

**PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC)
UNTUK PENGENDALIAN *WEB TENSION*
PADA *SISTEM REWINDER ROLL***

TUGAS AKHIR

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



Oleh :

MUTIARA PURNAMA SARI

11755200017

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU

PEKANBARU

2022

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

LEMBAR PERSETUJUAN

PERANCANGAN *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC) UNTUK PENGENDALIAN *WEB TENSION* PADA *SISTEM REWINDER ROLL*

TUGAS AKHIR

oleh:

MUTIARA PURNAMA SARI
11755200017

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 17 Juni 2022

Ketua Program Studi Teknik Elektro

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

Pembimbing I

Halim Mudia, S.T., M.T.
NIK. 13051 7053

Hak Cipta Uinraungi Ungaang-Ungaang

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 *MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC)* UNTUK PENGENDALIAN *WEB TENSION* PADA *SISTEM REWINDER ROLL*

TUGAS AKHIR

oleh:

MUTIARA PURNAMA SARI
11755200017

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 17 Juni 2022

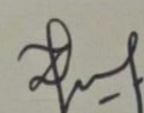
Pekanbaru, 17 Juni 2022

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dekan

Dr. Hartono, M.Pd.
NIP. 19630301 199203 1 003


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

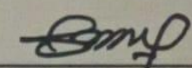
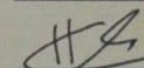

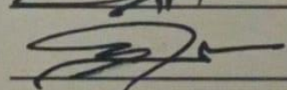
DEWAN PENGUJI :

Ketua : Sutoyo, S.T., M.T.

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

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

Anggota II : Putut Son Maria, S.S.T., M.T.

- Hak Cipta Uinraungi Ungaang-Ungaang
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 Diindungi Undang-Undang

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

Lampiran Surat :
Nomor : Nomor 25/2021
Tanggal : 10 September 2021

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Mutiara Purnama Sari
NIM : 11755200017
Tempat/Tgl. Lahir : Kuranji / 29 Juni 1999
Fakultas/Pascasarjana : Sains dan teknologi
Prodi : Teknik Elektro
Judul ~~Disertasi/Thesis/Skripsi/Karya Ilmiah~~ lainnya*:

Perancangan Model Predictive Control (MPC) untuk
Pengendalian Web Tension pada sistem Rewinder Roll

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa :

1. Penulisan ~~Disertasi/Thesis/Skripsi/Karya Ilmiah~~ lainnya* 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 ~~Disertasi/Thesis/Skripsi/Karya Ilmiah~~ lainnya* saya ini, saya nyatakan bebas dari plagiat.
4. Apa bila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penulisan ~~Disertasi/Thesis/Skripsi/(Karya Ilmiah~~ lainnya)* 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, 27 Juli 2022
Surat pernyataan



Mutiara Purnama Sari
NIM : 11755200017

* pilih salah satu sesuai jenis karya tulis

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali disebutkan dalam referensi dan di dalam daftar pustaka.

Pekanbaru, 17 Juni 2021

Yang membuat pernyataan,



Mutiara Purnama Sari

NIM: 11755200017

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.

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan 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 diharuskan 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 barangsiapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki keduanya, maka wajib baginya berilmu.

(HR. Tirmidzi)

Terima Kasih Ya Allah...

Sembah sujud serta syukurku kepada-Mu ya Allah, dzat yang Maha Pengasih namu tak pernah pilih kasih dan Maha Penyayang yang kasih sayangnnya tak terbilang. Engkau dzat yang Maha membolak-balikkan hati, teguhkanlah hati ini di atas agama-Mu ya Allah. Lantunan shalawat 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)

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

Dan katakanlah: "Ya Tuhan-ku, masukkan aku 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)

/ Mutiara Purnama Sari |

| 17 Juni 2022 |

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 *MODEL PREDICTIVE CONTROL* (MPC) UNTUK PENGENDALIAN *WEB TENSION* PADA *SISTEM REWINDER ROLL*

MUTIARA PURNAMA SARI
NIM : 11755200017

Tanggal Sidang : 17 Juni 2022

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Web tension pada sistem *Rewinder Roll* penting diatur untuk mempertahankan ketegangan kertas yang konstan pada proses penggulungan kertas. Permasalahan yang timbul terletak pada saat melakukan percobaan secara *open loop* masih terdapat *Overshoot* dan *Error Steady State*. Tujuan dari penelitian yakni merancang kendali *Model Predictive Control* (MPC) sebagai pengendali ketegangan kertas sehingga kertas yang dihasilkan sesuai dengan yang diharapkan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan kendali *Model Predictive Control* (MPC) ini dapat mengikuti respon sistem yang diberikan dan bisa diterapkan dalam pengaturan tegangan pada *Rewinder Roll*. Hasil dari penelitian ini, dapat dilihat bahwa *Model Predictive Control* (MPC) mampu dalam menghilangkan $Error Steady State=0$ N, dengan $Delay Time$ (T_d)= 0.034 detik $Rise Time$ (T_r)=0.051 $Maximum Overshoot=0\%$ dan mampu mengatasi gangguan yang diberikan.

Kata Kunci : *Sistem Rewinder Roll* , *Model Predictive Control* (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.

MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) DESIGN FOR WEB TENSION IN REWINDER ROLL SYSTEM

MUTIARA PURNAMA SARI

Student Number : 11755200017

Date of Final Exam : 17 June 2022

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science of Technology

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Soebrantas St. Number. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

The web tension in the Rewinder Roll system is important to maintain a constant paper tension in the paper rolling process. The problem that arises is when conducting an open loop experiment, there are still Overshoot and Steady State errors. The purpose of the research is to design a Model Predictive Control (MPC) control as a paper tension controller so that the paper produced is as expected. Based on the research conducted, this Model Predictive Control (MPC) control can follow the given system response and can be applied in regulating the voltage on the Rewinder Roll. The results of this study, it can be seen that the Predictive Control Model (MPC) is able to eliminate Steady State Error = 0 N, with Delay Time (T_d) = 0.034 seconds Rise Time (T_r) = 0.051 Maximum Overshoot = 0% and is able to overcome disturbances caused by given.

Key Word : *Rewinder Roll system, Model Predictive Control (MPC)*

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

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut dicontoh dan diteladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “*Perancangan Model Predictive Control (MPC) Untuk Pengendalian Web Tension Pada Sistem Rewinder Roll*”.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga doa orang-orang yang ada disekeliling 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. Bapak, Ibu dan kakak abang tercinta yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Hairunnas, M.Ag Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
3. Bapak Dr. Hartono, M.Pd. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA RIAU beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
4. Ibu Dr. 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 dan sekaligus dosen pembimbing akademik.
6. Bapak Halim Mudia, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing Tugas Akhir dan telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam

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.

memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

7. Bapak Putut Son Maria, S.S.T., M.T. selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir 1 dan penguji 2.

8. Bapak Ahmad Faizal, S.T., M.T. selaku dosen penguji 1 yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.

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

10. Sahabat (Nadia Aspa, S.T, Erryni Chantika Permata,S.T, dan Siti Ramlah) yang telah memberikan dukungan, dorongan, dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

11. Kelas D (DEWA'17), Dunsanak dan Instrumen 2017 serta teman-teman angkatan 2017 lainnya yang juga telah memberikan banyak dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini serta teman-teman penulis lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan memberi dorongan, motivasi dan sumbangan pemikiran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan pahala dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.

Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT. Hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 17 Juni 2022

Penulis



Mutiara Purnama Sari

NIM: 11755200017

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	ii
LEMBARAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR RUMUS.....	xvi
DAFTAR LAMBANG.....	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xix
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 Penelitian	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-3
2.2.1 Winder Machine.....	II-3
2.2.2 Pemodelan Dinamika <i>Web Tension</i> pada <i>Rewinder roll</i>	II-4
2.3 Sistem Kendali	II-8
2.3.1 Sistem Orde Dua	II-8
2.4 Transformasi Bilinear dan <i>Teorema Shannon</i>	II-10
2.5 <i>Model Predictive Control (MPC)</i>	II-10
2.5.1 <i>Model State Space</i>	II-11

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

2.5.2	<i>Controllable Cannonical Form</i>	II-12
2.5.3	Desain <i>Augmented Model</i>	II-13
2.5.4	<i>State</i> Prediksi dan Variabel <i>Output</i>	II-13
2.5.5	Indeks Performansi <i>Model Predictive Control</i> (MPC).....	II-14
2.6	Program Matlab.....	II-15
BAB III METODE PENELITIAN.....		III-1
3.1	<i>Flowchart</i> Metode Penelitian	III-1
3.2	Tahapan Penelitian	III-2
3.3	Pengumpulan Data	III-3
3.4	Pemodelan Matematis <i>Rewinder Roll</i>	III-3
3.5	Verifikasi Pemodelan Matematis	III-4
3.6	Skenario Penelitian.....	III-5
3.7	Perancangan Pengendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC).....	III-5
	3.7.1 Menentukan Respon <i>Transient</i> dari Sistem Berdasarkan Hasil <i>Close Loop</i>	III-6
	3.7.2 Perubahan <i>Transfer Function</i> ke Bentuk Model <i>State Space</i>	III-7
	3.7.2 <i>Controllable Cannonical Form</i>	III-9
	3.7.4 <i>Desain Augmented Model</i>	III-10
	3.7.5 <i>State</i> Prediksi dan Variabel <i>Output Model Predictive Control</i> (MPC)	III-10
	3.7.6 Indeks Performansi <i>Model Predictive Control</i> (MPC).....	II-11
3.8	Perancangan Pengendali.....	III-12
	3.8.1 Perancangan Pengendali MPC.....	III-12
	3.8.2 Perancangan Pengendali MPC Dengan Gangguan 5% dan 10% Dari Set Point.....	III-14
3.9	Hasil Data Penelitian yang Akan Diambil	III-14
	3.9.1 Grafik dari Setiap Pengujian Sistem.....	III-14
	3.9.2 Respon <i>Transient</i> Sistem dari Setiap Pengujian	III-15
BAB IV HASIL DAN ANALISA		IV-1
4.	Gambaran Umum Pengujian	IV-1
4.	Hasil Dan Analisa Simulasi Web Tension Pada Sistem <i>Rewinder Roll</i> Secara Open Loop	IV-1
4.	Hasil dan Analisa Simulasi Web Tension Pada Sistem <i>Rewinder Roll</i> Menggunakan Pengendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC).....	IV-4

4.4 Grafik Sistem Dengan Gangguan Sinyal Kendali 5% dan 10% Dari *Setpoint* IV-5

BAB V KESIMPULAN	V-1
5.1 Kesimpulan	V-1
5.2 Saran.....	V-1

DAFTAR PUSTAKA

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



UIN SUSKA RIAU

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Rewinder Roll	II-3
Gambar 2.2 Kertas Cacat (<i>Wrinkle</i>)	II-4
Gambar 2.3 Diagram Blok <i>Web Tension</i>	II-8
Gambar 2.4 Karakteristik Respon Waktu Sistem Orde	II-9
Gambar 2.5 Konsep Dasar Model Predictive Control (MPC)	II-11
Gambar 2.6 Matlab R2015a	II-16
Gambar 2.7 Tampilan Model Simulink Pada Matlab	II-17
Gambar 2.8 Kotak Dialog Simulink <i>Library</i>	II-17
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian	III-1
Gambar 3.2 Rangkaian Simulink Open Loop Pada Sistem Rewinder Roll	III-4
Gambar 3.3 Subsistem Blok <i>Rewinder Roll</i>	III-4
Gambar 3.4 Respon Sistem secara <i>Open Loop</i> pada <i>Rewinder Roll</i>	III-5
Gambar 3.5 Rangkaian Simulink Sistem Pengendali Model Predictive Control MPC	III-13
Gambar 3.6 Tampilan Blok Simulink MPC.....	III-13
Gambar 3.7 Tampilan Blok Simulink MPC.....	III-14
Gambar 3.8 Tampilan Blok Simulink MPC	III-14
Gambar 3.9 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem Pengendali <i>Model Predictive Control</i> (MPC) Dengan Gangguan 5% Dari <i>Set Point</i>	III-15

