----|--------------------------------|-------------|----------------------|
| 1.  | Panjang Lengan (L)             | 0.4         | m                    |
| 2.  | Panjang Pusat Massa (d)        | 0.2         | m                    |
| 3.  | Masa (m)                       | 0.32        | Kg                   |
| 4.  | Momen Inersia (J)              | 0.0512      | Kg.m <sup>2</sup>    |
| 5.  | Percepatan Gravitasi (g)       | 9.8         | m/s <sup>2</sup>     |
| 6.  | Koefesien redaman (c)          | 0.0001      | Kg.m <sup>2</sup> /s |
| 7.  | koefesien motor propeller (Km) | 0.7         | $\frac{rad/s}{v}$    |

**2.2.3 Linear Quadratic Regulator (LQR)**

Pokok bahasan dalam kendali optimal adalah menentukan sinyal kendali yang akan di proses untuk memenuhi batasan fisik sesuai dengan kriteria performansi yang diinginkan. Kendali optimal dengan kriteria *Quadratic* dalam menyelesaikan masalah *regulator* yaitu kendali *Linear Quadratic Regulator (LQR)*[14]. Perancangan model dan bentuk kendalinya berupa garis lurus disebut dengan *linear*, sedangkan *Quadratic* memiliki *cost function* berupa kuadrat, dan disebut *regulator* karena referensi sistem bukan fungsi waktu. Dari hasil *linierisasi* didapatkan suatu *plant linear* dalam bentuk:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.8)$$

$$y = Cx$$

- Dimana:
- A = matriks sistem
  - B = matriks input
  - C = matriks output
  - x = state output





$x$  = state sistem  
 $u$  = state output

Dalam perancangan kendali optimal LQR yang perlu dilakukan yaitu menentukan matriks Q dan matriks R. Selanjutnya matriks Q dan matriks R digunakan untuk menentukan indeks performansi sistem. Harga dari matriks Q dan matriks R ditentukan dengan kriteria yang diinginkan menggunakan indeks performansi[14][15].

$$\frac{1}{2} S(T)x^2(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T (Qx^2 + Ru^2) \tag{2.9}$$

Dengan syarat:

$$S(T) \geq 0, Q \geq 0, R \geq 0$$

Dimana:

- $t_0$  = waktu awal
- $T$  = waktu akhir
- $x$  = matriks *state* akhir
- $Q$  = matriks *semi definit positif*
- $R$  = matriks *definit positif*
- $S$  = matriks *semi definit positif*

Sehingga diperoleh persamaan Hamilton[14] :

$$H(x, u, \lambda, t) = L(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t)$$

$$H(x, u, \lambda, t) = \frac{1}{2} (x^T Qx + u^T Ru) + \lambda^T (A_x + B_u) \tag{2.10}$$

Dari persamaan Hamilton tersebut dapat diperoleh syarat perlu dan syarat batas yaitu:

1. Syarat perlu

a) Persamaan *State*

$$\frac{\partial H}{\partial u} = \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right)^T Qx + \left(\frac{\partial Qx}{\partial \lambda}\right)^T u = A_x + B_x \tag{2.11}$$

b) Persamaan *constate*

$$\lambda = \left[ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)^T Qx + \left(\frac{\partial Qx}{\partial \lambda}\right)^T x + \left(\frac{\partial x}{\partial x}\right)^T Ru + \left(\frac{\partial Ru}{\partial x}\right)^T u \right] + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \lambda}\right)^T (A_x + B_u) + \left(\frac{\partial (A_x + B_u)}{\partial x}\right)^T \lambda$$

$$\dot{\lambda} = Qx + A^T \lambda \tag{2.12}$$

c) Kondisi *stationer*

$$\frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

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.



$$\left[ \left( \frac{\partial x}{\partial x} \right)^\tau Qx + \left( \frac{\partial Qx}{\partial x} \right)^\tau x + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^\tau Ru + \left( \frac{\partial Ru}{\partial x} \right)^\tau u \right] + \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^\tau (A_x + B_u) + \left( \frac{\partial(A_x + B_u)}{\partial x} \right)^\tau \lambda = 0$$

$$Ru + B^\tau \lambda = 0$$

$$u = -R^{-1} + B^\tau \lambda \tag{2.13}$$

Syarat batas

Batas awal

$$x(0) = 0$$

Batas akhir

$$\phi_x + \psi_x^\tau v - \lambda)^\tau dx|_{t=\tau} + (\phi_t + \psi_t^\tau v - H) dt|_{t=\tau} = 0 \tag{2.14}$$

Karena  $\psi = 0$  dan

$$\phi(T) = \frac{1}{2} x^T(T) s(T) x(T)$$

$$\phi_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = s(T) x(T) \tag{2.15}$$

Sehingga diperoleh persamaan

$$(s(T)x(T) + v \cdot 0 - \lambda)^T dt|_{t=\tau} = 0$$

$$s(T)x(T) = \lambda(t) \tag{2.16}$$

Dari persamaan *costrate* dan (2.16), keduanya menggunakan variabel  $\lambda$ . Pada saat keduanya didistribusikan, maka akan menghasilkan persamaan [14]:

$$S(T)x(T) = \lambda(t)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{S}(t)x(t) + S(t)\dot{x}(t)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -Qx - A^\tau \lambda$$

$$S(t)x(t) + S(t)\dot{x}(t) = -Qx - A^\tau \lambda$$

$$S(t)x(t) + S(t)\{Ax + Bu\} = -Qx - A^\tau \lambda$$

$$S(t)x(t) + S(t)\{Ax + B(-R^{-1}B^\tau \lambda)\} = -Qx - A^\tau \lambda$$

$$\dot{x} = (A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q)x$$

$$\dot{S} = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q \tag{2.17}$$

Persamaan (2.17) disebut dengan persamaan *diferensial Riccati*. Dimana untuk  $\dot{S} = 0$  persamaannya disebut dengan *Algerraic Riccati Equation (ARE)*[14]. Dengan di dapatkannya matriks S dari Persamaan ARE ini sehingga didapatkan persamaan sinyal kendali yang dapat dihitung:

$$u = -R^{-1}B^\tau \lambda = -R^{-1}B^\tau Sx = -Kx \tag{2.18}$$

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

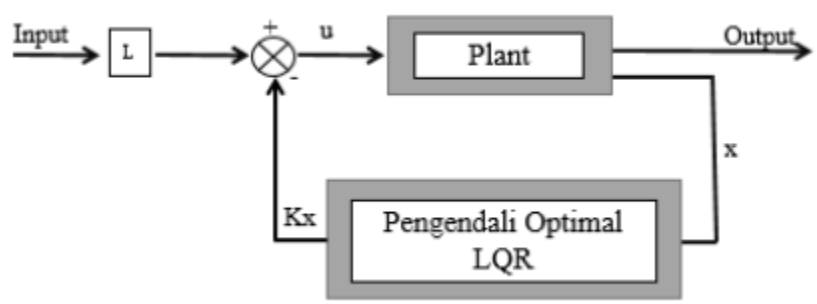
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

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

Maka konstanta umpan balik keadaan  $K$  dapat dicari sebelum menghasilkan sinyal kendali pada persamaan (2.18):

$$k = R^{-1}B^T S \tag{2.19}$$

Karena nilai  $S$  adalah unik, maka solusi semi definit *positif* untuk persamaan ARE haruslah memenuhi syarat persamaan (2.17). Dalam perancangan kendali optimal LQR dengan mengetahui nilai  $S$ , lalu nilai  $S$  tersebut disubstitusikan ke persamaan (2.18) sehingga didapatkan nilai matriks optimal  $K$ , dengan  $K$  adalah *Gain State Feedback*, sehingga sistem kendali optimal LQR hasil desain dapat diperlihatkan pada gambar[14]



Gambar 2.4 Sistem Kendali dengan Skema Kendali Optimal LQR[16]

Dari penjabaran di atas dapat disimpulkan bahwa langkah-langkah untuk merancang kendali LQR adalah sebagai berikut:

1. Ubah bentuk *Transfer Fungsion Plant nonlinier* menjadi bentuk *State Space* dan dapatkan matriks  $A$ ,  $B$ ,  $C$  dan  $D$  dari *Plant* tersebut.  
 Tentukan matriks pembobol  $Q$  dan  $R$   
 Selesaikan persamaan *aljabar riccati* hingga menghasilkan suatu matriks  $S$  yang *definit positif*  
 Hitung optimal *Gain Feedback K*

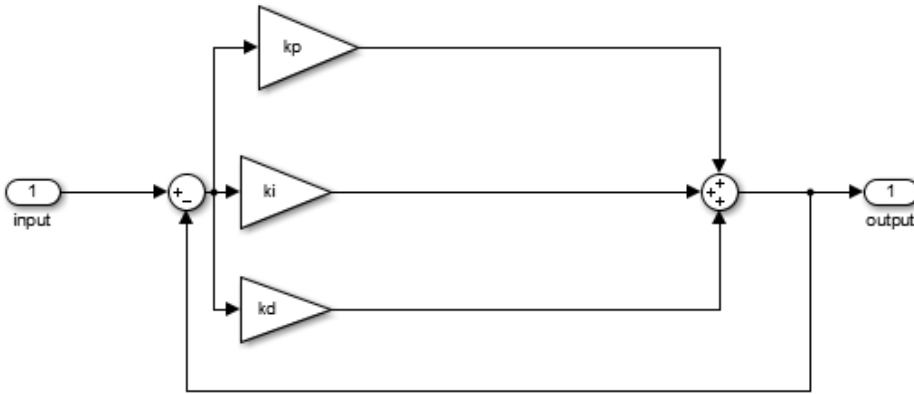
**2.3 Sistem Kendali PID**

Pengendali PID adalah pengendali paling umum digunakan pada industri seperti pada mesin cuci, mesin pompa air, sepeda motor, dll. Menurut survey, 97% mesin industry yang berkecimpungan dalam pengolahan industri menggunakan sistem pengendali PID sebagai pengendali utamanya[17]. Alasan menggunakan pengendali PID adalah karena algoritmanya sederhana sehingga mudah dipakai dan diimplementasi pada alat industri.



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

Sistem kendali *Proportional-Integrative-Derivative Controller* (PID) merupakan pengendali yang digunakan untuk menentukan presisi pada suatu sistem pengukuran dengan adanya umpan balik pada *setpoint* sistem tersebut. Pengendali PID mempunyai 3 komponen pengendali utama yaitu : kendali *Proportional* (P), *Integrative* (I), *Derivative* (D) yang memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri dan dapat saling membantu dalam mengerjakan suatu sistem. Seperti pada gambar 2.5 dibawah:



Gambar 2.5 Blok Diagram Pengendali PID[17]

### 2.3.1 Pengendali Proportional (P)

Pengendali proporsional sering di simbol dengan P pada sistem kendali PID. Kontribusi pengendali P pada sistem, yaitu dapat menambah atau mengurangi tingkat kestabilan sistem, dapat menaikkan *rise time* dan setting time pada respon *transient* dan juga pengendali P dapat mengurangi *steady state error* sistem yang mana apabila kita menginginkan mengurangi error maka kita harus menaikkan nilai Kp-nya sehingga nilai k-nya besar semakin tinggi nilai Kp-nya maka semakin berkurang errornya tapi dengan menaikkan nilai Kp maka sistem menjadi tidak stabil[18]. Pengendali P ini akan memberikan pengaruh langsung pada sistem yang sebanding dengan error. Adapun kekurangannya apabila apabila pengendali P terlalu tinggi maka semakin tinggi *overshoot* yang dihasilkan dan respon sistem akan berosilasi.

Persamaan pengendali proporsional sebagai berikut:

$$u(t) = Kp e(t) \tag{2.20}$$

### 2.3.2 Pengendali Integrative (I)

Pengendali integral biasanya disimbolkan dengan I pada pengendali PID. Pengendali I berfungsi untuk menghilangkan *steady state error* pada sistem sehingga respon sistem tidak



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

terjadi osilasi. Dengan menggunakan hanya pengendali P sistem kadang tidak mencapai nilai *setpoint* yang diinginkan maka dari itu dibantu dengan pengendali I. Kekurangan dari pengendali I adalah apabila nilai I terlalu tinggi maka membuat ketidakstabilan dalam sistem dan overshoot yang tinggi, dan juga pengendali I tidak bisa berdiri sendiri dengan artian pengendali I harus dibarengi dengan pengendali P[19].

Persamaan pengendali integrative sebagai berikut:

$$u(t) = Kie(t)dt \tag{2.21}$$

### 2.3.3 Pengendali Derivative (D)

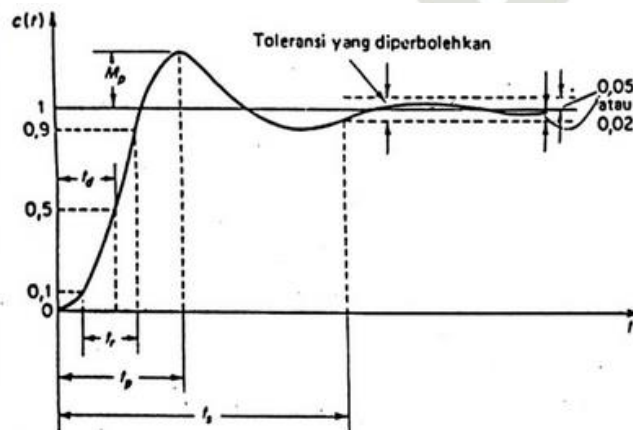
Pengendali Derivatif biasanya disimbolkan dengan D. Besar *output* dari pengendali derivatif memiliki sifat seperti operasi diferensial pada umumnya. Pengontrol derivatif menggunakan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter pengendali. Apabila tidak ada perubahan sinyal *error*, maka *output* dari pengendali derivatif tidak akan berubah. Pengendali D berfungsi sebagai penurun *overshoot* dan meningkatkan kestabilan pada sistem[19]. Kekurangan dari pengendali D adalah pengendali membuat *rise time* sistem semakin lama dan pengendali D tidak bisa berdiri sendiri.

Persamaan pengendali derivative sebagai berikut:

$$u(t) = Kd \frac{du}{dt} e(t) \tag{2.22}$$

### 2.4 Identifikasi Sistem

Respon sistem adalah perubahan perilaku output terhadap perubahan sinyal input. Respon sistem ini berupa kurva yang akan menjadi dasar untuk menganalisa karakteristik sistem dengan menggunakan persamaan atau model matematis.



Gambar2.6 Respon waktu orde 2[14]



Pada Gambar 2.6 Bentuk kurva respon sistem ini dapat dilihat setelah mendapatkan sinyal input. Sinyal input yang diberikan untuk mengetahui karakteristik sistem disebut dengan sinyal test[14].

**Waktu tunda (delay time)**

Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.

**Waktu naik (rise time)**

Waktu naik adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari harga akhir

**Waktu puncak**

Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali

**Maximum Overshoot (M<sub>p</sub>)**

Maximum overshoot adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum. Parameter ini didefenisikan sebagai berikut:

$$\% \text{ maximum Overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \tag{2.22}$$

**Waktu penetapan (settling time)**

Settling time adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetapkan dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya dengan persentase mutlak dari harga akhir (5% atau 2%)

**2.5 Kriteria Integral Menggunakan Integral Of Absolute Error (IAE)**

Kriteria integral membutuhkan data tanggapan mulai dari t = 0 hingga mencapai keadaan tunak. Kriteria ini didasarkan pada seluruh tanggapan dari proses yang bersangkutan. Kriteria integral yang digunakan pada penelitian ini adalah kriteria IAE (integral Absolute Error) yang bertujuan untuk mendapatkan nilai IAE sekecil mungkin dengan pemilihan kriteria tergantung pada karakteristik sistem proses dan beberapa syarat tambahan yang diperoleh dari tanggapan lup tertutup. Kriteria IAE lebih populer dikalangan praktisi industry sebab mudah dalam pemakaiannya serta sangat cocok untuk menekan error[10].

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \tag{2.23}$$

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

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang  
 © Satelit Islamic University of Sumatra  
 Kasim Riau

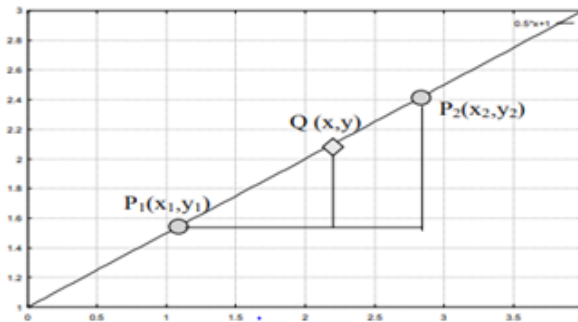


**6 Metode Heuristik**

Sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Perancangan metode heuristik ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan. Untuk perancangan sistem pengendalian PID dilakukan pencarian nilai besar Kp, Ki dan Td. Maka pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, dengan penalaan (metode heuristik) dimana penalaan parameter pengendali dimulai dengan hanya menggunakan pengendali P kemudian baru ditambahkan PI, lalu ditambahkan pengendali D. Pemberian nilai ini di sesuaikan dengan karakteristik respon sistem yang diperoleh[20].

**2.7 Interpolasi Linier**

Interpolasi adalah menentukan titik-titik antara dari n buah titik dengan menggunakan suatu fungsi pendekatan tertentu. Salah satu metode interpolasi adalah interpolasi linier yaitu menentukan titik-titik antara 2 buah titik dengan menggunakan garis lurus.



