

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.

**PERANCANGAN KENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL
(MPC) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT
PADA AERO PENDULUM**

TUGAS AKHIR

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



Oleh:

MUHAMMAD LUTHFAN WAFIUDIN
11850512435

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 KENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM

TUGAS AKHIR

oleh:

MUHAMMAD LUTHFAN WAFIUDIN

11850512435

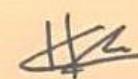
Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 20 Juli 2022

Pembimbing I



Putut Son Maria, S.T., M.T.
NIK. 130508079

Pembimbing II



Halim Mudia, S.T., M.T.
NIK. 130517053

Ketua Prodi Teknik Elektro



Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.
NIP. 19721021 200604 2 001

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 KENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM

TUGAS AKHIR

oleh:

MUHAMMAD LUTHFAN WAFIUDIN
11850512435

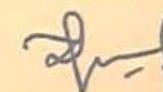
Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Pengaji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 20 Juli 2022

Pekanbaru, 20 Juli 2022

Mengesahkan,



Ketua Prodi Teknik Elektro



Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T.
NIP. 19721021 200604 2 001

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Dr. Liliana, S.T., M.Eng.

Sekretaris : Putut Son Maria, S.ST., M.T.

Anggota : Halim Mudia, S.T., M.T.

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

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



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Luthfan Wafiudin
NIM : 11850512435
Tempat, Tgl. Lahir : Rengat, 15 April 2001
Fakultas/Pascasarjana : Sains dan Teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul Skripsi :

PERANCANGAN KENDALI MODEL PREDITIVE CONTROL (MPC) 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, 20 Juli 2022
Yang membuat pernyataan



Muhammad Luthfan Wafiudin
NIM 11850512435

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

**Hak Cipta Dilindungi Undang
Ketentuan
Tentang
Pengutipan
Penyalahgunaan
Ketentuan
Hak Cipta
Universitas
Islam
Negeri
Sultan
Syarif
Kasim
Riau**

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.

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

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang

Barang siapa Yang menghendaki kehidupan dunia, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa 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, yang sekarang berada di tempat ternyaman dan terindah di sisi Allah SWT, Kakak dan Adik 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 ke tempat masuk yang benar dan keluarkanlah (pula) aku ke tempat keluar yang benar dan berilah aku disisi-Mu kekuasaan yang dapat menolongku."

(QS: Al-Isra 80)

/ Muhammad Luthfan Wafiudin |

| 20 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 mengurangi kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

PERANCANGAN KENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM

MUHAMMAD LUTHFAN WAFIUDIN

NIM: 11850512435

Tanggal Sidang: 20 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 adalah sebuah perangkat yang perancangannya merupakan 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 timbul terletak pada saat melakukan percobaan secara *open loop* masih terdapat osilasi dan stabilitas posisi sudut saat mencapai sudut yang diinginkan. Tujuan dari penelitian ini yakni merancang kendali *Model Predictive Control* (MPC) sebagai pengendali posisi sudut *Aero Pendulum*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan kendali MPC mampu bekerja dengan baik dalam penanganan *Overshoot*, *Error Steady State*, hingga kembali menuju *setpoint* yang diinginkan pada saat diberikan gangguan. Pengujian menggunakan *setpoint* 45° , 60° , 75° dan 90° , dengan respon terbaik pada sudut 45° dengan *Delay Time* (T_d) = 0.1941 detik, *Settling Time* (T_s) = 0.5145 detik, *Rise Time* (T_r) = 0.305 detik, *Maximum Overshoot* = 0.00000035% dan $Ess = 0.015^\circ$.

Kata Kunci: *Aero Pendulum*, UAV, *Model Predictive Control*, *Setpoint*

PREDICTIVE CONTROL MODEL (MPC) DESIGN TO CONTROL ANGLE POSITION ON AERO PENDULUM

MUHAMMAD LUTHFAN WAFIUDIN

Student Number : 11850512435

Date of Final Exam : July 20th, 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 whose design is 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 that arises is that when conducting an open loop experiment, there are still oscillations and stability of the angle position when it reaches the desired angle. The purpose of this study is to design a Model Predictive Control (MPC) as a controller for the angle position of the Aero Pendulum. Based on research conducted, MPC control is able to work well in handling Overshoot, Error Steady state, until it returns to the desired setpoint when a disturbance is given. The test uses setpoint 45°, 60°, 75° and 90°, with the best response at an angle of 45° with Delay Time (Td) = 0.1941 seconds, Settling Time (Ts) = 0.5145 seconds, Rise Time (Tr) = 0.305 seconds, Maximum Overshoot = 0.00000035% and Ess = 0.015°.

Key Word: Aero Pendulum, UAV, Model Predictive Control, Setpoint

UIN SUSKA RIAU

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang 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 Kendali Model Predictive Control (MPC) 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. Papa, mama, mbak 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 Putut Son Maria, S.ST., M.T selaku dosen pembimbing sekaligus menjadi dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir 1 yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

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 amanah UIN Suska Riau**
7. Bapak Jufrizel, S.T, M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari semester 1 hingga semester 8 ini.
 8. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 9. Keluarga besar HIMATE UIN SUSKA RIAU selaku wadah penulis untuk terus melakukan improvisasi diri dan ingin terus melakukan hal yang baru terkait rasa selama di perkuliahan.
 10. Desvita Anzelina yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk memberikan dorongan ke penulis dalam berbagi hal dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 11. SESCLUB, Robotic Techno Faste, Ikatan Mahasiswa Kecamatan Rengat – Pekanbaru dan Sahabat Instrument selaku rekan seperjuangan dalam mengupgrade diri dan terus memantapkan jati diri penulis.
 12. Para Brodie (Tri Anandikha, Dianda Rifaldi, Bang Zulfan Effendi Parinduri, Bang Iqbal Hidayat, Rizky Wijaya) 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, 20 Juli 2022
Penulis,

Muhammad Luthfan Wafiuдин
NIM.11850512435

- 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 ISI

| | |
|--|-------------|
| EMBAR PERSETUJUAN | i |
| EMBAR PENGESAHAN..... | ii |
| SURAT PERNYATAAN | iii |
| EMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL..... | iv |
| HALAMAN PERSEMBERAHAN | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT | vii |
| KATA PENGANTAR..... | viii |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xiii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR RUMUS | xvi |
| DAFTAR LAMBANG | xxi |
| DAFTAR SINGKATAN | xxii |
| BAB I PENDAHULUAN | I-1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | I-1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | I-3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | I-4 |
| 1.4 Batasan Masalah | I-4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | I-4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | II-1 |
| 2.1 Penelitian Terkait | II-1 |
| 2.2 Landasan Teori | II-2 |
| 2.2.1 <i>Aero Pendulum</i> | II-2 |
| 2.2.2 Model Matematika <i>Aero Pendulum</i> | II-3 |
| 2.2.3 Motor <i>Brushless DC</i> | II-5 |
| 2.2.4 <i>Propeller</i> 2 bilah..... | II-7 |
| 2.3 Karakteristik Sistem Orde 2 | II-8 |
| 2.4 Transformasi <i>Bilinear</i> dan <i>Theorema Shannon</i> | II-10 |
| 2.5 <i>Model Predictive Control (MPC)</i> | II-10 |

- Hak Cipta Dilindungi 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.
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

| | |
|---|-------|
| 4.4.1 Pengendali dengan Gangguan pada Sudut 45° | IV-20 |
| 4.4.2 Pengendali dengan Gangguan pada Sudut 60° | IV-22 |
| 4.4.3 Pengendali dengan Gangguan pada Sudut 75° | IV-25 |
| 4.4.4 Pengendali dengan Gangguan pada Sudut 90° | IV-28 |

| | |
|---|------------|
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | V-1 |
| 5.1 Kesimpulan..... | V-1 |
| 5.2 Saran | V-1 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A BLOK DIAGRAM SIMULINK

LAMPIRAN B HASIL RESPON AERO PENDULUM

LAMPIRAN C PROGRAM M-File

LAMPIRAN D SPESIFIKASI KOMPONEN

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Hak Cipta  Dilarang Menggunakan

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.

Hak Cipta  Riau

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|--------|
| Gambar 2. 1 Diagram Sistematis <i>Aero Pendulum</i> | II-2 |
| Gambar 2. 2 Blok diagram <i>Aero Pendulum</i> [3]..... | II-4 |
| Gambar 2. 3 Tampilan Motor BLDC A2212/13T[16]..... | II-6 |
| Gambar 2. 4 Gaya dorong dan torsi pada Propeller[18] | II-7 |
| Gambar 2. 5 Bagian-bagian <i>propeller</i> [19] | II-8 |
| Gambar 2. 6 Karakteristik Respon Waktu pada Sistem Orde 2 | II-9 |
| Gambar 2. 7 Konsep dasar Kendali MPC [22]..... | II-11 |
| Gambar 2. 8 Matlab R2015a | II-16 |
| Gambar 2. 9 Tampilan Model Simulink pada Matlab | II-16 |
| Gambar 2. 10 Kotak Dialog Simulink Library | II-17 |
| Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian | III-1 |
| Gambar 3. 2 Tampilan aero pendulum dengan setpoint 45° dan 60° | III-3 |
| Gambar 3. 3 Blok Simulink Open Loop Aero Pendulum | III-4 |
| Gambar 3. 4 Respon Open Loop Sistem Aero Pendulum 45° | III-4 |
| Gambar 3. 5 Rangkaian pengendali Model Predictive Control (MPC) Simulink | III-31 |
| Gambar 3. 6 Tampilan Source Block Parameters..... | III-32 |
| Gambar 3. 7 Tampilan Function Block Parameters dengan TF Aero Pendulum | III-32 |
| Gambar 3. 8 Tampilan Function Block Parameters pada TF model | III-33 |
| Gambar 3. 9 Tampilan Block MPC Controller | III-34 |
| Gambar 3. 10 Tampilan MPC Question..... | III-35 |
| Gambar 3. 11 Tampilan kendali MPC saat melakukan design pada sistem | III-35 |
| Gambar 4. 1 Rangkaian Open Loop Aero Pendulum | IV-1 |
| Gambar 4. 2 Hasil keluaran Open Loop 45° | IV-2 |
| Gambar 4. 3 Hasil keluaran Open Loop 60° | IV-4 |
| Gambar 4. 4 Hasil keluaran Open Loop 75° | IV-6 |
| Gambar 4. 5 Hasil keluaran Open Loop 90° | IV-8 |
| Gambar 4. 6 Rangkaian pengendali MPC untuk kendali Aero pendulum | IV-10 |
| Gambar 4. 7 Respon Aero Pendulum menggunakan pengendali MPC 45° | IV-10 |
| Gambar 4. 8 Respon Aero Pendulum menggunakan pengendali MPC 60° | IV-13 |
| Gambar 4. 9 Respon Aero Pendulum menggunakan pengendali MPC 75° | IV-15 |
| Gambar 4. 10 Respon Aero Pendulum menggunakan pengendali MPC 90° | IV-17 |

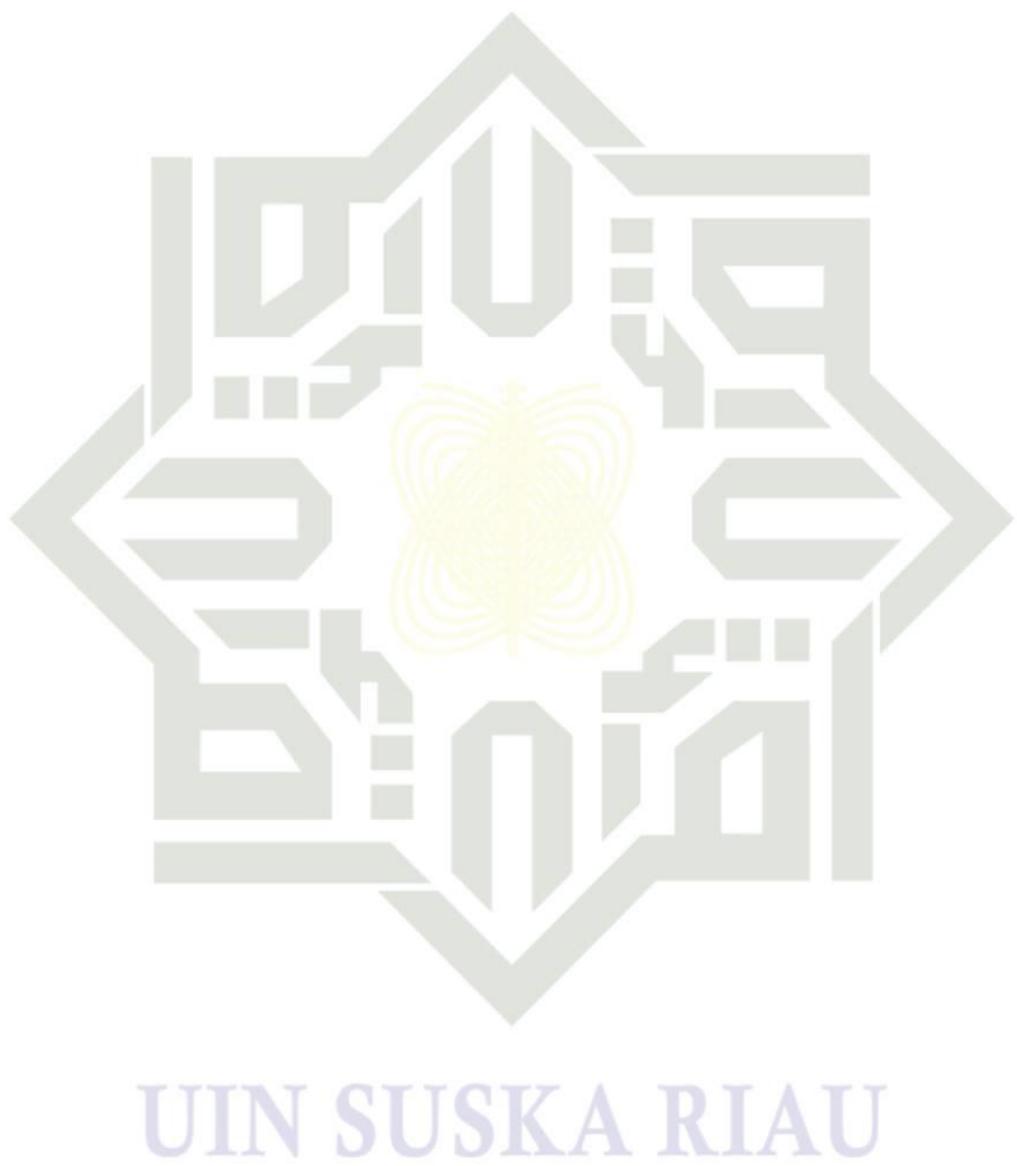
| | |
|--|-------|
| Gambar 4. 11 Blok Simulink MPC pada saat Aero Pendulum diberikan gangguan | IV-20 |
| Gambar 4. 12 Respon keluaran saat Aero Pendulum 45° diberikan gangguan | IV-20 |
| Gambar 4. 13 Respon keluaran saat Aero Pendulum 60° diberikan gangguan | IV-23 |
| Gambar 4. 14 Respon keluaran saat Aero Pendulum 75° diberikan gangguan | IV-25 |
| Gambar 4. 15 Respon keluaran saat Aero Pendulum 90° diberikan gangguan | IV-28 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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



DAFTAR TABEL

| | |
|---|--------|
| 1 Spesifikasi Aero Pendulum[9]. | II-5 |
| 1 Penentuan nilai τ pada TF Model..... | III-34 |
| 1 Hasil respon Aero Pendulum secara open loop 45° | IV-3 |
| 2 Hasil respon Aero Pendulum secara open loop 60° | IV-5 |
| 3 Hasil respon Aero Pendulum secara open loop 75° | IV-7 |
| 4 Hasil respon Aero Pendulum secara open loop 90° | IV-9 |
| 5 Hasil respon waktu dengan menggunakan pengendali MPC 45° | IV-12 |
| 6 Hasil respon waktu dengan menggunakan pengendali MPC 60° | IV-14 |
| 7 Hasil respon waktu dengan menggunakan pengendali MPC 75° | IV-17 |
| 8 Hasil respon waktu dengan menggunakan pengendali MPC 90° | IV-19 |
| 9 Respon Aero Pendulum pada sudut 45° saat diberikan gangguan | IV-22 |
| 10 Respon Aero Pendulum pada sudut 60° saat diberikan gangguan | IV-25 |
| 11 Respon Aero Pendulum pada sudut 75° saat diberikan gangguan | IV-27 |
| 12 Respon Aero Pendulum pada sudut 90° saat diberikan gangguan | IV-30 |

DAFTAR RUMUS

© Hak Cipta milik UIN Sultan Syarif Kasim Riau

- | | |
|----|--|
| 1 | Persamaan sistem |
| 2 | Persamaan sistem |
| 3 | Penurunan Persamaan Fungsi Alih Sistem |
| 4 | Penurunan Persamaan Fungsi Alih Sistem |
| 5 | Gaya Angkat |
| 6 | Bentuk Persamaan Fungsi Alih |
| 7 | Fungsi Alih SiStem Aero Pendulum |
| 8 | Medan Magnet |
| 9 | Persamaan Ns |
| 10 | Persamaan Transformasi Z |
| 11 | <i>overshoot</i> maksimum |
| 12 | Persamaan transformasi Z menggunakan transformasi bilinier |
| 13 | <i>theorema Shannon</i> |
| 14 | vektor variable state |
| 15 | <i>process output</i> |
| 16 | persamaan state space |
| 17 | vektor variable state |
| 18 | <i>Controllable Canonical Form</i> |
| 19 | <i>Controllable Canonical Form</i> |
| 20 | <i>Controllable Canonical Form</i> |
| 21 | Desain <i>augmented Model</i> |
| 22 | variabel <i>output</i> |
| 23 | variabel <i>output</i> |
| 24 | Matriks F |
| 25 | Matriks ϕ |
| 26 | Indeks Performansi MPC |
| 27 | Indeks Performansi J |
| 28 | persamaan solusi optimal kontrol |

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.

| | |
|----|--|
| 29 | persamaan solusi optimal kontrol |
| 30 | persamaan delta u |
| 31 | <i>gain Kmpc</i> |
| 32 | <i>gain Ky</i> |
| 1 | <i>state space</i> keadaan x 45° |
| 2 | <i>state space</i> keadaan y 45° |
| 3 | <i>state space</i> matriks A 45° |
| 4 | <i>state space</i> matriks B 45° |
| 5 | <i>state space</i> matriks C 45° |
| 6 | <i>state space</i> matriks D 45° |
| 7 | <i>state space</i> orde 2 Matriks X 45° |
| 8 | <i>state space</i> orde 2 Matriks Y 45° |
| 9 | <i>state space</i> orde 2 Matriks X 45° |
| 10 | <i>state space</i> orde 2 Matriks Y 45° |
| 11 | <i>state space</i> diubah ke bentuk <i>augmented model</i> 45° |
| 12 | <i>state space</i> diubah ke bentuk <i>augmented model</i> 45° |
| 13 | <i>Augmented Model</i> 45° |
| 14 | <i>Augmented Model</i> 45° |
| 15 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 45° |
| 16 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 45° |
| 17 | Persamaan Matriks F dan ϕ 45° |
| 18 | Formulasi Matriks F dan ϕ 45° |
| 19 | Parameter Matriks F dan ϕ 45° |
| 20 | Nilai Matriks F dan ϕ 45° |
| 21 | Persamaan Matriks Y 45° |
| 22 | Nilai Matriks Y 45° |
| 23 | <i>gain KMPC</i> 45° |
| 24 | Matriks Z 45° |
| 25 | <i>state space</i> keadaan x 60° |
| 26 | <i>state space</i> keadaan y 60° |