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

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 3.1 Parameter <i>Rewinder Roll</i>	III-3
Tabel 3.2 Model Referensi	III-14



UIN SUSKA RIAU

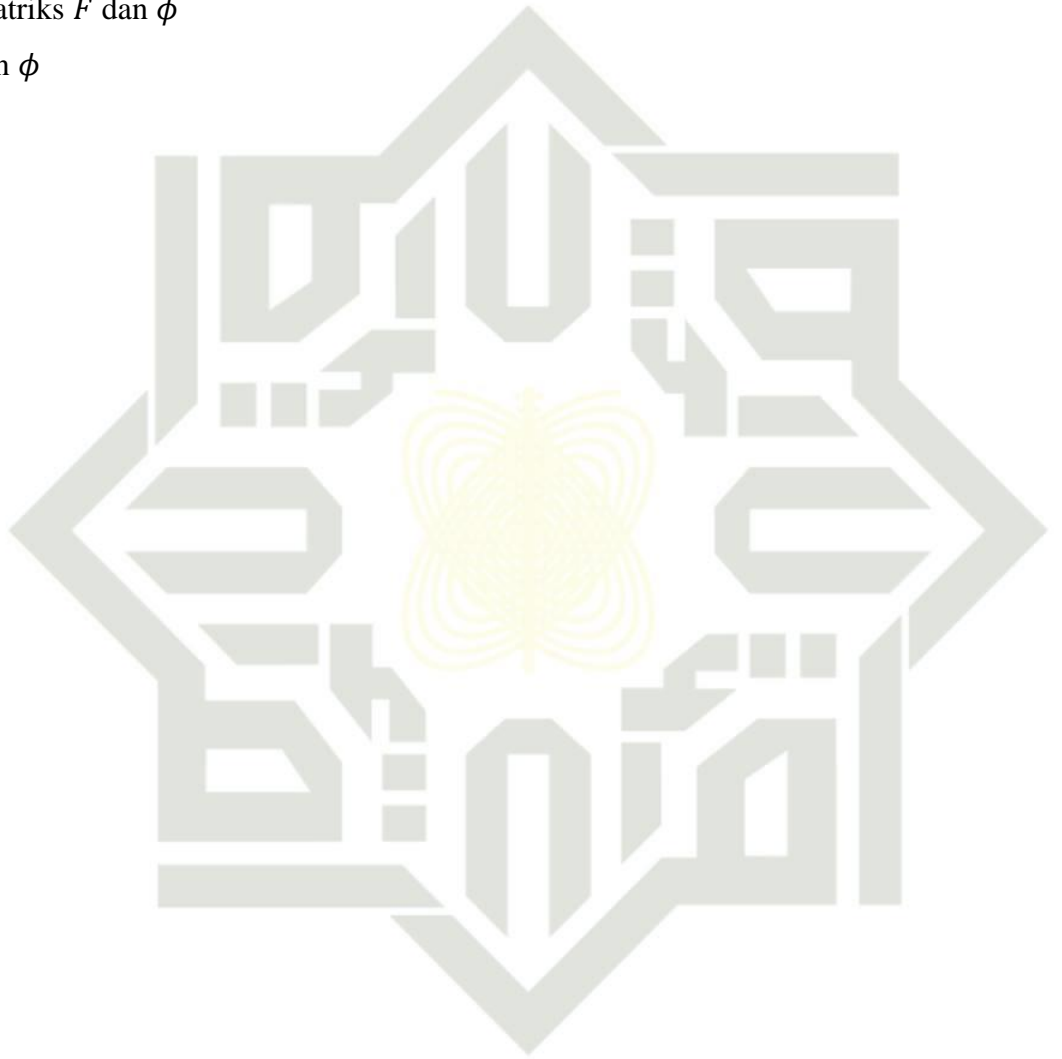
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

DAFTAR RUMUS

- © Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 © State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
- 2.1 Resivitasi Kepadatan Kertas
 - 2.2 Pemodelan Dinamika Kertas
 - 2.3 Hukum Elastisitas Ketegangan *Plant*
 - 2.4 *Strain*/Regangan dan Kontinuitas Massa
 - 2.5 Dinamika Torsi di Daerah *Rewinder Roll*
 - 2.6 Hukum Newton Kedua Persamaan *Winder*
 - 2.7 Transfer *Function* dari Torsi Motor sampai *Tension* Kertas dalam Domain-s
 - 2.8 Sistem Orde 2
 - 2.9 *Overshoot* Maksimum
 - 2.10 Asumsi *Plant Single Input Single Output*
 - 2.11 Rumus *Plant*
 - 2.12 Persamaan *State Space*
 - 2.13 Input Model *State Space* $\Delta u(k)$
 - 2.14 *Design Augmented Model*
 - 2.15 Variabel *State* yang akan Datang
 - 2.16 Nilai *Output* yang Terprediksi
 - 2.17 Sinyal Referensi dari Sinyal *Set Point*
 - 2.18 Refleksi Objektif Kontrol
 - 2.19 Solusi Optimal Kontrol
 - 3.1 *Transfer Function* *rewinder roll*
 - 3.2 *State Space Continue*
 - 3.3 *State Space* Keadaan x
 - 3.4 *State Space* untuk Matriks A
 - 3.5 *State Space* untuk Matriks B
 - 3.6 *State Space* untuk Matriks C
 - 3.7 *State Space* untuk Matriks D
 - 3.8 *State Space* Orde 2 Matriks X
 - 3.9 *State Space* Orde 2 Matriks Y
 - 3.10 *State Space* Orde 2 Matriks X
 - 3.11 *State Space* Orde 2 Matriks Y
 - 3.12 *State Space* diubah menjadi *Augmented Model*

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.



- 3.13 *State Space* dirubah menjadi *Augmented Model*
 - 3.14 Rumus *Augmented Model*
 - 3.15 Rumus *Augmented Model*
 - 3.16 *Augmented Model*
 - 3.17 *Augmented Model*
 - 3.18 Nilai *Output* Terprediksi dan Variabel Kontrol yang akan Datang
 - 3.19 Formulasi Matriks F dan ϕ
 - 3.20 Matriks F dan ϕ
 - 3.21 Matriks y
 - 3.22 *Gain* KMPC
 - 3.23 Matriks Z
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 LAMBANG

© Hak Cipta Milik UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

- ρ = Resivitasi
- A = Luas permukaan pada lembaran kertas
- L = Panjang kertas
- V = Kecepatan
- σ = Tegangan pada *web tension*
- ϵ = Regangan pada *web tension*
- L = Panjang antara *lead roll* dan *rewinder roll*
- A = Luas melintang kertas
- E = Modulus Elastisitas *Young* pada kertas
- V = Kecepatan pada *Rewinder roll*
- V_1 = Kecepatan pada *lead roll*
- C = Modulus redaman kertas
- D = Diameter *rewinder roll*
- GR = *Gear Ratio*
- J = Total Inersia pada motor
- B = Koefisien gesek pada motor penggerak
- ω = Kecepatan Rotasi
- α = Percepatan Rotasi
- τ = Torsi
- J = Refleksi objektif kontrol
- \bar{R} = Matriks diagonal yang tersusun dari beberapa matriks lain

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

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

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

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR SINGKATAN

- MPC = *Model Predictive Control*
 T_s = *Time Sampling*
 T_d = *Time Delay*
 T_r = *Rise Time*
 T_s = *Time Settling*

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 I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hasil industri Indonesia merupakan sektor pemasok terbesar untuk Produk Domestik Bruto (PDB) salah satu industri tersebut adalah *Pulp* (bubur kertas) dan kertas yang menjadi produk unggulan dari Indonesia dengan permintaan kertas di pasar global yang semakin tinggi setiap tahunnya tercatat pada tahun 2019 dengan kebutuhan sekitar 394 juta ton dan meningkat pada tahun 2020 dengan perkiraan 490 juta ton[1]. Permintaan produksi kertas tersebut akan meningkat setiap tahunnya seiring dengan perkembangan media digital. Hal tersebut membuktikan bahwa media digital tidak mengurangi minat dalam negeri dan luar negeri terhadap kebutuhan kertas dan tidak juga menghambat perkembangan industri pulp dan kertas di Indonesia.

Permintaan kertas yang terus bertambah setiap tahun membuat Indonesia berada pada peringkat enam sebagai industri penghasil kertas dan peringkat delapan penghasil *pulp* di dunia[2]. Dalam artian perkembangan industri kertas di Indonesia mampu bersaing dengan negara maju lainnya dan dituntut untuk menghasilkan produk yang berkualitas, dengan cara menghindari kecacatan pada produk yang dapat menurunkan nilai jual dari hasil produksi[3]. Dalam proses industri memperhatikan kualitas produk yang dihasilkan juga sangat penting apabila terdeteksi kesalahan dalam waktu yang cukup singkat bisa diantisipasi dengan cepat.

Kesalahan yang terjadi pada proses produksi ini salah satunya permukaan kertas yang tidak rata atau keriput sedangkan yang diharapkan dari hasil produksi ini permukaan kertas yang rata tanpa ada *wrinkle* (keriput)[3]. Penyebab utama dari ketidakrataan pada permukaan kertas terjadi ketika pengendalian *web tension* dalam mengatur ketegangan kertas yang tidak sesuai saat berlangsungnya proses *rewinder roll*. Ketegangan kertas yang tidak sesuai dengan standar yang diinginkan mempengaruhi daya serap tinta pada kertas dan jika gambar yang dihasilkan tidak jelas atau kabur ini disebabkan oleh batas ketegangan kertas yang melebihi dari elastis keregangan kertas[4]. Penggunaan sistem kontrol pada tegangan yang sesuai mungkin dapat mengurangi terjadinya kegagalan produk dan menghasilkan produk yang berkualitas.

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.

Dalam proses produksi untuk mendapatkan kualitas yang tidak berubah-ubah maka diperlukan pengendali yang dapat mempertahankan ketelitian tegangan *web*[5]. *Web* mempunyai arti kata bahan yang digunakan pada proses pembuatan kertas dan terus menerus ditarik dari gulungan yang besar melalui beberapa proses dan tension sendiri diartikan sebagai kuatnya ketegangan yang diukur pada bahan yang ditentangkan [6]. Dalam proses ini yang dimaksud bahannya adalah kertas yang telah melalui proses pembuatan[5]. Pengendalian ketegangan kertas untuk membuat permukaan kertas rata dan penggulungan kertas yang padat inilah yang disebut dengan *web tension*. Hasil dari pengendalian *web tension* yang tepat akan mengurangi cacat produk dan menghasilkan produk yang berkualitas.