Gambar 2.7 kurva untuk Interpolasi Linier

Persamaan garis lurus yang melalui 2 titik P1 (x1, y2) dan P2(x2, y2) dapat dituliskan dengan

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

Sehingga diperoleh persamaan dari interpolasi linier sebagai berikut:

$$y = \left( \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) (x - x_1) + y_1$$

Algoritma Interpolasi Linier adalah sebagai berikut:

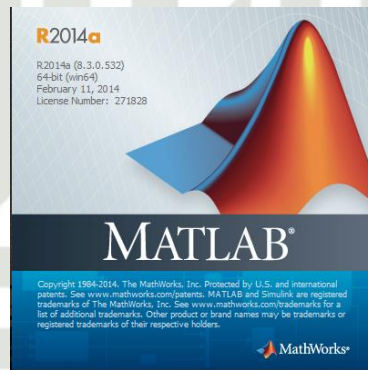
1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

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

- Tentukan dua titik P1 dan P2 dengan koordinasi masing-masing  $(x_1, y_2)$  dan  $(x_2, y_2)$
- Tentukan nilai x dari titik yang akan dicari
- Hitung nilai y dengan persamaan
- Tampilkan nilai titik yang baru Q(x,y)

### Matlab (Matrix Laboratory)

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah suatu program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks.



Gambar 2.8 Ikon Matlab

MATLAB merupakan merk software yang dikembangkan oleh Mathworks.Inc dimana, dalam software ini menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks dan sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matriks, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Sehingga Matlab banyak digunakan pada Matematika dan Komputasi, Pengembangan dan Algoritma, Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototype, Analisa Data, Eksplorasi dan visualisasi, Analisis numerik dan statistic, dan Pengembangan aplikasi teknik.

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

- Command window* digunakan untuk mengetik fungsi yang diinginkan.
- Current Directory berfungsi untuk menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan matlab
- Command history* berfungsi yang telah digunakan sebelumnya dapat kembali.
- Workspace* digunakan untuk membuat variabel yang ada dalam Matlab.

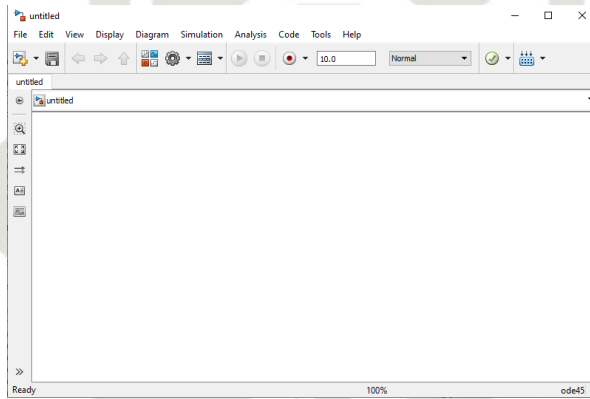
**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

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

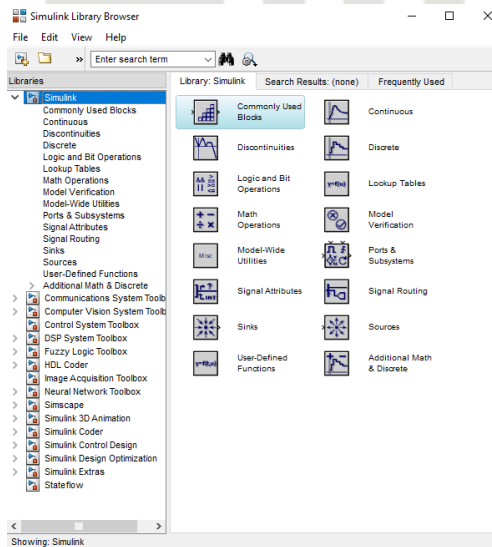
Pada penelitian ini dilakukan pemrograman modeling dan simulasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan. fitur matlab yang digunakan untuk simulasi ini disebut *simulink*.

*Simulink* adalah salah satu bagian dari Matlab program dimana *simulink* dapat digunakan untuk mensimulasi sistem, dalam artian mengamati dan menganalisa perilaku dari sebuah tiruan sistem yang sudah di modelkan. Tiruan sistem diharapkan memiliki perilaku yang sangat mirip dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar, simulasi akan membantu proses analisis dan desain sistem.

*Simulink* dalam aplikasi Matlab juga dapat menunjukkan performansi sistem dalam bentuk dua ataupun tiga dimensi. Dalam perancangan *user* menjadi mudah karena adanya blok-blok diagram yang dapat dengan mudah diatur sedemikian rupa, sesuai dengan model matematis dari sistem atau *plant* yang akan dikendalikan.



Gambar 2.9 Tampilan Model Simulink pada Matlab



Gambar 2.10 Kotak Dialog Simulink Library





UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

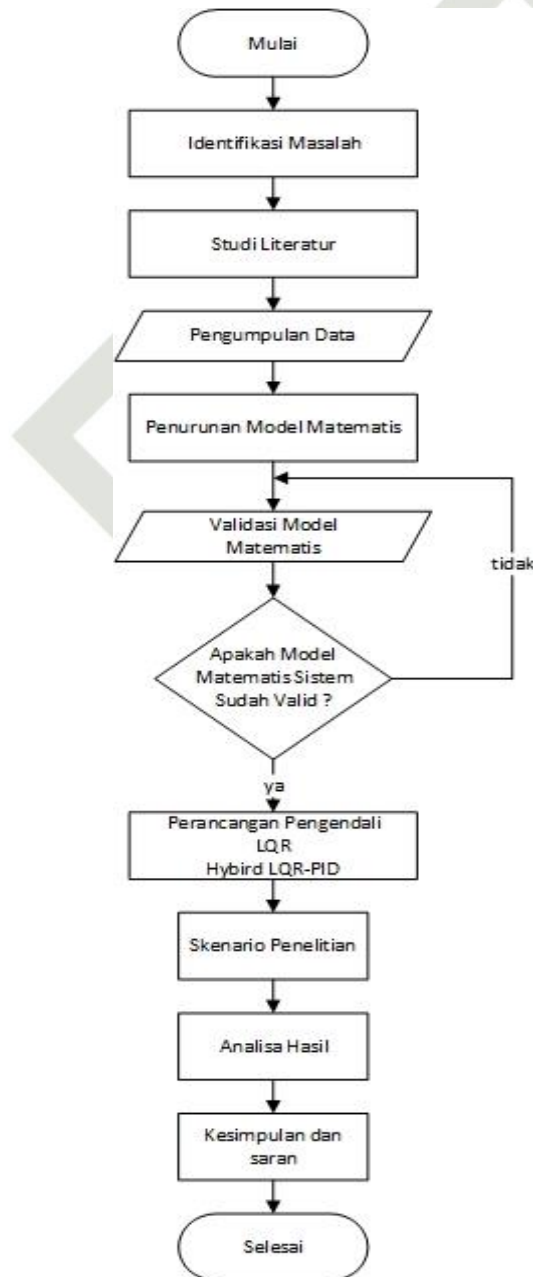


UIN SUSKA RIAU

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 1. Proses Alur Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan maupun langkah-langkah yang dilakukan penulis, mulai dari studi literatur hingga hasil akhir dalam penelitian Tugas Akhir ini. Berikut ini merupakan tahapan yang dilakukan penulis:



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

- 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.



## Tahapan Penelitian

Berdasarkan Flowchart diatas, dalam penelitain yang dilakukan dapat mencapai tujuan diharapkan, maka beberapa tahapan yang harus dilakukan sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah

Mencari masalah yang terdapat pada sistem *aero pendulum* dengan melakukan *review* dari beberapa referensi yang berkaitan dengan pengendalian pada *aero pendulum*

2. Studi Literatur

Melakukan *review* dan mempelajari referensi yang berkaitan dengan penelitian ini, mengenai *aero pendulum* dan perancangan pengendali LQR dan PID

3. Pengumpulan data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data-data sebelum membuat desain yang diperlukan untuk tahap selanjutnya

4. Penentuan Variabel

Data-data yang didapat dari pengumpulan data pra desain diubah dalam bentuk model matematis dengan persamaan transfer fungsi sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{Km/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_l \cdot g \cdot d}{J}}$$

5. Verifikasi model matematis

Tahapan ini untuk pengujian model matematis plant dalam bentuk transfer fungsi dari sistem *aero pendulum* yang diubah ke dalam bahasa program matlab *Simulink* untuk menyesuaikan hasil keluaran dari sistem dengan referensi yang digunakan

6. Desain pengendali

Penelitian ini menggunakan pengendali LQR yang dikombinasikan dengan pengendali PID. Untuk merancang pengendali LQR, terlebih dahulu dilakukan penurunan matematis pengendali LQR. Selanjutnya melakukan perancangan pengendali PID dan mengkombinasikan pengendali LQR dengan pengendali PID

7. Skenario Penelitian

Skenario penelitian merupakan tahap atau Langkah secara umum tentang penelitian yang dilakukan seperti melakukan pengujian terhadap sistem

8. Analisa hasil

Pada tahapan ini digunakan untuk melihat hasil keluaran respon sistem yang meliputi *rise time*, *selting time*, serta *error steady state* dari perancangan pengendali apakah respon sistem sudah sesuai dengan tujuan yang diharapkan.

2. 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.

UIN SUSKA RIAU  
 Himpunan Ilmiah  
 Universitas Islam  
 Negeri  
 Sultan  
 Syarif  
 Kasim  
 Riau





Kesimpulan dan saran

Setelah dilakukan analisa hasil dan sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian. Serta memberikan saran-saran yang berguna untuk dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

**3.3.1.3.2.3. Pemodelan matematis**

Pada perancangan matematis ini data-data parameter *aero pendulum* yang sudah ditetapkan sebelumnya disubstitusikan ke model matematis yang diturunkan pada persamaan (2.7). Berikut ini adalah parameter dari *aero pendulum* yang digunakan:

Tabel 3.1 spesifikasi sistem *aero pendulum*[13]

| No. | Parameter                      | Spesifikasi | Satuan               |
|-----|--------------------------------|-------------|----------------------|
| 1.  | Panjang Lengan (L)             | 0.4         | m                    |
| 2.  | Panjang Pusat Massa (d)        | 0.2         | m                    |
| 3.  | Masa (m)                       | 0.32        | Kg                   |
| 4.  | Momen Inersia (J)              | 0.0512      | Kg.m <sup>2</sup>    |
| 5.  | Percepatan Gravitasi (g)       | 9.8         | m/s <sup>2</sup>     |
| 6.  | Koefesien redaman (c)          | 0.0001      | Kg.m <sup>2</sup> /s |
| 7.  | koefesien motor propeller (Km) | 0.7         | $\frac{rad/s}{v}$    |

Berdasarkan persamaan (2.7) setelah dimasukkan nilai-nilai parameter *aero pendulum* pada tabel 3.1 ke dalam fungsi alih *aero pendulum*, maka didapatkan fungsi alih *aero pendulum* sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{Km/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}}$$

Dengan mendapatkan nilai Km, J, C,  $m_L$ , g dan d. selanjutnya memasukkan nilai tersebut kedalam fungsi alih sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{Km/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}}$$

$$G(s) = \frac{0.7/0.0512}{s^2 + \frac{0.0001}{0.0512}s + \frac{0.32 \cdot 9.8 \cdot 0.2}{0.0512}}$$

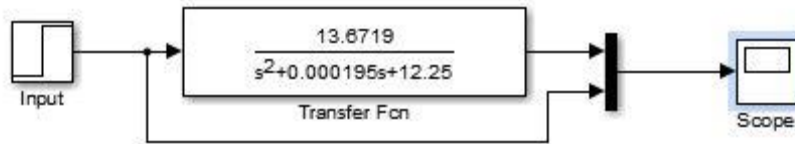
$$G(s) = \frac{13.6719}{s^2 + 0.000195 s + 12.25} \tag{3.1}$$

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

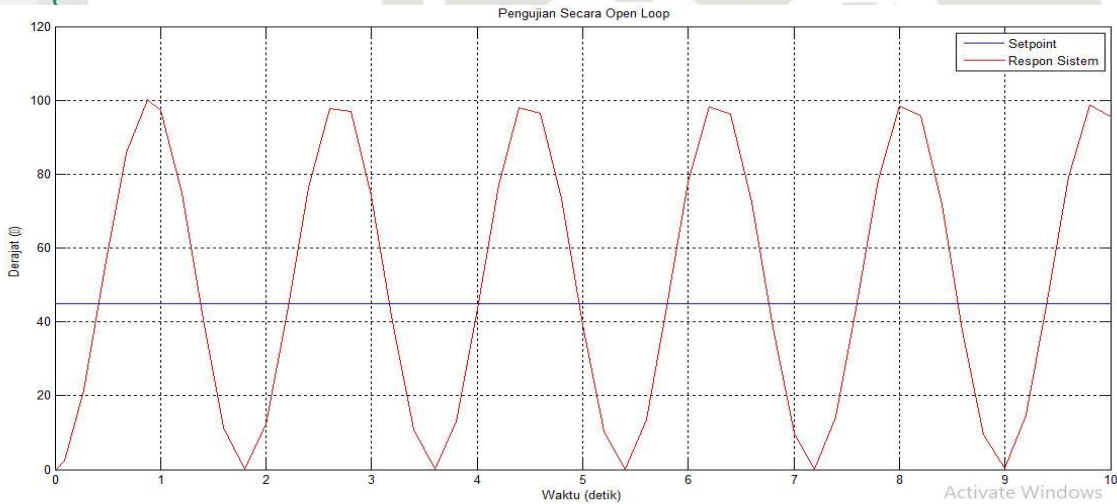
State Islamic University of Sultan Isyarif Kasim Riau

#### 4 Verifikasi Model Matematis

Untuk Verifikasi model matematis untuk *aero pendulum* dilakukan menggunakan perangkat lunak *Simulink Matlab R2014a* secara *open loop* dari penurunan nilai yang didapatkan. Variabel yang digunakan pada simulasi ini yaitu *setpoint* bernilai  $45^\circ$ . Rangkaian *open loop* untuk menguji sistem pada plant keseimbangan sudut pada *aero pendulum* dapat disusun sebagai berikut:



Gambar 3.2 Rangkaian *aero pendulum* secara *Open Loop*



Gambar 3.3 Respon *Open Loop* sistem keseimbangan sudut pada *aero pendulum*

Berdasarkan pada gambar 3.3 menunjukkan grafik dari hasil respon pengujian sistem tanpa pengendali (*open loop*) diatas menampilkan respon keluaran sistem yang sama dengan jurnal rujukan. Terlihat bahwa respon sistem dari posisi sudut *aero pendulum* yang tidak stabil dan terjadinya osilasi yang sangat besar. Hal ini membuktikan bahwa sistem tidak bisa mempertahankan posisinya dalam keadaan stabil. Oleh karena itu, diperlukannya pengendali agar dapat menghasilkan sistem yang stabil dan dapat mencapai *setpoint* yang diberikan.