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

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

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

| | |
|------|--|
| 27 | <i>state space</i> matriks A 60° |
| 28 | <i>state space</i> matriks B 60° |
| 29 | <i>state space</i> matriks C 60° |
| 30 | <i>state space</i> matriks D 60° |
| 31 | <i>state space</i> orde 2 Matriks X 60° |
| 32 | <i>state space</i> orde 2 Matriks Y 60° |
| 33 | <i>state space</i> orde 2 Matriks X 60° |
| 34 | <i>state space</i> orde 2 Matriks Y 60° |
| 3.35 | <i>state space</i> diubah ke bentuk <i>augmented model</i> 60° |
| 3.36 | <i>state space</i> diubah ke bentuk <i>augmented model</i> 60° |
| 3.37 | <i>Augmented Model</i> 60° |
| 3.38 | <i>Augmented Model</i> 60° |
| 3.39 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 60° |
| 3.40 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 60° |
| 3.41 | Persamaan Matriks F dan ϕ 60° |
| 3.42 | Formulasi Matriks F dan ϕ 60° |
| 3.43 | Parameter Matriks F dan ϕ 60° |
| 3.44 | Nilai Matriks F dan ϕ 60° |
| 3.45 | Persamaan Matriks Y 60° |
| 3.46 | Nilai Matriks Y 60° |
| 3.47 | <i>gain KMPC</i> 60° |
| 3.48 | Matriks Z 60° |
| 3.49 | <i>state space</i> keadaan x 75° |
| 3.50 | <i>state space</i> keadaan y 75° |
| 3.51 | <i>state space</i> matriks A 75° |
| 3.52 | <i>state space</i> matriks B 75° |
| 3.53 | <i>state space</i> matriks C 75° |
| 3.54 | <i>state space</i> matriks D 75° |
| 3.55 | <i>state space</i> orde 2 Matriks X 75° |
| 3.56 | <i>state space</i> orde 2 Matriks Y 75° |

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

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

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

- ©Hak Cipta milik UIN SUSKA RIAU
- 57 state space orde 2 Matriks X 75°
- 58 state space orde 2 Matriks Y 75°
- 59 state space diubah ke bentuk *augmented model* 75°
- 60 state space diubah ke bentuk *augmented model* 75°
- 61 Augmented Model 75°
- 62 Augmented Model 75°
- 63 Bentuk *augmented Model Aero Pendulum* 75°
- 64 Bentuk *augmented Model Aero Pendulum* 75°
- 3.65 Persamaan Matriks F dan ϕ 75°
- 3.66 Formulasi Matriks F dan ϕ 75°
- 3.67 Parameter Matriks F dan ϕ 75°
- 3.68 Nilai Matriks F dan ϕ 75°
- 3.69 Persamaan Matriks Y 75°
- 3.70 Nilai Matriks Y 75°
- 3.71 *gain KMPC* 75°
- 3.72 Matriks Z 75°
- 3.73 state space keadaan x 90°
- 3.74 state space keadaan y 90°
- 3.75 state space matriks A 90°
- 3.76 state space matriks B 90°
- 3.77 state space matriks C 90°
- 3.78 state space matriks D 90°
- 3.79 state space orde 2 Matriks X 90°
- 3.80 state space orde 2 Matriks Y 90°
- 3.81 state space orde 2 Matriks X 90°
- 3.82 state space orde 2 Matriks Y 90°
- 3.83 state space diubah ke bentuk *augmented model* 90°
- 3.84 state space diubah ke bentuk *augmented model* 90°
- 3.85 Augmented Model 90°
- 3.86 Augmented Model 90°

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

| | |
|------|---|
| 87 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 90° |
| 88 | Bentuk <i>augmented Model Aero Pendulum</i> 90° |
| 89 | Persamaan Matriks F dan ϕ 90° |
| 90 | Formulasi Matriks F dan ϕ 90° |
| 91 | Parameter Matriks F dan ϕ 90° |
| 92 | Nilai Matriks F dan ϕ 90° |
| 93 | Persamaan Matriks Y 90° |
| 94 | Nilai Matriks Y 90° |
| 3.95 | <i>gain KMPC</i> 90° |
| 3.96 | Matriks Z 90° |

DAFTAR LAMBANG

©

Hak Cipta Dilegalkan UIN Sultan Syarif Kasim Riau

Gain Overall

\propto Konstanta waktu

\propto Frekuensi alami tak teredam

\propto Rasio Peredaman

\propto Operasi delta

\propto Matriks *output*

\propto Matriks *output*

\propto Refleksi objektif kontrol

\propto Matriks diagonal yang tersusun dari beberapa matriks lain

\propto Medan Magnet

\propto Kecepatan Medan Putar

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.

DAFTAR SINGKATAN

© **Hak Cipta milik UIN Suska Riau**
HPC = *Model Predictive Control*

TD = *Time delay*

TS = *Time sampling*

RT = *Rise time*

ESS = *error steady state*

MOS = *maximum overshoot*

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

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



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Patar Belakang

Perkembangan teknologi pada saat ini mengalami kemajuan yang sangat pesat. Kemajuan teknologi memberikan manfaat dan dampak positif pada kehidupan. Contohnya ada teknologi kedinginan yang selalu menunjukkan perkembangan yang luar biasa dan tidak ada habisnya, salah satunya yakni teknologi *Unnamed Aerial Vehicle* (UAV)[1]. UAV merupakan sebuah pesawat tanpa awak yang pengendaliannya dilakukan dari jarak jauh atau dapat diterbangkan secara mandiri dengan terlebih dahulu memberikan program komputer maupun diterbangkan secara otomatis[2].

Proses perancangan UAV membutuhkan ketelitian untuk menjadikan pesawat nirawak dapat terbang dengan baik, sehingga posisi terbang dari pesawat nirawak menjadi stabil[3]. Adapun bentuk pengujian yang banyak digunakan yakni pada *Aero Pendulum*. Jenis pendulum ini mempunyai motor dengan baling-baling di salah satu ujung perangkatnya. Sehingga pendulum dapat berayun di salah satu titik tetap yang memakai gaya aerodinamik yang diperoleh dari baling-baling[4].

Baling-baling pada *Aero Pendulum* dikontrol melalui motor *brushless DC* yang mampu menghasilkan gaya dorong sebagai penyesuaian posisi pendulum berdasarkan tegangan masukan yang diberikan[5]. *Aero Pendulum* terbagi dari dua posisi ekuilibrium yakni posisi stabil dan tidak stabil, dimana posisi stabil didefinisikan sebagai suatu posisi pendulum yang menyesuaikan masukan *setpoint* dan mempertahankan nilai yang telah diberikan. Sedangkan, posisi tidak stabil merupakan posisi pendulum yang tidak dapat menyesuaikan *setpoint* yang telah diberikan. Pengontrolan posisi tersebut berfungsi sebagai penstabil sistem pada titik stabil ekuilibrium yang telah ditentukan[6].

Permasalahan yang terdapat pada *Aero Pendulum* yaitu terdapat pada implementasi *single rotor*, dimana permasalahan stabilitas serta kontrol penerbangan yang lebih sulit dikarenakan memiliki kekekalan momentum sudut[7]. Maka dari itu perlu ditambahkan penggunaan pengendali pada *Aero Pendulum* yang nantinya mampu mengendalikan respon serta stabilitas sudut dengan menyesuaikan tegangan yang diberikan, *overshoot*, waktu naik dan lain sebagainya. Penggunaan pengendali tersebut ditujukan agar stabilitas posisi sudut pada *Aero Pendulum* dapat menyesuaikan *setpoint* yang diberikan[5].

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.

Mengacu dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa penelitian terkait *aero pendulum*, salah satunya pengendalian sudut dengan menggunakan metode tuning *Evreus Luyben*, Adapun nilai yang didapatkan adalah $K_p = 0.0313$, $K_i = 0.0355$ dan $K_d = 0.002$, lalu dengan menggunakan nilai K_p , K_i dan K_d yang didapatkan menghasilkan hasil terbaik pada sudut 60° dengan *rise time*(tr) = 45.95 detik, *delay time*(td) = 14.49 dan *settling time*(ts) = 62.74 detik. Selain dari hasil respon yang cukup lambat, pada penelitian ini masih didapatkan *overshoot* = 60.8% dan *error steady state* = 0.1% [8].

Penelitian serupa dengan menggunakan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), kendali ANFIS diterapkan sebagai pengontrol suatu sistem dengan pergerakan yang kurang baik. Hasil respon terbaik yang didapatkan yakni $tr = 0.8903$ detik, $ts = 1.1484$ detik, pada pengendalian posisi sudut menggunakan kendali ANFIS ini masih terdapat *overshoot* dan *error steady state*, dengan nilai 0.4868% untuk *overshoot* dan 0.006% untuk *error steady state* [6].

Penelitian pengaturan sudut *aero pendulum* lainnya menggunakan pengendali PID, metode yang digunakan yakni metode *genetic algorithm optimization*. Dari hasil yang didapatkan dengan nilai $K_p = 0.91$, $K_i = 6.529$ dan $K_d = 0.65$ yakni pada *setpoint* bernilai 45° didapatkan *peak time* (tp) = 5.28 detik, td = 1.457 detik, $tr = 4.054$ detik, $ts = 3.379$ detik, namun pada penelitian masih didapatkan *error steady state* = 0.0116% [7].

Pengaturan sudut pada *Aero Pendulum* dilakukan juga dengan menggunakan pengendali LQG, hasil respon yang didapatkan dengan menggunakan pengendali LQG diantarnya sebagai berikut $td = 0.3099$ detik, $ts = 0.4295$ detik, $tr = 0.3934$ detik. Namun masih didapatkan maximum overshoot yang tinggi yakni 47.64% [9].

Dari beberapa penelitian yang telah dipaparkan menunjukkan hasil *open loop aero pendulum* menunjukkan hasil keluaran yang memiliki osilasi dan belum mampu mencapai *setpoint* yang diinginkan. Osilasi dapat dikatakan sebuah gangguan yang membuat bentuk gelombang keluaran menjadi rusak. Lalu mengenai *aero pendulum* dengan menggunakan beberapa pengendali memiliki masalah pada *error steady state* dan *Overshoot*. *Overshoot* merupakan tanda ketidakstabilan suatu sistem. Sementara itu, perlu kita ketahui Kestabilan sistem sangat diperlukan pada *aero pendulum* saat menginginkan posisi sudut yang sesuai dengan keinginan. Maka dari itu, diperlukan sebuah pengendali yang mampu membuat hasil respon berjalan sesuai keinginan.

Terdapat sebuah pengendali yang mampu minimalkan respon keluaran sistem yakni pada *error steady state* maupun *maximum overshoot*, pengendali tersebut ialah pengendali

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

- a. 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.

Model *Predictive Control* (MPC), pengendali MPC telah banyak diterapkan di dunia perindustrian, dengan banyaknya penerapan pengendali MPC yang mampu menangani berbagai kendala di proses yang berbeda pada industri mampu membuktikan bahwa pengendali ini cukup baik dalam penanganan masalah pada sebuah sistem. Selain itu, pengendali MPC ini juga dapat mengikuti nilai *setpoint* yang diberikan.

Tujuan utama dari sistem kendali MPC yakni untuk menentukan nilai sinyal kendali sehingga nilai *output* yang diprediksi akan mendekati nilai *setpoint* dengan optimal[10]. Keuntungan dari pengendali MPC dari pengendali konvensional lain yakni mampu memperhitungkan batasan sistem untuk perancangan pengendali. Konsep MPC yang mudah penalarannya dapat digunakan untuk pengendalian proses yang bervariasi, mulai dari yang sederhana hingga proses yang kompleks. Tidak hanya itu, pengendali MPC juga mampu menangani sistem *multivariable*, memiliki kompensasi waktu tunda hingga dapat melakukan kompensasi dari gangguan[11].

Berdasarkan pemaparan diatas, maka penulis ingin melakukan penelitian terhadap pengendalian *aero pendulum* dengan sistem pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk menguji apakah sistem pengendali ini tetap mampu mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan dan mampu meredamkan *overshoot* ataupun *error steady state*. Oleh karena itu, penulis mengajukan judul **“Perancangan Kendali Model Predictive Control (MPC) Untuk Mengendalikan Posisi Sudut Pada Aero Pendulum”**.

Penelitian dilakukan dengan skenario pertama yakni dengan Pengujian simulasi secara open loop dengan *setpoint* 45° , 60° , 75° dan 90° tanpa menggunakan pengendali (*open loop*), selanjutnya Pengujian simulasi dengan menggunakan pengendali MPC dengan *setpoint* yang diberikan yakni 45° , 60° , 75° dan 90° dan yang terakhir Pengujian keandalan pengendali saat *Aero Pendulum* diberikan gangguan 6%, 10%.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaturan parameter pada pengendali MPC sehingga dapat mengurangi osilasi dan *error steady state*?
2. Bagaimana Performansi *aero pendulum* supaya dapat menjaga keadaan pada nilai *setpoint* saat diberi gangguan dengan menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

Menentukan konfigurasi *Model Predictive Control* (MPC) yang efektif untuk mengurangi osilasi dan *error steady state*.

Menentukan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) pada *Aero Pendulum* agar mampu kembali stabil menuju *setpoint* pada saat diberi gangguan.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dibutuhkan agar pembahasan tidak terlalu luas, maka peneliti membatasi masalah sebagai berikut:

1. Pemodelan matematis dari *aero pendulum* menggunakan fungsi alih dari penelitian [6].
2. Parameter yang dikendalikan adalah sudut pada *aero pendulum*
3. *Setpoint* yang digunakan pada penelitian ini merujuk dari referensi terkait *aero pendulum* pada masing-masing penelitian yang mendapatkan hasil *respon transient* terbaik.
4. Pengamatan kinerja kendali disimulasikan menggunakan *tool simulink* MATLAB.
5. Desain hanya berupa simulasi dan tidak membahas perangkat.
6. Analisis dilakukan hanya berdasarkan data hasil simulasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Bagi Penulis

Meluaskan pengetahuan terkait perancangan sistem kendali MPC dalam upaya pengendalian *Aero Pendulum*.

2. Bagi Mahasiswa Teknik Elektro dan pembaca

- a. Penambah referensi pada penelitian dan penulisan Tugas Akhir.
- b. Penambah referensi tentang pengendali MPC.

3. Bagi Universitas

Meluaskan koleksi referensi yang terdapat pada perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.

4. Bagi Perusahaan

Sebagai referensi dan pertimbangan untuk pengaplikasian pengendali pada bidang industri perusahaan.

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.

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.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1. Penelitian Terkait

Pada penelitian Tugas Akhir ini penulis telah melakukan kajian literatur yang dimulai dari teori hingga referensi yang topik nya sesuai dengan permasalahan yang diteliti baik dari segi *plant* maupun pengendali yang digunakan, adapun beberapa kajian literatur yang telah dilakukan salah satunya Penelitian yang menggunakan pengendali PID metode *Genetic Algorithm Optimization* dengan $K_p = 0.91$, $K_i = 6.529$ dan $K_d = 0.65$ didapatkan hasil respon sistem yang baik pada sudut 45° dengan hasil $tp = 5.28$ detik, $td = 1.457$ detik, $tr = 4.054$ detik dan $ts = 3.379$ detik. Pada penelitian ini masih terdapat *error steady state* = 0.0116% [7].

Penelitian yang membahas pengaturan sudut pada *Aero Pendulum* menggunakan kontroler PID *Tyreus-Luyben* yang dimana hasil terbaik didapatkan pada saat *setpoint* bernilai 60° dengan *peak time* (tp) = 129.65 detik, $tr = 45.95$ detik, nilai *delay time* (td) = 14.49 detik dan $ts = 62.74$ detik. Pada penelitian ini juga masih didapatkan *overshoot* dan *Error steady state* = 60.8° untuk *overshoot* = 0.1% [8].

Penelitian Desain sistem pengaturan sudut *Aero Pendulum* menggunakan kendali *adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), dimana hasil terbaik terdapat pada nilai *setpoint* 80° dengan nilai *rise time* (tr) = 0.8903 detik, *settling time* (ts) = 1.1484 detik, namun hasil masih memiliki nilai *maximum overshoot* (mo) = 0.4868% serta nilai *error steady state* (ess) = 0.006% [6].

Lalu penelitian serupa dalam pengaturan sudut pada *Aero Pendulum* yakni dengan menggunakan pengendali LQG, yang dimana hasil terbaik didapatkan pada saat *setpoint* berada pada sudut 90° , hasil respon yang didapatkan dengan menggunakan pengendali LQG diantaranya sebagai berikut $td = 0.3099$ detik, $ts = 0.4295$ detik, $tr = 0.3934$ detik. Pada penelitian dengan menggunakan LQG ini telah dapat meredam *error steady state* pada *Aero Pendulum*, namun masih didapatkan maximum overshoot yang tinggi yakni sebesar 47.64% [9].

Berikut ini terdapat beberapa penelitian yang telah dilakukan menggunakan pengendali MPC, dimana penelitian ini dilakukan terhadap sistem suspensi seperempat kendaraan. Hasil keluaran respon yang dihasilkan mampu meredam *overshoot* yang mula nya dari 60% menjadi 0%, tak hanya *overshoot* yang berhasil direddamkan pada sistem

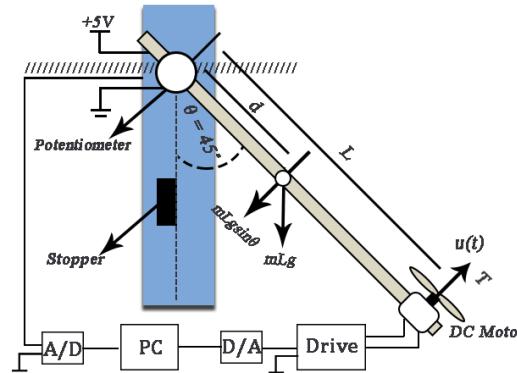
1. Dilarang menyalin konten ini tanpa izin.
Hak Cipta Dilindungi
© Hukipedia
susensi seperempat kendaraan ini, melainkan osilasi yang terdapat pada sistem juga
tidak dapat diremed. Dengan hasil respon yang dihasilkan berdasarkan hasil visual dan juga
identifikasi sistem di dapatkan nilai *rise time* 0.8834 detik, *settling time* 1.2084 detik,
overshoot 0% serta error steady state sebesar 0 meter[12].

Dari beberapa kajian literatur yang telah dilakukan dari peneliti sebelumnya, maka dari itu peneliti akan melakukan penelitian pengaturan sudut pada *Aero Pendulum* dengan menggunakan pengendali MPC. MPC juga diharapkan mampu menghasilkan hasil keluaran yang lebih baik lagi serta mampu meredam overshoot dari *Aero Pendulum*.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 ~~Aero~~ Pendulum

Aero Pendulum merupakan pendulum yang mempunyai baling-baling yang dipasang pada poros motor untuk menghasilkan sebuah gaya dorong yang berfungsi sebagai penggerak batang ke sudut yang diinginkan. Pada *aero pendulum* yang akan ditampilkan 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[13][14].



Gambar 2. 1 Diagram Sistematis Aero Pendulum [3]

Pada Gambar 2.1 terdapat komponen yang bernama *stopper* yang berfungsi sebagai pembatas lengan bandul agar tidak terjadi keluaran sistem yang melewati sudut negatif pada saat *aero pendulum* beroperasi. Peran *stopper* juga dapat dilihat pada hasil keluaran yang didapatkan, *stopper* akan menjaga lengan bandul yang bergerak menuju sudut negatif *aero pendulum*.

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

2.2 Model Matematika Aero Pendulum

Dari gambar 2.1 baling-baling yang dibawah nya terdapat motor DC akan berputar sehingga menghasilkan sebuah gaya dorong saat sistem diaktifkan lalu ditambahkan nilai setpoint. Hal ini yang mampu mendorong untuk dilakukan nya sebuah pengendalian atau pengontrolan terhadap sudut yang terdapat pada *Aero Pendulum* agar sebuah sistem bergerak dengan stabil dan responsif dalam mencapai sebuah setpoint yang diinginkan. Dari gaya dorong yang dihasilkan dari baling-baling membuat sistem yang terangkat sehingga terbentuklah sudut.