Telah dilakukan penelitian yang membahas hal tersebut, seperti pengendalian *web tension* menggunakan *robust* PID dimana PID konvensional dan *robust* PID dibandingkan. Berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan *robust* PID mampu menjalankan kinerja yang lebih baik dari pada PID konvensional, dengan hasil *overshoot* sebesar 1,744% dan respon menuju *set point* yang lambat[4]. Penelitian ini ditambahkan gangguan berupa perubahan *set point* dan setelah ditambahkan gangguan respon sistem nya tidak ditampilkan.

Penelitian menggunakan logika *fuzzy* pada loop tertutup juga diterapkan dalam pengendalian *web tension* yang bertujuan untuk mendapatkan posisi yang diinginkan pada *active dancer system* dalam mempertahankan ketegangan kertas pada unit *web tension*. Dalam penelitian ini *set point* yang digunakan bernilai 5 N dan kendali yang diterapkan mampu untuk mencapai *set point* tersebut dengan waktu 12.255 detik[7]. Kekurangan yang dimiliki pengendali ini terdapat osilasi pada sistem yang dihasilkan.

Kendali lain yang pernah digunakan yaitu *auto tuning* menggunakan *fuzzy* yang diterapkan Pada pengendali *web tension*. Penelitian ini menghasilkan *overshoot* sebesar 0.0044%, *error steady state* 0N dan kendali ini membutuhkan waktu sebesar 0.3151 detik pada *rise time*[8]. Pada penelitian ini menggunakan simulasi validasi model matematis secara *close loop* dan dalam pengendalian ketegangan kertas tersebut masih terdapat sedikit osilasi.

Pengendalian *web tension* pada kendali optimal LQR yang bisa memenuhi perubahan *set point* yang terjadi secara optimal namun respon pada sistem yang diberikan kendali LQR ini masih terdapat *overshoot* sekitar 0.05% dan *error steady state* yang dihasilkan pada sistem senilai 0.0025N[9].

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

Dengan menggunakan pengendali yang berbeda telah dilakukan penelitian terkait *web tension* dan juga terdapat penelitian lain yang menggunakan pengendali seperti yang diangkat peneliti contohnya *Model Predictive Control (MPC)* yang diterapkan pada plant *coupled tank* menyatakan bahwa *error* yang dihasilkan yaitu 7.0973×10^{-9} pada tangki 1 dan 8518×10^{-5} pada tangki 2 [10] pada penelitian ini model referensi yang diberikan mampu diikuti oleh respon sistem. Adanya pengaruh parameter *control horizon* dalam menggunakan pengendali *Model Predictive Control (MPC)* menyebabkan lebih lambatnya respon waktu dan semakin kecilnya *error* yang ada ketika nilai *control horizon kecil*.

Dalam percobaan ini menggunakan simulasi *open loop* pada aplikasi *matlab* menunjukkan bahwa *set point* yang diharapkan belum mampu untuk dicapai. Percobaan yang pernah membahas mengenai pengendalian *web tension* ini sudah mendapat hasil yang cukup bagus, namun *error steady state* dan *osilasi* yang ditimbulkan masih ada. Stabilitasnya suatu sistem apabila *overshoot* dan *error steady state* tidak ditimbulkan lagi.

Dalam mempertahankan ketegangan yang konstan pada pelepasan gulungan kertas sistem *web tension* berjalan secara terus menerus dan dibutuhkan pengendali yang mampu menangani kendala yang terjadi ketika proses berlangsung salah satu pengendali modern yang sudah banyak digunakan yaitu *Model Predictive Control (MPC)* dengan kemampuan pengontrolan di dunia industri [11]. Dalam menangani masalah *error steady state* dan *overshoot*. *Model Predictive Control (MPC)* ini mampu dalam mengikuti *set point* yang diinginkan serta dapat mengikuti respon sistem yang diberikan dan bisa diterapkan dalam pengaturan ketegangan kertas pada *Rewinder Roll* yang mana pada percobaan *open loop* terdapat *overshoot* dan *error steady state* yang tinggi. Penelitian sebelumnya sudah cukup bagus namun masih terdapat *overshoot* menggunakan pemodelan matematis Totok R. Biyanto belum ada yang memakai pengendali tersebut. Oleh karena itu, penulis mengajukan judul Perancangan *Model Predictive Control (MPC)* Untuk Pengendalian *Web Tension* Pada Sistem *Rewinder Roll*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana performansi *Model Predictive Control (MPC)* dalam mengatasi *error steady state* dan *overshoot*?
2. Bagaimana performansi *Model Predictive Control (MPC)* dalam menangani gangguan sinyal kendali yang diberikan?

1.3 Tujuan penelitian

1. Menghasilkan model rancangan sistem kendali *Model Predictive Control* (MPC) dalam pengendalian mempertahankan ketegangan, mengatasi *error steady state* dan *overshoot* pada sistem *Rewinder Roll*.
2. Merancang pengendali *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem *Rewinder Roll* agar mampu kembali stabil saat diberi gangguan sinyal.

1.4 Batasan Penelitian

Dalam hal ini peneliti memberikan batasan masalah yang akan dibahas agar pembahasan tidak melebar yaitu:

1. Model matematis *Rewinder Roll* yang digunakan pada penelitian ini merujuk ke penelitian sebelumnya[4].
2. Penelitian ini menggunakan *set point* yang dirujuk pada pengendalian mengenai kendali *web tension*.
3. Penggunaan *software* MATLAB pada penelitian ini dalam menjalankan simulasi.
4. Rancangan berbentuk simulasi tidak membahas tentang *hardware* dari *plant*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mendapatkan hasil rancangan sistem kendali *Model Predictive Control* untuk pengendalian *web tension* pada sistem *rewinder roll*
2. Dapat diterapkan dalam sistem kendali di dunia industri bertujuan untuk mendapatkan kemudahan dalam permasalahan umum yang ada dalam proses pengendalian *rewinder roll*
3. Dalam penelitian selanjutnya bisa digunakan sebagai rujukan.

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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini penulis akan menampilkan penelitian terkait dengan studi literatur yang mempunyai isi landasan teori sehingga bisa membantu penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

2.1. Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terkait yang pernah membahas permasalahan utama sesuai dengan topik yang sedang penulis angkat diperoleh dari paper dan kumpulan jurnal dari Indonesia maupun internasional diantaranya dalam mengatasi masalah pengendalian tegangan *web tension* dengan menggunakan kendali optimal LQR[9]. Hasil dari penelitian tersebut pengendali yang digunakan mampu memberikan respon yang diharapkan dalam mencapai *set point* 0.5 N dan respon waktu yang dihasilkan sistem tidak terdapat osilasi namun dalam respon sistem tersebut masih dijumpai *error* yang bernilai 0.0025 N dan *overshoot* sebesar 0.05% kendali LQR ini mampu beradaptasi dengan perubahan *set point* secara maksimal. Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian yang sedang dilakukan penulis dalam pengontrolan ketegangan kertas menggunakan pengendali yang berbeda dengan penelitian penulis.

Pengendali lain yang digunakan dalam penelitian *web tension* salah satunya menggunakan *robust* PID dimana PID konvensional dan *robust* PID dibandingkan berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan. Sehingga hasil dari percobaan tersebut *robust* PID mampu menjalankan kinerja yang lebih baik dari pada PID konvensional. Namun dari pengendali *robust* PID ini terdapat *overshoot* dengan nilai 1,744% dan respon menuju *set point* yang lambat. Penelitian ini tidak ditambahkan gangguan[4]. Keterkaitan penelitian penulis dengan penelitian tentang *robust* PID ini yaitu sama sama membahas mengenai ketegangan web tension tetapi pada penelitian ini menggunakan dua pengendali yang kemudian hasilnya dibandingkan.

Selain pengendali *robust* PID dan LQR juga pernah digunakan *Auto Tuning* Menggunakan *Fuzzy* yang diterapkan pada pengendali *web tension*. Penelitian ini menghasilkan *overshoot* 0.0044%, *error steady state* 0N dan kendali ini membutuhkan waktu sebesar 0.3151 detik pada *rise time*[8]. Pada penelitian ini menggunakan simulasi validasi model matematis secara *close loop*. Penelitian ini juga membahas mengenai

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.

ketegangan suatu web yang membuat penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian yang sedang dilakukan penulis.

Dengan menggunakan pengendali yang berbeda telah dilakukan penelitian terkait *web Tension* dan juga terdapat penelitian lain yang menggunakan pengendali seperti yang diangkat peneliti contohnya *Model Predictive Control (Mpc)* yang diterapkan pada *plant coupled tank* menyatakan bahwa *error* yang dihasilkan yaitu 7.0973×10^{-9} pada tangki 1 dan 3.8518×10^{-5} pada tangki 2 [10] pada penelitian ini model referensi yang diberikan mampu diikuti oleh respon sistem. Adanya pengaruh parameter *control horizon* dalam menggunakan pengendali *Model Predictive Control (MPC)* menyebabkan lebih lambatnya respon waktu dan semakin kecilnya error yang ada ketika nilai *control horizon* kecil. Keterkaitan penelitian yang dilakukan penulis dengan penelitian ini menggunakan pengendali yang sama tetapi plant yang berbeda.

Penelitian lain yang membahas *Model Predictive Control (MPC)* pada *plant quadruple tank* oleh Tri Bowo Setiyo dan dkk mendapatkan hasil yang dapat mempertahankan batasan (constraint) pada sinyal kontrol dan sinyal keluaran di tangki serta mampu menyelesaikan masalah tracking maupun regulator pada quadruple tank [12]. Hasil yang didapatkan menggunakan pengendali *Model Predictive Control (MPC)* memperlihatkan bahwa penggunaan pengendali tersebut mempunyai hasil yang memuaskan. Penggunaan pengendali yang sama dengan peneliti gunakan.

Penelitian Halim Mudia [13] memperlihatkan model MPC dengan pengamat *Robust Stator Flux Observer* mampu melacak nilai kecepatan referensi yang diterapkan pada model motor induksi DTC, yaitu 120 rpm dengan settling time 0,753 detik.

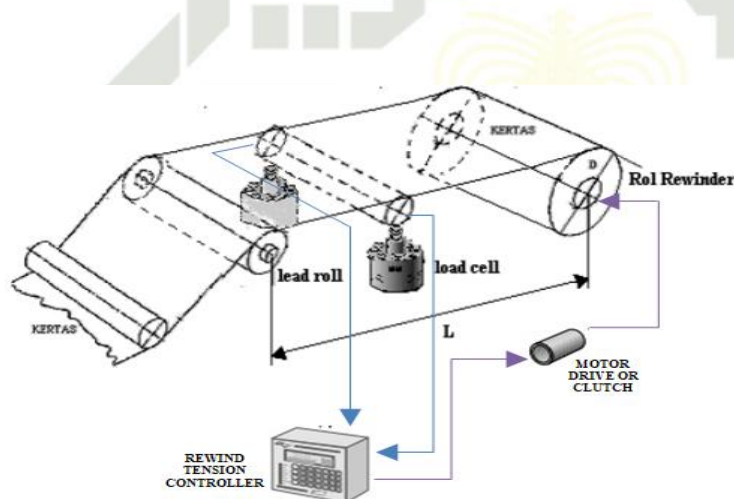
Berdasarkan kajian pustaka di atas tentang pengendali *Model Predictive Control (MPC)* yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya menyatakan bahwa pengendali ini mampu mengikuti respon sistem yang diberikan dan bisa diterapkan dalam pengaturan tegangan pada *rewinder roll*. Melihat penelitian sebelumnya sudah cukup bagus namun masih terdapat *overshoot* dan *error steady state* dan untuk pemodelan matematis Totok R. Biyanto belum ada yang menggunakan pengendali tersebut. Sehingga penulis ingin melaksanakan penelitian dengan menggunakan pengendali *Model Predictive Control (MPC)* karena efektif dalam mengatasi permasalahan respon *transient* seperti *overshoot* dan *error steady state*.