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



**Perancangan Pengendali**

**1.1 Perancangan Pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR)**

Persamaan transfer fungsi dari dari posisi sudut *aero pendulum* diubah dalam bentuk *state space* karena pada perancangan pengendali LQR membutuhkan pemodelan *state space* dari sistem. Adapaun pemodelan *state space* tersebut adalah:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.000195 s + 12.25}$$

Dari turunan transfer fungsi pada persamaan dari *aero pendulum* tersebut kemudian diturunkan dengan menggunakan transformasi laplace balik sehingga diperoleh persamaan diferensial orde dua:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.000195 s + 12.25}$$

$$13.6719 U(s) = s^2 Y(s) + 0.000195 s Y(s) + 12.25 Y(s)$$

$$13.6719 U = \frac{d^2 y}{dt^2} + 0.000195 \frac{dy}{dt} + 12.25$$

$$13.6719 U = \ddot{y} + 0.000195 \dot{y} + 12.25$$

$$\ddot{y} = -0.000195 \dot{y} - 12.25 + 13.6719 U$$

$$\dot{y} = \frac{-0.000195 \dot{y} - 12.25 + 13.6719 U}{1}$$

$$\ddot{y} = -0.000195 \dot{y} - 12.25 + 13.6719 U$$

Didefinisikan:

$$x_1 = y \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{y}$$

$$x_2 = \dot{y} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{y} = -0.000195 \dot{y} - 12.25 + 13.6719 U$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{y} = -0.000195 \dot{y} - 12.25 + 13.6719 U$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -12.25 & -0.000195 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 13.6719 \end{bmatrix} U \tag{3.2}$$

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

Jadi, dari persamaan diatas didapatkan nilai matriks A, B, C, D yaitu sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -12.15 & -0.000195 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 13.6719 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

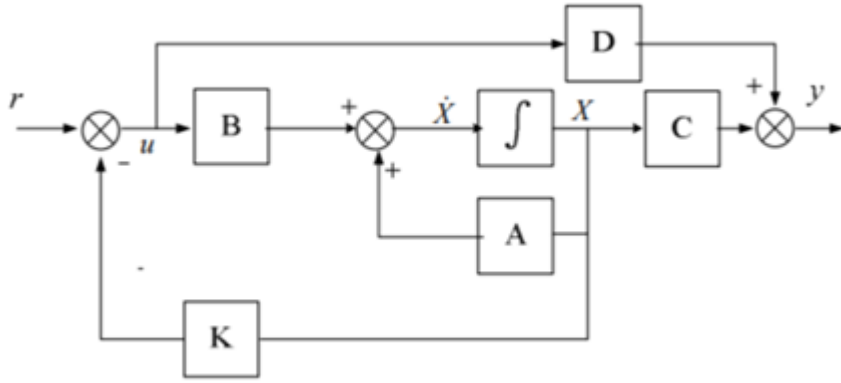
$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

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

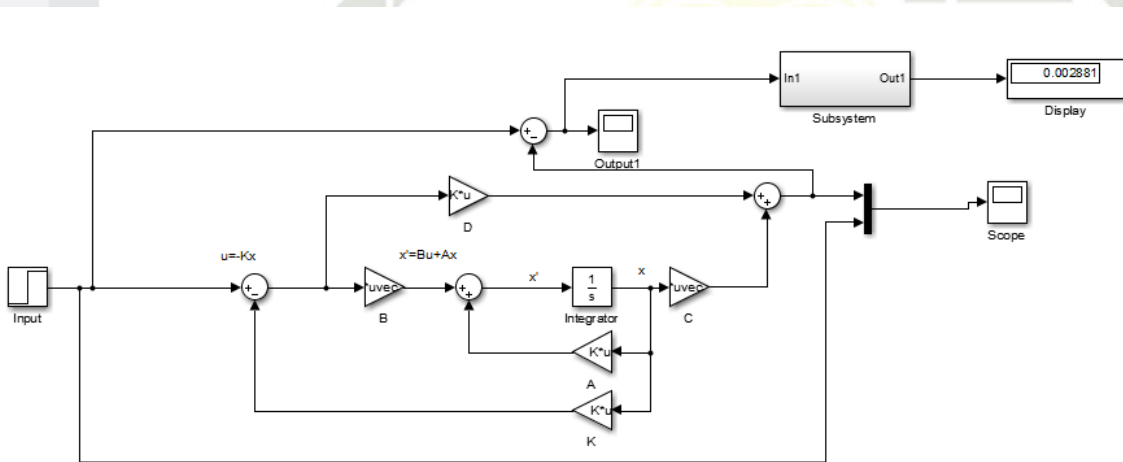


1. Diarung Undang-Undang
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian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

Perancangan pengendali LQR adalah berdasarkan penurunan persamaan matematis pada bab 2. Sehingga berdasarkan turunan matematis dan skema LQR yang sudah didapatkan akan dibuat ke Simulink. Blok-blok diagram dan rangkaian Simulink pengendalian LQR pada sistem *aero pendulum* diperlihatkan pada gambar berikut:



Gambar 3.4 blok diagram *aero pendulum* menggunakan pengendali LQR



Gambar 3.5 rangkaian *aero pendulum* menggunakan pengendali LQR

Setelah rangkaian pengendali LQR dirancang. Maka langkah selanjutnya membuat program yang bertujuan untuk mencari nilai matriks R dan Q dengan memasukkan nilai matriks A, B, C, dan D. Adapun program yang dimasukkan dalam M-file adalah seperti yang di tunjukkan pada gambar dibawah 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.

```

programname.m  x  LQR_Afdal.m  x  +
1 -   A=[0 1 ; -12.25 -0.000195];
2 -   B=[0; 13.6719];
3 -   C=[1 0];
4 -   D=[0];
5 -   R=[1];
6 -   Q=[0.1974 0;0 0];
7 -   N=[0];
8 -   sys=ss(A,B,C,D)
9 -   [K,S,e]=lqr(sys,Q,R,N)
  
```

Gambar 3.6 Tampilan Program M-file *aero pendulum* Menggunakan Pengendali LQR

Perhitungan untuk pengendali LQR dilakukan dengan memasukkan persamaan *state space* yang telah didapatkan kedalam *software* matlab. Dalam melakukan simulasi menggunakan pengendali LQR dibutuhkan matriks Q dan R yang optimal. Untuk mendapatkan matriks Q dan R yang optimal dilakukanlah dengan cara menetapkan matriks R bernilai konstan yaitu 1, sehingga didapatkan nilai matriks Q adalah bilangan itu sendiri, karena hal inilah yang diinginkan. Penentuan matriks Q menggunakan *trial and error* dengan analisa IAE. Percobaan *trial and error* dengan analisa IAE dapat dilihat pada tabel

Tabel 3.2 matriks R konstan dengan analisa IAE

| No. | Matriks R | Matriks Q   | IAE   |
|-----|-----------|---|-------|
| 1.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 61.93 |
| 2.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.11 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 58.48 |
| 3.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.12 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 55.25 |
| 4.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.13 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 52.21 |
| 5.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.14 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 49.34 |
| 6.  | [1]       | $\begin{bmatrix} 0.15 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 46.61 |



|  |     |   |       |
|--|-----|---|-------|
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.16 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$   | 44.02 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.17 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$   | 41.59 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.18 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$   | 39.38 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.19 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$   | 37.35 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.191 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 37.16 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.192 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.98 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.193 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.81 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.194 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.64 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.195 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.48 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.196 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.33 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.197 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  | 36.21 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1971 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.2  |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1972 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.19 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1973 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.18 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1974 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.17 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1975 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.16 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1976 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.15 |
|  | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1977 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.15 |

Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

State Islamic Univ

Han Syarif Kasim Riau

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





|    |     |   |       |
|----|-----|---|-------|
| 5. | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1978 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.14 |
| 6. | [1] | $\begin{bmatrix} 0.1979 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 36.13 |

Pada tabel percobaan dilakukan *trial and error* dengan memasukkan nilai matriks Q  $\begin{bmatrix} 0.1978 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  kemudian didapatkan nilai IAE namun respon keluaran melebihi dari nilai *setpoint*. Selanjutnya dilakukan penambahan nilai matriks Q sebesar 0.01, nilai IAE semakin kecil namun respon keluaran masih melebihi nilai *setpoint*. Pada nilai matriks Q sebesar 0.19 nilai respon keluaran mendekati *set point* sehingga dilakukan penambahan nilai lagi sebesar 0.001, sampai pada matriks  $\begin{bmatrix} 0.197 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  pada matriks ini keluaran respon sistem semakin mendekati *setpoint* dan didapatkan nilai IAE yang kecil. Selanjutnya dilakukan kembali penambahan nilai matriks sebesar 0.0001 pada matriks  $\begin{bmatrix} 0.1957 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , pada penambahan nilai matriks ini mendapatkan nilai IAE yang semakin kecil dan respon keluar sistem mencapai nilai *setpoint*. Pada matriks Q =  $\begin{bmatrix} 0.1975 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  nilai IAE lebih semakin kecil dari pada matriks Q =  $\begin{bmatrix} 0.1975 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  dan respon keluaran sistem menjauhi *setpoint*. Sehingga dilakukan perancangan pengendali LQR dengan menggunakan matriks Q =  $\begin{bmatrix} 0.1975 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , matriks R = [1] dan nilai IAE = 36.16.

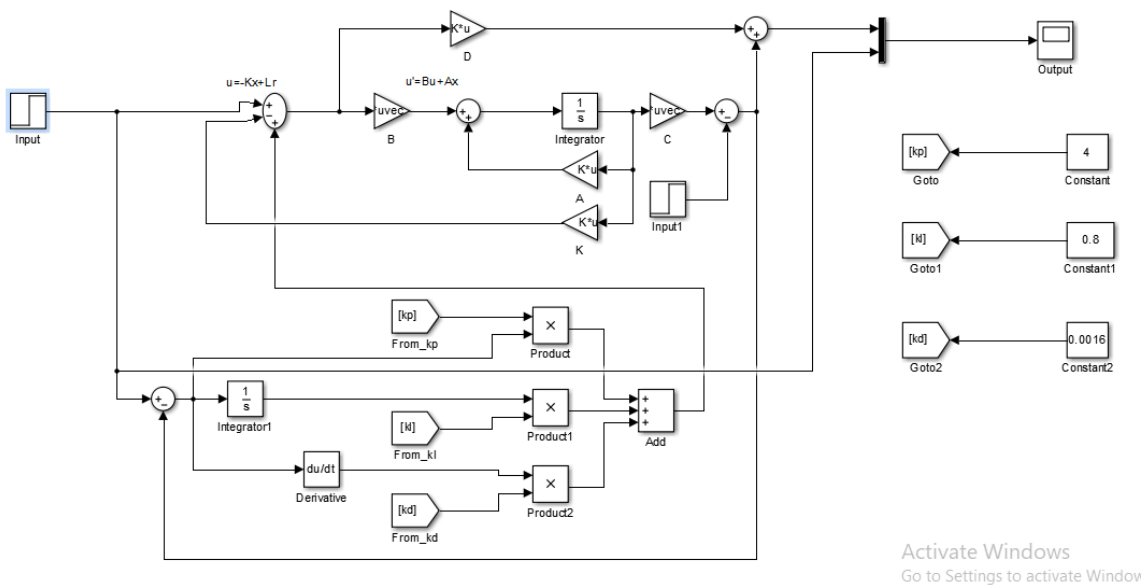
### 3.5.2 Perancangan kendali Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID

Setelah mempelajari desain pengendali LQR maka langkah selanjutnya dapat dilakukannya penggabungan antara pengendali optimal LQR dengan pengendali PID agar kinerja dari pengendali LQR menjadi optimal dan lebih baik.

Nilai parameter PID didapatkan pada saat melakukan tuning menggunakan metode heuristik. Rangkaian pengendali LQR-PD pada sistem pengendalian posisi sudut pada *aero pendulum* adalah sebagai berikut:

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

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



Gambar 3.7 rangkaian pengendali LQR-PID

Penalaan PID didapatkan dengan menggunakan metode Heuristic, berikut ini penalaan PID dengan metode Heuristic

Tabel 3.3 tabel penalaan PID menggunakan metode Heuristic

| Setpoint<br>(Derajat) | Uji Metode Heuristic |    |        | Rise Time<br>(detik) | Settling<br>Time<br>(detik) | Error<br>Steady<br>State(°) |
|-----------------------|----------------------|----|--------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                       | Kp                   | Ki | Kd     |                      |                             |                             |
| 5                     | 0.1                  | 1  | 0.1478 | 0.1841               | 0.0078                      |                             |
| 10                    | 0.2                  | 2  | 0.3782 | 0.6741               | 0.1305                      |                             |
| 15                    | 0.1                  | 1  | 0.0682 | 0.166                | 0.0419                      |                             |
| 20                    | 0.2                  | 2  | 0.159  | 0.3071               | 0.0593                      |                             |
| 25                    | 0.18                 | 3  | 0.2355 | 0.4255               | 0.0339                      |                             |
| 30                    | 0.12                 | 4  | 0.2802 | 0.494                | 0.0231                      |                             |
| 10                    | 0.1                  | 5  | 1.0317 | 1.737                | 0.1763                      |                             |
| 20                    | 0.15                 | 6  | 0.6512 | 1.1087               | 0.0911                      |                             |



|    |      |     |        |        |        |
|----|------|-----|--------|--------|--------|
| 30 | 0.2  | 0.1 | 0.0271 | 0.0796 | 0.1812 |
| 5  | 0.14 | 1   | 0.2836 | 0.553  | 0.1632 |
| 10 | 0.18 | 2   | 0.3793 | 0.6766 | 0.1189 |
| 15 | 0.15 | 3   | 0.4169 | 0.7194 | 0.0732 |
| 20 | 0.12 | 4   | 0.4264 | 0.7388 | 0.0555 |
| 25 | 0.1  | 5   | 0.0673 | 0.1397 | 0.0383 |
| 30 | 0.15 | 6   | 0.0689 | 0.139  | 0.0433 |
| 5  | 0.1  | 0.1 | 0.1892 | 0.1939 | 0,0217 |
| 10 | 0.12 | 1   | 0,1122 | 0.2335 | 0,0295 |
| 15 | 0.14 | 2   | 0.237  | 0.4418 | 0.0617 |
| 20 | 0.16 | 3   | 0.3978 | 0.5403 | 0.0583 |
| 25 | 0.18 | 4   | 0.4383 | 0.5913 | 0.045  |
| 30 | 0.2  | 5   | 0.4623 | 0.6235 | 0      |

Nilai parameter PID setelah melakukan tuning menggunakan metode heuristik, didapatkan nilai  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0.2$  dan  $K_d = 5$

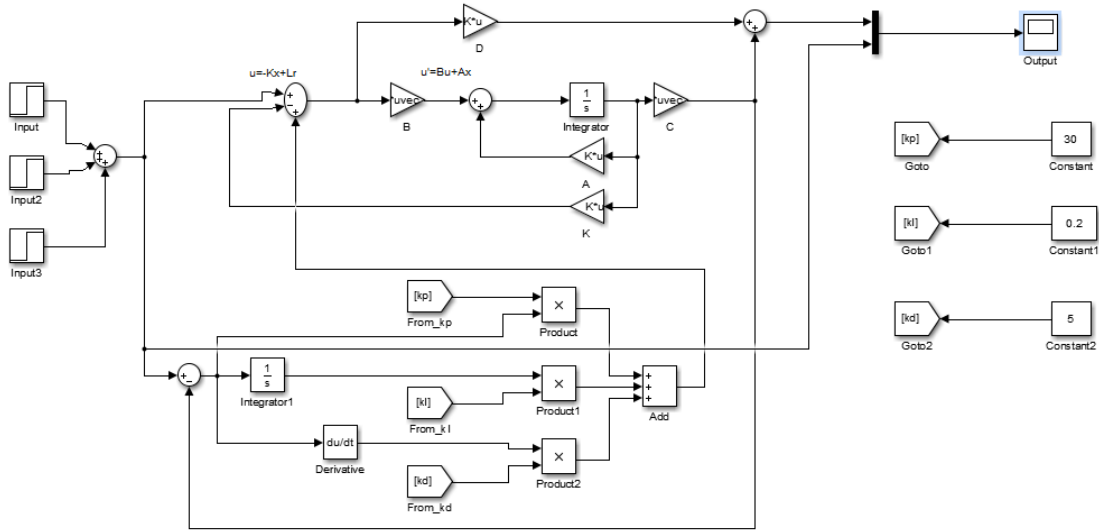
**3.5.3 Perancangan kendali Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID Dengan Perubahan Setpoint**

Untuk mengetahui performa pengendali LQR-PID dalam perubahan setpoint yang terjadi pada *aero pendulum* yang dimana perubahan setpoint di defenisikan sebagai posisi sudut. Perubahan terjadi pada detik ke 4 dan ke 7 dengan posisi sudut dari 45 ke 60 dan 90, kemudian menganalisa hasil respon sistem dari pengendali tersebut. Berikut ini adalah rangkaian pengendali LQR-PID saat perubahan posisi sudut:

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



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



Gambar 3.8 rangkaian pengendali LQR-PD dengan gangguan

### 3.6 Skenario penelitian

Pada skenario penelitian pada model sistem harus disimulasikan dengan beberapa skenario (minimal 3 skenario), dimana masing-masing skenario menghasilkan satu grafik respon keluaran. Penelitian ini menggunakan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan memasukkan data-data yang telah didapatkan pada pemodelan matematis sebelumnya ke dalam program matlab. Berdasarkan parameter untuk pemodelan matematis pada penelitian terkait menggunakan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Adapun skenario penelitian yang dilakukan yaitu:

1. Simulasi sistem secara open loop dengan setpoint  $45^\circ$
2. Simulasi menggunakan pengendali LQR dengan setpoint  $45^\circ$
3. Simulasi menggunakan pengendali LQR-PID dengan setpoint  $45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
4. Simulasi pengendali LQR-PID dengan perubahan setpoint



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan Analisa respon sistem yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pengendali LQR-PID mampu mencapai *setpoint* dan dapat mengurangi *osilasi* dan *Error Steady State* yang terjadi pada *aero pendulum*. Respon pada sistem *aero pendulum* dengan posisi sudut 45, 60, dan 90 menunjukkan keluaran berbeda-beda setiap *setpoint* yang diberikan. Hasil respon sistem LQR-PID pada sudut 45° dengan nilai *time delay* 0.1216 detik, *settling time* 0.6235 detik, *overshoot* 0%, dan *error steady state* 0. Pada pengendali LQR-PID dengan perubahan *setpoint* masih memiliki *Error Steady State* pada setiap *setpoint* yang diberikan. Pada sudut 45° terjadi *Error Steady State* sebesar 0.0477°, pada sudut 60° sebesar 0.0463°, dan pada sudut 90° sebesar 0.09°.