Persamaan sistem yang digerakkan didasarkan pada hukum Newton dan juga momentum sudut dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$J \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + m_L \cdot g \cdot d \cdot \theta = T \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) kita lakukan transformasi *Laplace* dengan domain (s). dimana persamaan akan berubah menjadi seperti berikut:

$$J \cdot s^2 \theta(s) + c \cdot s \theta(s) + m_L \cdot g \cdot d \theta(s) = T(s) \quad (2.2)$$

Setelah didapatkan persamaan (2.2) pindahkan ruas, sehingga persamaan menjadi fungsi alih seperti persamaan berikut:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J \cdot s^2 + c \cdot s + m_L \cdot g \cdot d} \quad (2.3)$$

Dari fungsi alih yang didapatkan dilakukan penyederhanaan dengan cara melakukan pembagian persamaan dengan J , maka persamaan yang didapatkan menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{c}{J} \cdot s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \quad (2.4)$$

Keterangan:

θ = Sudut (Derajat)

$\theta(s)$ = Sudut dalam domain waktu (*Laplace*)

ω = Kecepatan sudut (rad/s)

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

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

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

- = Percepatan sudut (rad/s²)
- = Momen Inersia (kg.m²)
- = Percepatan gravitasi (m/s²)
- = Berat bandul (kg)
- = Panjang Lengan (m)
- = Koefisien redaman (kg. m²/s)
- = Jarak ujung lengan ke titik tumpu (m)

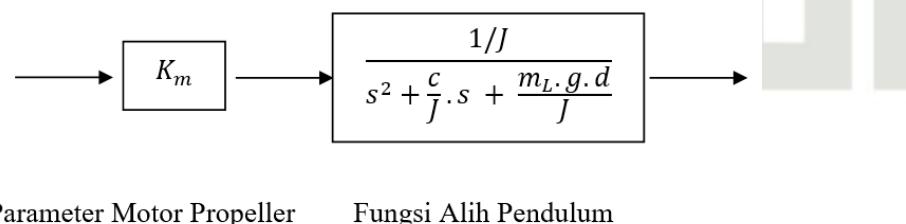
Pergerakan yang terdapat pada *Aero Pendulum* dihasilkan dari putaran motor baling-baling dan tegangan masukan yang diberikan. Dari putaran tersebut maka dihasilkan gaya dorong sehingga persamaan sistem harus dikalikan dengan kecepatan yang dihasilkan dari motor baling-baling. Sehingga didapatkan nilai persamaan yang bisa dikendalikan.

$$T(s) = K_m \cdot V \quad (2.5)$$

Keterangan:

- K_m = Kecepatan putaran baling-baling motor (rad/s/V)
- $T(s)$ = Gaya angkat dalam domain waktu yang dihasilkan dari motor *brushless DC* (Nm/kg)
- $V(s)$ = Tegangan dalam domain waktu yang diberikan ke motor *brushless DC* (Volt)

Adapun blok *Aero Pendulum* berdasarkan persamaan (2.4) dan (2.5) menjadi seperti gambar diagram blok dibawah.



Parameter Motor Propeller Fungsi Alih Pendulum

Gambar 2. 2 Blok diagram *Aero Pendulum* [3]

Dari blok diagram yang terdapat pada Gambar 2.2, bentuk fungsi alih berubah menjadi:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \quad (2.6)$$

Sebelum menentukan sebuah fungsi alih sistem, diperlukan spesifikasi dari sebuah sistem. Adapun tabel spesifikasi dari *plant Aero Pendulum* sebagai berikut.

Tabel 2.1 Spesifikasi *Aero Pendulum*[9].

| No. | Alat | Spesifikasi | Satuan |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang | Panjang Lengan (L) | 0,4 | m |
| | Momen Inersia (J) | 0,0512 | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ |
| | Koefisien Redaman (c) | 0,0001 | $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ |
| | Panjang Pusat Massa (d) | 0,2 | m |
| | Percepatan Gravitasi (g) | 9,8 | m/s^2 |
| | Massa (m) | 0,32 | Kg |
| | Koefisien Motor Propeller (Km) | 0,7 | $\frac{\text{rad} / \text{s}}{v}$ |

Dari spesifikasi yang telah dipaparkan pada tabel diatas, langkah selanjutnya yakni memasukkan nilai spesifikasi ke dalam persamaan (2.6). sehingga nilai fungsi alih yang didapatkan menjadi seperti berikut

$$G(s) = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$G(s)$ = Fungsi Alih Pemodelan Sistematis

2.2.3 Motor **Brushless DC**

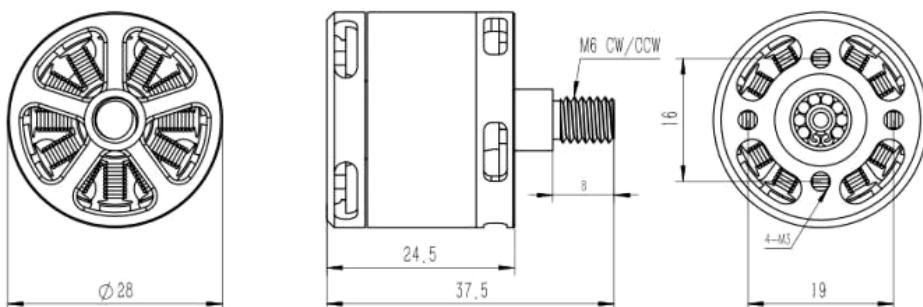
Motor *Brushless DC* (BLDC) merupakan salah satu jenis motor sinkron. Berarti medan magnet yang diperoleh dari stator dan medan magnet yang diperoleh dari rotor berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami slip yang biasanya terlihat pada motor induksi. Sesuai dengan namanya, motor BLDC tidak menggunakan *brush/sikat* untuk pergantian. Sebaliknya, mereka dimutasi secara elektronik. Motor BLDC memiliki banyak keunggulan diantaranya: [15].

1. Kecepatan yang lebih baik dibandingkan karakteristik torsi.
2. Respon dinamis yang tinggi
3. Efisiensi yang tinggi
4. Masa pakai yang lama

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. Pengoperasian tanpa suara
 6. Rentang kecepatan yang lebih tinggi

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
Pada Aero Pendulum Motor BLDC yang digunakan yakni bertipe A2212/13T dengan spesifikasi motor yang diberikan yakni:



Gambar 2. 3 Tampilan Motor BLDC A2212/13T[16]

Motor BLDC merupakan motor tanpa *brush* berkecepatan tinggi yang dirancang khusus untuk penggerak pada quadcopter, Drone ataupun pesawat mainan. Motor ini bertipe outrunner yang dimana casing luar berputar sementara di dalam tetap. Motor ini juga salah satu model yang populer di pasaran karena harganya yang murah[16].

Motor BLDC mampu bekerja pada saat stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Dari arus yang lewat pada kumparan stator menimbulkan medan magnet (B), sehingga persamaan yang didapatkan[17]:

(2.8)

$$B = \frac{\mu Ni}{2l}$$

Dimana:

- N = Jumlah lilitan
 i = Arus
 l = Panjang lilitan
 μ = Permeabilitas

Dengan arus AC 3 fasa *sinusoidal* yang diberikan, nilai medan magnet dan polaritas setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Adapun yang ditimbulkan dari adanya perubahan polaritas dan besar medan magnet tiap kumparan yakni menciptakan medan putar magnet dengan kecepatan[17]:

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.

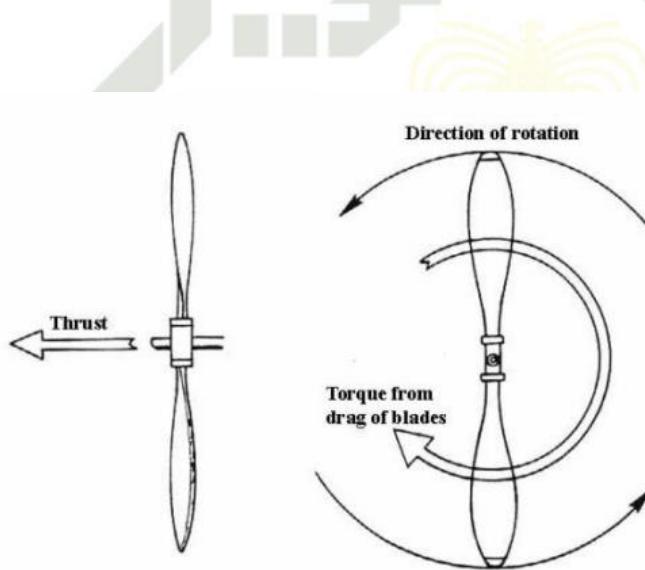
$$\frac{Q}{P} = \frac{f}{p}$$

dimana:

f = Frekuensi arus input
 p = jumlah pole rotor

2.4 Propeller 2 bilah

Propeller atau yang biasa disebut dengan baling-baling merupakan sebuah sayap kecil yang mampu menghasilkan gaya resultan aerodinamis yang dibagi menjadi gaya yang bekerja sepanjang sumbu aksis dari pesawat (gaya dorong) dan gaya yang bekerja pada baling-paling (momen torsi). Dalam keadaan setimbang, *propeller* berputar dengan konstan yang dikendalikan dari torsi mesin yang mempunyai besar yang sama namun arah berbeda seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah [18].



Gambar 2. 4 Gaya dorong dan torsi pada *Propeller*[18]

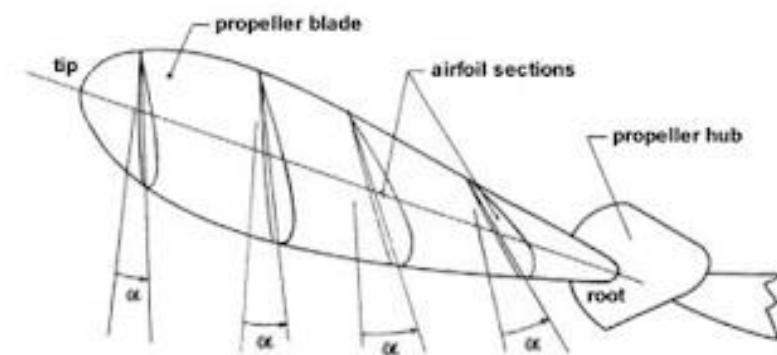
Prinsip kerja dari *propeller* yakni identik dengan sayap, yang memanfaatkan *airfoil* yang bergerak secara berputar sehingga menghasilkan gaya aerodinamika yang disebut *thrust* atau gaya dorong. Perputaran pada *propeller* mengakibatkan kecepatan gerak *airfoil* pada ujung dan pangkal *propeller* berbeda. Maka dari itu *Angle of Attack (AOA)* bilah pada baling-baling dari pangkal ke ujung dibuat semakin kecil, sehingga gaya yang dihasilkan sama. Sehingga dapat dikatakan semakin tinggi kecepatan *airfoil*, semakin besar gaya yang dihasilkan[19].

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.



Gambar 2. 5 Bagian-bagian propeller[19]

Pada *Aero Pendulum* yang telah dirancang menggunakan *propeller* dengan dua bilah, dimana *propeller* ini sering digunakan pada pesawat *aeromodelling* dikarenakan pada segi efek turbulen yang diakibatkan dari putaran propeller lebih sedikit dan lebih seimbang pada putarannya[19].

2.3 Karakteristik Sistem Orde 2

Dalam pengendali *Model Predictive Control* (MPC) harus menggunakan model state space yang fungsinya sebagai pemprediksi respon-respon ke depan dan pada *plant* ini masih menggunakan *transfer function* orde dua untuk pengubahan nilai *transfer function plant* ke persamaan transformasi Z dapat menggunakan *transformasi bilinear* berikut:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n} \quad (2.10)$$

Keterangan:

K = Gain overall

ω_n = Frekuensi alami tak teredam

ξ = Rasio peredaman

Karakteristik respon transient sistem orde kedua pada Gambar 2.3 terdiri dari:

1. Spesifikasi teoritis

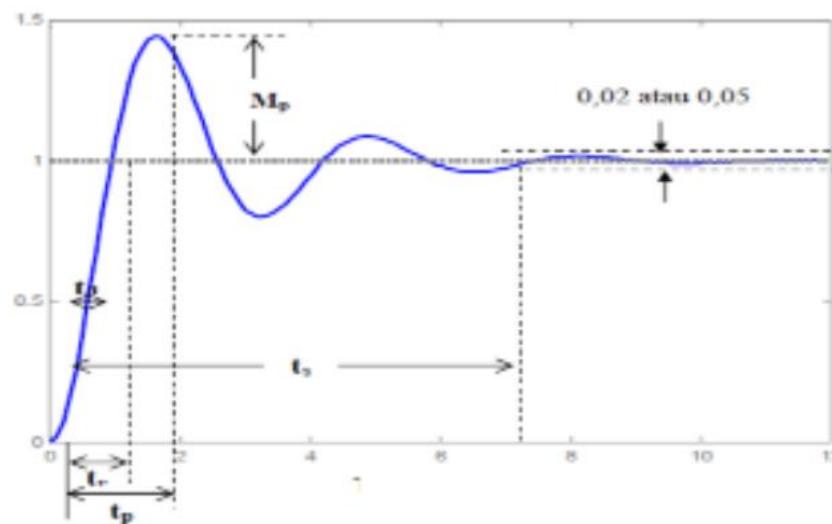
Frekuensi alami tak teredam (ω_n) dan rasio peredaman (ξ).
2. Spesifikasi praktis

Spesifikasi praktis didapatkan dengan asumsi respon sistem orde kedua dalam keadaan redaman kurang (under damped).

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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



Gambar 2. 6 Karakteristik Respon Waktu pada Sistem Orde 2

Adapun spesifikasi dari sistem Orde 2 terdiri dari:

 1. Waktu tunda (*delay time*)

Waktu tunda merupakan waktu yang diperlukan respon agar mencapai setengah harga akhir yang pertama kali.

 2. Waktu naik (*rise time*)

Waktu naik merupakan waktu yang diperlukan respon agar respon naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95% ataupun 0% sampai 100% dari harga akhir.

 3. Waktu puncak (*peak time*)

Waktu puncak merupakan waktu yang diperlukan dari respon supaya mampu mencapai puncak pertama.

 4. Waktu tunak/penetapan (*settling time*)

Waktu tunak atau yang sering disebut *settling time* merupakan waktu yang diperlukan kurva respon agar dapat mencapai serta menetapkan dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya dengan persentase mutlak dari harga akhir (5% atau 2%)

5. Overshoot maksimum

Overshoot maksimum merupakan harga puncak maksimum dari kurva respon yang mulai diukur dari satu. Jika harga keadaan tunak dari respon hasilnya tidak satu, maka dapat menggunakan persen maksimum. Parameter ini dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\% \text{overshoot maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \quad (2.11)$$

Transformasi Bilinear dan Theorema Shannon

Perancangan pengendali MPC memakai model *state space* sebagai pemprediksi spon kedepan dan pada pada plant yang digunakan yakni menggunakan *transfer function* dua, untuk peralihan nilai *transfer function plant* ke persamaan transformasi Z menggunakan transformasi bilinier berikut :

$$H(z) = \frac{2}{Ts} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (2.12)$$

Dengan penentuan nilai *Ts* (*time sampling*) pada transformasi bilinier harus mengikuti ketentuan dari *theorema Shannon* berikut:

$$\frac{tr}{10} \leq Ts \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } Ts < td \quad (2.13)$$

Nilai *Ts* ini selanjutnya digunakan untuk mencari bentuk *state space* diskrit sebagai perancangan *Model Predictive Control* (MPC)

Model Predictive Control (MPC)

Model Predictive Control (MPC) bermula pada akhir tahun tujuh puluhan dan telah berkembang pesat sejak saat itu. Istilah dari kendali MPC tidak hanya menuju kepada strategi pengendalian tertentu melainkan berbagai dari metode pengendalian yang secara eksplisit menggunakan model proses untuk mendapatkan sinyal kontrol dengan meminimalkan fungsi objektif. Metode desain ini mengarah ke pengontrolan yang secara praktis mempunyai struktur yang sama dan menghadirkan derajat kebebasan yang memadai. Adapun ide yang mendasari kendali MPC adalah[20] :

1. Penggunaan model secara eksplisit untuk memprediksi keluaran proses yang akan datang dalam rentang waktu tertentu (*horizon*).
2. Perhitungan rangkaian sinyal kendali dengan meminimalisir suatu fungsi kriteria.
3. Strategi surut, pada setiap waktu pencuplikan *horizon* dipindahkan ke waktu selanjutnya yang melibatkan penggunaan sinyal kendali pertama sebagai pengendalian proses, kedua tata cara di atas diulang menggunakan informasi terakhir[21].

Pengendali MPC memiliki keunggulan dibandingkan pengendali lainnya, diantara nya sebagai berikut[21] :

1. Memiliki konsep yang sangat inisiatif dan penalaran yang mudah

2.4 Hak Cipta Bilinier Undang-Undang

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

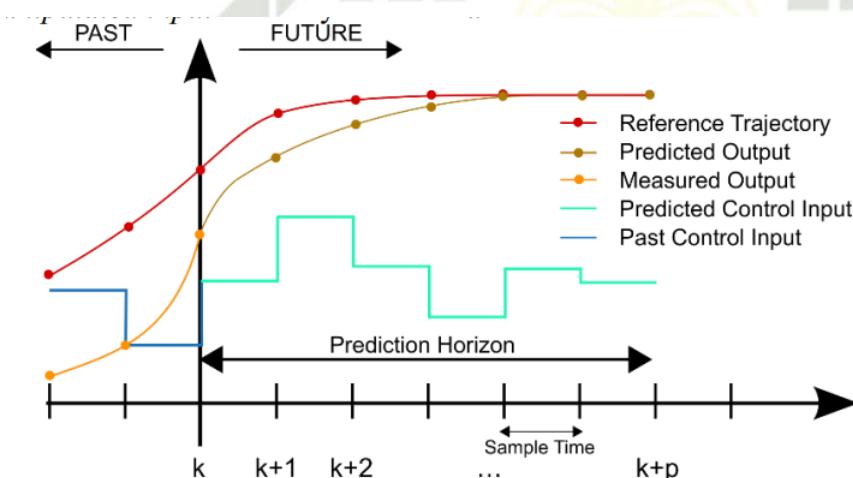
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2.5 Tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

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

- 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.
- Bisa digunakan sebagai pengendali proses yang beragam, dari proses yang tingkatnya sederhana, hingga proses yang tingkatnya kompleks, selain itu waktu tunda yang didapatkan yakni besar.
- Mampu mengatasi sistem *multivariable*.
- Memiliki kompensasi pada waktu tunda.
- Memiliki kemampuan yang mampu mengkompensasi gangguan yang terukur.
- Dapat di implementasikan dengan mudah.
- Mampu menghitung batasan atau *constraint* saat merancang pengendali.
- Kendali MPC sangat berguna jika sinyal referensi untuk masa yang akan datang diketahui.

Selain kelebihan yang dimiliki dari pengendali MPC, kendali MPC juga mempunyai kekurangan yakni masalah penurunan aturan sinyal yang lumayan kompleks serta keperluan model proses yang baik[21].



Gambar 2. 7 Konsep dasar Kendali MPC [22]

Setelah mengetahui kelebihan serta kekurangan pada pengendali MPC, kendali MPC memiliki konsep dasar yang dimana nilai yang akan datang dari variabel *output* yang diprediksi memakai model proses yang dinamik serta menggunakan pengukuran saat ini. Perhitungan pada pengukuran didasarkan dari sebuah prediksi yang akan datang saat ini[23].