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

Landasan Teori

Winder Machine

Winder machine merupakan mesin yang mempunyai fungsi untuk melakukan pemotongan gulungan kertas berukuran besar (jumbo roll) ke bentuk gulungan yang berukuran kecil, mesin ini ditempatkan setelah proses pengeringan (dryer)[5]. *Winder machine* mempunyai sistem mekanik *Rewinder roll* yang bekerja berlawanan arah. *Rewinder roll* berfungsi sebagai penggulung kertas, dan *roll unwinder* berfungsi sebagai pengumpan kertas dari gulungan berukuran jumbo. Perubahan ketegangan kertas yang dapat menimbulkan permukaan kertas terlalu kencang atau terlalu kendur diperlukan kondisi dimana ketegangan permukaan kertas antara *Rewinder Roll* dan *lead roll* selalu diperhatikan[4]. Pada tahap inilah peranan dari *web tension* untuk memastikan keluaran dari *winder machine* tidak menghasilkan kerutan, dan seluruh permukaan kertas halus dengan gulungan yang padat.



Gambar 2. 1 Rewinder Roll [4]

Proses kontrol tegangan kertas terjadi ketika *load cell* yang digunakan untuk mengukur tegangan kertas merasakan beban atau gaya yang dihasilkan dari tegangan kertas dalam proses penggulangan. Load Cell adalah alat elektromekanik yang biasa disebut transducer, yaitu gaya yang bekerja berdasarkan prinsip deformasi sebuah material akibat adanya tegangan mekanis yang bekerja, kemudian mengubah gaya mekanik menjadi sinyal listrik. Untuk menentukan tegangan berdasarkan hasil penemuan Robert Hooke, bahwa hubungan antara tegangan mekanis dan deformasi yang terjadi disebut regangan. Regangan ini terjadi pada lapisan kulit dari bahan sehingga memungkinkan untuk mengukur sensor regangan atau strain Gauge *Load cell* ini terhubung dengan perangkat yang menampilkan nilai tegangan kertas (*rewind tension controller*) dan mengontrol torsi motor pada gulungan

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

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

Rewinder secara otomatis. Operator memasuki pengaturan tegangan yang diinginkan (titik penyesuaian tegangan) dan tindakan korektif yang benar dilakukan secara otomatis dengan mengubah torsi motor pada gulungan penggulung. Pengontrol tegangan mundur terus-menerus memantau titik pengaturan tegangan dan secara otomatis menyesuaikan tingkat tegangan untuk mempertahankan tegangan kertas yang diinginkan.

Dalam proses penggulungan kertas *Tension* kertas diatur oleh sistem rem yang dipasang pada roll *unwinder*. Sistem rem memberikan tekanan pada gulungan sehingga kertas menjadi tegang. Aplikasi tension kertas yang terlalu rendah mengakibatkan kertas tidak dapat digulung dengan padat, sehingga gulungan kertas menjadi gembos. *Tension* kertas yang terlalu tinggi mengakibatkan kertas bergelombang dan cacat yang sering dialami berupa gulungan yang tidak rata seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 2 Kertas cacat (*wrinkle*) [6]

2.2.2 Pemodelan Dinamika *Web Tension* pada *Rewinder roll*

Pemodelan matematis ini adalah gambaran dari proses yang masalah yang ada dan dituangkan ke dalam bentuk matematika sehingga permasalahan yang ada lebih jelas karena telah diubah ke dalam bentuk model atau gambar[14]. Pada penelitian ini dinamika plant akan dimodelkan dalam bentuk single output dan single input yang mana, torsi motor sebagai *manipulated variable* (input) dan tegangan sebagai *process variable* (output). Pemodelan dinamika kertas pada penelitian ini mengasumsikan bahwa[15]. Sebelum membuat pemodelan matematis, terlebih dahulu membuat asumsi-asumsi terhadap *web tension*[8], yaitu:

1. Percepatan V_1 pada lead roll adalah konstan
2. Lebar melintang kertas adalah sama
3. Strain / $\varepsilon \ll 1$
4. Kertas elastis
5. Kepadatan kertas tidak ada perubahan

$$\rho = \rho_u + 1 \quad (2.1)$$

Pemodelan dinamika kertas yaitu sebagai berikut:

$$\frac{d(\rho AL)}{dt} = \rho_1 A_1 V_1 - \rho AV \quad (2.2)$$

Persamaan 2.1 adalah neraca massa untuk lebar kertas antara *lead roll* dan *Rewinder Roll*, terdiri dari:

- a. Perubahan keseluruhan lembar kertas antara *lead roll* dan *Rewinder Roll*.

$$\frac{d(\rho AL)}{dt}$$

- b. Neraca material yang masuk ke *lead roll* dan material yang digulung pada *Rewinder Roll*.

$$\rho_1 A_1 V_1 - \rho AV$$

Dimana:

ρ = Resivitasi(kepadatan kertas)

A = Luas permukaan pada lembaran kertas

L = Panjang kertas

V = Kecepatan

Persamaan dibawah ini menyatakan hukum elastisitas dalam menentukan ketegangan pada plant:

$$\sigma = E\varepsilon + C \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad \sigma = \frac{T}{A} \quad (2.3)$$

Untuk menentukan strain/regangan dan kontinuitas massa dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\varepsilon = \frac{L-L_u}{L_u}, \quad \rho AL = \rho_u A_u L_u \quad (2.4)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi seperti persamaan di bawah ini untuk menentukan karakteristik dinamika torsi di daerah *Rewinder Roll*:

$$L \frac{dT}{dt} = EA(V - V_1) - TV_1 + CA \frac{d}{dt}(V - V_1)$$

Dimana:

σ = Tegangan pada *web tension*

ε = Regangan pada *web tension*

L = Panjang antara *lead roll* dan *Rewinder Roll*

A = Luas melintang kertas

E = Modulus Elastisitas *Young* pada kertas

V = Kecepatan pada *Rewinder Roll*

V_1 = Kecepatan pada *lead roll*

C = Modulus redaman kertas

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Dengan penurunan rumus sebagai berikut:

$$L \frac{dT}{dt} = EA(V - V_1) - TV_1 + CA \frac{d}{dt}(V - V_1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EA(V - V_1) - TV_1 + CA \frac{d}{dt}(V - V_1)}{L}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EA(V - V_1) + CA \frac{d}{dt}(V - V_1) - TV_1}{L}$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{EA + CA \frac{d}{dt}}{L} (V - V_1) - \frac{TV_1}{L}$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{TV_1}{L} = \frac{EA + CA \frac{d}{dt}}{L} (V - V_1)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{V_1}{L}\right) T = \frac{EA + CA \frac{d}{dt}}{L} (V - V_1)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + \frac{V_1}{L}\right) T = \frac{EA + CA \frac{d}{dt}}{L} (V - V_1)$$

$$\frac{EA + CA \frac{d}{dt}}{\frac{d}{dt} + \frac{V_1}{L}} = \frac{T}{(V - V_1)}$$

$$\frac{EA + \frac{CA}{L} \frac{d}{dt}}{\frac{d}{dt} + \frac{V_1}{L}} = \frac{T}{(V - V_1)} \tag{2.6}$$

Maka dari persamaan 2.6 didapatkan persamaan Laplace sebagai berikut:

$$\frac{EA + \frac{CA}{L} S}{s + \frac{V_1}{L}} = \frac{T}{(V - V_1)} \tag{2.7}$$

Persamaan 2.7 di atas mencerminkan dinamika yang domain dari daerah *rewinder* untuk disimulasikan serta dianalisa.

Bagian yang dimanipulasi meliputi motor, *gearbox*, dan *rewinder roll*. Dengan menggunakan hukum Newton kedua persamaan *rewinder* adalah:

$$\sum \tau(t) = J\alpha(t) \tag{2.8}$$

Dimana:

α = Percepatan Rotasi

J = Konstanta Inersia

τ = Momen Puntir atau Torsi

Gaya putar atau torsi masukan $\tau(t)$, yang diterapkan pada massa yang dapat diputar dengan inersia massa J , akan menyebabkan terjadi putaran dengan sudut putar $\theta(t)$, dengan kecepatan dan percepatan sudut putar sebesar $\omega(t)$ dan $\alpha(t)$. Adanya sifat-sifat fisik massa mekanik berputar, dapat menyebabkan timbulnya gaya-gaya putar (torsi) lawan, yaitu masing-masing torsi gesek viskos $\tau_b(t)$, dengan persamaan[8]:

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

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

$$\tau_b(t) = B\omega(t) \tag{2.9}$$

Dimana:

- ω = Kecepatan Rotasi
- B = Koefisien Gesek
- τ_b = Momen Putar atau Torsi gesek

Maka persamaan 2.8 dan persamaan 2.9 dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum \tau(t) &= J\alpha(t) \\ \tau(t) - \tau_b(t) &= J\alpha(t) \\ \tau(t) - B\omega(t) &= J\alpha(t) \\ \tau(t) &= J\alpha(t) + B\omega(t) \end{aligned} \tag{2.10}$$

Selain itu hubungan antara kecepatan sudut putar $\omega(t)$ dan percepatan sudut putar $\alpha(t)$, dijabarkan dengan persamaan berikut[8]:

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} \tag{2.11}$$

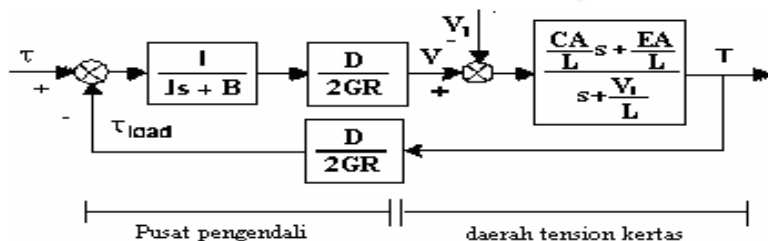
Dari persamaan 2.11 yang disubstitusikan ke persamaan 2.10, maka didapatkan persamaan torsi yang dihasilkan motor yang kemudian di transfer untuk memutar beban, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tau(t) &= J\alpha(t) + B\omega(t) \\ \tau(t) &= J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \end{aligned} \tag{2.12}$$

Maka dari persamaan 2.12 didapatkan persamaan Laplace sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \tau(t) &= Js\omega(t) + B\omega(t) \\ \tau(t) &= (Js + B)\omega(t) \\ \frac{\omega(t)}{\tau(t)} &= \frac{1}{(Js + B)} \end{aligned} \tag{2.13}$$

Berdasarkan persamaan 2.6 dan 2.13, blok diagram *web tension* dapat dilinierisasikan sebagai berikut:



Gambar 2. 3 Diagram Blok Web Tension [4]

Berdasarkan blok diagram di atas didapatkan fungsi transfer orde kedua dalam domain-s mulai dari torsi motor sampai *tension* lembar kertas adalah sebagai berikut [9]:

$$\frac{T(s)}{\tau(s)} = \frac{\frac{D EA}{2GRJL} \left(\frac{C}{E}s+1\right)}{s^2 + \left(\frac{B}{J} + \frac{V_1}{L} + \frac{D^2 CA}{4GR^2 JL}\right)s + \left(\frac{BV_1}{JL} + \frac{D^2 EA}{4GR^2 JL}\right)} \quad (2.14)$$

2.3 Sistem Kendali

Sistem kendali dirancang untuk mengendalikan, mengarahkan, dan mengatur baik secara aktif maupun dinamis. Untuk perancangan sistem kendali, sistem disesuaikan dengan keinginan perancang[16]. Sistem kontrol adalah berbagai komponen yang bekerja sama untuk mendapatkan fungsi yang diinginkan dilakukan secara efisien dan akurat. Saat ini, dalam teori dan penerapan kontrol, banyak karakteristik optimal telah diusulkan untuk operasi otomatis yang sering dilakukan berulang kali, dan sudah banyak insinyur dan ilmuwan yang memahami kontrol otomatis.[17].