### 5.2 Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, untuk penelitian selanjutnya bisa digunakan dengan pengendali yang berbeda dalam mengatasi *osilasi* yang ada pada sistem. Pada penelitian ini, untuk mendapatkan nilai matriks R dan Q, dengan metode *trial and error* membutuhkan waktu yang sangat lama sehingga, untuk proses penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan pengendali seperti JST, MPC, MRAC dan lain lain agar dapat dilakukan perbandingan.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Faishol Hasib, P. Wanarti Rusimamto, M. Syariffuddien Zuhrie, “Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Hybrid PD-Fuzzy Controller,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, pp. 377–385, 2021.
- [2] M. E. Prasetyo, “DESAIN SISTEM PENGATURAN POSISI SUDUT AERO PENDULUM BERBASIS PID METODE GENETIC ALGORITHM OPTIMIZATION DENGAN SOFTWARE LABVIEW,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 09, pp. 597–604, 2020.
- [3] F. Agung Kurniawan, Endryansyah, “DESAIN SISTEM PENGATURAN POSISI SUDUT AERO PENDULUM BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROLLER DENGAN SOFTWARE LABVIEW,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 09, pp. 625–632, 2020.
- [4] A. W. Habibi, Endryansyah, M. S. Zuhrie, B. Suprianto, “DESAIN SISTEM KONTROLER PID TYREUS-LUYBEN PADA KENDALI SUDUT AERO PENDULUM BERBASIS LABVIEW,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, pp. 145–151, 2021.
- [5] A. Tri Prasetyo, B. Suprianto, P. Wanarti Rusimamto, “Desain Sistem Pengaturan Sudut Aero Pendulum Menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Berbasis MATLAB,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, pp. 387–395, 2021.
- [6] K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik Edisi 2 Jilid 1*. Jakarta: Prentice Hall, 1970.
- [7] L. Frank, Syrmos, V. L., *Optimal Control*. Jhon Wiley dan Sons, Inc, 1995.
- [8] S. Y. O. Putra, “Perancangan Kendali Hybrid Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID Pada Kecepatan Motor Brushless DC,” *Skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.
- [9] Ferdiansyah, “Teori Kontrol PID,” [Online]. Available: [https://www.academia.edu/9928544/Teori\\_Kontrol\\_PID\\_Proportional\\_Integral\\_Derivative.](https://www.academia.edu/9928544/Teori_Kontrol_PID_Proportional_Integral_Derivative.), 2021.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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

- [10] M. M. Khoirudin, Endryansyah, “DESAIN SISTEM PENGATURAN POSISI SUDUT AERO PENDULUM MENGGUNAKAN PENGENDALI ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 09, pp. 587–595, 2020.
- [11] A. Marashian, “Modeling and Control of Mechatronic Aeropendulum,” Iran, Dec. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.18357.40161.
- [12] H. Kızmaz, S. Aksoy, A. Mühürçü, “Sliding mode control of suspended pendulum,” 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/224256771>
- [13] B. Haritsyah, “PERANCANGAN SISTEM KENDALI LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM,” *Skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2022.
- [14] K. Ogata, *Model Control Engineering Edisi 5*, 5th ed. Jakarta: Prentice Hall, 2010.
- [15] Firmansyah, Rifqi, “Penerapan Kontroller LQR dengan Gain Feed Forward Statis untuk Tracking Pendulum Terbaik Dua Tingkat,” *Seminar Nasional Pendidikan Matematika Ahmad Dahlan (SENDIKMAD)*, 2012.
- [16] Chandra, Widhayaka Aji, “Pengaturan Kecepatan pada Simulator Paraller Hybrid elektrik Vihicle (PHEV) menggunakan Linier Quadratic Regulator (LQR) Berdasarkan Particle Swarm Optimization (SPO),” *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [17] I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Industri*. PT. Elex Media Komputindo, 2008.
- [18] Triyono, “APLIKASI KONTROL PID DENGAN SOFTWARE MATLAB,” *Jurnal Teknik*, vol. 1, 2015.
- [19] A. Muhammad, “Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software Matlab,” *Skripsi*, Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2004.

R. P. Sari, “Penalaan Parameter Kontrol PID dengan Metode Heuristik Aplikasi Sistem Pengendalian Kecepatan Motor DC,” *Skripsi*, Surabaya: Institut Teknologi Nasional, 2010.



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.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Ridhowatul Afdal lahir pada tanggal 19 Mei 1997 sebagai anak Pertama dari bapak Ridwan dan Hayatul Husna dengan jumlah saudara sebanyak 2 saudara. Beralamat di Perumnas THP 3 Jl. Gagak no.4 Duri, Riau. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 9 Mandau, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 4 Mandau, selanjutnya melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMK Negeri 1 Mandau. Kemudian setelah lulus SMA pada tahun 2015 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dengan jurusan Teknik Elektro. Pada semester 4 penulis mengambil konsentrasi Elektronika Instrumentasi.

Dengan karunia Allah SWT, ketekunan serta rasa motivasi yang tinggi untuk terus belajar dan berusaha, penulis telah berhasil menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan manfaat dan kontribusi untuk siapa saja yang membutuhkannya.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesainya tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Sistem Kendali Hybrid Linear Quadratic Regulator (LQR)-PID Untuk Mengendalikan Posisi Sudut Pada Aero Pendulum”**.

No. HP : 083175235990

Email : 11555100376@students.uin-suska.ac.id

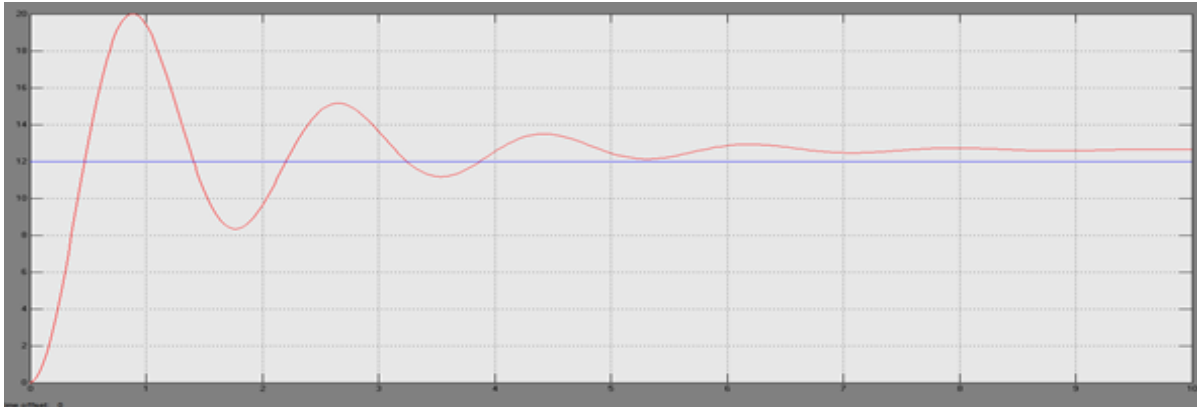
- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 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



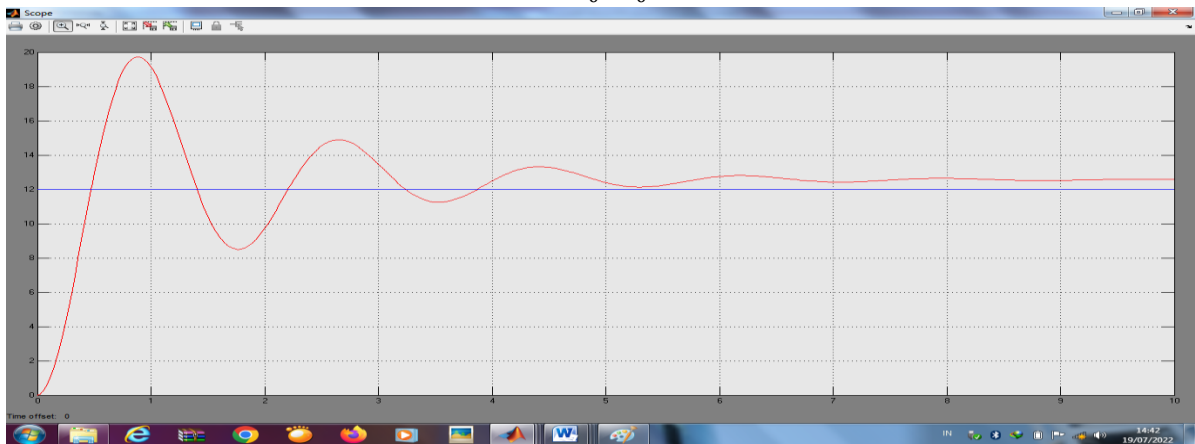
# LAMPIRAN A

## PROSES TUNNING PENGENDALI LQR PADA MATRIKS Q DAN R PADA SISTEM AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR)

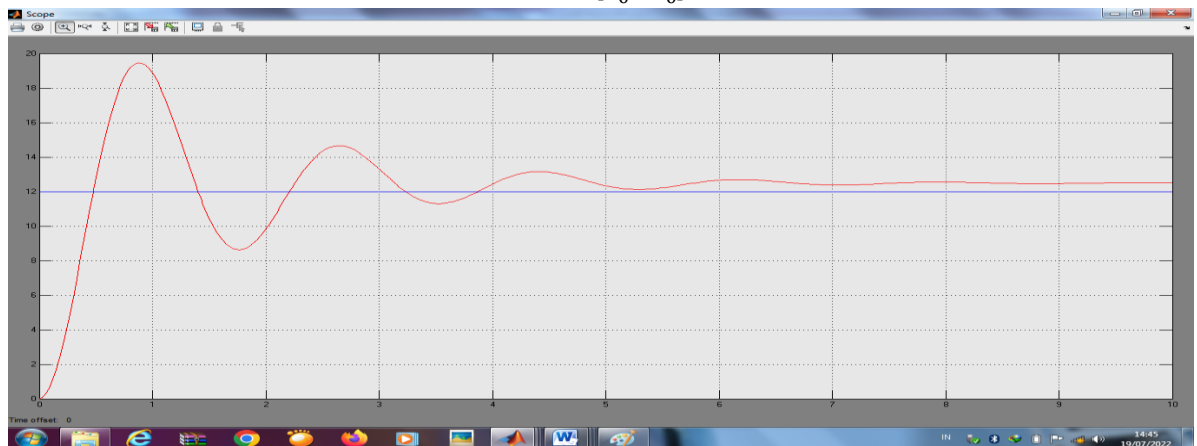
1. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



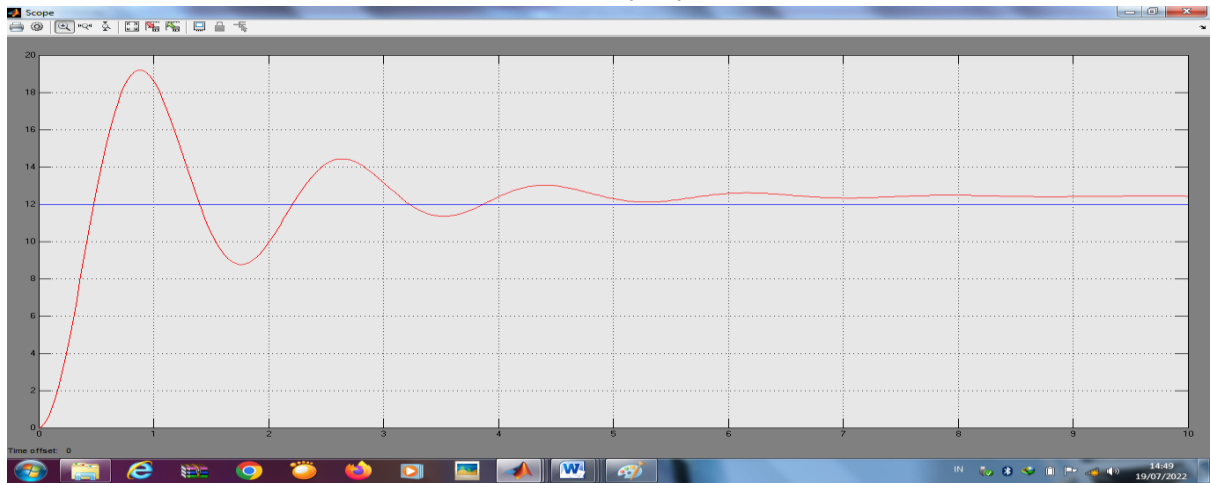
2. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,11 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



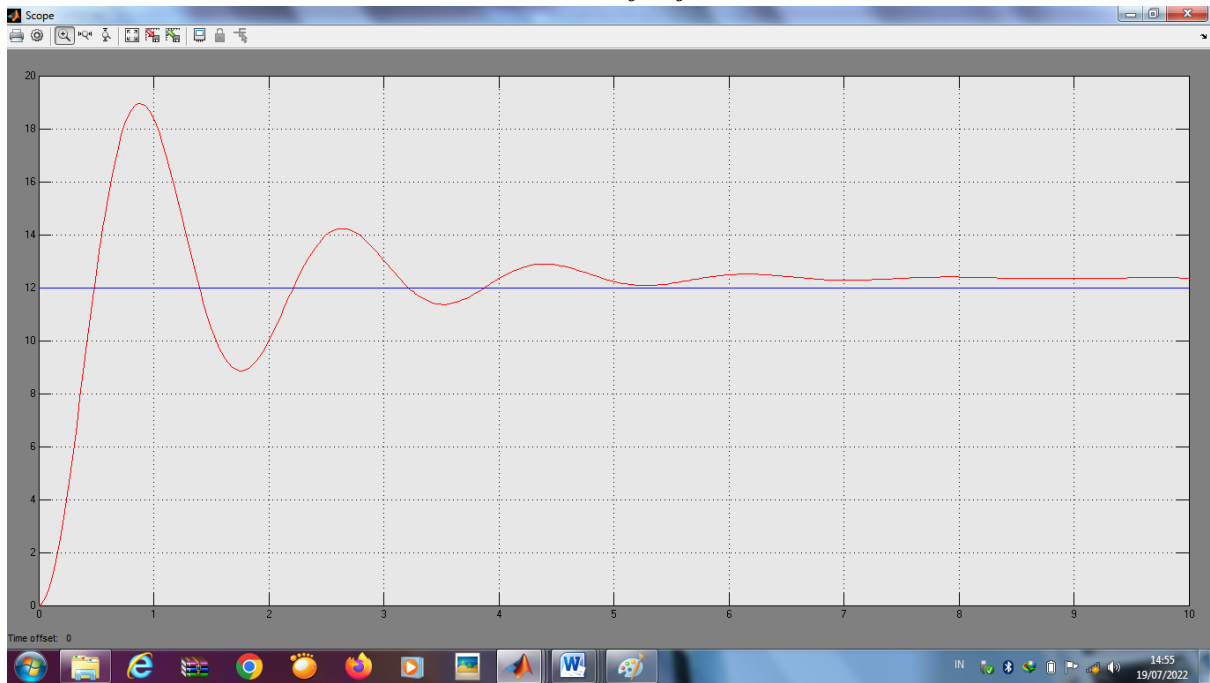
3. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,12 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



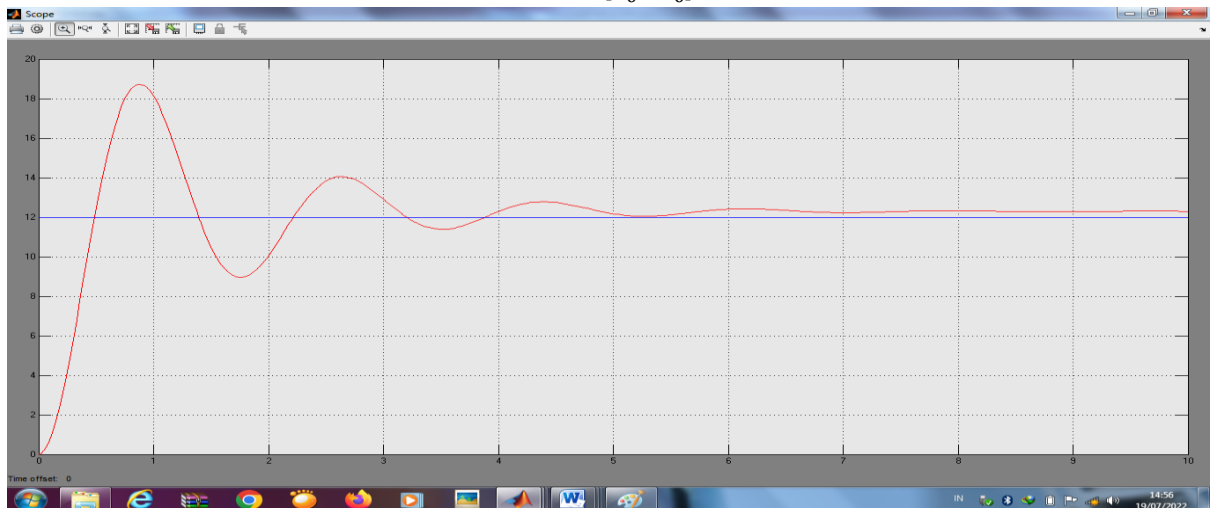
4. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,13 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