5.1 Model State Space

Perancangan Sistem MPC didapatkan dari model matematika *plant*. Model *Transfer Function* yang digunakan dirubah ke dalam bentuk *state space*, perubahan ini dibutuhkan guna untuk memprediksi respon ke depan yang diwakilkan oleh variabel saat *plant* diasumsikan menjadi *single input single output* (SISO) yang dijelaskan oleh[24].

$$x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \quad (2.14)$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \quad (2.15)$$

manfaat:

$u(k)$ Variabel *input*

$y(k)$ *process output*

x_m vektor variabel *state*

Sistem MPC memiliki $u(k)$ yang berperan sebagai *input* dan tidak mempengaruhi *output* $y(k)$. Dengan mengambil operasi delta pada persamaan (2.12), maka dihasilkan:

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m(x_m(k) - x_m(k-1)) + B_m u(k) - u(k-1))$$

Persamaan beda variabel *state* dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$\Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k);$$

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1)$$

Delta variabel control dapat dinotasikan sebagai berikut:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$$

Jadi didapatkan persamaan (2.12) *State space* nya adalah:

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (2.16)$$

$\Delta u(k)$ sebagai catatan input model *state space*. Selanjutnya yakni menggabungkan $\Delta x_m(k)$ ke *output* $y(k)$ dan di bentuk vektor variable *state* baru:

$$x(k) = [\Delta x_m(k)^T \ y(k)]^T$$

$$y(k+1) - y(k) = C_m(x_m(k+1) - x_m(k)) = C_m \Delta x_m(k)$$

Atau

$$y(k+1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m + C_m B_m \Delta u(k) \quad (2.17)$$

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.

5.2 Controllable Canonical Form

Kendali MPC memerlukan model fungsi alih yang baik agar kendali yang sudah dirancang bisa bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan belum bisa langsung digunakan namun diubah ke dalam bentuk *controllable Canonical Form*[25].

$$\frac{F(z)}{G(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1 z^2 + a_1 z + a_2} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (2.19)$$

$$\mathbf{y}(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.5.3 Desain Augmented Model

Persamaan (2.14) dan (2.15) digabungkan sehingga membentuk model *state space*

$$\begin{aligned} \overbrace{\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^A &= \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^B \overbrace{\begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix}}^C + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^D \Delta u(k) \\ y(k) &= \overbrace{\begin{bmatrix} 0_m & 1 \end{bmatrix}}^E \begin{bmatrix} \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

dimana $0_m = \overbrace{[0 \ 0 \ \dots \ 0]}^{n_1}$. A, B, C adalah *augmented model* yang digunakan untuk perancangan *predictive control*[24].

2.5.4 State Prediksi dan Variabel Output

Tahapan selanjutnya pada perancangan sistem MPC yakni melakukan perhitungan pada keluaran *plant* yang diprediksi dengan sinyal kontrol yang akan datang sebagai variabel yang dapat diatur. $\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots \Delta u(k_i + N_c + 1)$ merupakan notasi variabel kontrol yang akan datang.

ki diasumsikan sebagai *instant sampling*, state $x(k_i)$ menyediakan informasi *plant* saat ini, sedangkan N_c yaitu *control Horizon* yang merupakan jumlah langkah berkelanjutan yang di proyeksi oleh *Model Predictive Control* (MPC) dalam sebuah waktu *sampling*. Dengan informasi yang diberikan $x(k_i)$, variabel *output* yang nantinya

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. Prediksi untuk N_p , N_p sendiri merupakan *prediction horizon*. Variabel *output* yang akan datang yakni:

$$x(k_i + 1|k_i), x(k_i + 2|k_i), \dots, x(k_i + m|k_i), \dots, x(k_i + N_p|k_i) \quad (2.22)$$

dimana $x(k_i + m|k_i)$ merupakan variabel *state* yang diprediksi saat $k_i + m$ dengan informasi *plant* yang diberikan saat ini $x(k_i)$. Nilai N_c harus lebih kecil atau sama dengan N_p . Lalu, nilai *output* yang terprediksi (F) dan variabel yang akan datang (Φ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.21):

$$= Fx(k_i) + \Phi\Delta U \quad (2.23)$$

Dimana matriks F , Φ dan ΔU diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

2.5.5 Indeks Performansi *Model Predictive Control* (MPC)

Pada kendali MPC diperlukan sebuah proses Optimasi yang memiliki objektif kontrol sebagai meminimalkan *error* yang berasal dari selisih nilai referensi dengan nilai *output* dari *plant*. Optimasi dilakukan dengan cara mendeskripsikan sebuah nilai serta parameter indeks performansi J yang merefleksikan objektif kontrol dari sebuah kendali MPC. Dengan mengasumsikan data vektor yang berisikan informasi *setpoint* yakni:

$$R_s^T = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{N_p} r(k_i) \quad (2.26)$$

Definisikan *cost function* J yang mencerminkan objektif kontrol sebagai berikut:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad (2.27)$$

R_s didefinisikan sebagai vektor yang di dalamnya terdapat sinyal referensi atau sinyal *setpoint* yang dinotasikan pada persamaan (2.24). Pada persamaan (2.25) indeks performansi J bertujuan untuk meminimalisir *error* yang terjadi antara nilai *output* yang terprediksi dengan *setpoint* yang dimasukkan. Persamaan $\Delta U^T R \Delta U$ bertujuan merefleksikan berapa besar nilai ΔU yang didapatkan saat indeks performansi J dibuat sekecil mungkin. Matriks \bar{R} merupakan matriks diagonal yang berbentuk $r_w I_{N_c \times N_c}$ ($r_w \geq$

digunakan sebagai parameter *tuning* kendali MPC. Pada saat nilai dari $r_w = 0$, indeks performansi J akan mempunyai objektif untuk meminimalkan *error* dari $(R_s - Y)^T(R_s - Y)$ sekecil mungkin dengan mengabaikan besar nilai ΔU .

Mensubstitusikan persamaan (2.24) ke persamaan (2.25) lalu diturunkan terhadap delta U dengan nol, maka akan didapatkan sebuah persamaan solusi optimal kontrol seperti persamaan (2.26) dengan *setpoint* $r(k_i)$:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.28)$$

$$\Delta U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.29)$$

Nilai optimal parameter pada ΔU merupakan vektor yang mengandung sinyal kontrol $\Delta u(k_i + 1|k_i)$, $\Delta u(k_i + 2|k_i)$, ... $\Delta u(k_i + N_c + 1)$. Dikarenakan prinsip dari *Receding Horizon Control* (RHC), peneliti hanya mampu mengimplementasikan sampel pertama lalu mengabaikan urutan selanjutnya. Ketika periode sampling setelahnya datang, nilai yang berasal dari pengukuran yang paling baru diambil dari *state vector* $(k_i + 1)$ untuk perhitungan sinyal kontrol yang baru. Maka dari itu, sinyal kontrol dari persamaan (2.26) bisa ditulis ulang

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Atau

$$\Delta U = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \quad (2.30)$$

KMPC merupakan baris pertama dari matriks

$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (2.31)$$

Pada gain MPC, dimana K_y merupakan baris pertama dari matriks

$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (2.32)$$

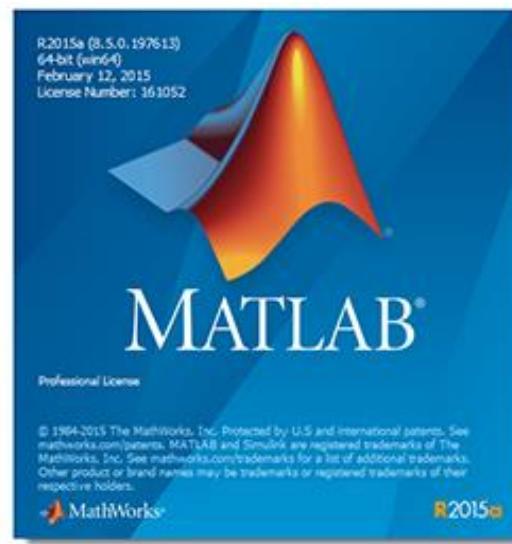
2.6 Perangkat Lunak MATLAB

Matrix Laboratory atau yang biasa disebut dengan Matlab merupakan sebuah bahasa pemrograman tingkat tinggi yang memiliki kinerja sebagai komputasi masalah teknik. Matlab juga mengintegrasikan komputasi, visualisasi dan juga pemrograman pada sebuah lingkungan tunggal.

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

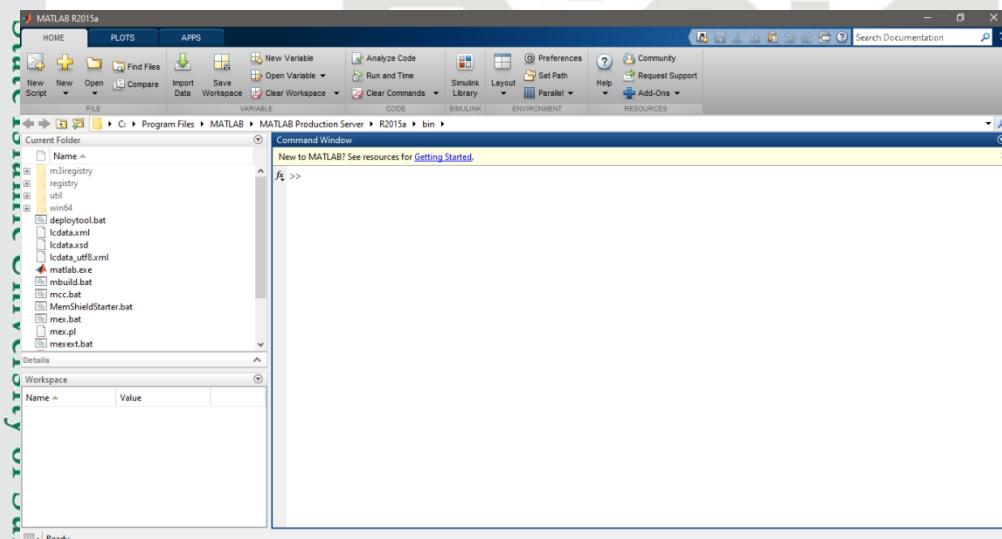
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



Gambar 2. 8 Matlab R2015a

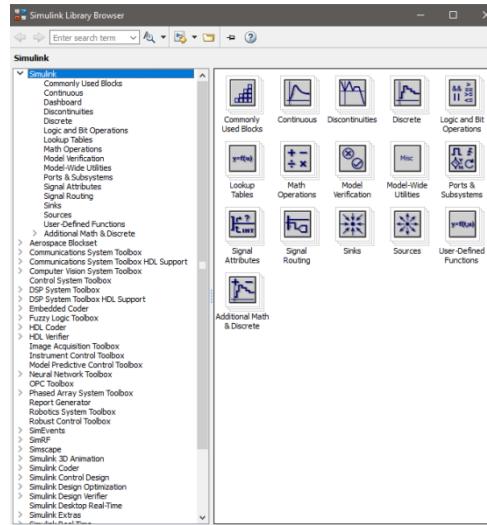
Pada penelitian ini adupun fitur yang digunakan yakni Simulink, fitur ini dapat memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Simulasi juga sangat membantu saat proses analisa dan juga perancangan sistem. *Simulink* pada Matlab mampu memperlihatkan performansi dari sistem dalam bentuk dua ataupun tiga dimensi. Pengguna dapat dengan mudah dalam melakukan desain karena terdapat blok-blok diagram yang mudah diatur sesuai dengan model matematis pada *plant* yang akan dikendalikan.



Gambar 2. 9 Tampilan Model *Simulink* pada Matlab

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



Gambar 2. 10 Kotak Dialog *Simulink Library*

2.6.1 Perancangan Pengendali MPC pada MATLAB

Dalam merancang pengendali MPC pada MATLAB adapun langkah-langkah nya sebagai berikut:

1. Merangkai pengendali MPC pada *worksheet Simulink*.
2. Memasukkan nilai *setpoint* yang diinginkan pada pengendali

Penentuan nilai *setpoint*, dimulai dengan pengujian pada nilai *setpoint* yang terdapat pada referensi terkait. Lalu dilanjutkan dengan pemberian nilai *setpoint* sesuai dengan yang diinginkan oleh peneliti.

3. Memasukkan *transfer function* pada pengendali MPC

Transfer function yang dimasukkan pada rangkaian pengendali MPC sesuai dengan yang telah didapatkan pada pemodelan matematis yang didapatkan pada persamaan (2.7)

4. Menentukan nilai TF model

Penentuan nilai TF model bertujuan untuk mendapatkan nilai keluaran respon transient yang optimal sesuai yang diinginkan. Untuk penentuan nilai TF Model ini dimulai dari mengganti nilai τ pada TF model, dimana TF model pada pengendali MPC berbentuk seperti $\frac{1}{\tau s + 1}$, τ pada pengendali MPC didefinisikan sebagai koefisien yang menjadi acuan untuk menghasilkan nilai respon transient yang baik, pengecilan ataupun pembesaran nilai τ dapat dilakukan pada saat didapatkan nya nilai respon *transient* saat sistem dijalankan secara *open loop*.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Dengan nilai yang sudah didapatkan pada saat sistem dijalankan dengan *open loop*, dapat menjadi acuan agar nantinya nilai yang diinginkan mampu mengeluarkan hasil respon pada pengendali MPC yang lebih baik dibandingkan sistem yang dikendalikan tanpa pengendali. Pengaruh dari nilai τ yang diubah-ubah pada saat nilai τ diberikan dapat dilihat pada hasilnya, dimulai dengan memberikan nilai yang mengacu dari hasil *rise time* secara open loop, saat nilai yang diberikan masih terlalu tinggi maka sistem akan berjalan lambat untuk mencapai ke dalam keadaan *steady state*, namun saat nilai yang diinginkan lebih cepat, lakukan pengecilan nilai τ secara berkala, hingga didapatkan nilai *respon transient* yang diinginkan.

5. Melakukan design pada MPC

Setelah memasukkan nilai TF Model yang diinginkan, selanjutnya melakukan design MPC agar pengendali dapat memproses sistem sehingga nantinya dapat melihat hasil keluaran yang didapatkan oleh pengendali MPC tersebut.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Flowchart Metode Penelitian

Flowchart Metode Penelitian

Flowchart Metode Penelitian

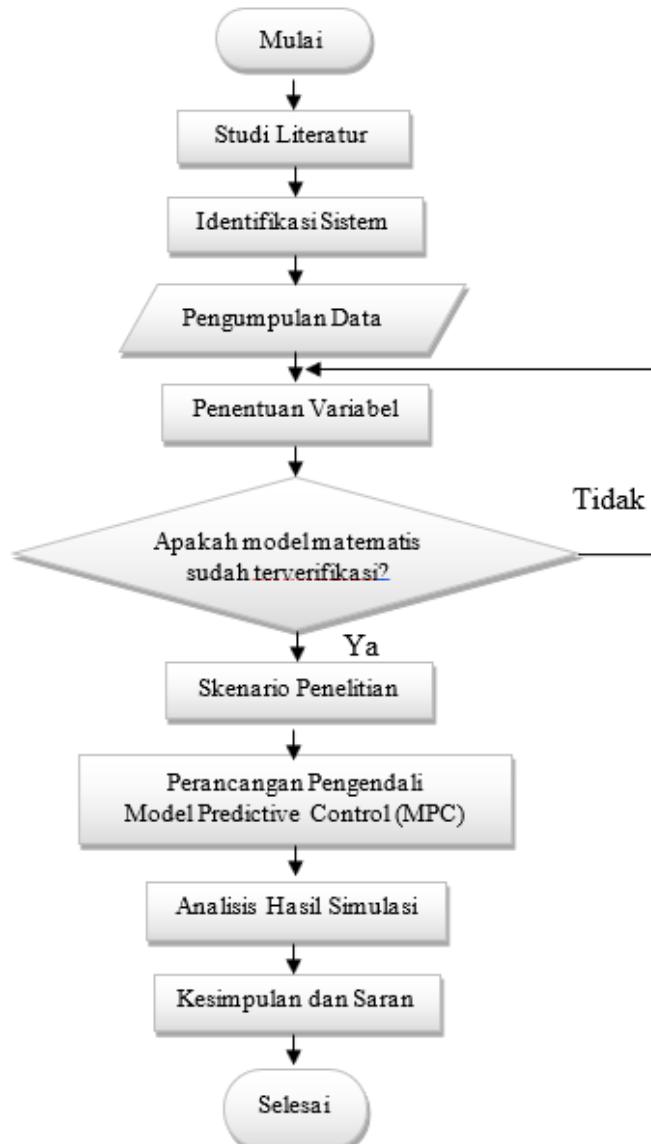
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar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

BAB III

METODE PENELITIAN

Flowchart Metode Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini memiliki beberapa tahapan ataupun langkah-langkah yang dilakukan oleh peneliti yaitu penentuan judul, perumusan masalah, tujuan yang diharapkan dari suatu penelitian, proses pemodelan matematis sebuah sistem, perancangan pengendali sampai mendapatkan hasil akhir dari penelitian Tugas Akhir ini. Adapun alur sebuah penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan pada *flowchart* berikut:



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

Tahapan Penelitian

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

3.

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 mengurangi kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Berdasarkan *flowchart* penelitian tersebut, supaya tujuan dari sebuah penelitian dapat dicapai adapun beberapa tahapan penelitian yang harus dilaksanakan ialah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan hal yang pertama kali dilakukan, yakni mempelajari penelitian terkait yang diambil melalui beberapa referensi seperti buku, *paper*, Jurnal serta sumber lainnya mengenai *Aero Pendulum* dan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC).

2. Identifikasi Sistem

Permasalahan yang akan diangkat pada penelitian Tugas Akhir ini yakni pengendalian sudut pada *Aero Pendulum* menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) untuk mendapatkan respon yang stabil serta mengurangi *error steady state*.

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan agar mampu mendapatkan karakteristik dari *plant* yang nantinya diteliti dan diketahui model matematis *Aero Pendulum* dalam bentuk *transfer function*.

4. Penetuan variabel

Setelah nilai dari masing-masing variabel yang terdapat di tahap pengumpulan data telah didapatkan, selanjutnya variabel-variabel tersebut dimasukkan ke pemodelan matematis sistem dengan persamaan *transfer function* sebagai berikut:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}}$$

5. Verifikasi pemodelan matematis

Pada tahapan ini berfungsi sebagai tempat pengujian model matematis *plant* dalam bentuk *transfer fungsi* dari *Aero Pendulum* yang telah diubah ke dalam bentuk bahasa pemrograman *Simulink Matlab*.

6. Skenario Penelitian

Pada tahap skenario penelitian ini yang dilakukan yakni rencana seperti apa yang dilakukan pada penelitian ini untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

7. Perancangan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)

Tahap ini dilakukan sebuah perancangan pengendali MPC agar respon *output* sebuah sistem mampu mengikuti nilai *setpoint* yang didapatkan pada jurnal rujukan.

8. Analisa hasil Pengujian
9. Kesimpulan

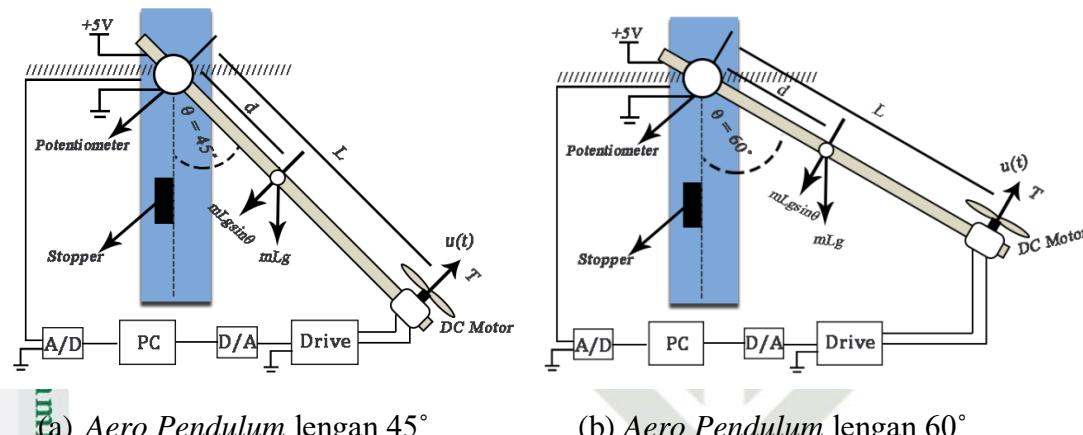
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- 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.