Istilah dalam sistem kendali adalah sebagai berikut:

1. *Plant* adalah peralatan dan instrumen yang berfungsi sebagai komponen dari sistem yang dikendalikan seperti peralatan mekanik.
2. Proses ialah prosedur dan mekanisme yang dikendalikan seperti pada plant contohnya kendali web tension pada sistem *rewinder roll*
3. Variabel terkendali adalah kondisi yang diukur serta dikendalikan.
4. Variabel termanipulasi ialah kondisi yang diubah oleh kendali sehingga dapat mempengaruhi nilai variabel terkendali, biasanya keluaran sistem.
5. Kendali umpan balik. Saat adanya gangguan, perbedaan antara keluaran dengan masukan acuan sulit diprediksi yang berakibat tujuan pengoperasian suatu sistem tidak terpenuhi. Oleh karena itu, dibutuhkan umpan balik keluaran supaya bisa dibandingkan dengan input acuan agar selisih perbedaan bisa dikendalikan dan diminimalisir secara otomatis.
6. Gangguan pada sistem riil sering berpengaruh pada keseimbangan kerja sistem, gangguan ini disebabkan oleh permasalahan internal atau eksternal.

2.3.1 Sistem Orde Dua

Pemodelan *plant rewinder roll* adalah sistem orde dua, sistem orde dua dinyatakan dalam persamaan di bawah ini:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.15)$$

dimana:

K = Gain overall

ω_n = Frekuensi alami tak teredam

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

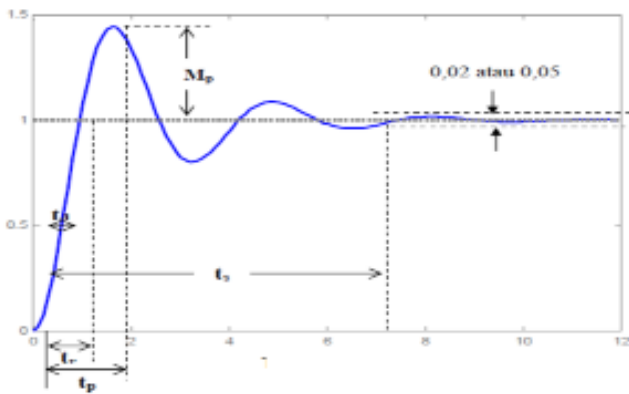
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan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

ζ = Rasio redaman

Karakteristik respon transien sistem orde kedua pada Gambar 2.4 terdiri dari:

1. Spesifikasi teoritis
Frekuensi alami tak teredam (ω_n) dan rasio redaman (ζ)

2. Spesifikasi praktis
Diperoleh dengan asumsi respon sistem orde kedua dalam keadaan (*underdamped*).



Gambar 2. 4 Karakteristik Respon Waktu Orde 2[17]

Spesifikasi praktis orde dua terdiri dari:

1. *Delay Time* (t_d)
Delay Time adalah waktu yang diperlukan oleh respon *output* untuk mencapai 50% dari nilai *steady state* tunak untuk waktu yang pertama.
2. *Rise Time* (t_r)
Rise Time adalah waktu yang diperlukan oleh respon *output* untuk naik dari 5% menjadi 95% dari nilai *steady state*.
3. *Peak Time* (t_p)
Waktu puncak adalah waktu yang dibutuhkan respon *output* untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.
4. *Overshoot* maksimum (M_p)
Overshoot maksimum merupakan nilai puncak kurva respon diukur dari satuan

$$M_p = \frac{c(t_p) - c_\infty}{c_\infty} 100\% \quad (2.16)$$
5. *Settling Time* (t_s)
Waktu tunak adalah waktu yang diperlukan kurva respons untuk mencapai dan tetap berada dalam nilai akhir dari ukuran yang disederhanakan dengan

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.

persentase absolut dari harga akhirnya terkait dengan jumlah sistem kontrol, biasanya 2% atau 5%.

Karakteristik respon keadaan tunak (*steady state*)

Sistem orde dua diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau *error steady state* (e_{ss}). Besarnya kesalahan pada keadaan tunak adalah

$$e_{ss} = C_{ss} - R_{ss}$$

Dimana :

$$e_{ss} = \text{Error Steady State}$$

C_{ss} = Masukan sistem pada *steady state*

R_{ss} = Keluaran sistem pada *steady state*

2.4 Transformasi Bilinear dan Teorema Shannon

Model Predictive Control (MPC) harus menggunakan model *state space* untuk memprediksi respons di masa depan, dan *plant* ini masih menggunakan *transfer function* orde kedua, yang diubah menggunakan transformasi bilinear ke persamaan transformasi Z[18]:

$$s = \frac{2}{T_s} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \tag{2.17}$$

Dengan penentuan nilai T_s (*time sampling*) pada transformasi bilinear harus mengikuti ketentuan dari *teorema shannon* berikut:

$$\frac{tr}{10} \leq T_s \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } T_s < td \tag{2.18}$$

Nilai T_s ini selanjutnya akan digunakan mencari bentuk *state space* diskrit untuk perancangan *Model Predictive Control* (MPC).

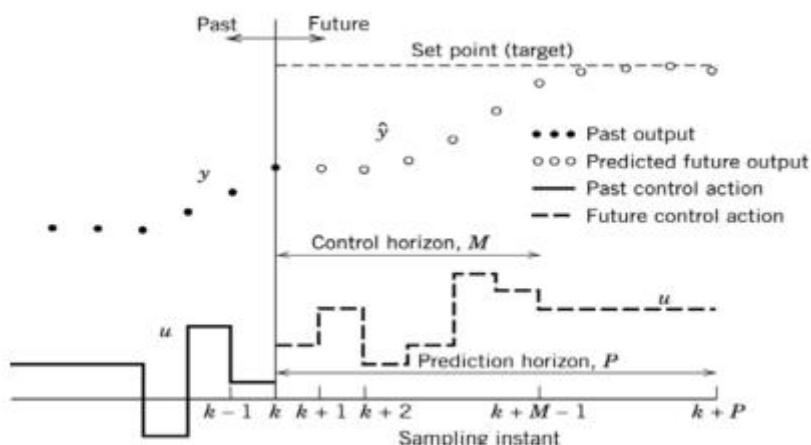
2.5 Model Predictive Control (MPC)

Model kontrol prediktif (MPC) merupakan metode pengendalian sistem dengan memprediksi perilaku masa depan. Model Predictive Control (MPC) adalah sistem kontrol umpan balik yang membantu mengelola sistem multi-input multi-output dimana ada interaksi antara input dan output. Model kontrol prediktif (MPC) adalah teknik yang menyelesaikan masalah optimasi dengan kesalahan antara referensi dan jalur prediksi. Hal ini memungkinkan proses pengoptimalan bekerja secara non-sistematis, yang dapat menghasilkan hasil yang lebih akurat[19].

Keunggulan *Model Predictive Control* (MPC) dibandingkan dengan pengendali lain diantaranya adalah[18] :

1. Penerapan pada *plant* mudah dilakukan
2. Mudah dinalarkan
3. Mempunyai kompensasi terhadap *time delay*
4. Sistem yang ditangani mampu lebih dari satu variabel
5. Pengontrolan multivariabel yang mengatur keluaran secara bersamaan dengan memperhitungkan semua interaksi antara variabel sistem
6. Mempunyai kemampuan pengendali umpan balik untuk mentoleransi gangguan yang terukur
7. Bisa menghitung batasan pada sistem dalam mendesain kendali
8. Memberi input informasi referensi di masa mendatang kedalam masalah kontrol dalam peningkatan kinerja pengontrolan.

Konsep dasar *Model Predictive Control* (MPC) adalah nilai yang akan datang dari variabel output yang diprediksi menggunakan model dinamik dari suatu proses dan pengukuran saat ini. Perhitungan aksi pengaturan didasarkan pada pengukuran prediksi yang akan datang pada saat ini[18]. Prinsip kerjanya yaitu menggunakan model sistem sebagai prediksi keluaran di masa depan dalam rentang N atau *horizon*, menghitung sinyal kendali untuk meminimalkan *objective function* yang telah ditetapkan untuk menjaga sinyal keluaran proses sedekat mungkin dengan karakteristik sistem dan sinyal keluaran berikutnya mengikuti perhitungan yang menggunakan sinyal kendali sebelumnya.



Gambar 2. 5 Konsep Dasar Model Predictive Control (MPC)[10]

2.5.1 Model State Space

Sistem *Model Predictive Control* (MPC) dirancang dari model matematika *plant*. Pengubahan model *plant* dimanipulasi menjadi model *state space* akan dibutuhkan untuk

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

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

memprediksi respon kedepan yang diwakilkan oleh variabel saat ini. Diasumsikan *plant* sebagai *single input single output* (SISO) yang dijelaskan oleh [18]:

$$x_m(k + 1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \tag{2.19}$$

$$y(k) = C_m x_m(k) \tag{2.20}$$

di mana:

- $u(k)$ = variabel *input*
- y = *process output*
- x_m = vektor variabel *state*.

Dengan sistem tersebut memiliki $u(k)$ sebagai *inputnya* dan tidak mempengaruhi *output* $y(k)$. Mengambil operasi delta pada persamaan (2.19), 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:

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

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

dan delta variabel *control* dapat dinotasikan sebagai berikut:

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

sehingga persamaan (2.19) *state space* nya adalah:

$$\Delta x_m(k + 1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \tag{2.21}$$

dengan catatan *input* model *state space* adalah $\Delta u(k)$. Selanjutnya adalah menghubungkan $\Delta x_m(k)$ ke *output* $y(k)$ dan di bentuk vektor variabel *state* baru:

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

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

atau

$$y(k + 1) - y(k) = C_m A_m \Delta x_m + C_m B_m \Delta u(k) \tag{2.22}$$

2.5.2 Controllable Cannonical Form

Kendali *Model Predictive Control* (MPC) membutuhkan pemodelan fungsi alih yang baik supaya kendali yang dirancang bisa bekerja secara maksimal. Fungsi alih yang didapatkan tidak dapat langsung digunakan melainkan diubah ke dalam bentuk *controllable canonical form* [19].