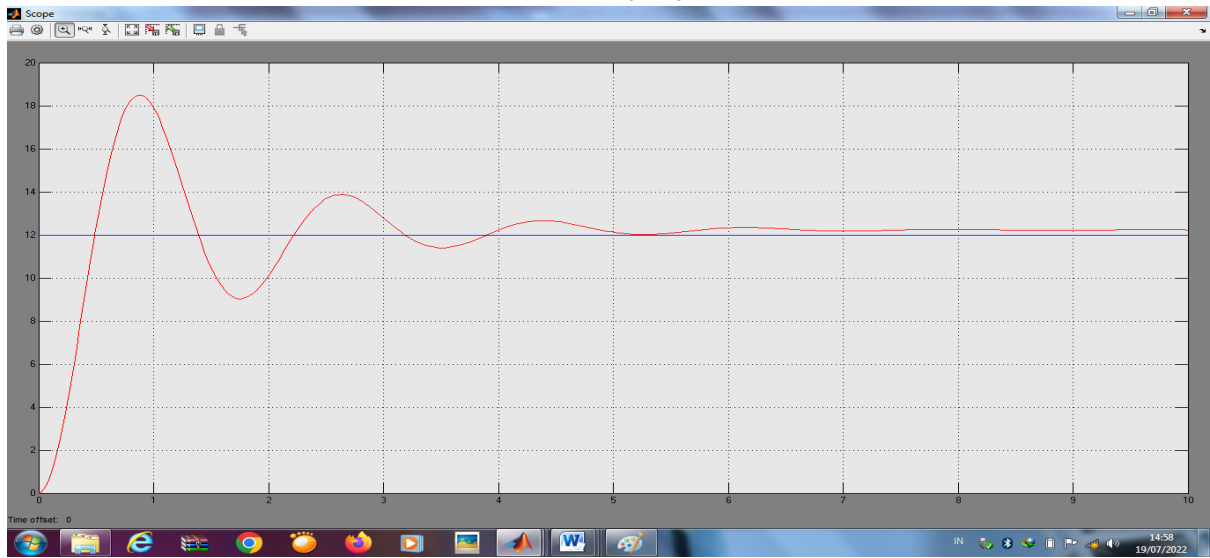
5. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,14 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



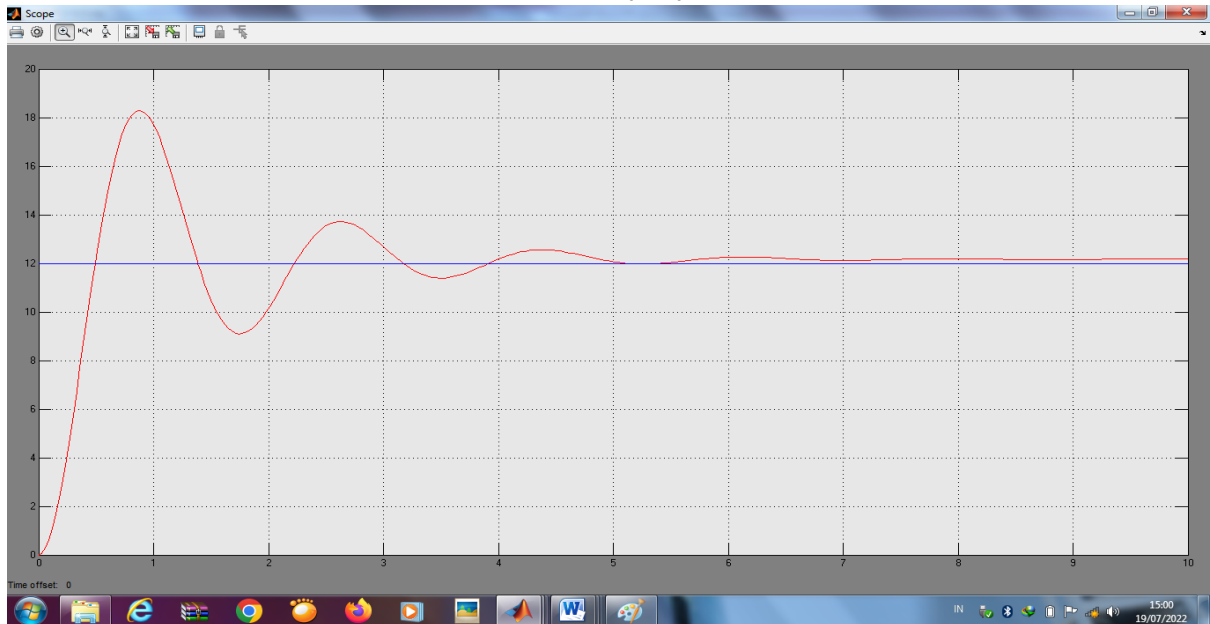
6. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,15 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



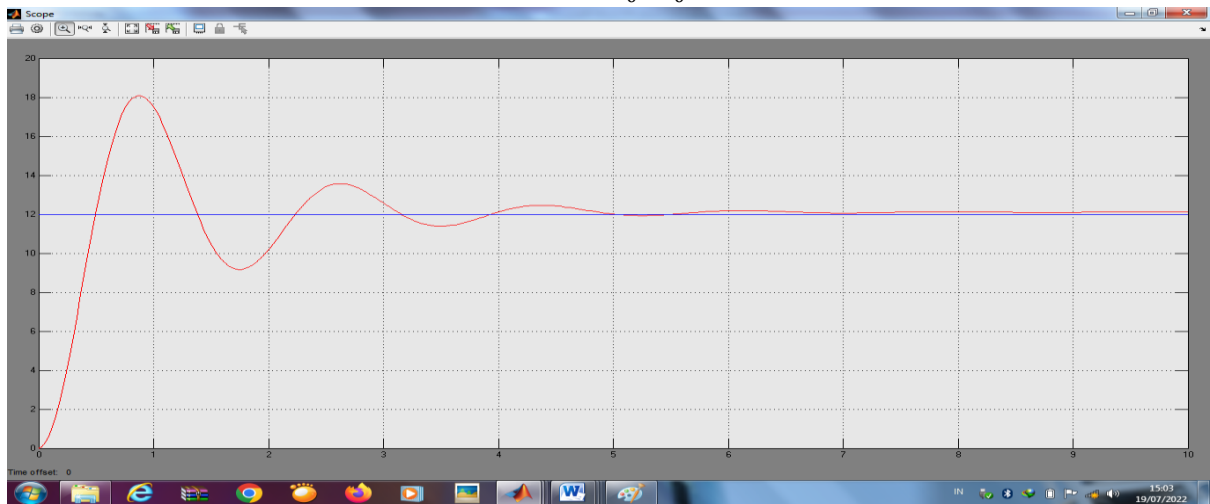
7. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,16 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



8. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,17 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

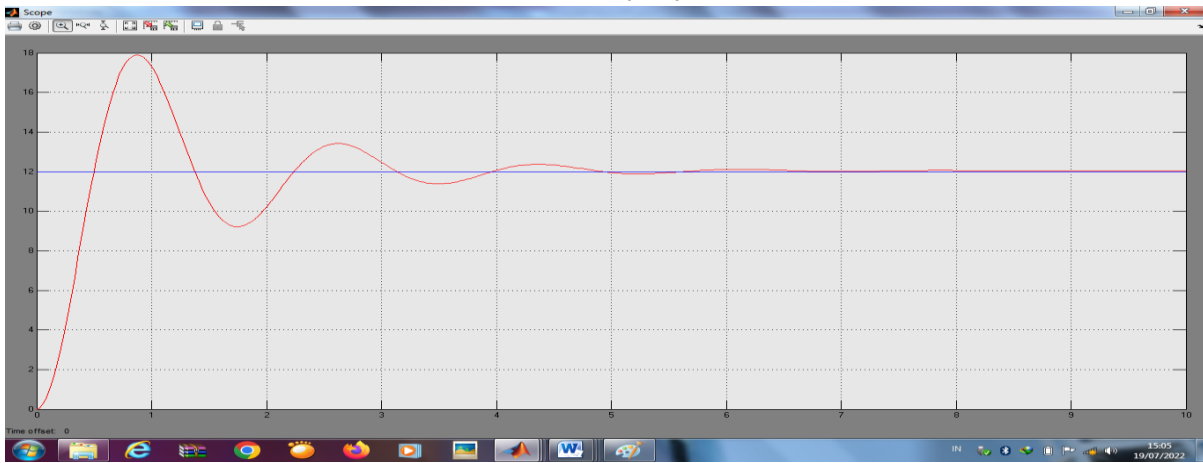


9. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,18 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

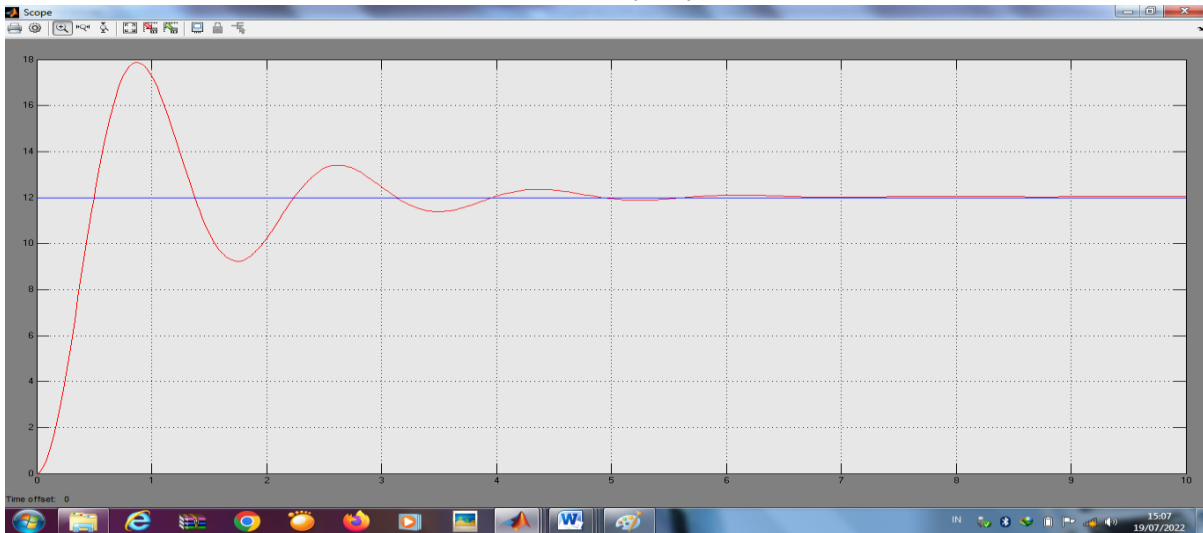




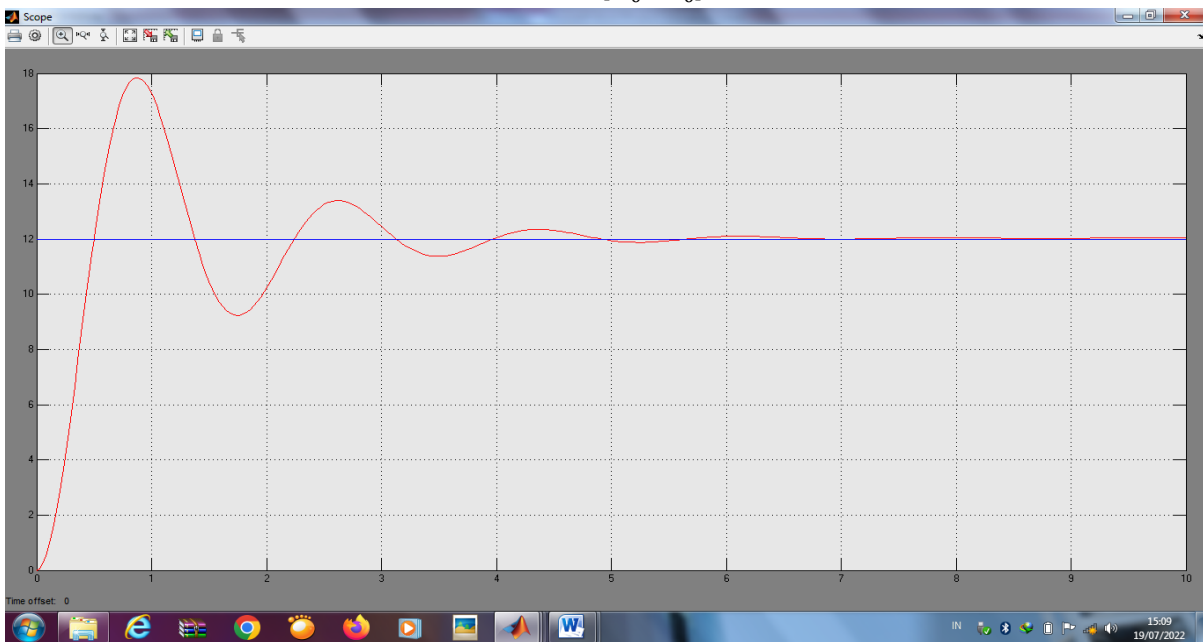
10. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,19 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



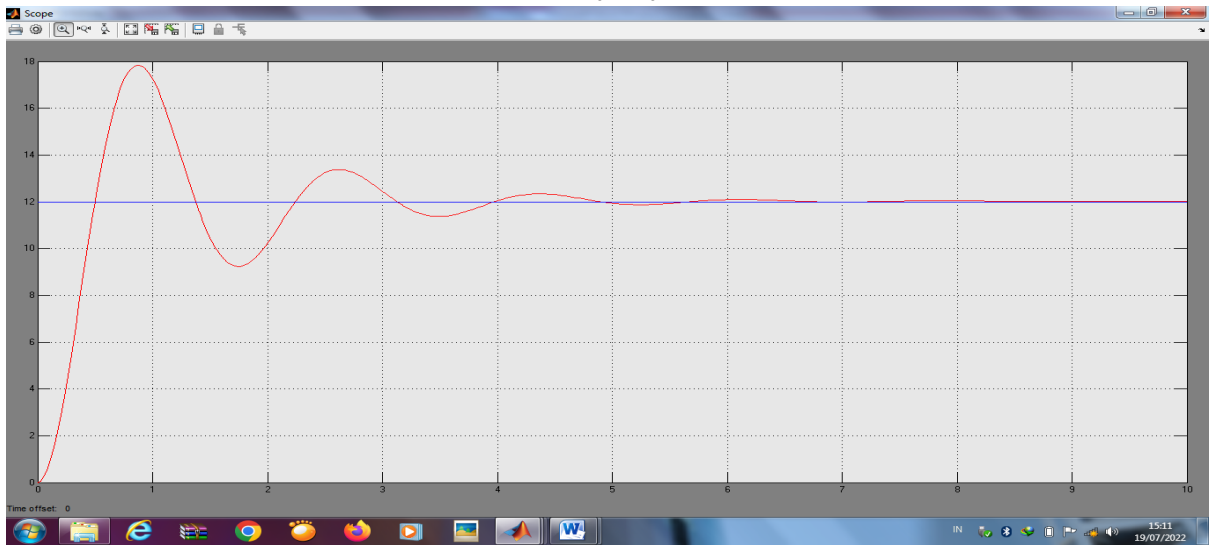
11. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,191 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



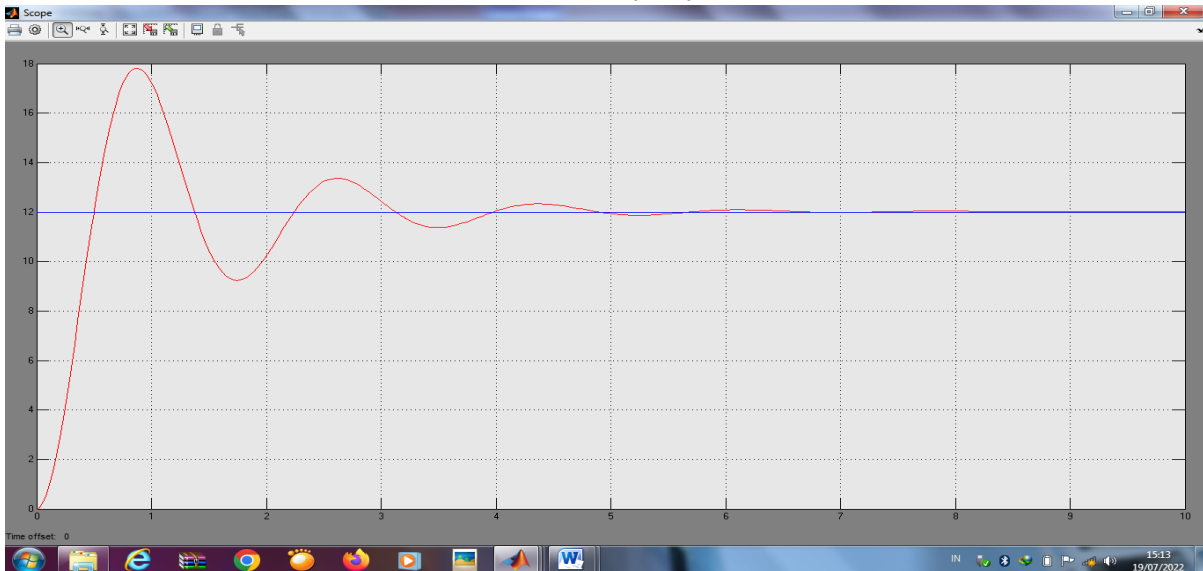
12. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,192 & 9 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