Pengumpulan Data

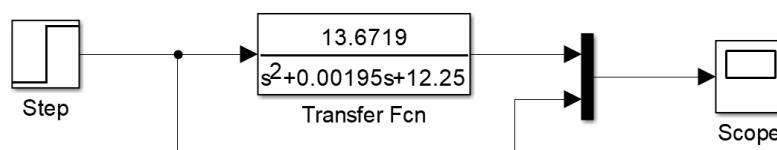
Pengumpulan Data dikerjakan dengan langkah mencari data apa saja yang dibutuhkan pada penelitian terkait, tujuannya agar dapat menentukan *setpoint* yang akan digunakan. Berdasarkan penelitian terkait telah dilakukan *review* bahwa *set point* yang digunakan yakni sudut 45° , 60° , 75° dan 90°



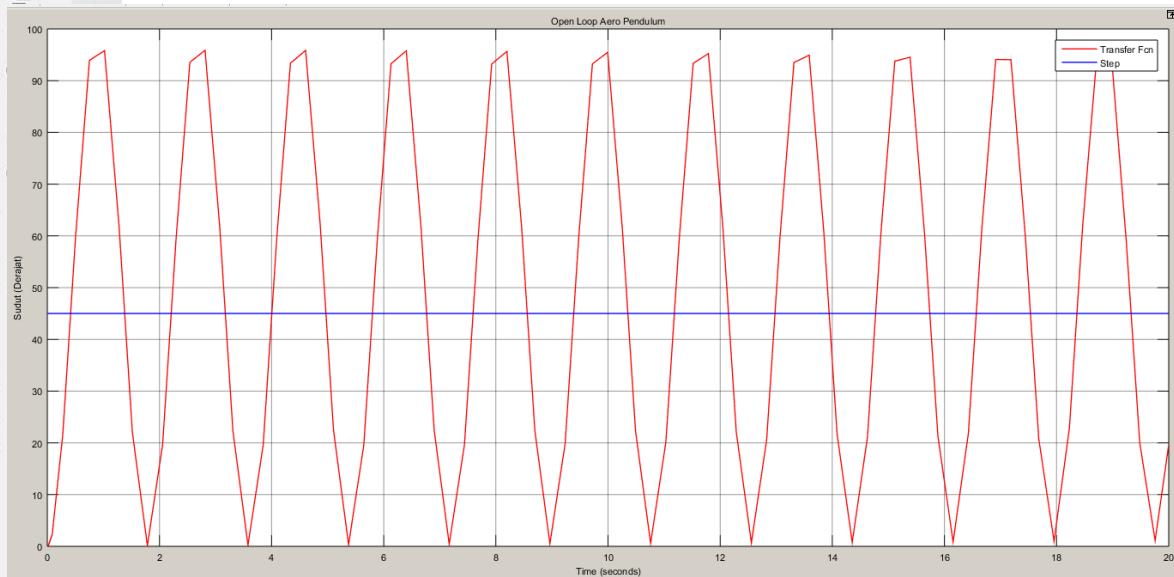
Gambar 3. 2 Tampilan *aero pendulum* dengan *setpoint* 45° dan 60°

3.4 Verifikasi Model Matematis

Pada tahapan verifikasi model matematis ini pengujian pada sistem *Aero Pendulum* yang telah dilakukan menggunakan *software Simulink Matlab R2015a*. Blok diagram dari simulasi yang telah dilakukan dengan cara menjalankan sistem secara *open loop* dan tanpa menggunakan pengendali dengan *setpoint* 45° yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari *Aero Pendulum* sebelum didesain dengan menggunakan pengendali.



Gambar 3. 3 Blok Simulink *Open Loop Aero Pendulum*



Gambar 3. 4 Respon *Open Loop* Sistem Aero Pendulum 45°

Gambar 3.4 merupakan hasil respon *Aero Pendulum* secara *open loop* dan tidak menggunakan pengendali. Dapat dilihat bahwa hasil keluaran yang dihasilkan sistem masih menunjukkan hasil yang tidak stabil dalam mencapai *setpoint*, didapatkan osilasi dan juga *overshoot* yang cukup besar. Sehingga sesuai dengan pengujian simulasi yang tidak menggunakan pengendali, maka *Aero Pendulum* perlu dikendali dengan pengendali yang mampu mengurangi osilasi dan juga dapat menstabilkan sistem.

3.5 Skenario Penelitian

Penelitian ini menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) yang diharapkan mampu mengendalikan *Aero Pendulum* dengan memasukkan data-data yang didapatkan dari penelitian terkait dengan beberapa skenario (minimal 3 skenario). Pada penelitian ini juga dilakukan beberapa pengujian dengan melihat hasil dari simulasi, adapun data yang diambil yaitu respon *transient* dari pengujian, adapun skenario yang dilakukan yaitu:

1. Pengujian simulasi secara open loop dengan setpoint 45°, 60°, 75° dan 90° tanpa menggunakan pengendali (*open loop*).

- 356
- © Hak Cipta Universitas Sultan Syarif Kasim Riau
2. Pengujian simulasi dengan menggunakan pengendali MPC dengan setpoint yang diberikan yakni 45° , 60° , 75° dan 90° .
 3. Pengujian keandalan pengendali saat *Aero Pendulum* diberikan gangguan 6%, 10%.

3.6 Perancangan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)

Untuk dapat mengontrol sudut pada *Aero Pendulum* agar sudut mampu menyinkronkan masukan yang diinginkan, perlu terlebih dahulu melakukan perancangan desain pengendali *Model Predictive Control* (MPC). Setelah didapatkan *transfer function* dari sistem, langkah selanjutnya yakni merancang pengendali pada sistem. Tahapan ini bertujuan untuk mengetahui perancangan fungsi alih pada model *state space*, desain *augmented model* dan penentuan parameter pada pengendali MPC[23].

Pada perancangan pengendali MPC ini menggunakan empat buah sudut yakni 45° , 60° , 75° dan 90° . Untuk mengetahui hasil respon yang diinginkan, diperlukan pengujian per setiap sudut untuk mengetahui respon transient keluaran aero pendulum.

3.6.1 Perancangan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) 45°

1. Menentukan Respon *Transient* Sistem Berdasarkan Hasil *Open Loop*

Plant yang digunakan untuk penelitian ini yakni *Aero Pendulum*. Adapun langkah pertama yang perlu dilakukan yakni mengetahui persamaan matematis dari sebuah *plant* lalu diubah ke dalam bentuk persamaan diskrit. Untuk penentuan nilai pertama kali, terlebih dahulu harus melakukan penentuan nilai *ts* (*time sampling*) dengan rumus sebagai berikut[24].

$$\frac{tr}{10} \leq ts \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } ts < td$$

Selanjutnya menentukan nilai *tr* (*rise time*) dan *td* (*time delay*) yang didapat dari data *open loop* yang menggunakan cara membesarkan layar *scope* agar dapat memenuhi kondisi kedua di dalam menentukan nilai *ts* dimana:

a. Nilai *rise time* (*tr*) (5%-95%) *set point*

$$\begin{aligned} y_{5\%} &= 5\% \text{ dari } \textit{steady state} \text{ respon } \textit{output} \\ &= 5\% \times 45^\circ \\ &= 2.25^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 5% dan pada *set point* adalah 0.0850 detik

356
Hak Cipta Universitas Sultan Syarif Kasim Riau
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.

$$\begin{aligned}
 y_{95\%} &= 95\% \text{ dari steady state respon output} \\
 &= 95\% \times 45^\circ \\
 &= 42.75^\circ
 \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 95% dari pada *set point* adalah 0.4025 detik

$$\begin{aligned}
 \text{Maka Nilai } tr (95\% - 5\%) &= 0.4025 \text{ detik} - 0.0850 \text{ detik} \\
 &= 0.3175 \text{ detik}
 \end{aligned}$$

b. Nilai *delay time* (td)

$$\begin{aligned}
 y_{50\%} &= 50\% \text{ dari steady state respon output} \\
 &= 50\% \times 45^\circ \\
 &= 22.5^\circ
 \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari pada *set point* adalah 0.2809 detik.

Setelah didapatkan nya nilai dari td (*time delay*) yang berasal dari data *open loop* dengan menggunakan cara pembesaran layar pada *scope* sebagai syarat memenuhi kondisi kedua ketika menentukan nilai ts.

Dimana nilai ts untuk transformasi *bilinear*:

$$\begin{aligned}
 \frac{tr}{10} \leq ts &\leq \frac{tr}{2} \\
 \frac{0.3175}{10} \leq ts &\leq \frac{0.3175}{2}
 \end{aligned}$$

0.03175 detik \leq ts \leq 0.15875 detik dan ts $<$ 0.2809 detik.

Maka nilai ts (*time sampling*) yang akan digunakan pada transformasi *bilinear* mengacu dari ketentuan persamaan (2.11) maka dipilih nilai ts yang akan digunakan yakni 0.1 detik.

2. Perubahan Transfer Function ke bentuk Model State Space

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), fungsi alih yang terdapat pada persamaan (2.7) perlu dirubah ke dalam bentuk *state space* seperti berikut[24]:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25}$$

$$13.6719 V(s) = s^2 \theta(s) + 0.00195s\theta(s) + 12.25\theta(s)$$

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang.

© Hak Cipta Universitas Islam Negeri Syarif Kasim Riau

$$3.6719 V = \frac{d^2\theta}{d\theta^2} + 0.001955 \frac{d\theta}{dt} + 12,25\theta$$

$$3.6719 V = \ddot{\theta} + 0.001955\dot{\theta} + 12,25\theta$$

Definisikan:

$$= \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2$$

$$= \theta \rightarrow x_2 = \ddot{\theta} = -0.001955\dot{\theta} - 12,25\theta + 13.6719 V$$

$$= -0.001955x_2 - 12,25x_2 + 13.6719 V$$

$$= x_2$$

$$= \ddot{x}_2 = -0.001955x_2 - 12,25x_2 + 13.6719 V$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V$$

$$[y] = [0 \ 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Solusi persamaan keadaan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \quad (3.1)$$

Persamaan keluaran:

$$y = Cx + Du$$

$$[y] = [0 \ 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Persamaan keadaan (3.1) dan juga persamaan keluaran (3.2) diatas dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 13.67 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$D = [0] \quad (3.6)$$

Pengubahan dalam bentuk *state space* diskrit, setelah didapatkan nya hasil dari *state space*. Adapun yang harus dilakukan selanjutnya adalah memasukkan persamaan (3.3) dan (3.5) ke persamaan (2.10). dimana nilai Y(z) merupakan nilai dari matriks C dan X(z) adalah nilai dari matriks A sehingga[24]:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955 \left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

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

$$\begin{aligned}
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{13,6719}{20 \times \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955 \left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25} \\
 &= \frac{13,6719}{400 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,0391 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25} \\
 &= \frac{13,6719(1+z^{-1})^2}{400(1-z^{-1})^2 + 0,0391(1-z^{-1})(1+z^{-1}) + 12,25(1+z^{-1})^2} \\
 &= \frac{13,6719(1+2z^{-1}+z^{-2})}{400(1+2z^{-1}+z^{-2}) + 0,0391(1-z^{-2}) + 12,25(1+2z^{-1}+z^{-2})} \\
 &= \frac{13,6719+27,3438z^{-1}+13,6719z^{-2}}{400-800z^{-1}+400z^{-2}+0,0391-0,0391z^{-2}+12,25+24,50z^{-1}+12,25z^{-2}} \\
 &= \frac{13,6719 + 27,3438z^{-1} + 13,6719z^{-2}}{412.2891 - 775.5z^{-1} + 412.2109z^{-2}}
 \end{aligned}$$

3. Controllable Canonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kendali yang telah dirancang mampu bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak dapat langsung dipergunakan namun dirubah terlebih dahulu ke dalam bentuk *controllable canonical form*[25]. Setelah didapatkan nilai dari *state space* diskrit, langkah selanjutnya melakukan pembagian penyebut dengan nilai 412.2891 untuk mendapatkan nilai 1 supaya dapat mengikuti bentuk *controllable Canonical form* yang berdasarkan persamaan (2.17).

$$\begin{aligned}
 \frac{Y(z)}{U(z)} &= \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1 z^2 + a_1 z + a_2} \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{13.6719+27.3438z^{-1}+13.6719z^{-2}}{412.2891-775.5z^{-1}+412.2109z^{-2}} \div 412.2891 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316+0.06632z^{-1}+0.03316z^{-2}}{1-1.88096z^{-1}+0.99981z^{-2}} \times z^2 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316z^2+0.06632z+0.03316}{z^2-1.88096z+0.99981}
 \end{aligned}$$

dimana:

$$a_1 = -1.88096$$

$$a_2 = 0.99981$$

$$b_0 = 0.03316$$

$$b_1 = 0.06632$$

$$b_2 = 0.03316$$

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

Berikut merupakan bentuk gambaran *controllable canonical form* yang mana bentuk *state space* pada orde dua ini mempunyai bentuk seperti dibawah ini sesuai dengan persamaan (2.17) lalu didapatkanlah persamaan (3.7) dan (3.8)[25]

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.7)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka model *state space* yang didapatkan adalah sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.9)$$

$$y(k) = [0.0000064 \quad 0.12869] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

4. Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah suatu langkah yang dilakukan untuk mengubah *state space* ke dalam *augmented model* dari model yang telah di diskritisasi. Berdasarkan persamaan (2.19) substitusi kan hasil yang telah didapat dari persamaan (3.9) dan (3.10) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix}}_{A_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{B_m} u(k) \quad (3.11)$$

$$y(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.0000064 & 1.88096 \end{bmatrix}}_{C_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Berdasarkan persamaan (3.11) dan persamaan (3.12), selanjutnya bentuk *state space* diubah ke dalam bentuk *augmented model*

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}_A \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}_B \Delta u(k) \quad (3.13)$$

$$y(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_m} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Adapun bentuk *augmented model* dari *Aero Pendulum* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & & \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,99981 & 1,88096 & 0 \\ -0,188 & 0,354 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 1 \\ 0,188 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.15)$$

$$Hak(C_{\Delta x_m(k+1)}) = \begin{bmatrix} C_m \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Matriks A, B, C merupakan bentuk *augmented model* digunakan dilangkah selanjutnya dalam perancangan kendali MPC.

5. State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Langkah selanjutnya yakni menentukan parameter dari kendali MPC. Parameter yang dimaksud yakni *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c) serta *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). Untuk perancangan kendali MPC pada sistem *Aero Pendulum* diambil satu sampel yang akan menggunakan parameter *prediction horizon* sebesar 5 langkah, *control horizon* sebesar 1 langkah dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan persamaan (3.15) dan (3.16), nilai keluaran terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang akan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) sehingga persamaan yang didapatkan[24]:

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.17)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Setelah nilai parameter kendali telah ditentukan, maka dapat ditentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Masukkan persamaan (3.14) nilai matriks *augmented model* ke persamaan sehingga hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\text{Hak Cipta milik UIN Suska Riau} \\ \text{Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang} \\ \text{2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:} \\ \text{a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.} \\ \text{b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.} \\ \text{2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.} \\ \text{Indeks Performansi Model Predictive Control (MPC)} \\ \text{Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar keluaran yang dihasilkan dari suatu sistem mempunyai nilai sedekat mungkin dengan setpoint. jika nilai F dan \Phi telah didapatkan, parameter selanjutnya yakni gain dari Model Predictive Control (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC}, yang perlu dilakukan yakni mencari nilai dari matriks Y yang didapatkan dari persamaan (2.29) sebagai berikut[24]:} \\ \mathbf{Y} = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.20)$$

Indeks Performansi *Model Predictive Control* (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar keluaran yang dihasilkan dari suatu sistem mempunyai nilai sedekat mungkin dengan *setpoint*. jika nilai F dan Φ telah didapatkan, parameter selanjutnya yakni gain dari *Model Predictive Control* (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC} , yang perlu dilakukan yakni mencari nilai dari matriks Y yang didapatkan dari persamaan (2.29) sebagai berikut[24]:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.21)$$

Setelah melakukan perhitungan matriks F dan Φ didapatkan hasil:

$$y(k) = [-0.7913 \quad 1.0797 \quad 0.5849] \quad (3.22)$$

Nilai gain K_{MPC} adalah baris dari matriks Y. Oleh Karena itu, nilai gain K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = [-0.7913 \quad 1.0797 \quad 0.5849] \quad (3.23)$$

Setelah gain K_{MPC} telah didapatkan, langkah selanjutnya yakni gain K_y yang didapatkan dari persamaan (2.30). Gain bisa dihitung dari nilai matriks Z seperti berikut:

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.24)$$

Dari hasil perhitungan sesuai persamaan diatas, didapatkan hasil:

$$Z = [0.9177]$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z, sehingga nilai K_y adalah:

$$K_y = 0.9177$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.26)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U = 0.0038]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.27)

$$\Delta U(k_i) = \underbrace{[1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]}_{N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah melakukan perhitungan dari $\Delta U(k_i)$ didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U(k_i) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0][0.0038]$$

$$= 0.0038$$

6.2

Perancangan Pengendali Model Predictive Control (MPC) 60°

Menentukan Respon *Transient* Sistem Berdasarkan Hasil *Open Loop*

Langkah pertama yang perlu dilakukan yakni mengetahui persamaan matematis dari sebuah *plant* lalu diubah ke dalam bentuk persamaan diskrit. Untuk penentuan nilai pertama kali, terlebih dahulu harus melakukan penentuan nilai *ts* (*time sampling*) dengan rumus sebagai berikut[24].

$$\forall t \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } ts < td$$

Selanjutnya menentukan nilai *tr* (*rise time*) dan *td* (*time delay*) yang didapat dari data *open loop* yang menggunakan cara membesarkan layar *scope* agar dapat memenuhi kondisi kedua di dalam menentukan nilai *ts* dimana:

- Nilai *rise time* (*tr*) (5%-95%) *set point*

$$\begin{aligned} y_{5\%} &= 5\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 5\% \times 60^\circ \\ &= 3^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari pada *set point* adalah 0.0760 detik

$$\begin{aligned} y_{95\%} &= 95\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 95\% \times 60^\circ \\ &= 57^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 95% dari pada *set point* adalah 0.4012 detik

$$\begin{aligned} \text{Maka Nilai } tr (95\% - 5\%) &= 0.4012 \text{ detik} - 0.0760 \text{ detik} \\ &= 0.3252 \text{ detik} \end{aligned}$$

- Nilai *delay time* (*td*)

$$\begin{aligned} y_{50\%} &= 50\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 50\% \times 60^\circ \\ &= 30^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari pada *set point* adalah 0.2763 detik.

Setelah didapatkan nilai dari td (*time delay*) yang berasal dari data *open loop* dengan menggunakan cara pembesaran layar pada *scope* sebagai syarat memenuhi kondisi dua ketika menentukan nilai ts .

Dimana nilai ts untuk transformasi *bilinear*:

$$ts \leq \frac{tr}{2}$$

0.03252 detik \leq ts \leq 0.1626 detik dan ts \leq 0.2763 detik

Maka nilai ts (*time sampling*) yang akan digunakan pada transformasi *bilinear* mengacu dari ketentuan persamaan (2.11) maka dipilih nilai ts yang akan digunakan yakni 0.1 detik.