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{1z^2 + a_1 z + a_2} \tag{2.23}$$

$$\begin{bmatrix} x_1(k + 1) \\ x_2(k + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \tag{2.24}$$

$$y(k) = [b_2 - a_2b_0 \quad b_1 - a_1b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

2.5.3 Desain Augmented Model

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.21) dan (2.22) dibentuklah menjadi model *state space*nya

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 0_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$$

di mana $0_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$. A, B, C merupakan *augmented model* yang dipakai dalam rancangan *predictive control*[19].

2.5.4 State Prediksi dan Variabel Output

Proses berikutnya dalam perancangan sistem *Model Predictive Control* (MPC) yaitu menghitung *output plant* yang diprediksi menggunakan sinyal kontrol yang akan datang sebagai variabel yang bisa diatur[18]. Variabel kontrol yang akan datang dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \dots, \Delta u(k_i + N_c + 1)$$

Dengan asumsi bahwa k_i adalah instan sampling, *state* $x(k_i)$ memberikan informasi *plant* saat ini. N_c atau *control horizon* yaitu jumlah langkah berkelanjutan yang diprediksi oleh *Model Predictive Control* (MPC) dalam suatu waktu sampling. Dengan informasi yang diberikan $x(k_i)$, variabel *output* yang akan diprediksi untuk N_p , dimana N_p yaitu *prediction horizon*[18]. Variabel *output* yang akan datang sebagai :

$$x(k_i + 1|k_i), x(k_i + 2|k_i), \dots, x(k_i + m|k_i), \dots, x(k_i + N_p|k_i) \quad (2.27)$$

dimana $x(k_i + m|k_i)$ adalah 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 nilai N_p . Setelah itu, nilai *output* terprediksi (F) dan variabel yang akan datang (Φ) bisa dihitung dengan persamaan (2.28).

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (2.28)$$

dimana matriks F, Φ dan ΔU diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

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

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.5.5 Indeks Performansi Model Predictive Control (MPC)

Dalam *Model Predictive Control (MPC)*, diperlukan proses optimasi yang dapat membantu meminimalkan kesalahan yang disebabkan oleh perbedaan antara nilai referensi dan nilai keluaran plant. Optimasi dilakukan dengan menentukan nilai dan parameter indeks kinerja yang mencerminkan tujuan kontrol yang diinginkan dari algoritma *Model Predictive Control (MPC)*. Dengan mengasumsikan bahwa data vektor yang berisikan informasi *set point* adalah:

$$R_s^T = \overbrace{[1 \ 1 \ \dots \ 1]}^{N_p} r(k_i) \quad (2.31)$$

dan mendefinisikan *cost function J* yang mencerminkan objektif kontrol sebagai:

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (2.32)$$

R_s merupakan vektor sinyal referensi atau sinyal *set point* yang dituliskan pada persamaan (2.31). Pada persamaan (2.32) indeks performansi J berguna untuk mengurangi *error* yang terjadi antara nilai *output* yang terprediksi dengan *set point* yang diinput. Persamaan $\Delta U^T \bar{R} \Delta U$ untuk menunjukkan seberapa besar nilai ΔU yang akan dihasilkan ketika indeks performansi J dibuat seminimal mungkin. Matriks \bar{R} adalah matriks diagonal yang berbentuk $r_w I_{N_c \times N_c}$ ($r_w \geq 0$) digunakan untuk parameter tuning kendali *Model Predictive Control (MPC)*. Pada saat nilai $r_w = 0$, indeks performansi J akan mempunyai objektif untuk meminimalkan nilai *error* dari $(R_s - Y)^T (R_s - Y)$ sekecil mungkin dengan mengabaikan besar nilai ΔU [18].

Dengan memasukkan persamaan (2.31) ke persamaan (2.32) dan diturunkan terhadap delta U sama dengan nol maka akan memperoleh persamaan solusi optimal kontrol seperti persamaan (2.33) dengan *set point* $r(k_i)$:

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.33)$$

$$\Delta U(k_i) = \overbrace{[1 \ 0 \ \dots \ 0]}^{N_c} (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T (\bar{R}_s r(k_i) - Fx(k_i)) \quad (2.34)$$

Nilai optimal parameter pada ΔU adalah vektor yang memiliki sinyal kontrol $\Delta u(k_i + 1|k_i) \ \Delta u(k_i + 2|k_i) \ \dots \ \Delta u(k_i + N_c + 1)$. Disebabkan oleh prinsip dari *Receding Horizon Control (RHC)*, pengimplementasian sampel pertama dengan mengabaikan urutan selanjutnya. Ketika periode sampling berikutnya datang, nilai

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

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.

pengukuran yang terbaru diambil dari *state vector* ($k_i + 1$) untuk perhitungan sinyal kontrol yang baru. Oleh sebab itu, sinyal kontrol dari persamaan (2.33) dapat ditulis sebagai berikut:

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

atau

$$\Delta U = K_y r(k_i) - K_{mpc} x(k_i) \tag{2.35}$$

Kemudian untuk *gain Model Predictive Control* (MPC) dimana K_y ialah baris pertama dari matriks

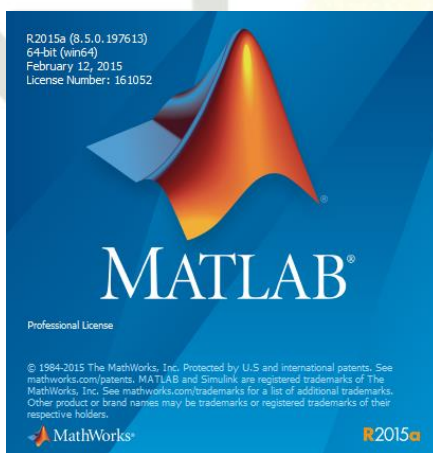
$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \tag{2.36}$$

dan K_{mpc} merupakan baris pertama dari matriks

$$(\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} \Phi^T F \tag{2.37}$$

2.6 Program Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi dengan kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam sebuah lingkungan tunggal[18].



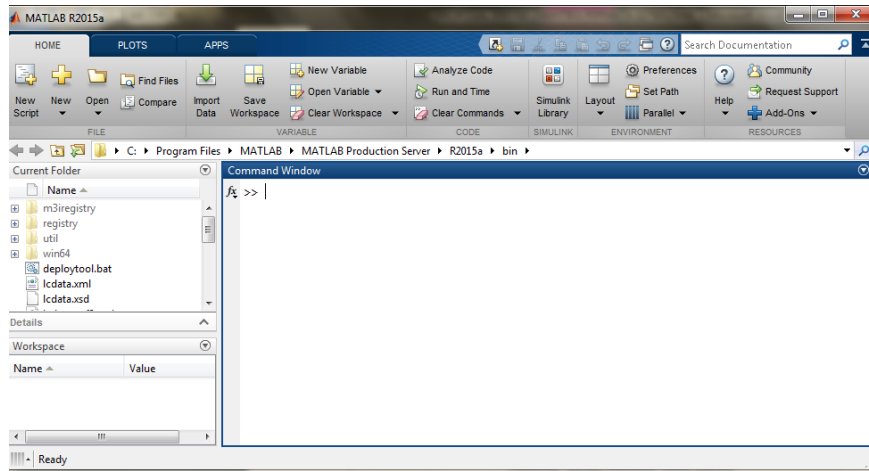
Gambar 2.6 Matlab 2015 a

Dalam studi ini, penggunaan Simulink menguntungkan dalam pemodelan dan simulasi sistem. Sistem simulasi yang diinginkan memiliki perilaku yang mirip dengan sistem fisik, simulasi dapat membantu dalam proses analisis dan desain sistem. Simulink dapat menampilkan kinerja sistem dalam dua atau tiga dimensi[18]. Pengguna menjadi lebih mudah untuk mendesain plant dengan diagram blok yang mudah diatur sesuai dengan model matematis plant yang akan dikendalikan.

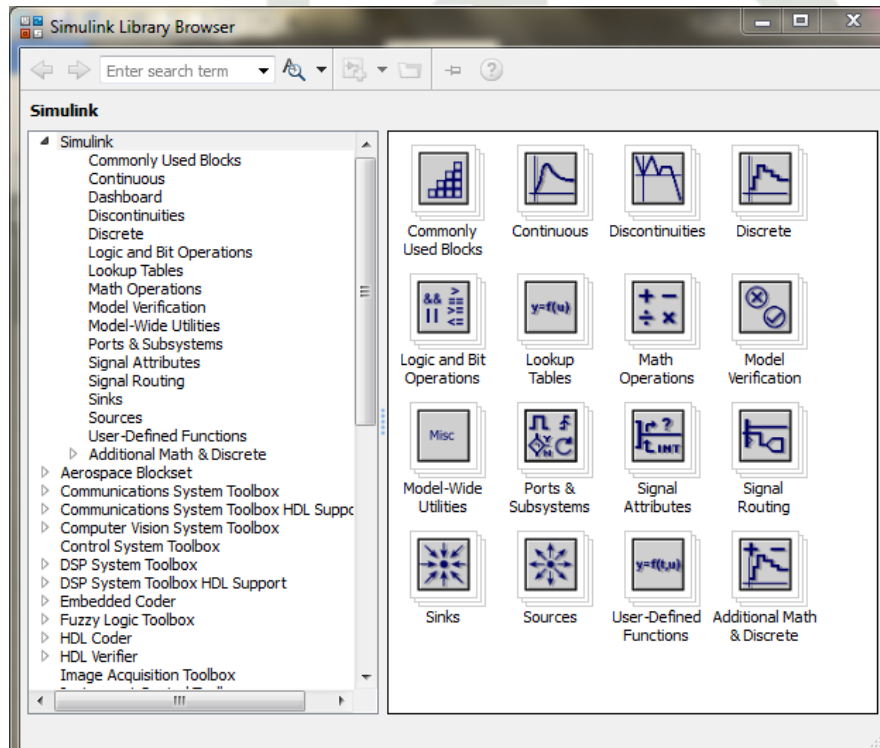
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Dalam penelitian ini, pemodelan dan pemrograman simulasi digunakan untuk mencapai hasil penelitian yang diinginkan. Fitur Matlab yang digunakan untuk simulasi ini disebut Simulink.