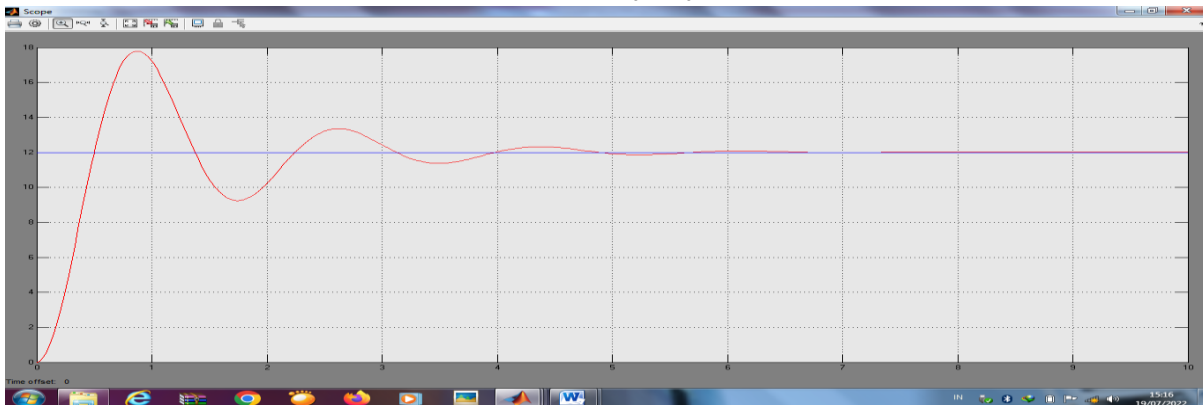
13. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,193 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



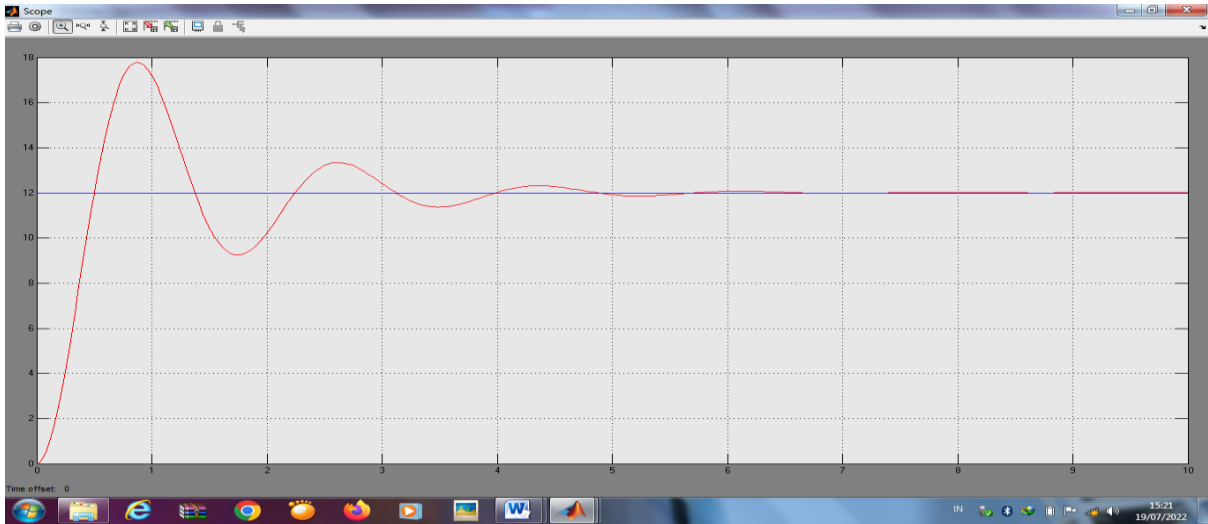
14. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,194 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



15. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,195 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



16. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0,196 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

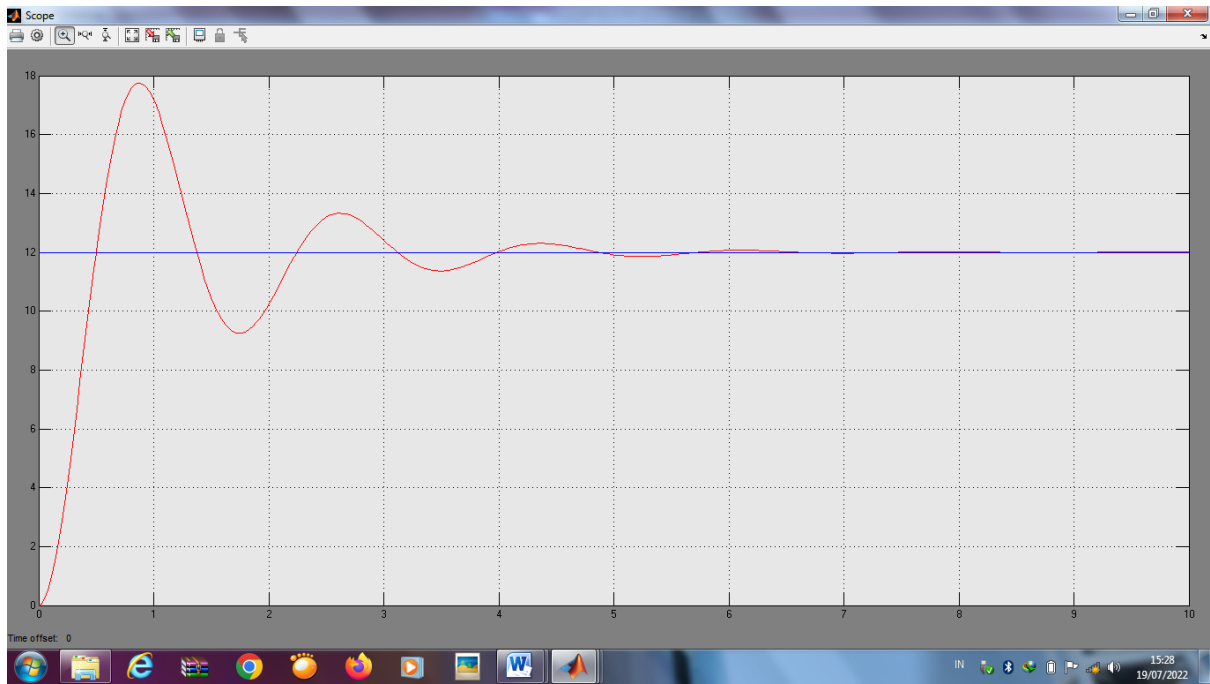


17. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.197 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

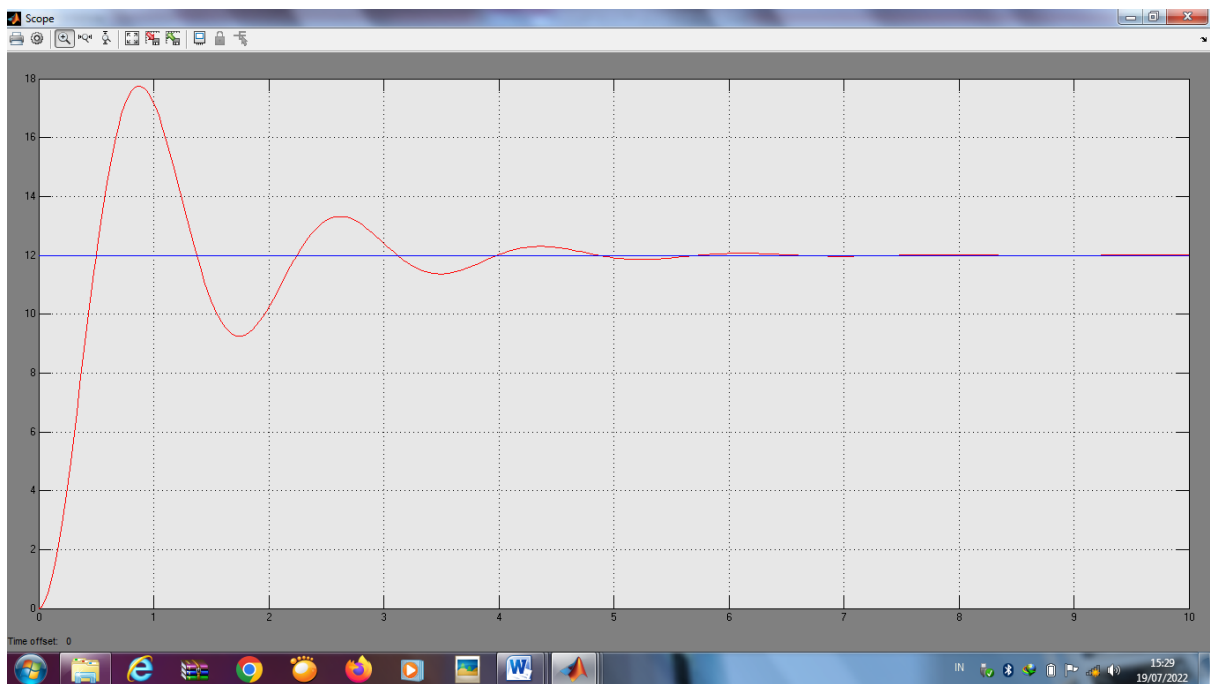




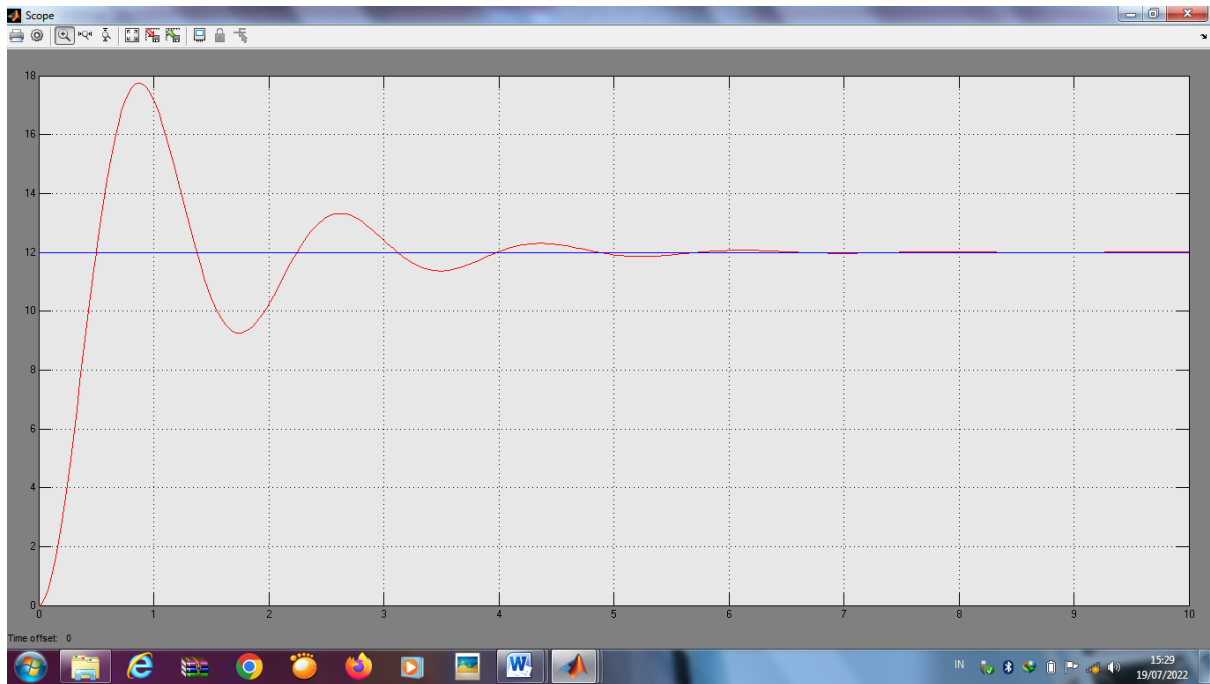
18. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.1971 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



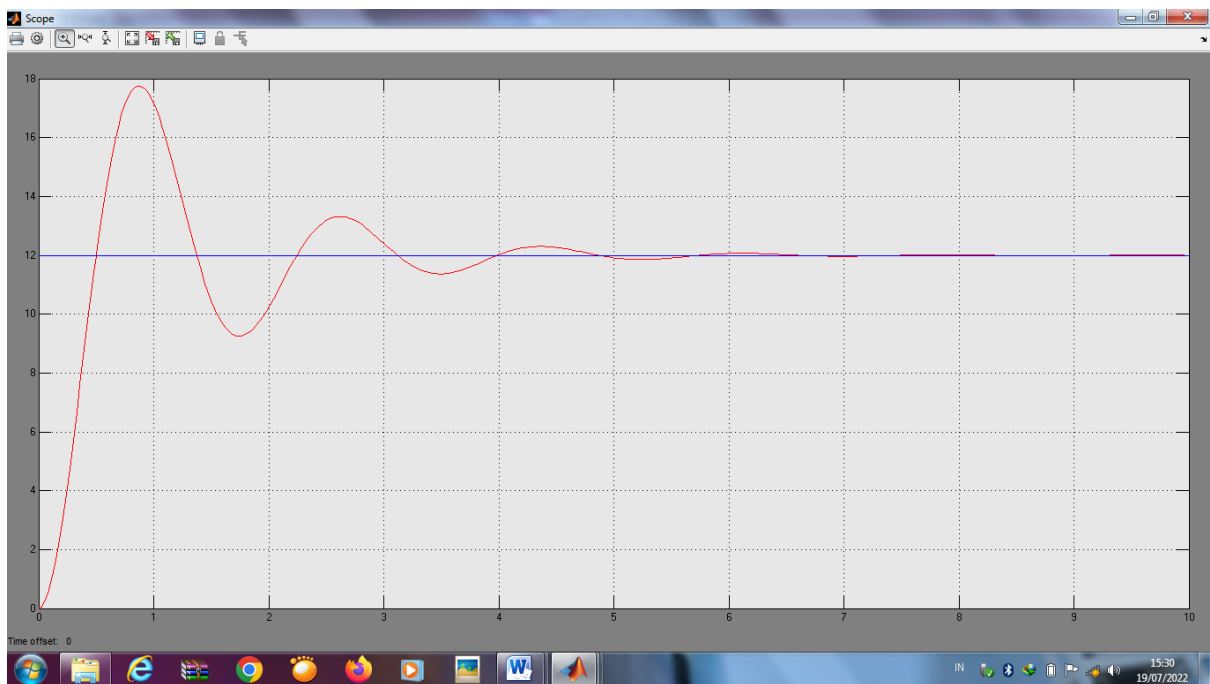
19. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.1972 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



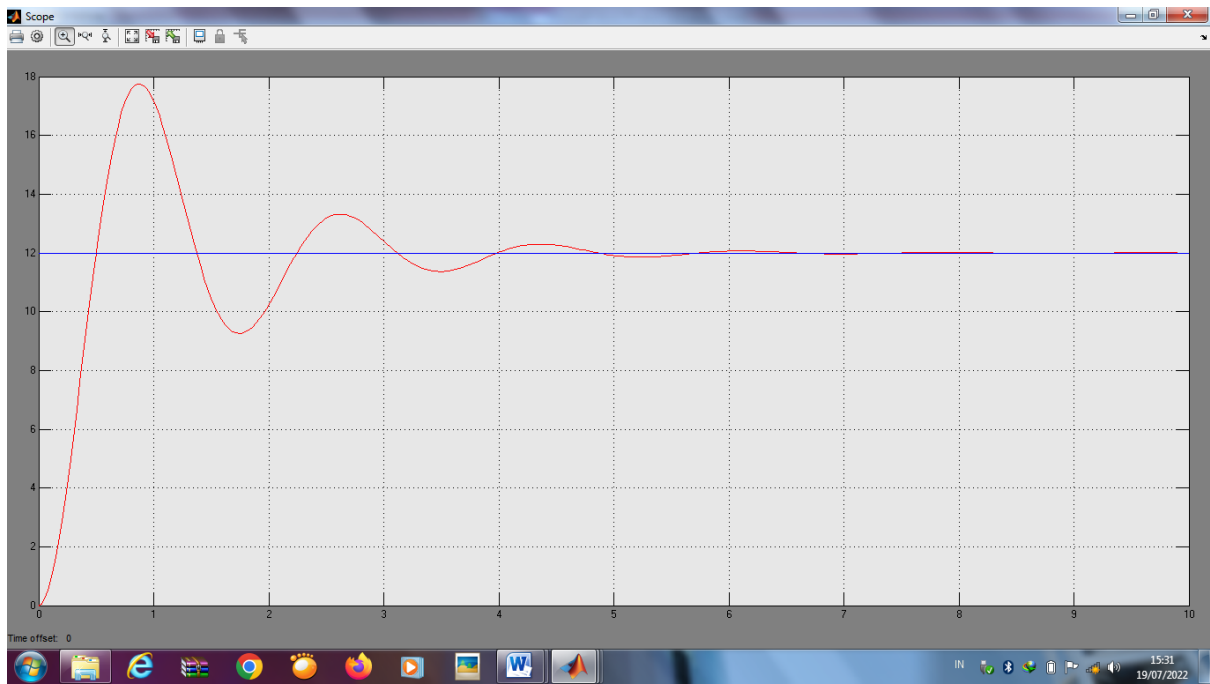
20. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.1973 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



21. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.1974 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