2. Perubahan Transfer Function ke bentuk Model State Space

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), fungsi alih yang terdapat pada persamaan (2.7) perlu dirubah ke dalam bentuk *state space* seperti berikut:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25}$$

$$13.6719 V(s) = s^2\theta(s) + 0.001955s\theta(s) + 12.25\theta(s)$$

$$13.6719 V = \frac{d^2\theta}{d\theta^2} + 0.001955 \frac{d\theta}{dt} + 12,256$$

$$13.6719 V = \ddot{\theta} + 0.001955\dot{\theta} + 12.25\theta$$

Di Definisikan:

$$x_1 = \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2$$

$$x_1 = \theta \rightarrow x_2 = \ddot{\theta} = -0.001955\dot{\theta} - 12.25\theta + 13.6719V$$

$$= 0.001955x_2 - 12.25x_3 + 13.6719V$$

$x^* = x_1$

$$x_1 = x_2 = -0.001955x_3 - 13.25x_4 + 13.6719x_5$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12.25 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V$$

$$[y] = [0 \quad 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Solusi persamaan kuadrat:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12.25 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \quad (3.25)$$

Persamaan keluaran:

$$H = Cx + Du$$

$$H = [0 \ 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

bersamaan keadaan (3.25) dan juga persamaan keluaran (3.26) diatas dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$C = 13.67 \quad (3.29)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Pengubahan dalam bentuk *state space* diskrit, setelah didapatkan nya hasil dari *state space*. Adapun yang harus dilakukan selanjutnya adalah memasukkan persamaan (3.27) dan (3.29) ke persamaan (2.10). dimana nilai Y(z) merupakan nilai dari matriks C dan X(z) adalah nilai dari matriks A sehingga:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{400\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,0391\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719(1+z^{-1})^2}{400(1-z^{-1})^2 + 0,0391(1-z^{-1})(1+z^{-1}) + 12,25(1+z^{-1})^2}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719(1+2z^{-1}+z^{-2})}{400(1+2z^{-1}+z^{-2}) + 0,0391(1-z^{-2}) + 12,25(1+2z^{-1}+z^{-2})}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719+27,3438z^{-1}+13,6719z^{-2}}{400-800z^{-1}+400z^{-2}+0,0391-0,0391z^{-2}+12,25+24,50z^{-1}+12,25z^{-2}}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719+27,3438z^{-1}+13,6719z^{-2}}{412,2891-775,5z^{-1}+412,2109z^{-2}}$$

3. Controllable Canonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kendali yang telah dirancang mampu bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak dapat langsung dipergunakan namun dirubah terlebih dahulu

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

Ke dalam bentuk *controllable canonical form*[25]. Setelah didapatkan nilai dari *state space* diskrit, langkah selanjutnya melakukan pembagian penyebut dengan nilai 412.2891 untuk mendapatkan nilai 1 supaya dapat mengikuti bentuk *controllable Canonical form* yang berdasarkan persamaan (2.17).

$$\begin{aligned}
 \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1 z^2 + a_1 z + a_2} &= \frac{13.6719 + 27.3438 z^{-1} + 13.6719 z^{-2}}{412.2891 - 775.5 z^{-1} + 412.2109 z^{-2}} \div 412.2891 \\
 \frac{0.03316 + 0.06632 z^{-1} + 0.03316 z^{-2}}{1 - 1.88096 z^{-1} + 0.99981 z^{-2}} &\times z^2 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316 z^2 + 0.06632 z + 0.03316}{z^2 - 1.88096 z + 0.99981}
 \end{aligned}$$

dimana:

$$a_1 = -1.88096$$

$$a_2 = 0.99981$$

$$b_0 = 0.03316$$

$$b_1 = 0.06632$$

$$b_2 = 0.03316$$

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.

Berikut merupakan bentuk gambaran *controllable canonical form* yang mana bentuk *state space* pada orde dua ini mempunyai bentuk seperti dibawah ini sesuai dengan persamaan (2.17) lalu didapatkan lah persamaan (3.31) dan (3.32)[25]

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.31)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka model *state space* yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.33)$$

$$y(k) = [0.0000064 \quad 0.12869] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

4. Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah suatu langkah yang dilakukan untuk mengubah *state space* ke dalam *augmented model* dari model yang telah di diskritisasi. Berdasarkan

persamaan (2.19) substitusi kan hasil yang telah didapat dari persamaan (3.33) dan (3.34) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ \begin{matrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} u(k) \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_m \\ \begin{matrix} 0.0000064 & 1.88096 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

berdasarkan persamaan (3.35) dan persamaan (3.36), selanjutnya bentuk *state space* diubah ke dalam bentuk *augmented model*

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_m^T \\ \begin{matrix} A_m & 0_m \\ C_m A_m & 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \begin{matrix} B_m \\ C_m B_m \end{matrix} \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.37)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C_m \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Adapun bentuk *augmented model* dari *Aero Pendulum* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \begin{matrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{matrix} & \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m \\ y(k) \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0.188 \end{matrix} \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.39)$$

$$(k) = \begin{bmatrix} C_m \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Matriks A, B, C merupakan bentuk *augmented model* digunakan dilangkah selanjutnya dalam perancangan kendali MPC.

5. State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Langkah selanjutnya yakni menentukan parameter dari kendali MPC. Parameter yang dimaksud yakni *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c) serta *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). Untuk perancangan kendali MPC pada sistem *Aero Pendulum* diambil satu sampel yang akan menggunakan parameter *prediction horizon* sebesar 5 langkah, *control horizon* sebesar 1 langkah dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan persamaan (3.39) dan (3.40), nilai keluaran terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang akan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) sehingga persamaan yang didapatkan[24]:

$$= Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.41)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Setelah nilai parameter kendali telah ditentukan, maka dapat ditentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Masukkan persamaan (3.40) nilai matriks *augmented model* ke persamaan sehingga hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} -0.188 & 0.354 & 1 \\ -0.542 & 0.832 & 1 \\ -0.102 & 1.377 & 1 \\ -1.565 & 1.924 & 1 \\ -2.112 & 2.408 & 1 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0.188 \\ 0.542 \\ 1.02 \\ 1.565 \\ 2.112 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

6. Indeks Performansi *Model Predictive Control* (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar keluaran yang dihasilkan dari suatu sistem mempunyai nilai sedekat mungkin dengan *setpoint*. jika nilai F dan Φ telah didapatkan, parameter selanjutnya yakni gain dari *Model Predictive Control* (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC} , yang perlu dilakukan yakni mencari nilai dari matriks Y yang didapatkan dari persamaan (2.29) sebagai berikut[24]:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.45)$$

Setelah melakukan perhitungan matriks F dan Φ didapatkan hasil:

$$y(k) = \begin{bmatrix} -0.7913 & 1.0797 & 0.5849 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Nilai gain K_{MPC} adalah baris dari matriks Y. Oleh Karena itu, nilai gain K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = \begin{bmatrix} -0.7913 & 1.0797 & 0.5849 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Setelah gain K_{MPC} telah didapatkan, langkah selanjutnya yakni gain K_y yang didapatkan dari persamaan (2.30). Gain bisa dihitung dari nilai matriks Z seperti berikut:

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.48)$$

Dari hasil perhitungan sesuai persamaan diatas, didapatkan hasil:

$$= [0.9177]$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z , sehingga nilai K_y adalah:

$$K_y = [0.9177]$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.26)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U = [0.0038]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.27)

$$\Delta U(k_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah melakukan perhitungan dari $\Delta U(k_i)$ didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta U(k_i) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0][0.0038] \\ &= 0.0038 \end{aligned}$$

3.6.3 Perancangan Pengendali Model Predictive Control (MPC) 75°

1. Menentukan Respon Transient Sistem Berdasarkan Hasil Open Loop

Langkah pertama yang perlu dilakukan yakni mengetahui persamaan matematis dari sebuah *plant* lalu diubah ke dalam bentuk persamaan diskrit. Untuk penentuan nilai pertama kali, terlebih dahulu harus melakukan penentuan nilai *ts* (*time sampling*) dengan rumus sebagai berikut[24].

$$\frac{tr}{10} \leq \frac{td}{2} \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } ts < td$$

Seanjutnya menentukan nilai *tr* (*rise time*) dan *td* (*time delay*) yang didapat dari data *open loop* yang menggunakan cara membesarkan layar *scope* agar dapat memenuhi kondisi kedua di dalam menentukan nilai *ts* dimana:

a. Nilai *rise time* (*tr*) (5%-95%) *set point*

$$\begin{aligned} y_{5\%} &= 5\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 5\% \times 75^\circ \\ &= 3.75^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari pada *set point* adalah 0.0700 detik

$$\begin{aligned} y_{95\%} &= 95\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 95\% \times 75^\circ \end{aligned}$$

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.

$$\theta = 71.25^\circ$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari pada *set point* adalah 0.4020 detik

$$\text{Maka Nilai } tr (95\% - 5\%) = 0.4020 \text{ detik} - 0.0700 \text{ detik} \\ = 0.332 \text{ detik}$$

Nilai *delay time* (td)

$$y_{50\%} = 50\% \text{ dari steady state respon output} \\ = 50\% \times 75^\circ \\ = 37.5^\circ$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari pada *set point* adalah 0.2734 detik.

Setelah didapatkan nya nilai dari td (*time delay*) yang berasal dari data *open loop* dengan menggunakan cara pembesaran layar pada *scope* sebagai syarat memenuhi kondisi kedua ketika menentukan nilai ts.

Dimana nilai ts untuk transformasi *bilinear*:

$$\frac{tr}{10} \leq ts \leq \frac{tr}{2} \\ \frac{0.332}{10} \leq ts \leq \frac{0.332}{2} \\ 0.0332 \text{ detik} \leq ts \leq 0.166 \text{ detik} \text{ dan } ts < 0.2734 \text{ detik.}$$

Maka nilai ts (*time sampling*) yang akan digunakan pada transformasi *bilinear* mengacu dari ketentuan persamaan (2.11) maka dipilih nilai ts yang akan digunakan yakni 0.1 detik.

2. Perubahan Transfer Function ke bentuk Model State Space

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), fungsi alih yang terdapat pada persamaan (2.7) perlu dirubah ke dalam bentuk *state space* seperti berikut:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25}$$

$$13.6719 V(s) = s^2 \theta(s) + 0.001955s\theta(s) + 12.25\theta(s)$$

$$13.6719 V = \frac{d^2\theta}{dt^2} + 0.001955 \frac{d\theta}{dt} + 12.25\theta$$

$$13.6719 V = \ddot{\theta} + 0.001955\dot{\theta} + 12.25\theta$$

Hai Definisikan:

$$\begin{aligned}
 &= \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2 \\
 &= \theta \rightarrow x_2 = \ddot{\theta} = -0.001955\dot{\theta} - 12,25\theta + 13.6719 V \\
 &\quad = -0.001955x_2 - 12,25x_2 + 13.6719 V
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \\
 &= \ddot{y} = -0.001955x_2 - 12,25x_2 + 13.6719 V \\
 &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \\
 &[y] = \begin{bmatrix} 0 & 13.67 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Solusi persamaan keadaan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \quad (3.49)$$

Persamaan keluaran:

$$y = Cx + Du$$

$$[y] = [0 \quad 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Persamaan keadaan (3.49) dan juga persamaan keluaran (3.50) diatas dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$C = [0 \quad 13.67] \quad (3.53)$$

$$D = [0] \quad (3.54)$$

Pengubahan dalam bentuk *state space* diskrit, setelah didapatkan nya hasil dari *state space*. Adapun yang harus dilakukan selanjutnya adalah memasukkan persamaan (3.51) dan (3.53) ke persamaan (2.10). dimana nilai Y(z) merupakan nilai dari matriks C dan X(z) adalah nilai dari matriks A sehingga[24]:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

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

$$\begin{aligned}
 \frac{H(z)}{X(z)} &= \frac{13,6719}{400\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,0391\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25} \\
 &= \frac{13,6719(1+z^{-1})^2}{400(1-z^{-1})^2 + 0,0391(1-z^{-1})(1+z^{-1}) + 12,25(1+z^{-1})^2} \\
 &= \frac{13,6719(1+2z^{-1}+z^{-2})}{400(1+2z^{-1}+z^{-2}) + 0,0391(1-z^{-2}) + 12,25(1+2z^{-1}+z^{-2})} \\
 &= \frac{13,6719 + 27,3438z^{-1} + 13,6719z^{-2}}{400-800z^{-1}+400z^{-2}+0,0391-0,0391z^{-2}+12,25+24,50z^{-1}+12,25z^{-2}} \\
 &= \frac{13,6719 + 27,3438z^{-1} + 13,6719z^{-2}}{412.2891 - 775.5z^{-1} + 412.2109z^{-2}}
 \end{aligned}$$

3. Controllable Canonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kendali yang telah dirancang mampu bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak dapat langsung dipergunakan namun dirubah terlebih dahulu ke dalam bentuk *controllable canonical form*[25]. Setelah didapatkan nilai dari *state space* diskrit, langkah selanjutnya melakukan pembagian penyebut dengan nilai 412.2891 untuk mendapatkan nilai 1 supaya dapat mengikuti bentuk *controllable Canonical form* yang berdasarkan persamaan (2.17).

$$\begin{aligned}
 \frac{Y(z)}{U(z)} &= \frac{b_0z^2+b_1z+b_2}{1z^2+a_1z+a_2} \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{13.6719+27.3438z^{-1}+13.6719z^{-2}}{412.2891-775.5z^{-1}+412.2109z^{-2}} \div 412.2891 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316+0.06632z^{-1}+0.03316z^{-2}}{1-1.88096z^{-1}+0.99981z^{-2}} \times z^2 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316z^2+0.06632z+0.03316}{z^2-1.88096z+0.99981}
 \end{aligned}$$

dimana

$$a_1 = -1.88096$$

$$a_2 = 0.99981$$

$$b_0 = 0.03316$$

$$b_1 = 0.06632$$

$$b_2 = 0.03316$$

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

Berikut merupakan bentuk gambaran *controllable canonical form* yang mana bentuk *state space* pada orde dua ini mempunyai bentuk seperti dibawah ini sesuai dengan persamaan (2.17) lalu didapatkanlah persamaan (3.55) dan (3.56)[25]

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.55)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

berdasarkan persamaan diatas, maka model *state space* yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.57)$$

$$y(k) = [0.0000064 \quad 0.12869] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

4. Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah suatu langkah yang dilakukan untuk mengubah *state space* ke dalam *augmented model* dari model yang telah di diskritisasi. Berdasarkan persamaan (2.19) substitusi kan hasil yang telah didapat dari persamaan (3.57) dan (3.58) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix}}^{A_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}^{B_m} u(k) \quad (3.59)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0.0000064 & 0.12869 \end{bmatrix}}^{C_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Berdasarkan persamaan (3.59) dan persamaan (3.60), selanjutnya bentuk *state space* diubah ke dalam bentuk *augmented model*

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.61)$$

$$y(k) = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{C_m} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Adapun bentuk *augmented model* dari *Aero Pendulum* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0,99981 & 1,88096 & 0 \\ -0,188 & 0,354 & 1 \end{bmatrix}}^A \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0,188 \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.63)$$

$$Y(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{C_m} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Matriks A, B, C merupakan bentuk *augmented model* digunakan dilangkah selanjutnya dalam perancangan kendali MPC.

State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Langkah selanjutnya yakni menentukan parameter dari kendali MPC. Parameter yang dimaksud yakni *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c) serta *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). Untuk perancangan kendali MPC pada sistem *Aero Pendulum* diambil satu sampel yang akan menggunakan parameter *prediction horizon* sebesar 5 langkah, *control horizon* sebesar 1 langkah dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan persamaan (3.63) dan (3.64), nilai keluaran terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang akan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) sehingga persamaan yang didapatkan[24]:

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.65)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Setelah nilai parameter kendali telah ditentukan, maka dapat ditentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

Masukkan persamaan (3.62) nilai matriks *augmented model* ke persamaan sehingga hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} 0.188 & 0.354 & 1 \\ 0.542 & 0.832 & 1 \\ 0.102 & 1.377 & 1 \\ 1.565 & 1.924 & 1 \\ 2.112 & 2.408 & 1 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0.188 \\ 0.542 \\ 1.02 \\ 1.565 \\ 2.112 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

- 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.

Indeks Performansi *Model Predictive Control* (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar keluaran yang dihasilkan dari suatu sistem mempunyai nilai sedekat mungkin dengan *setpoint*. jika nilai F dan Φ telah didapatkan, parameter selanjutnya yakni gain dari *Model Predictive Control* (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC} , yang perlu dilakukan yakni mencari nilai dari matriks Y yang didapatkan dari persamaan (2.29) sebagai berikut[24]:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.69)$$

Setelah melakukan perhitungan matriks F dan Φ didapatkan hasil:

$$y(k) = [-0.7913 \quad 1.0797 \quad 0.5849] \quad (3.70)$$

Nilai gain K_{MPC} adalah baris dari matriks Y . Oleh Karena itu, nilai gain K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = [-0.7913 \quad 1.0797 \quad 0.5849] \quad (3.71)$$

Setelah gain K_{MPC} telah didapatkan, langkah selanjutnya yakni gain K_y yang didapatkan dari persamaan (2.30). Gain bisa dihitung dari nilai matriks Z seperti berikut:

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.72)$$

Dari hasil perhitungan sesuai persamaan diatas, didapatkan hasil:

$$Z = [0.9177]$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z , sehingga nilai K_y adalah:

$$K_y = [0.9177]$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.26)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U = [0.0038]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.27)

$$\Delta U(k_i) = \underbrace{[1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]}_{N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah melakukan perhitungan dari $\Delta U(k_i)$ didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U(k_i) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0][0.0038]$$

$$= 0.0038$$

6.4 Perancangan Pengendali Model Predictive Control (MPC) 90°

Menentukan Respon *Transient* Sistem Berdasarkan Hasil *Open Loop*

Langkah pertama yang perlu dilakukan yakni mengetahui persamaan matematis dari sebuah *plant* lalu diubah ke dalam bentuk persamaan diskrit. Untuk penentuan nilai pertama kali, terlebih dahulu harus melakukan penentuan nilai *ts* (*time sampling*) dengan rumus sebagai berikut[24].

$$\forall t \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } ts < td$$

Selanjutnya menentukan nilai *tr* (*rise time*) dan *td* (*time delay*) yang didapat dari data *open loop* yang menggunakan cara membesarkan layar *scope* agar dapat memenuhi kondisi kedua di dalam menentukan nilai *ts* dimana:

- Nilai *rise time* (*tr*) (5%-95%) *set point*

$$\begin{aligned} y_{5\%} &= 5\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 5\% \times 90^\circ \\ &= 4.5^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari pada *set point* adalah 0.0662 detik

$$\begin{aligned} y_{95\%} &= 95\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 95\% \times 90^\circ \\ &= 85.5^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 95% dari pada *set point* adalah 0.4034 detik

$$\begin{aligned} \text{Maka Nilai } tr (95\% - 5\%) &= 0.4034 \text{ detik} - 0.0662 \text{ detik} \\ &= 0.3372 \text{ detik} \end{aligned}$$

- Nilai *delay time* (*td*)

$$\begin{aligned} y_{50\%} &= 50\% \text{ dari } steady state \text{ respon output} \\ &= 50\% \times 90^\circ \\ &= 45^\circ \end{aligned}$$

Setelah melakukan pembesaran layar pada *scope*, maka didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari pada *set point* adalah 0.2715 detik.

Setelah didapatkan nya nilai dari td (*time delay*) yang berasal dari data *open loop* dengan menggunakan cara pembesaran layar pada *scope* sebagai syarat memenuhi kondisi dua ketika menentukan nilai ts .