Gambar 2. 7 Tampilan Model Simulink pada Matlab

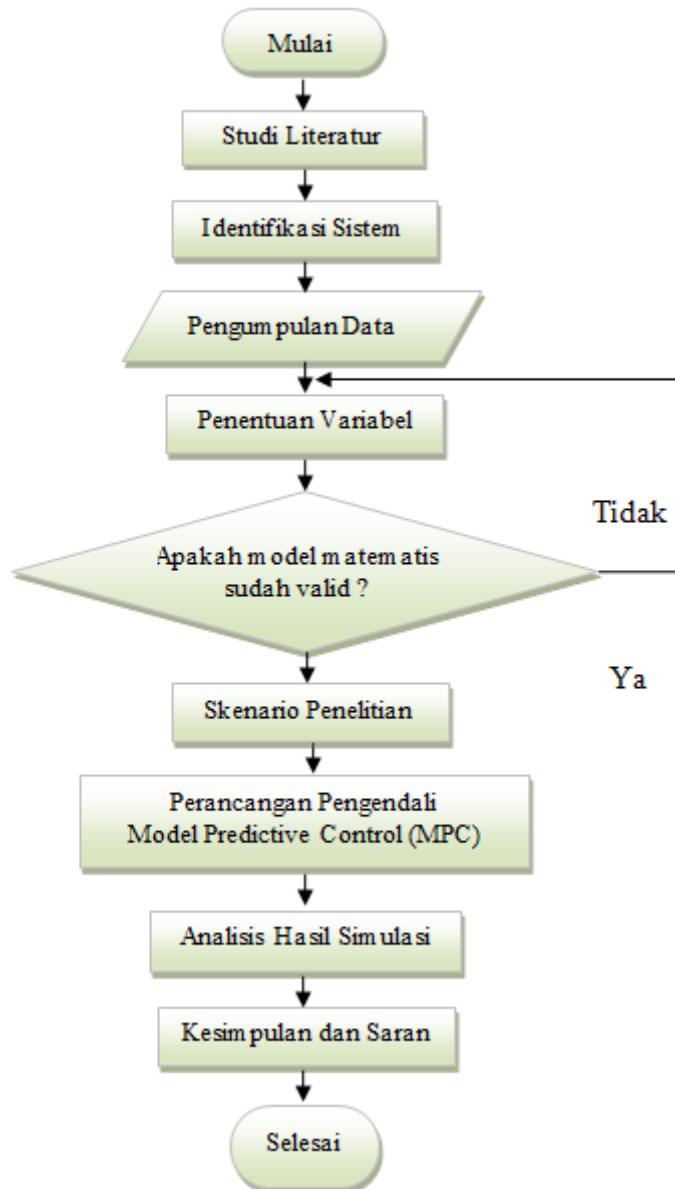


Gambar 2. 8 Kotak Dialog Simulink Library

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Flowchart Metode Penelitian

Dalam penelitian ini tahapan tahapan yang akan dilakukan peneliti yaitu penentuan judul, perumusan masalah, tujuan yang diharapkan dari penelitian yang dilakukan, proses pemodelan matematis sistem, perancangan pengendali hingga mendapatkan hasil akhir dalam penelitian tugas akhir. Jenis penelitian tugas akhir ini jenis berupa simulasi. Langkah langkah penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat melalui *flowchart* berikut:



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian, tahapan penelitian berdasarkan *flowchart* yang harus dilalui antara lain:

1. Studi literatur

Langkah awal dalam penelitian ini adalah mempelajari sumber sumber terkait penelitian yang relevan, antara lain jurnal, buku, makalah, dan sumber lainnya. Penelitian ini akan membahas *web tension* pada sistem *rewinder roll* dan pengontrol MPC.

2. Identifikasi Sistem

Pada penelitian tugas akhir ini masalah yang diangkat adalah performansi sistem menggunakan rancangan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) dalam mengatasi *error steady state* dan osilasi yang dihasilkan oleh sistem.

3. Pengumpulan data

Dalam pengumpulan data dari plant yang akan diteliti perlu untuk mengetahui karakteristik plant yang akan digunakan seperti perancangan pengendali, setpoint yang bernilai 0.5N dan ketetapan yang dipakai pada *transfer function* sistem adalah:

$$TF = \frac{a}{bs^2+cs+d} \tag{3.1}$$

4. Penentuan variabel

Pada tahap pengumpulan data ini nilai dari masing masing variabel didapatkan. variabel-variabel yang telah didapatkan dimasukan dalam persamaan model matematis sistem pada persamaan 2.

kemudian variabel-variabel tersebut dimasukkan ke dalam pemodelan matematis sistem pada persamaan 2. dalam bentuk *transfer function*

$$\frac{T(s)}{\tau(s)} = \frac{\frac{D EA}{2GRJL} (\frac{C}{E} s + 1)}{s^2 + \left(\frac{B}{J} + \frac{V_1}{L} + \frac{D^2 CA}{4GR^2 JL} \right) s + \left(\frac{BV_1}{JL} + \frac{D^2 EA}{4GR^2 JL} \right)} \tag{3.2}$$

5. Validasi model matematis sistem *rewinder roll*

Validasi model matematis sistem adalah tahap pengujian model matematis dalam bentuk *transfer function* dari sistem yang sudah diubah ke dalam bentuk bahasa pemrograman Matlab *Simulink*.

6. Skenario Penelitian

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

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Skenario penelitian menggambarkan tahapan umum penelitian yang dilakukan, seperti pengujian yang dilakukan pada sistem atau *plant*.

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

Peneliti memodelkan pengontrol Model Predictive Control (MPC) untuk memastikan bahwa respon keluaran sistem mengikuti nilai *set point* yang diberikan dalam jurnal referensi.

8. Analisa hasil pengujian

Pada tahap ini peneliti menganalisis keluaran sistem sebelum dan sesudah pengontrol dipasang. Jika penelitian yang dilakukan telah berhasil, jika sebaliknya perlu penelitian lebih lanjut.

9. Kesimpulan

Setelah menganalisis data dan memenuhi tujuan, penelitian ini berhasil. Sehingga dapat ditarik kesimpulan dan direkomendasi untuk studi lebih lanjut dapat dibuat.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari data-data yang diperlukan dari studi-studi terkait guna menentukan set point yang akan digunakan. Berdasarkan studi yang relevan ditinjau, set point yang digunakan sebesar 0.5 N[4].

3.4 Pemodelan Matematis Rewinder Roll

Dari model fungsi alih sistem *rewinder roll* yang terdapat dalam persamaan 2.7 digunakanlah parameter seperti dalam tabel pada penelitian ini.

Tabel 3.1 Parameter *rewinder roll*[4]

No	Parameter	Keterangan	Nilai
1	D	Diameter <i>rewinder roll</i>	1,0561 m
2	GR	<i>Gear ratio</i>	3
3	J	Total inersia pada motor	144,967
4	A	Luas melintang kertas	$1,72 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
5	V_1	Kecepatan kertas pada <i>lead roll</i>	152 m/sec
6	L	Panjang antara <i>lead roll</i> dan <i>rewinder roll</i>	5 m
7	C	Modulus redaman kertas	5 sec/m^2
8	B	Koefisien gesek pada motor penggerak	$2,23 \times 10^{-3} \text{ N m/rad/sec}$
9	E	Modulus elastisitas <i>young</i> pada kertas	17190^6 N/m^2

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Transfer function yang didapatkan setelah memasukkan nilai parameter yang ada dalam tabel 3.1 sebagai berikut:

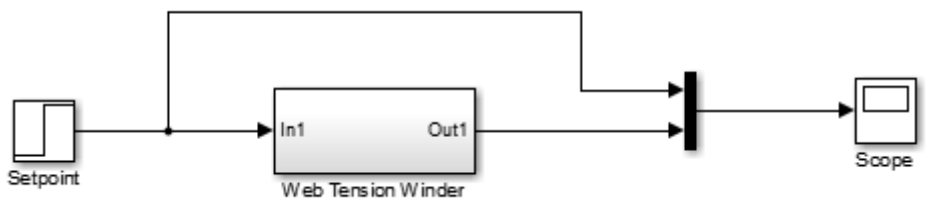
$$\frac{T(S)}{\tau(S)} = \frac{\frac{1.056 m (1719 \times 10^6 N/m^2 \times (1.72 \times 10^{-3} m^2))}{2(3) (144.967 kgm^2) (5m)} \left(\frac{5 Nsec/m^2}{1719 \times 10^6 N/m^2} s + 1 \right)}{s^2 + \left(\frac{2.25 \times 10^{-3} Nm/rad/sec}{144.967 kgm^2} + \frac{152 m/sec}{5m} + \frac{1.056^2}{4(3)^2} \times \frac{5 Nsec/m^2 \times 1.72 \times 10^{-3} m^2}{144.967 kgm^2 \times 5m} \right) s + \frac{2.25 \times 10^{-3} Nm/sec}{144.967 kgm^2} \times \frac{152 m/sec}{5m} + \frac{1.056^2}{4(3)^2} \times \frac{1719 \times 10^6 N/m^2 \times 1.72 \times 10^{-3} m^2}{144.967 kgm^2 \times 5m}} \quad (3.3)$$

$$\frac{T(S)}{\tau(S)} = \frac{2.088 \times 10^{-6} s + 717.922}{s^2 + 31.9885s + 173.535237} \quad (3.4)$$

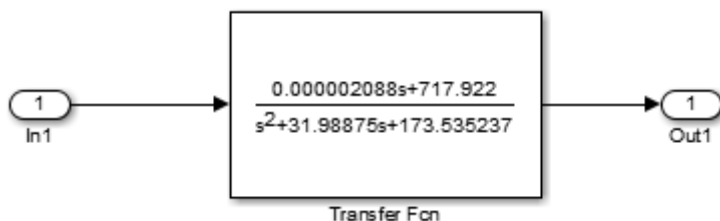
3.5 Verifikasi Pemodelan Matematis

Validasi rancangan model matematis pada sistem *rewinder roll* menggunakan pengujian *Simulink* Matlab R2015a, cara yang digunakan untuk sistem ini yaitu dengan disimulasikan secara *Open Loop* dengan memasukkan nilai pada persamaan 3.4

Simulasi dinamika yang akan digunakan pada sistem *rewinder roll* berbentuk *single input* dan *single output* dalam blok diagram, dengan torsi motor sebagai *manipulated variable (input)* dan *tension* sebagai *process variable (output)*. Simulasi tersebut dapat dilihat pada gambar berikut:

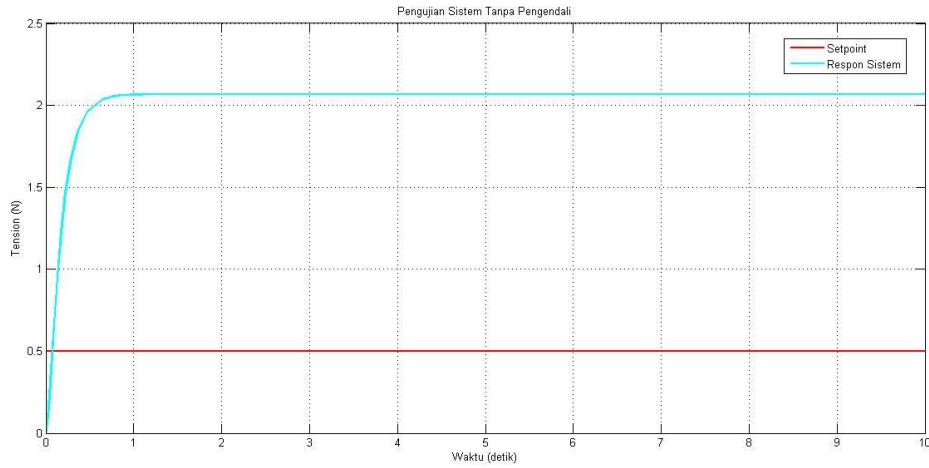


Gambar 3. 1 Rangkaian *Simulink Open Loop* pada Sistem *Roll rewinder*



Gambar 3. 2 Subsistem Blok *Rewinder Roll*

Setelah merancang diagram blok *Simulink* sistem tersebut, lalu sistem disimulasikan dan menghasilkan grafik yang menampilkan respon keluaran sistem secara *Open Loop*. Grafik respon keluaran sistem dalam dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 4 Respon Sistem secara *Open Loop* pada *Rewinder Roll*

Setelah dilakukan pengujian hasil dari *open loop* tanpa pengendali di atas menghasilkan keluaran yang sudah stabil pada sistem namun tidak mampu dalam menyesuaikan dengan nilai *set point* yang telah ditentukan sebagaimana penelitian sebelumnya. Untuk itu model matematis dari sistem *rewinder roll* ini sudah valid. Pada gambar 3.4 diatas menunjukkan nilai *set point* sebesar 0.5 N, namun hasil respon keluaran sistem menunjukkan nilai melewati 2 N dalam waktu kurang dari 1 detik untuk mencapai keadaan stabil dan memiliki *error steady state* sebesar 1.6 N.