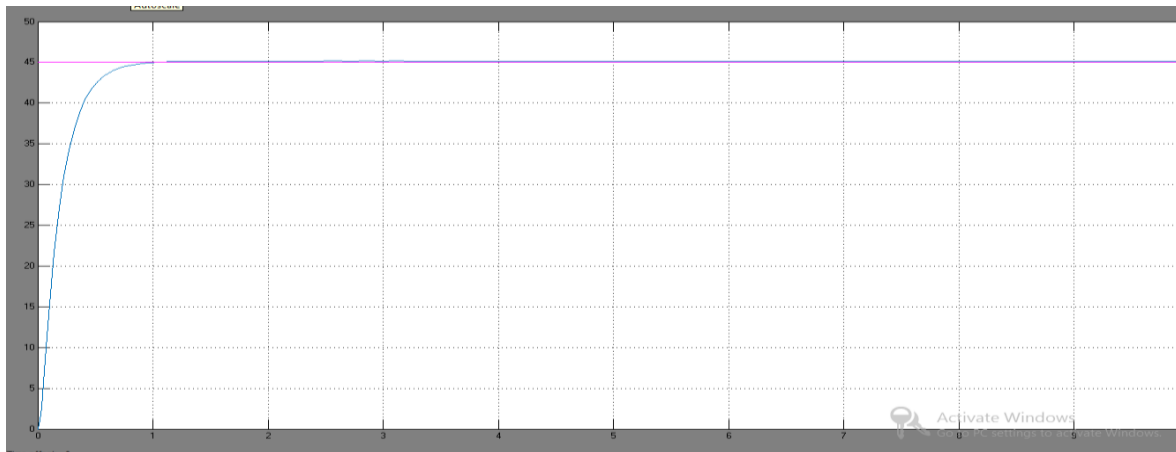
22. Hasil Simulasi LQR dengan  $R = 1$  dan  $Q = \begin{bmatrix} 0.1975 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



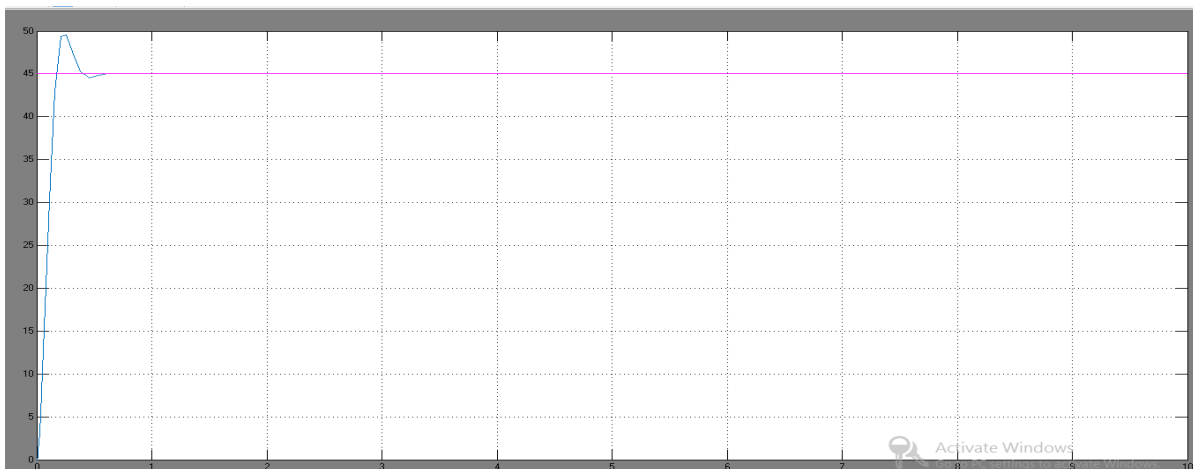


**LAMPIRAN B**  
**PROSES TUNNING PENGENDALI PID PADA SISTEM *LINEAR QUADRATIC***  
***REGULATOR (LQR)***

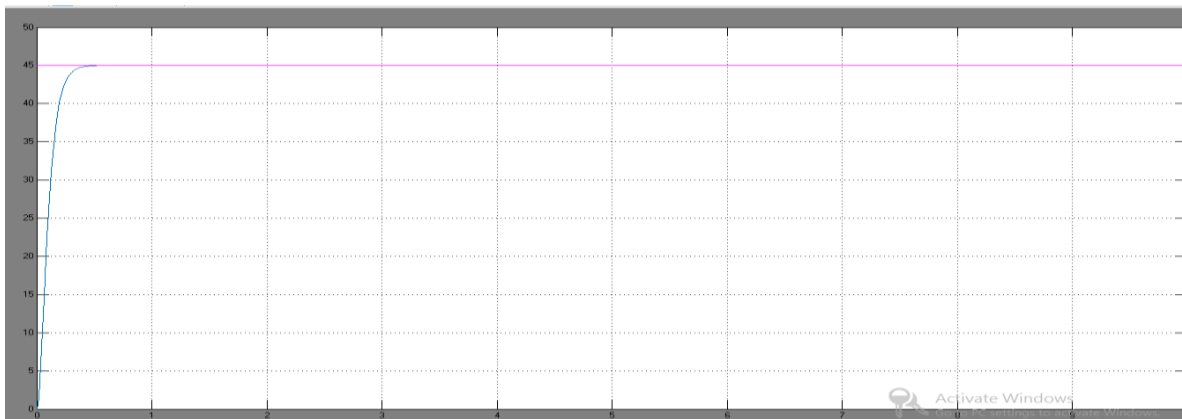
1. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 10$  ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 2$



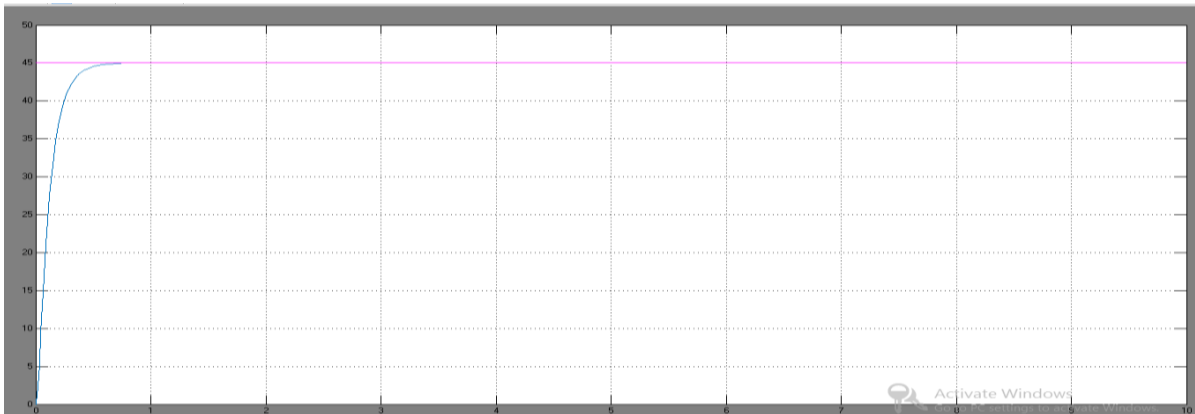
2. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 15$  ,  $K_i = 0.1$ ,  $K_d = 1$



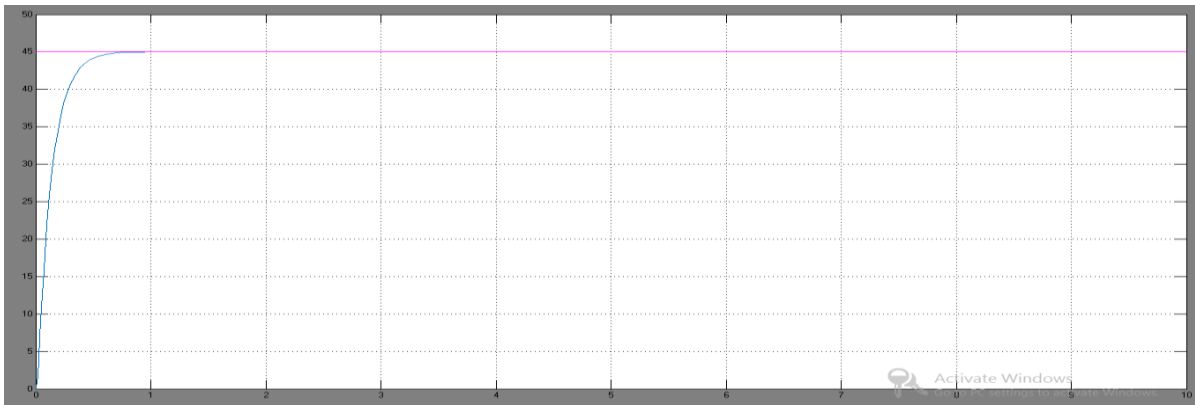
3. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 25$  ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 2$



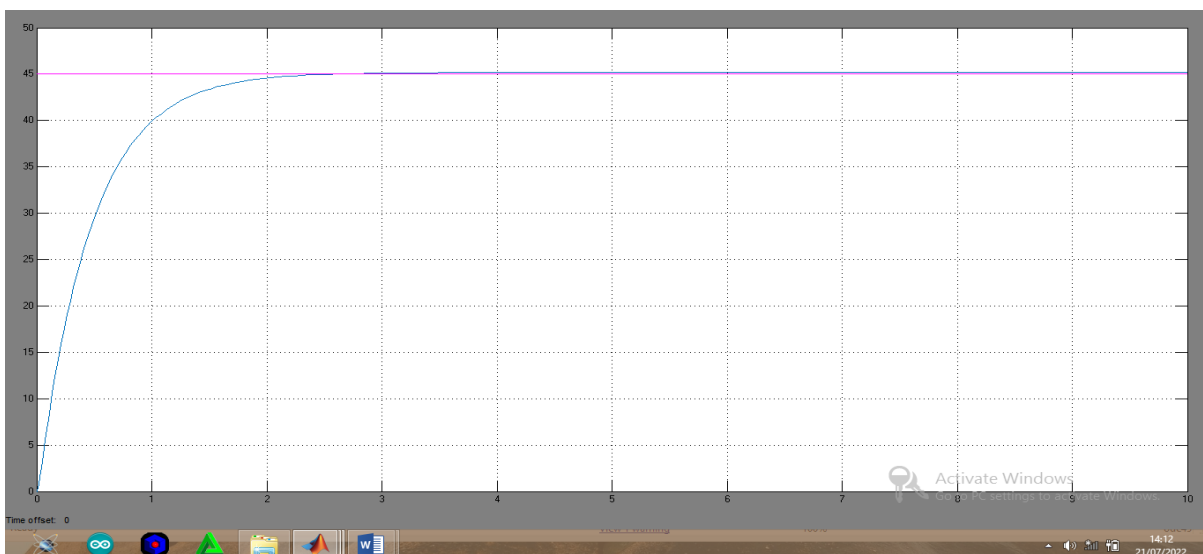
4. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 25$  ,  $K_i = 0.18$  ,  $K_d = 3$



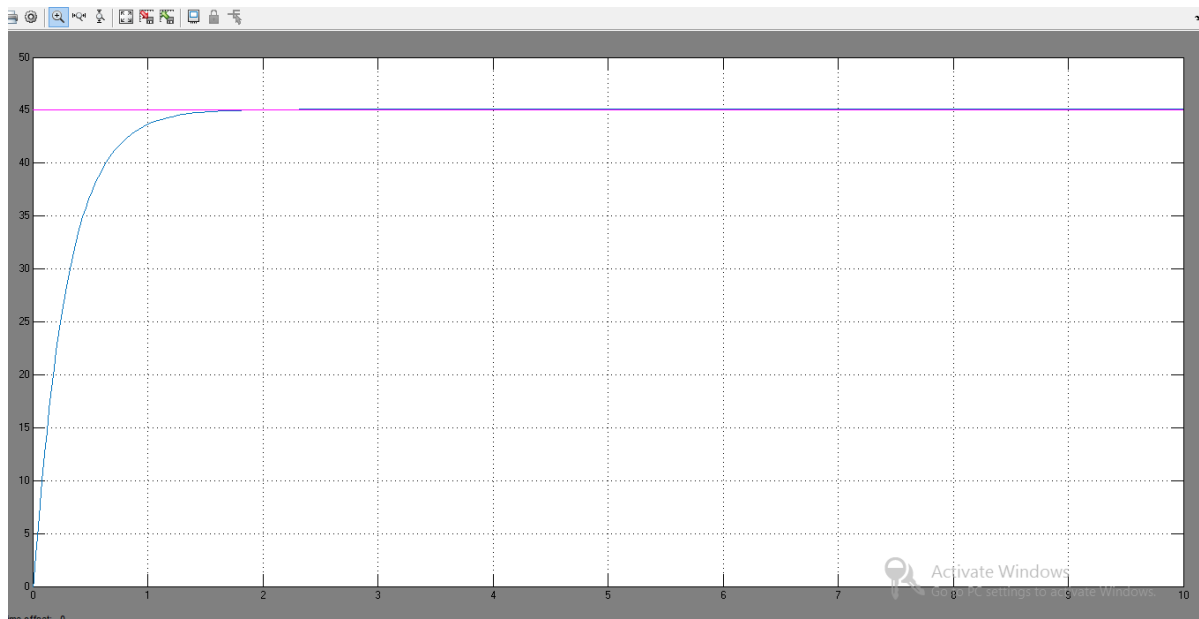
5. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 30$  ,  $K_i = 0.12$  ,  $K_d = 4$



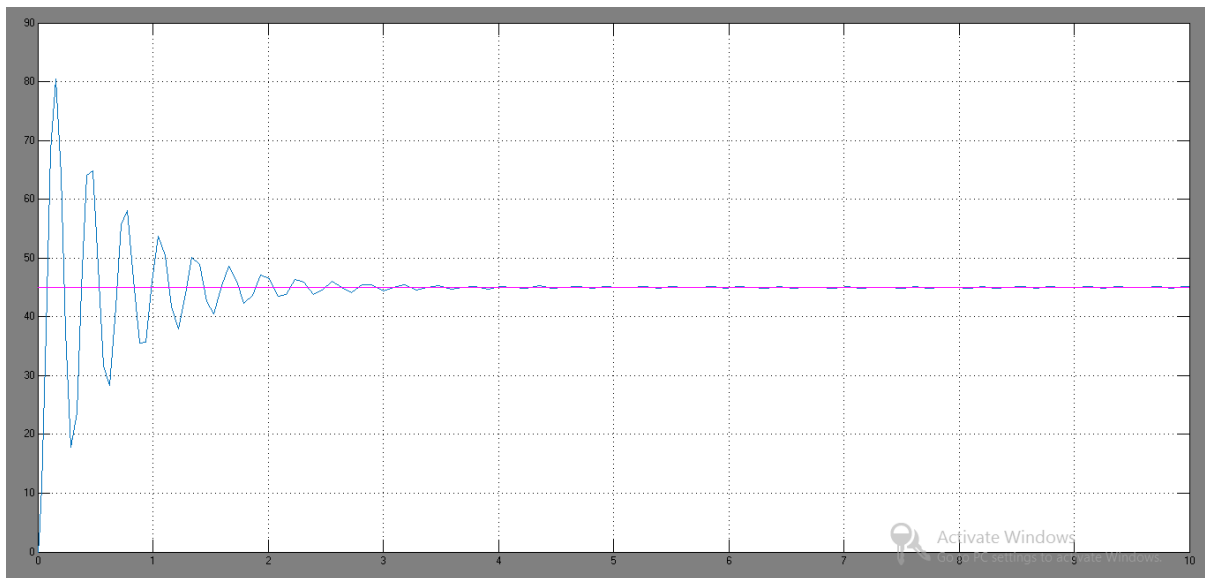
6. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 10$  ,  $K_i = 0.1$  ,  $K_d = 5$



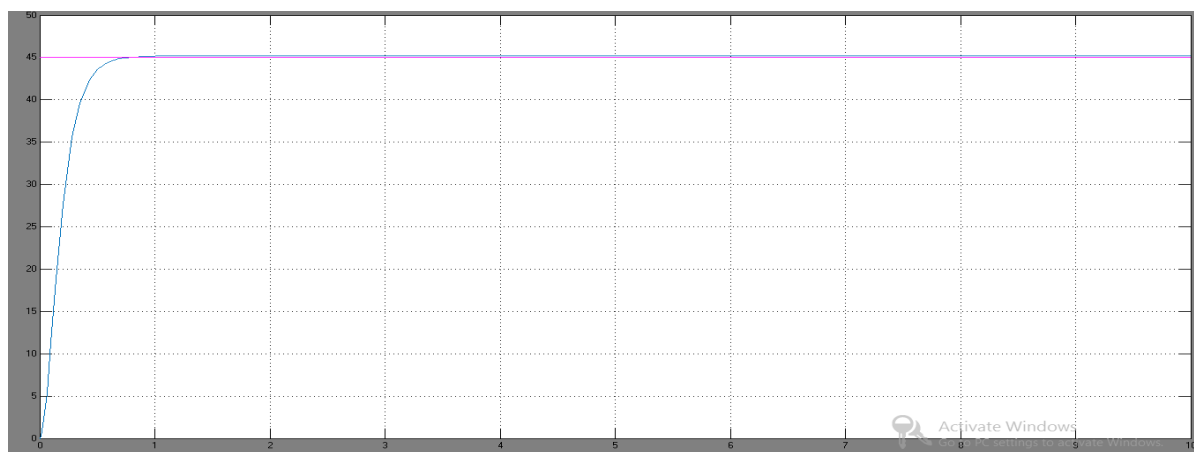
7. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 20$ ,  $K_i = 0.15$ ,  $K_d = 6$



8. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 0.1$

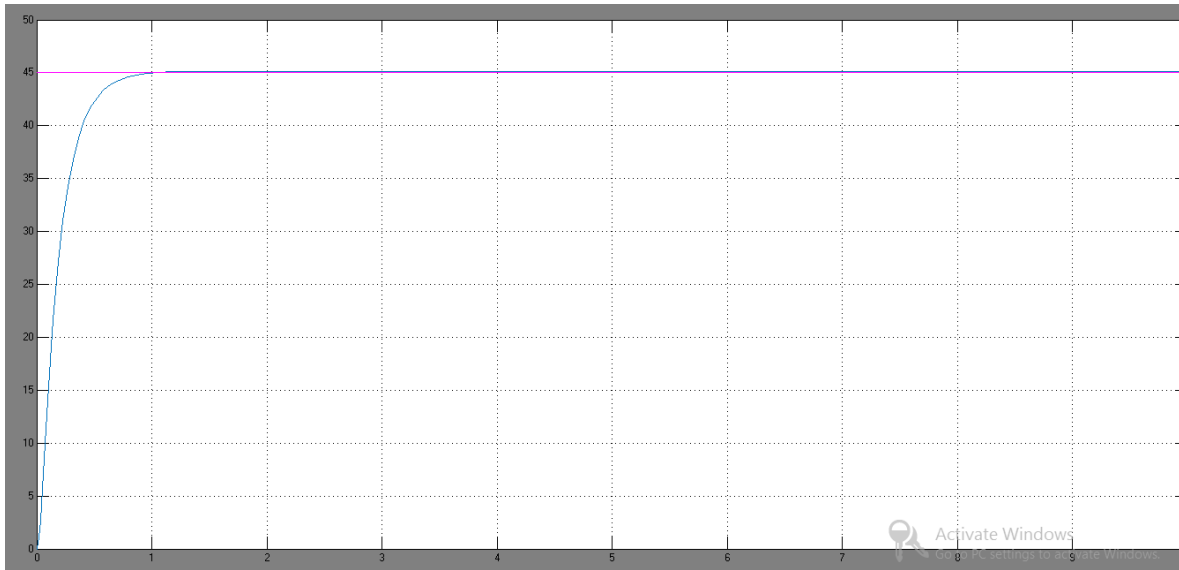


9. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 5$ ,  $K_i = 0.14$ ,  $K_d = 1$

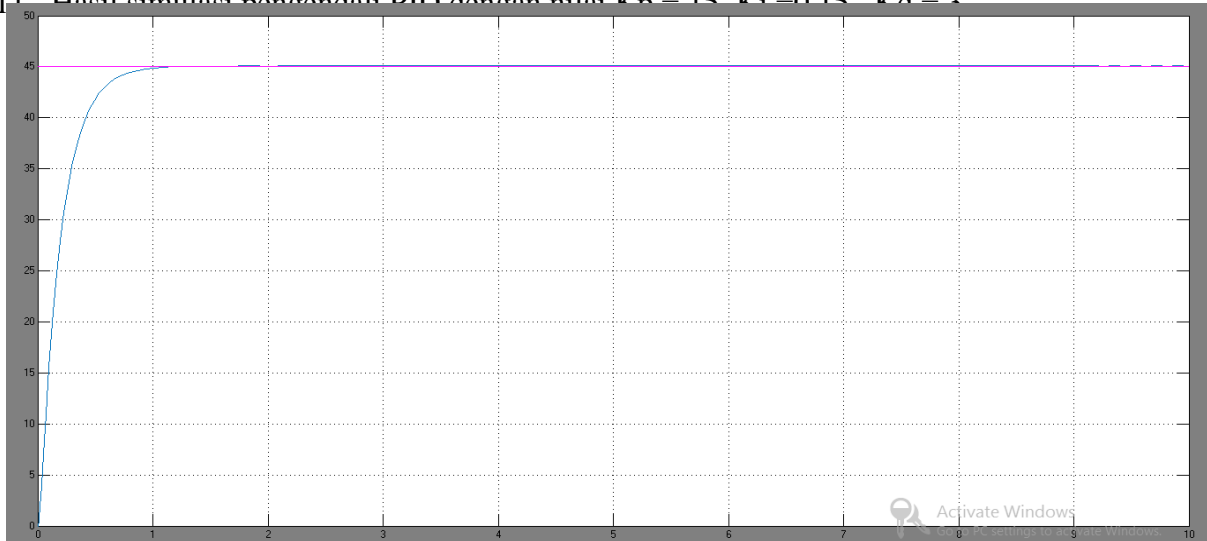




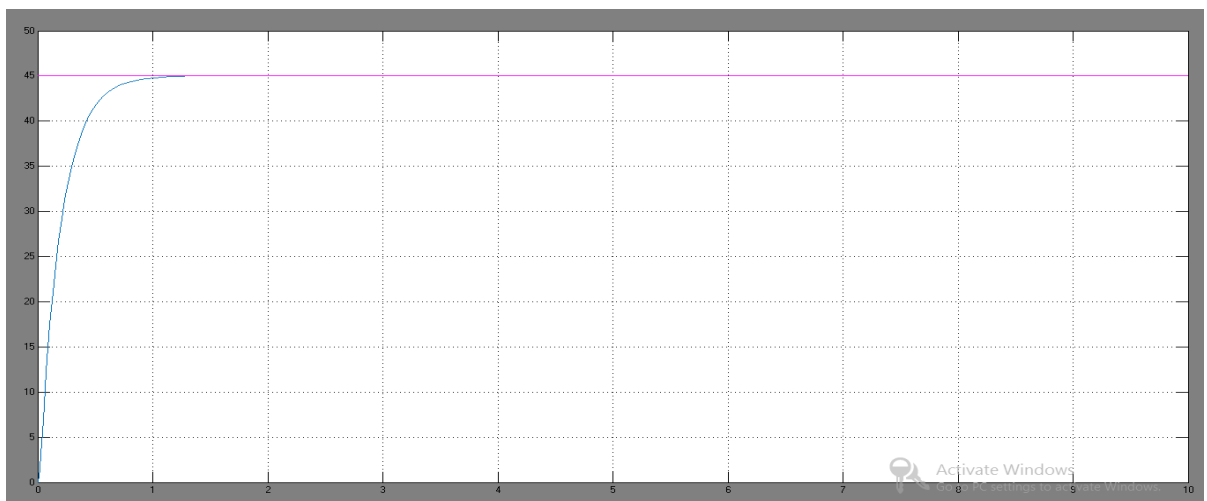
10. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0.18$ ,  $K_d = 2$



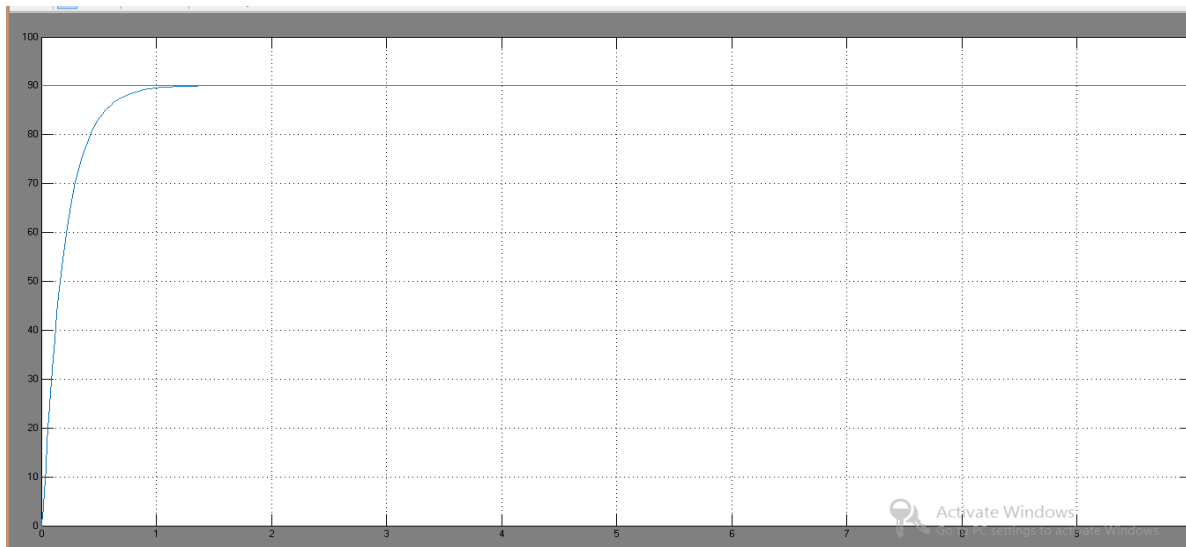
11. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 15$ ,  $K_i = 0.15$ ,  $K_d = 3$



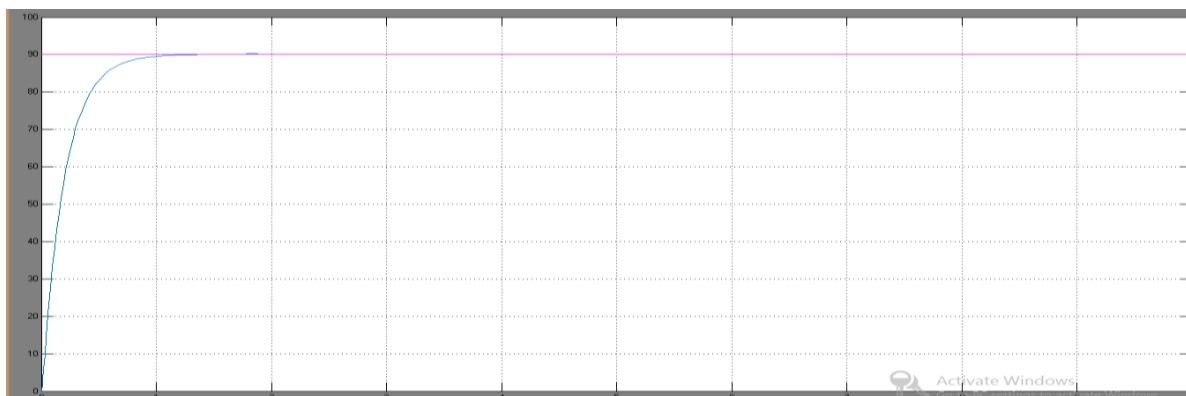
12. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 20$ ,  $K_i = 0.12$ ,  $K_d = 4$



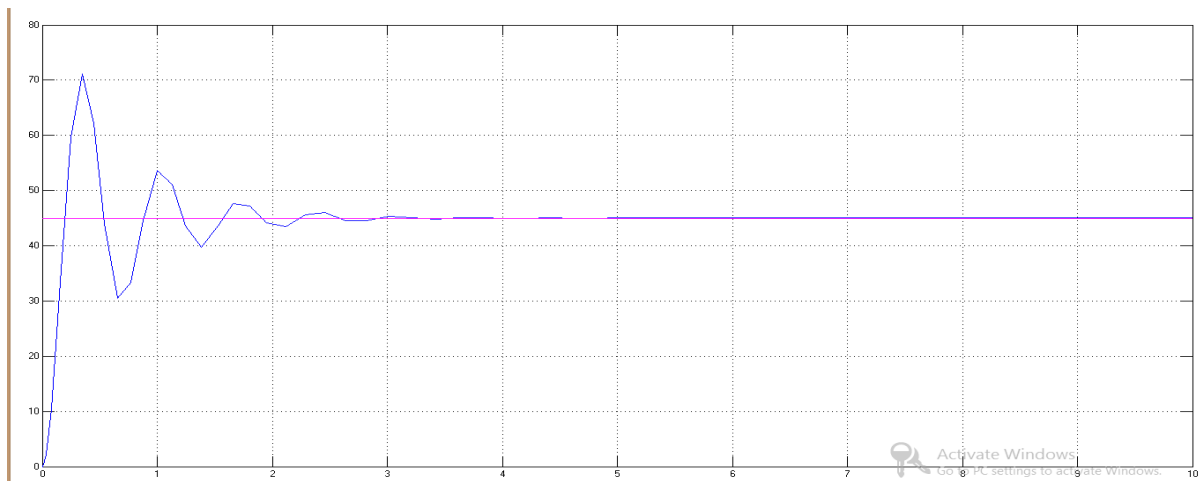
13. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 25$ ,  $K_i = 0.1$ ,  $K_d = 5$



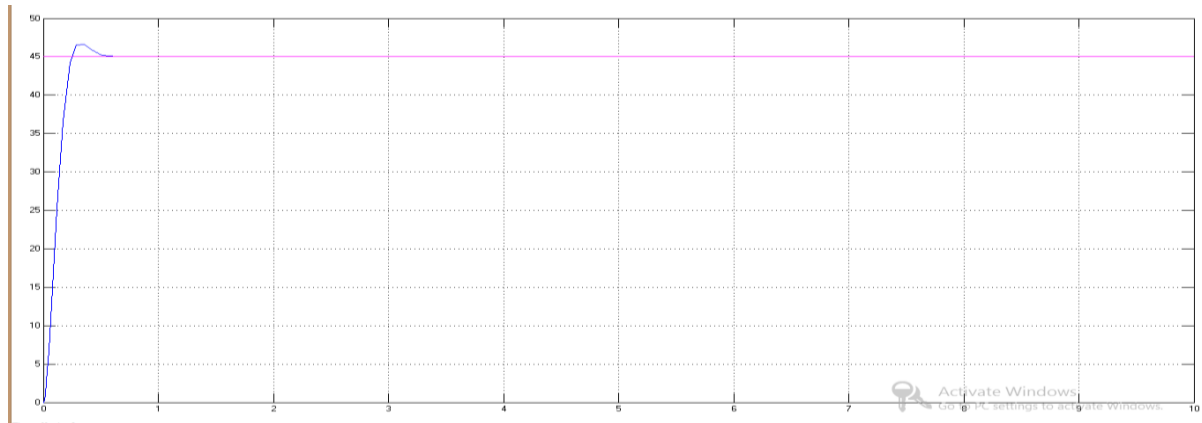
14. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0.15$ ,  $K_d = 6$



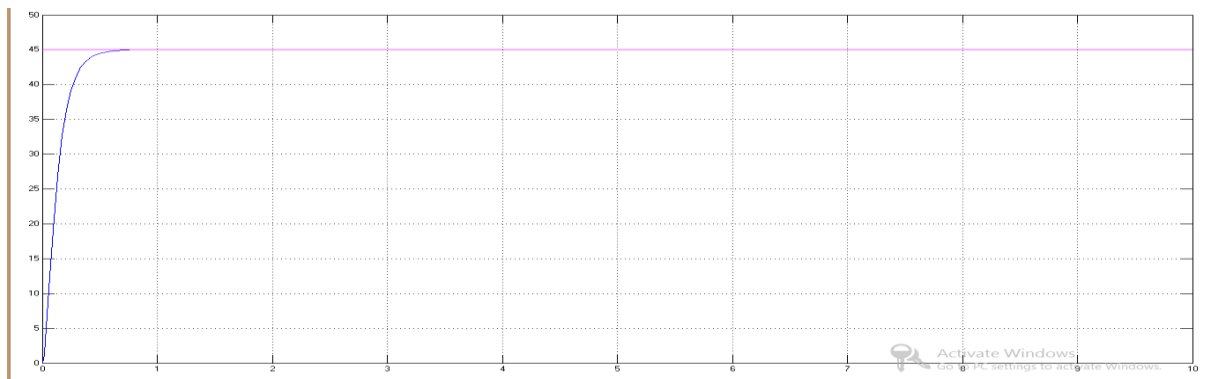
15. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 5$ ,  $K_i = 0.1$ ,  $K_d = 0.1$



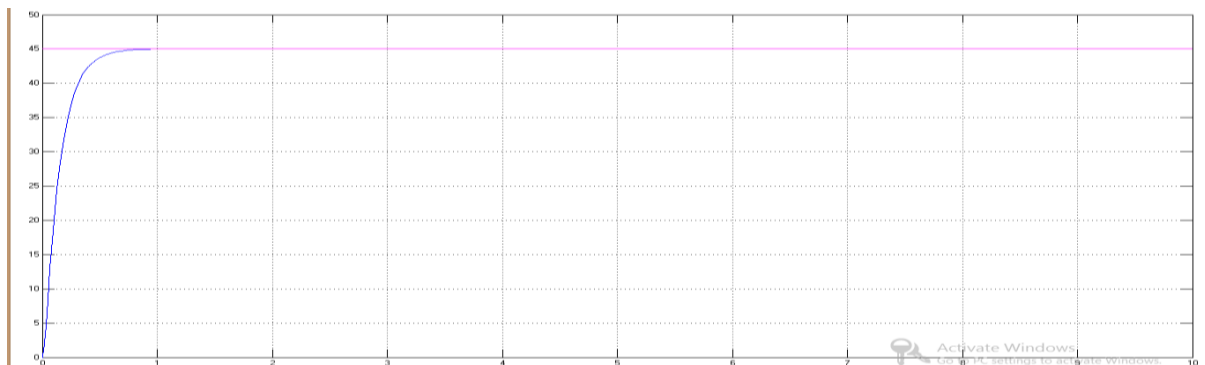
16. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 10$ ,  $K_i = 0.12$ ,  $K_d = 1$



17. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 15$ ,  $K_i = 0.14$ ,  $K_d = 2$



18. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 20$ ,  $K_i = 0.16$ ,  $K_d = 3$



19. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 25$ ,  $K_i = 0.18$ ,  $K_d = 4$



20. Hasil simulasi pengendali PID dengan nilai  $K_p = 30$ ,  $K_i = 0.2$ ,  $K_d = 5$