Dimana nilai ts untuk transformasi *bilinear*:

$$\sqrt{1 - \frac{tr}{2}} \leq \frac{0.3372}{2}$$

0.3372 detik $\leq ts \leq 0.1686$ detik dan $ts < 0.2715$ detik.

Maka nilai ts (*time sampling*) yang akan digunakan pada transformasi *bilinear* mengacu dari ketentuan persamaan (2.11) maka dipilih nilai ts yang akan digunakan yakni 0.1 detik.

2. Perubahan Transfer Function ke bentuk Model State Space

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), fungsi alih yang terdapat pada persamaan (2.7) perlu dirubah ke dalam bentuk *state space* seperti berikut:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.001955s + 12.25}$$

$$13.6719 V(s) = s^2 \theta(s) + 0.001955s\theta(s) + 12.25\theta(s)$$

$$13.6719 V = \frac{d^2\theta}{d\theta^2} + 0.001955 \frac{d\theta}{dt} + 12.25\theta$$

$$13.6719 V = \ddot{\theta} + 0.001955\dot{\theta} + 12.25\theta$$

Di Definisikan:

$$x_1 = \theta \rightarrow \dot{x} = \dot{\theta} = x_2$$

$$\begin{aligned} x_2 = \dot{\theta} \rightarrow x_2 = \ddot{\theta} = -0.001955\dot{\theta} - 12.25\theta + 13.6719 V \\ = -0.001955x_2 - 12.25x_2 + 13.6719 V \end{aligned}$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$x_2 = \ddot{y} = -0.001955x_2 - 12.25x_2 + 13.6719 V$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12.25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V$$

$$[y] = [0 \quad 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Solusi persamaan keadaan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.001955 & -12.25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V \quad (3.73)$$

Persamaan keluaran:

$$H = Cx + Du$$

$$H = [0 \quad 13.67] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

bersamaan keadaan (3.73) dan juga persamaan keluaran (3.74) diatas dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0.001955 & -12,25 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

$$C = 13.67 \quad (3.77)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Pengubahan dalam bentuk *state space* diskrit, setelah didapatkan nya hasil dari *state space*. Adapun yang harus dilakukan selanjutnya adalah memasukkan persamaan (3.75) dan (3.77) ke persamaan (2.10). dimana nilai Y(z) merupakan nilai dari matriks C dan X(z) adalah nilai dari matriks A sehingga[24]:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(\frac{2}{0,1} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,001955\left(20 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719}{400\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 0,0391\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 12,25}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719(1+z^{-1})^2}{400(1-z^{-1})^2 + 0,0391(1-z^{-1})(1+z^{-1}) + 12,25(1+z^{-1})^2}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719(1+2z^{-1}+z^{-2})}{400(1+2z^{-1}+z^{-2}) + 0,0391(1-z^{-2}) + 12,25(1+2z^{-1}+z^{-2})}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719+27,3438z^{-1}+13,6719z^{-2}}{400-800z^{-1}+400z^{-2}+0,0391-0,0391z^{-2}+12,25+24,50z^{-1}+12,25z^{-2}}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{13,6719+27,3438z^{-1}+13,6719z^{-2}}{412.2891-775.5z^{-1}+412.2109z^{-2}}$$

3. Controllable Canonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) memerlukan sebuah pemodelan fungsi alih yang baik agar kendali yang telah dirancang mampu bekerja secara optimal. Fungsi alih yang telah didapatkan tidak dapat langsung dipergunakan namun dirubah terlebih dahulu

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

te dalam bentuk *controllable canonical form*[25]. Setelah didapatkan nilai dari *state space* diskrit, langkah selanjutnya melakukan pembagian penyebut dengan nilai 412.2891 untuk mendapatkan nilai 1 supaya dapat mengikuti bentuk *controllable Canonical form* yang berdasarkan persamaan (2.17).

$$\begin{aligned}
 \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1 z^2 + a_1 z + a_2} &= \frac{13.6719 + 27.3438 z^{-1} + 13.6719 z^{-2}}{412.2891 - 775.5 z^{-1} + 412.2109 z^{-2}} \div 412.2891 \\
 \frac{0.03316 + 0.06632 z^{-1} + 0.03316 z^{-2}}{1 - 1.88096 z^{-1} + 0.99981 z^{-2}} &\times z^2 \\
 \frac{Y(z)}{X(z)} &= \frac{0.03316 z^2 + 0.06632 z + 0.03316}{z^2 - 1.88096 z + 0.99981}
 \end{aligned}$$

dimana:

$$a_1 = -1.88096$$

$$a_2 = 0.99981$$

$$b_0 = 0.03316$$

$$b_1 = 0.06632$$

$$b_2 = 0.03316$$

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.

Berikut merupakan bentuk gambaran *controllable canonical form* yang mana bentuk *state space* pada orde dua ini mempunyai bentuk seperti dibawah ini sesuai dengan persamaan (2.17) lalu didapatkan lah persamaan (3.79) dan (3.80)[25]

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.79)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2 b_0 \quad b_1 - a_1 b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.80)$$

Berdasarkan persamaan diatas, maka model *state space* yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.99981 & 1.88096 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.81)$$

$$y(k) = [0.0000064 \quad 0.12869] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

4. Desain Augmented Model

Desain *augmented model* adalah suatu langkah yang dilakukan untuk mengubah *state space* ke dalam *augmented model* dari model yang telah di diskritisasi. Berdasarkan

persamaan (2.19) substitusi kan hasil yang telah didapat dari persamaan (3.81) dan (3.82) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.83)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_m \\ [0.0000064 \quad 1.88096] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

berdasarkan persamaan (3.83) dan persamaan (3.84), selanjutnya bentuk *state space*

ubah ke dalam bentuk *augmented model*

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ C_m B_m \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.85)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C_m \\ [0 \quad 0 \quad 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

Adapun bentuk *augmented model* dari *Aero Pendulum* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -0,99981 & 1,88096 \\ -0,188 & 0,354 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (3.87)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C_m \\ [0 \quad 0 \quad 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.88)$$

Matriks A, B, C merupakan bentuk *augmented model* digunakan dilangkah selanjutnya dalam perancangan kendali MPC.

5. State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Langkah selanjutnya yakni menentukan parameter dari kendali MPC. Parameter yang dimaksud yakni *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c) serta *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). Untuk perancangan kendali MPC pada sistem *Aero Pendulum* diambil satu sampel yang akan menggunakan parameter *prediction horizon* sebesar 5 langkah, *control horizon* sebesar 1 langkah dan *tuning parameter* indeks performansi sebesar 0,2. Berdasarkan persamaan (3.87) dan (3.88), nilai keluaran terprediksi dan variabel kontrol yang akan datang akan dihitung dengan menggunakan persamaan (2.23) sehingga persamaan yang didapatkan[24]:

$$= Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.89)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \cdots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

Setelah nilai parameter kendali telah ditentukan, maka dapat ditentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

Masukkan persamaan (3.14) nilai matriks *augmented model* ke persamaan sehingga hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} -0.188 & 0.354 & 1 \\ -0.542 & 0.832 & 1 \\ -0.102 & 1.377 & 1 \\ -1.565 & 1.924 & 1 \\ -2.112 & 2.408 & 1 \end{bmatrix}; \quad \Phi = \begin{bmatrix} 0.188 \\ 0.542 \\ 1.02 \\ 1.565 \\ 2.112 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

6. Indeks Performansi *Model Predictive Control* (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol diperlukan agar keluaran yang dihasilkan dari suatu sistem mempunyai nilai sedekat mungkin dengan *setpoint*. jika nilai F dan Φ telah didapatkan, parameter selanjutnya yakni gain dari *Model Predictive Control* (MPC). Untuk mencari nilai K_{MPC} , yang perlu dilakukan yakni mencari nilai dari matriks Y yang didapatkan dari persamaan (2.29) sebagai berikut[24]:

$$Y = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T F) \quad (3.93)$$

Setelah melakukan perhitungan matriks F dan Φ didapatkan hasil:

$$y(k) = \begin{bmatrix} -0.7913 & 1.0797 & 0.5849 \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

Nilai gain K_{MPC} adalah baris dari matriks Y. Oleh Karena itu, nilai gain K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = \begin{bmatrix} -0.7913 & 1.0797 & 0.5849 \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

Setelah gain K_{MPC} telah didapatkan, langkah selanjutnya yakni gain K_y yang didapatkan dari persamaan (2.30). *Gain* bisa dihitung dari nilai matriks Z seperti berikut:

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \quad (3.96)$$

Dari hasil perhitungan sesuai persamaan diatas, didapatkan hasil:

$$= [0.9177]$$

Gain K_y merupakan baris pertama dari matriks Z , sehingga nilai K_y adalah:

$$K_y = [0.9177]$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.26)

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\Delta U = [0.0038]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.27)

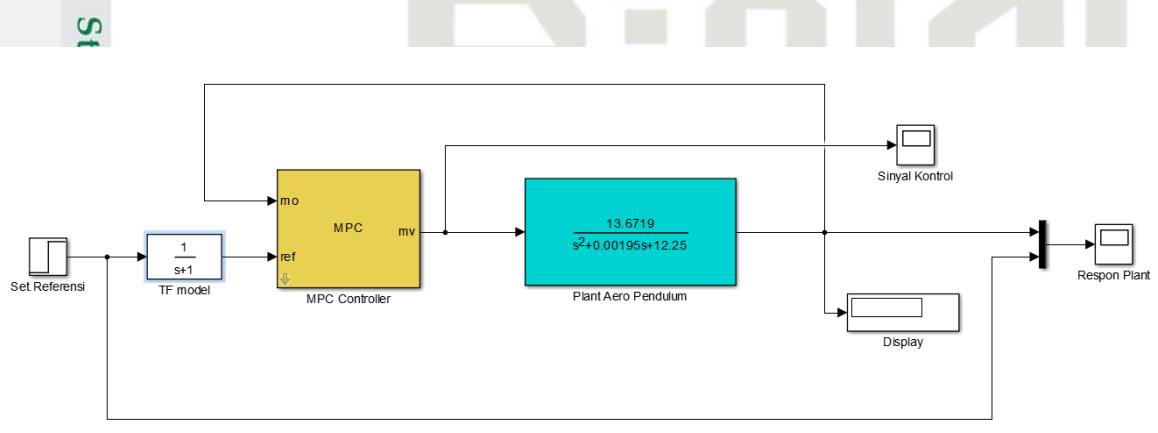
$$\Delta U(k_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s - r(k_i) - Fx(k_i))$$

Setelah melakukan perhitungan dari $\Delta U(k_i)$ didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta U(k_i) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0][0.0038] \\ &= 0.0038 \end{aligned}$$

Perancangan Simulasi

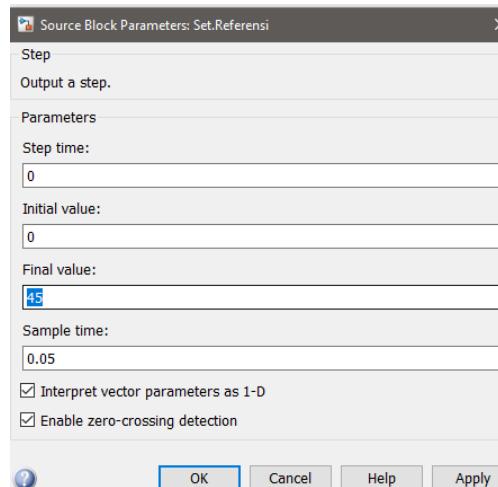
Perancangan simulasi berfungsi sebagai pemberi gambaran terhadap respon sistem, dimana perancangan simulasi ini menggunakan *Simulink Matlab*. Untuk perancangan simulasi yang dijalankan pada saat ini menggunakan sudut 45° . Adapun bentuk rangkaian *Simulink* pengendali MPC seperti berikut.



Gambar 3. 5 Rangkaian pengendali *Model Predictive Control* (MPC) *Simulink*

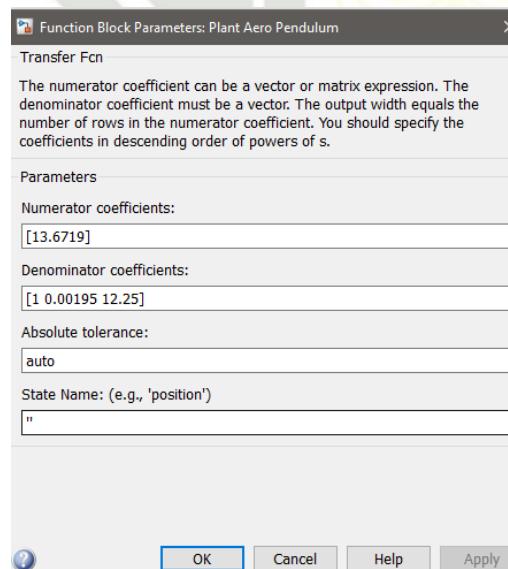
Pada blok diagram pada gambar terdapat model referensi yang diinginkan pada penelitian kali ini yakni dimana keluaran pada *plant* mampu mengikuti keluaran model referensi yang diinginkan. Adapun cara untuk melakukan penelitian ini dengan

Henggunakan kendali *Model Predictive Control* (MPC) setelah merangkai rangkaian pengendali MPC pada *Simulink* yakni memasukkan nilai *setpoint* pada blok Set. Referensi dengan memasukkan *setpoint* pertama pada parameter *Final Value* seperti gambar berikut:



Gambar 3. 6 Tampilan *Source Block Parameters*

Langkah berikutnya dengan memasukkan nilai *Transfer Function Aero Pendulum* pada *Function Block Parameter* seperti gambar berikut:



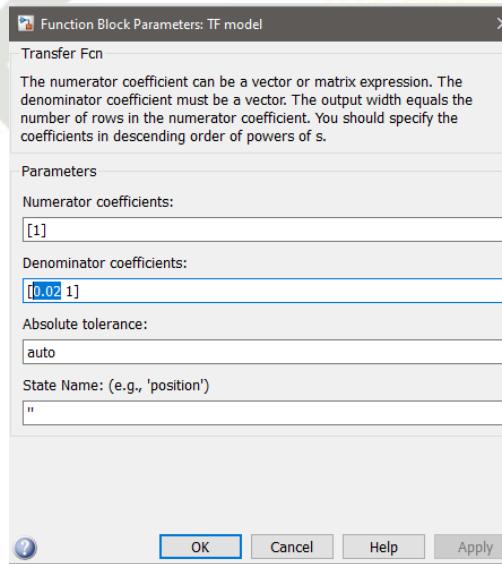
Gambar 3. 7 Tampilan *Function Block Parameters* dengan *TF Aero Pendulum*

Lalu, memasukkan nilai *transfer function model* setelah memasukkan Nilai *transfer function* yang didapatkan dari penelitian terkait. Kunci untuk mendapatkan hasil keluaran respon yang baik tergantung dari nilai τ yang dimasukkan.

- 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.

Dikarenakan nilai *rise time* pada saat *Aero Pendulum* dijalankan secara *open loop* bernilai 0.3175 detik, maka nilai tersebut dijadikan acuan peneliti agar nilai yang dihasilkan lebih baik dari nilai tersebut. Pada saat proses melakukan memasukkan nilai τ , sebelumnya melakukan percobaan di nilai 0.3 mengacu dari nilai *rise time* saat sistem dijalankan secara *open loop*, saat mengetahui nilai respon transient yang didapatkan belum sesuai dengan yang diinginkan, lakukanlah percobaan dengan mengurangi nilai τ hingga didapatkan nilai yang dinginkan dan lebih baik dibandingkan dengan *Aero Pendulum* yang berjalan secara *open loop*.

Pada saat melakukan percobaan nilai pada *TF model*, perlu diketahui bahwa pada bagian *numerator coefficients* dan *denominator coefficient* merupakan nilai yang perlu diisi sesuai dengan ketentuan *TF Model*, dengan persamaan $\frac{1}{ts+1}$, maka untuk *numerator* dimasukkan nilai 1, lalu pada bagian *denominator* masukkan nilai τ yang diinginkan lalu spasi dan berikan nilai 1 sesuai dengan persamaan *TF Model*.



Gambar 3. 8 Tampilan Function Block Parameters pada TF model

Semakin tinggi nilai τ maka hasil *respon transient* yang didapatkan akan semakin lambat, sebaliknya saat nilai τ dimasukkan rendah maka hasil *respon transient* untuk menuju dalam ke dalam *steady* memakan waktu yang cepat. Pada penelitian kali ini didapatkan nilai τ untuk nilai *TF Model* yang bernilai 0.02 untuk penelitian sudut 45° sehingga hasil respon yang didapatkan menunjukkan hasil yang terbaik pada saat

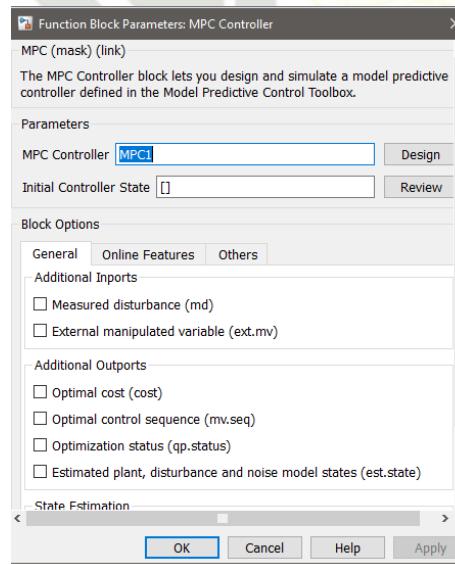
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

lakukan metode *heuristic* sesuai dengan tabel 3.1. Adapun percobaan saat ingin menentukan nilai τ sebagai nilai paling optimal adalah sebagai berikut.

1 Penentuan nilai τ pada TF Model

| NO | τ | HASIL RESPON | | | | |
|----|--------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------------|-------------------|
| | | Rise Time (Tr) | Delay Time (Td) | Settling Time (Ts) | Error Steady State (Ess) | Maximum Overshoot |
| 1 | 0.3 | 0.9608 | 0.3911 | 1.3707 | 0.000000000008 | 0.00000000352 |
| 2 | 0.2 | 0.6913 | 0.3215 | 0.9956 | 0.0000000000072 | 0.0000000245 |
| 3 | 0.1 | 0.4439 | 0.2479 | 0.6621 | 0.000000000007 | 0.000000137 |
| 4 | 0.09 | 0.4234 | 0.2406 | 0.6348 | 0.000000000007 | 0.00000014 |
| 5 | 0.07 | 0.381 | 0.2254 | 0.5844 | 0.000000000007 | 0.00000014 |
| 6 | 0.05 | 0.3417 | 0.2088 | 0.5423 | 0.000000000007 | 0.00000014 |
| 7 | 0.03 | 0.3117 | 0.1921 | 0.5137 | 0.000000000006 | 0.00000015 |
| 8 | 0.02 | 0.3033 | 0.1854 | 0.5036 | 0.000000000006 | 0.00000015 |
| 9 | 0.01 | 0.2955 | 0.1808 | 0.4989 | 0.0044 | 0 |
| 10 | 0.009 | 0.2945 | 0.1806 | 0.4984 | 0.0023 | 0 |

langkah yang harus dilakukan yakni melakukan *design* pada sistem kendali MPC dengan cara menekan blok MPC *controller* maka akan muncul tampilan seperti gambar berikut:

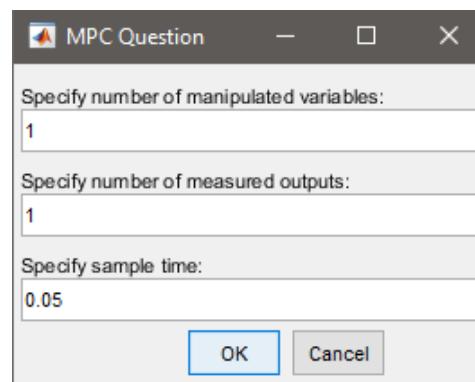


Gambar 3. 9 Tampilan Block MPC Controller

Setelah muncul tampilan pada blok, terlebih dahulu menghapus bagian parameter MPC *controller* yang bertuliskan “MPC1”. Kemudian *Apply* dan keluar dari tampilan. Lalu masuk kembali ke tampilan yang telah dihapus, tekan *design* pada tampilan yang tertera.

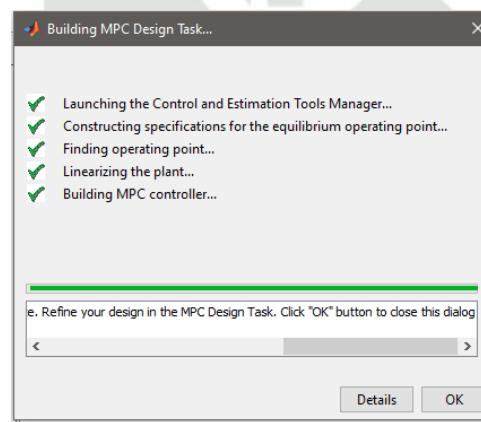
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak mengurangi dan memperbanyak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

saat melakukan design pengendali akan segera memproses sistem, di saat yang bersamaan juga akan muncul tampilan seperti pada gambar berikut:



Gambar 3. 10 Tampilan MPC *Question*

Pilih OK, maka sistem akan berjalan dan muncul tampilan yang menunjukkan bahwa kendali MPC telah menyelesaikan 5 proses di dalamnya adapun yang diselesaikan yakni seperti gambar 3.10. setelah proses selesai maka akan kembali ke tampilan rangkaian MPC, namun telah didapatkan hasil dari *control* dan *Estimation Tools Manager* yang berisi *Linearization Result*, *Diagnostic Messages* dan *Linearization Inspector*. Pada tampilan *Linearization Result* ditampilkan nilai *state space* yang didapatkan dari kendali MPC.



Gambar 3. 11 Tampilan kendali MPC saat melakukan design pada sistem

Selanjutnya *run*, Simulink akan melakukan *compiling* hingga selesai. lalu pilih blok *Response Plant* untuk melihat hasil keluaran yang dihasilkan dari kendali MPC.

- 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 V

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa keluaran respon pada *Aero Pendulum* dapat disimpulkan bahwa Pengendali MPC mampu mengurangi respon keluaran berupa osilasi, *maximum overshoot* dan *error steady state*. Pengaturan parameter dilakukan dengan mencari nilai koefisien τ secara *Heuristic* dengan memulai percobaan dari nilai *rise time* saat *Open Loop*, saat hasil keluaran yang didapatkan belum sesuai dengan yang diinginkan, nilai koefisien τ diperkecil terus menerus, hingga didapatkan nilai τ yang paling optimal yakni 0.02. Hasil terbaik *Aero Pendulum* menggunakan pengendali MPC yakni pada sudut 45° dengan nilai $T_d = 0.1854$ detik, $T_s = 0.5036$ detik, $T_r = 0.3032$ detik, *Maximum Overshoot* = 0.00000033% dan *Ess* = 0. 00000000000006°.

Performansi pada saat *Aero Pendulum* diberikan gangguan, berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, maka performa terbaik *Aero Pendulum* didapatkan pada sudut 45° dengan nilai $T_d = 0.1941$ detik, $T_s = 0.5145$ detik, $T_r = 0.305$ detik, *Maximum Overshoot* = 0.00000035% dan *Ess* = 0.015°. Dari empat percobaan dengan sudut yang berbeda, semakin besar sudut yang digunakan, maka semakin besar *Ess* yang dihasilkan pada keluaran sistem.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) menampilkan bahwa pengendali dapat mengikuti *Setpoint* yang diberikan dan mampu mengurangi nilai *error steady state* pada *Aero Pendulum*. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan bisa melakukan penelitian dengan pengendali lain atau metode kendali yang berbeda sehingga didapatkan hasil respon transient yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Faishol Hasib, Endryansyah, 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. Rahnawati, A. Harjoko, R. Sumiharto, M. Jurusan Ilmu Komputer dan Elektronika, F. Agung Kurniawan, Endryansyah, "Purwarupa Sistem Tracking Sungai Menggunakan Unmanned Aerial Vehicle," *IJEIS*, vol. 3, no. 2, pp. 157–164, 2013.
3. 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.
4. Y. Taskin, "Fuzzy PID Controller for Propeller Pendulum," *IU-JEEE*, vol. 17, no. 1, pp. 3175–3180, 2017, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/317312139>
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. B. Haritsyah, "PERANCANGAN SISTEM KENDALI LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) UNTUK MENGENDALIKAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM," *Skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau 2022.

1. Arifin, J. Pramudijanto, A. Fatoni, "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC)," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 4, pp. 41–47, 2015.
2. M. M., "PERANCANGAN PENGENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL PADA SERVO MEKANIS DC," *DINAMIKA Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 39–48, 2016.
3. Dea Erdila, "PERANCANGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK MENGEKALIKAN SISTEM SUSPENSI SEPEREMPAT KENDARAAN," *Skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau 2022.
4. A. Marashian, "Modeling and Control of Mechatronic Aeropendulum," Iran, Dec. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.18357.40161.
5. H. Kizmaz, S. Aksoy, and A. Mühürcü, "Sliding mode control of suspended pendulum," 2010. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/224256771>
6. P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," *Microchip Technology Inc.*, 2003.
7. component101.com, "A2212/13T TECHNICAL DATA," 2018.
8. O. J. Oguntoyinbo, "PID CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR AND ROBOT TRAJECTORY PLANNING AND SIMULATION WITH MATLAB/SIMULINK," *Report*. Univesity Of Applied Sciences 2009.
9. A. F. Oemry, "SIMULASI REDUKSI KEBISINGAN PADA PESAWAT TANPA AWAK NVC USU DENGAN METODE CAPSULING MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS 15.0," *Skripsi*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2016.
10. R. Habaty, "Analisa Ukuran Propeller Terhadap Unjuk Kerja Engine O.S 46 Max pada Model Pesawat Terbang Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Fixed-Wing," *Skripsi*, Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2018.
11. E. F. Camacho and C. Bordons, "Introduction to Model Predictive Control," London: Springer, 2007, pp. 1–11. doi: 10.1007/978-0-85729-398-5_1.
12. J. Melvin, "PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALI MODEL PREDICTIVE CONTROL DENGAN CONSTRAINT UNTUK PENGATURAN LEVEL SUATU masalah.

HADA COUPLED-TANK BASIC PROCESS RIG 38-100,” *Skripsi*, Jakarta: Universitas Indonesia, 2008.

Dyah Puspitarini, “DESAIN PENGATURAN LEVEL PADA COUPLED TANK PROCESS DENGAN MENGGUNAKAN METODE MODEL PREDICTIVE CONTROL,” *Skripsi*, Surabaya: Institut Sepuluh Nopember 2017.

C. Permata, “PERANCANGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL(MPC) UNTUK PENGEKENDALIAN TEMPERATUR PADA ANNEALING LEHR,” *Skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau 2021.

L. Wang, *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, AIC. Verlag London: Springer, 2009.

K. Ogata, *Discrete-Time Control System Second Edition*, 2nd Edition. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc, 1995.

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

© Hak Cipta

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

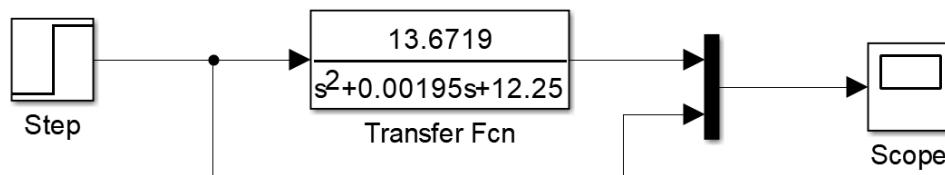
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

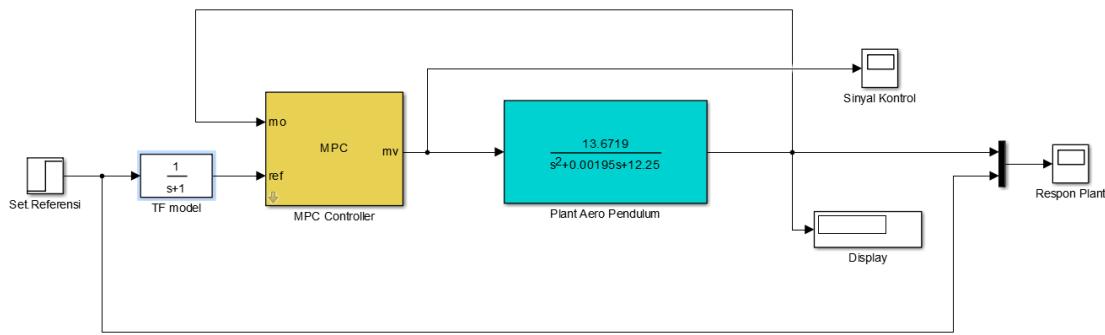
LAMPIRAN A

BLOK DIAGRAM SIMULINK

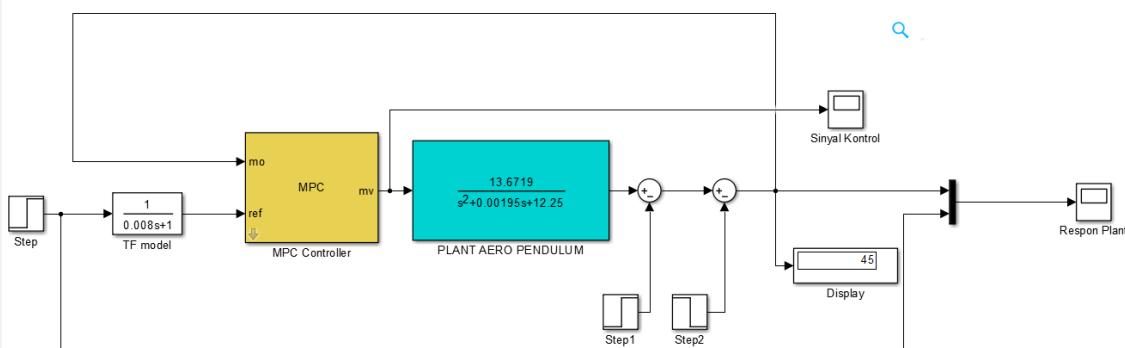
1. Blok Simulink Pemodelan Aero Pendulum Open Loop



2. Blok Simulink Pengendali MPC Tanpa ada gangguan



3. Blok Simulink Pengendali MPC saat diberikan gangguan



UIN SUSKA RIAU

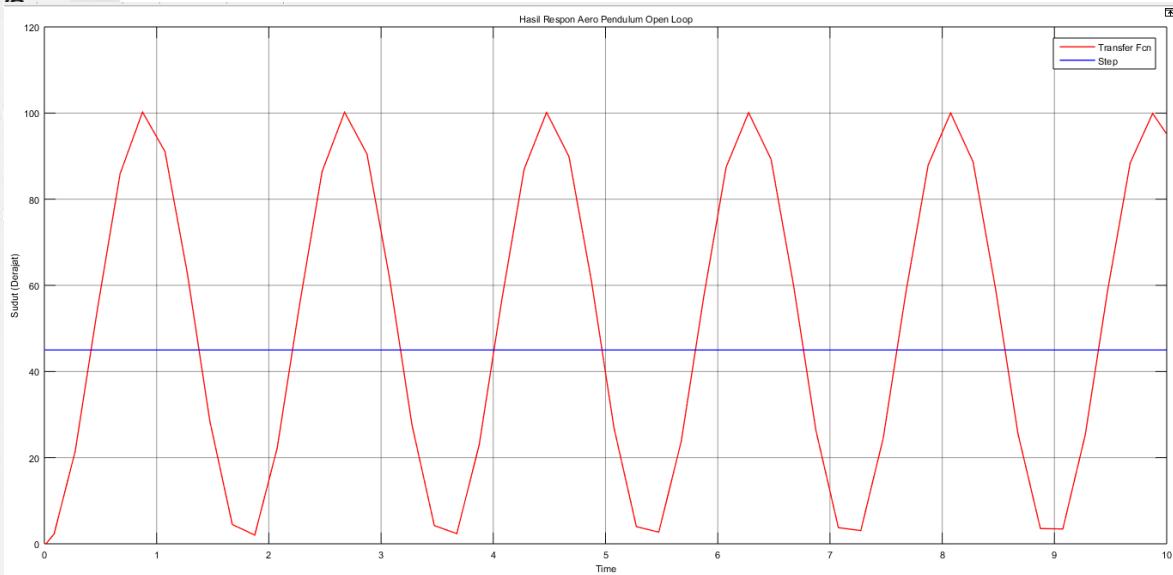
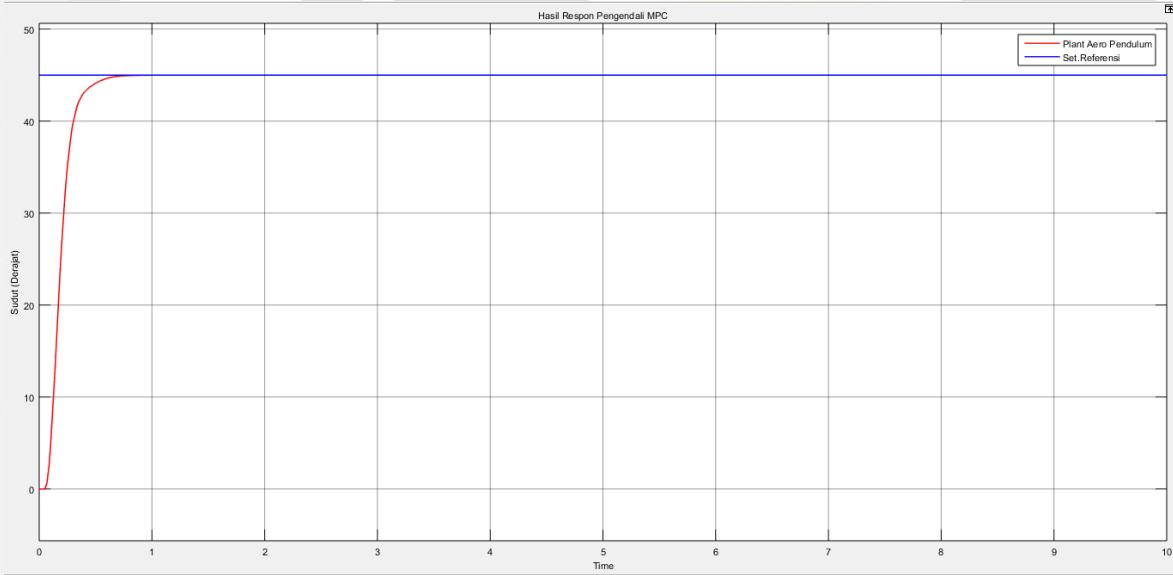
© Hak Cipta

Hak Cipta Dilindungi

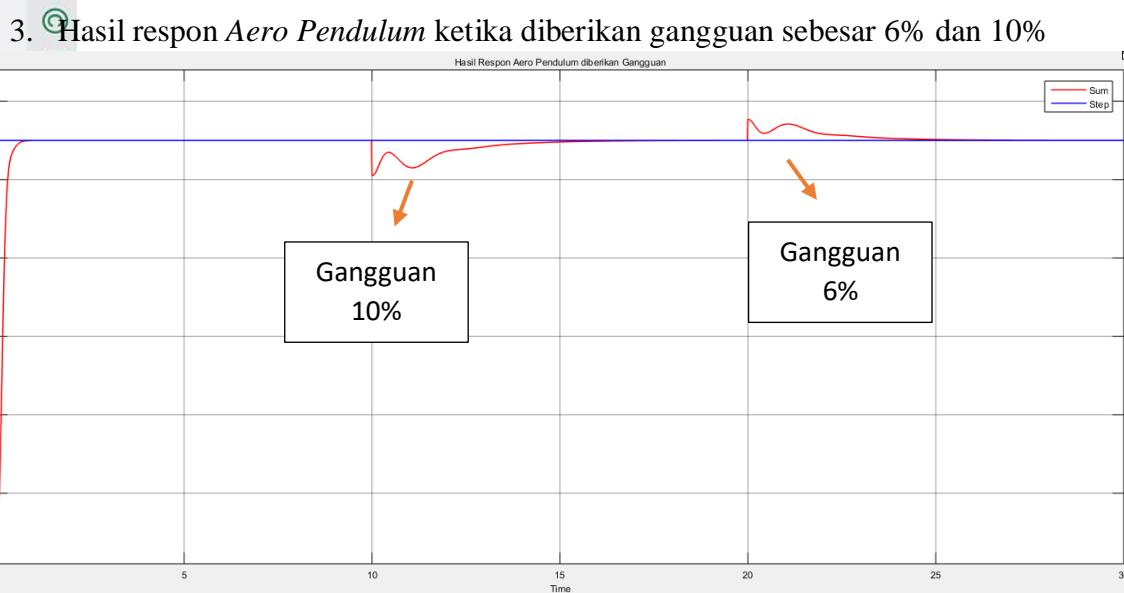
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

HASIL RESPON AERO PENDULUM

1. Hasil respon Aero Pendulum Secara *Open Loop*2. Hasil respon Aero Pendulum Menggunakan Pengendali dalam mencapai *setpoint*

Hak



© Hak**Hak Cipta**

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 C**PROGRAM M-File**

Linearization Result:

- To plot the response of this result click on the node labeled Custom Views.
- To export the result click on the Export To Workspace button below.

```
sys =  
  
a =  
    x1      x2  
x1  -0.00195  -12.25  
x2      1      0  
  
b =  
    u1  
x1  1  
x2  0  
  
c =  
    x1      x2  
y1  0  13.67  
  
d =  
    u1  
y1  0
```

Continuous-time state-space model.

S

State Names:

x1 - PLANT AERO PENDULUM(1)
x2 - PLANT AERO PENDULUM(2)

Input Channel Names:

u1 - MPC Controller

Output Channel Names:

y1 - Sum

LAMPIRAN D

SPESIFIKASI KOMPONEN

Spesifikasi Motor BLDC A2212/13T[16]

| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| No. of Cells: | 2 – 3 Li-Poly 6 – 10 NiCd/NiMH |
| Max KV: | 1000 RPM/V |
| Max Efficiency: | 80% |
| Max Efficiency Current: | 4 – 10A (>785%) |
| No Load Current | 0.5A @10V |
| Resistance: | 0.090 ohms |
| Max Current: | 13A for 60S |
| Max Watts: | 150W |
| Weight: | 52.7 g / 1.86 oz |
| Size: | 28 mm dia x 28 mm bell length |
| Shaft Diameter: | 3.2 mm |
| Poles: | 14 |
| Model: | 300 – 800g / 10.5 – 28.2 oz |

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

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



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Muhammad Luthfan Wafiudin lahir pada tanggal 15 April 2001 sebagai anak ketiga dari Musa Imam Santoso dan Almh. Aryani dengan jumlah saudara sebanyak 4 saudara. Beralamat di Jl. Teuku Umar, RT 010 RW 003, Kel. Sekip Hilir, Kec. Rengat, Riau. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 018 Rengat dan lulus pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Rengat dan lulus pada tahun 2015, selanjutnya melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Rengat. Kemudian setelah lulus SMA pada tahun 2018 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 terselesaiannya tugas akhir yang berjudul **“Perancangan Kendali Model Predictive Control (MPC) Untuk Mengendalikan Posisi Sudut Pada Aero Pendulum”**.

No. HP : 085263296613

Email : 11850512435@students.uin-suska.ac.id