3.6 Skenario Penelitian

Penelitian ini menggunakan model matematika *Model Predictive Control (MPC)* untuk menginput data yang didapatkan pada rancangan model matematika sebelumnya ke dalam program Matlab, berdasarkan parameter penelitian yang terkait dengan *set point* 0.5N. Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui *respon transien* dari pengujian tersebut. Tes dilakukan.

1. Simulasi sistem secara *open loop*
2. Simulasi menggunakan pengendali *Model Predictive Control (MPC)*
3. Simulasi pengujian dengan menggunakan beban yang bervariasi

3.7 Perancangan Pengendali *Model Predictive Control (MPC)*

Tujuan dari perancangan *Model Predictive Control (MPC)* adalah untuk menjaga ketegangan pada range yang diinginkan. Web tension pada sistem *rewinder roll* ini harus stabil agar ketegangan yang dihasilkan sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Setelah mendapatkan fungsi alih sistem, langkah selanjutnya adalah merancang pengontrol untuk sistem tersebut. Tahapan perancangan kendali ini adalah perancangan fungsi transfer pada

model *state space*, perancangan model *augmented*, dan penentuan parameter kendali Model Predictive Control (MPC).

3.7.1 Menentukan Respon *Transient* dari Sistem Berdasarkan Hasil *Close Loop*

Karakteristik fungsi alih (*transport function*) plant dalam penelitian ini adalah sistem orde dua yang ditransformasikan menjadi persamaan *diskrit* dengan persamaan (2.17) dan (2.18) transformasi *belinier* menggunakan *Teorema Shannon* dengan mendefinisikan nilai T_s (*time sampling*) dari transformasi *biliner* yang memiliki kondisi yang harus dipenuhi:

$$\frac{tr}{10} \leq T_s \leq \frac{tr}{2} \text{ dan } T_s < td[20]$$

Setelah menentukan nilai t_r dan t_d yang diperoleh dari data *open loop* dengan perbesaran layar pada scope untuk memenuhi syarat kedua dalam menentukan nilai t_s , dimana :

Nilai *rise time* (t_r) (5%-95%)

$$t_r(5\%) = 5\% \text{ dari } steady \ state$$

$$t_r = 5\% \times 0.5N$$

$$t_r = 0.025N$$

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) data didapatkan waktu untuk mencapai 5% dari set point adalah 0.013 detik.

$$t_r(95\%) = 95\% \text{ dari } steady \ state$$

$$t_r = 95\% \times 0.5N$$

$$t_r = 0.475N$$

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) data didapatkan waktu untuk mencapai 95% dari set point adalah 0.074 detik

$$\text{Maka } t_r(95\% - 5\%) = 0.074 - 0.013$$

$$t_r = 0.061 \text{ detik}$$

Nilai *delay time*

$$t_d = 50\% \text{ dari } steady \ state$$

$$t_d = 50\% \times 0.5 N$$

$$t_d = 0.25 N$$

dengan menggunakan cara pembesaran layar (*zoom*) data didapatkan waktu untuk mencapai 50% dari *set point* adalah pada 0.047 detik.

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

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

Setelah memperoleh nilai dari t_d (*delay time*) dari data open loop yang telah dilakukan dengan pembesaran layar (*zoom*) pada scope untuk memenuhi kondisi kedua dalam menentukan nilai T_s .

Dimana nilai T_s untuk transformasi bilinear :

$$\frac{t_r}{10} \leq T_s \leq \frac{t_r}{2}$$

$$\frac{0.061}{10} \leq T_s \leq \frac{0.061}{2}$$

$$0.0061 \text{ detik} \leq T_s \leq 0.030$$

Maka nilai T_s yang diinginkan adalah : 0.01s

Maka nilai T_s (*time sampling*) yang akan dipakai pada transformasi bilinear mengikuti ketentuan dengan persamaan (2.18) maka dipilih nilai t_s (*time sampling*) yang akan digunakan adalah 0.01 detik

3.7.2 Perubahan *Transfer Function* ke Bentuk Model *State Space*

Untuk perancangan kendali *Model Predictive Control* (MPC), lalu fungsi alih di persamaan (3.4) perlu diubah ke bentuk *state space* seperti berikut :

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{2.088 \times 10^{-6}s + 717.922}{s^2 + 31.9885s + 173.535237}$$

$$2.088 \times 10^{-6}U(s)^2 + 717.922U(s) = s^2\theta(s) + 31.988s\theta(s) + 173.535237\theta(s)$$

$$(2) 2.088 \times 10^{-6}U + 717.922U = \frac{d^2\theta}{dt^2} + 31.988 \frac{d\theta}{dt} + 173.535237\theta$$

$$4.176 \times 10^{-6}U + 717.922U = \frac{d^2\theta}{dt^2} + 31.988 \frac{d\theta}{dt} + 173.535237\theta$$

$$717.923U = \frac{d^2\theta}{dt^2} + 31.988 \frac{d\theta}{dt} + 173.535237\theta$$

$$717.923U = \ddot{\theta} + 31.988\dot{\theta} + 173.53523\theta$$

Didefinisikan :

$$x_1 = \theta \rightarrow \dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2$$

$$x_2 = \dot{\theta} \rightarrow \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -31.988\dot{\theta} - 173.53523\theta + 717.923U$$

$$= -31.988x_2 - 173.53523x_1 + 717.923U$$

$$717.923U = \ddot{\theta} + 31.988\dot{\theta} + 173.53523\theta$$

$$\ddot{\theta} = -31.988\dot{\theta} - 173.53523\theta + 717.923U$$

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

$$\dot{x}_2 = -31.988\dot{\theta} - 173.53523\theta + 717.923U$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -173.53523 & -31.988 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} U$$

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

$$[y] = [717.923 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Solusi persamaan keadaan :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -173.53523 & -31.988 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Persamaan keluaran :

$$y = cx$$

$$[y] = [717.923 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Jadi dari persamaan keadaan (3.5) dan persamaan keluaran (3.6), dapat ditentukan matriks *state space* A, B, C dan D seperti berikut :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -173.53523 & -31.988 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C = [717.923 \quad 0] \quad (3.9)$$

$$D = [0] \quad (3.10)$$

Setelah memperoleh hasil dari *state space* kontinu selanjutnya ialah merubahnya dalam bentuk *state space* diskrit yang disubstitusikan dari persamaan (3.7) dan (3.9) ke persamaan (2.17) dengan nilai Y(z) adalah matriks dari C dan X(z) adalah nilai dari matriks A sehingga:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923}{\left(\frac{2}{0.01} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 31.988 \left(\frac{2}{0.01} \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 173.535237}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923}{\left(200 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 31.988 \left(200 \times \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 173.535237}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923}{40000 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right)^2 + 31.9886 \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) + 173.535237}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923(1+2z^{-1}+z^{-2})}{40000(1-2z^{-1}+z^{-2}) + 6397.6(1-z^{-2}) + 173.535237(1+2z^{-1}+z^{-2})}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923 + 1435.846z^{-1} + 717.923z^{-2}}{40000 - 80000z^{-1} + 40000z^{-2} + 6397.6 - 6397.6z^{-2} + 173.535237 + 347.0704z^{-1} + 173.535237z^{-2}}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923 + 1435.84z^{-1} + 717.923z^{-2}}{46271.13 - 79652.93z^{-1} + 33775.9z^{-2}}$$

3.7.2 Controllable Canonical Form

Proses kendali Model Predictive Control (MPC) membutuhkan pemodelan fungsi alih yang akurat untuk memastikan bahwa kontrol yang telah dirancang akan bekerja secara efektif. Fungsi transfer yang diperoleh tidak dapat digunakan secara langsung, tetapi diubah menjadi bentuk *controllable canonical form* yang dapat dikontrol. Setelah memperoleh nilai dari *state space* diskrit kemudian dilakukan pembagian penyebut dengan nilai 46271.13 untuk mendapatkan nilai 1 agar bisa mengikuti bentuk *controllable canonical form* berdasarkan persamaan (2.24)

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{717.923+1435.84z^{-1}+717.923z^{-2}}{46271.13-79652.93z^{-1}+33775.9z^{-2}} \div 46271.13$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.015+0.031z^{-1}+0.015z^{-2}}{1-1.721z^{-1}+0.729z^{-2}}$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.015+0.031z^{-1}+0.015z^{-2}}{1-1.721z^{-1}+0.729z^{-2}} \times z^2$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.015z^2+0.031z+0.015}{1z^2-1.721z+0.729}$$

Maka *state space* diskrit dari *rewinder roll* adalah sebagai berikut :

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{0.015z^2+0.031z+0.015}{1z^2-1.721z+0.729}$$

dimana :

$$a_1 = -1.721$$

$$a_2 = 0.729$$

$$b_0 = 0.015$$

$$b_1 = 0.031$$

$$b_2 = 0.015$$

Persamaan (3.11) dan (3.12) adalah persamaan yang didapatkan berdasarkan persamaan (2.24) yang mana ini merupakan bentuk *controllable canonical form* dari bentuk *state space* orde dua ini [19]:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.11)$$

$$y(k) = [b_2 - a_2b_0 \quad b_1 - a_1b_0] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Model *state space* yang didapatkan menggunakan persamaan (3.11) dan (3.12) berdasarkan bentuk sebelumnya:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.729 & 1.721 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) \quad (3.13)$$

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.

$$y(k) = [0.025935 \quad -0.005185] \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

3.7.4 Desain Augmented Model

Perancangan *augmented model* bertujuan merubah bentuk *state space* ke dalam *augmented model* dari *model diskrit*. dari persamaan (2.26), masukkan hasil yang diperoleh dari persamaan (3.13) dan (3.14) sehingga

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.729 & 1.721 \end{bmatrix}}^{A_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}^{B_m} u(k) \quad (3.15)$$

$$y(k) = \overbrace{[0.025935 \quad -0.005285]}^{C_m} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Dari persamaan (3.15) dan (3.16) kita merubah bentuk *state space* di atas menjadi bentuk persamaan (2.26) yaitu *augmented model*

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} A_m & O_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.17)$$

$$y(k) = \overbrace{[0 \quad 0 \quad 1]}^c \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Sehingga *augmented model* dari *rewinder roll* seperti di bawah ini

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix}}^{x(k+1)} = \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.729 & 1.721 & 0 \\ 0.0038 & 0.0170 & 1 \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}}^{x(k)} + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -0.0052 \end{bmatrix}}^B \Delta u(k) \quad (3.19)$$

$$y(k) = \overbrace{[0 \quad 0 \quad 1]}^c \begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Matriks A,B,C adalah bentuk dari *augmented model* yang digunakan dalam merancang kontroler *Model Predictive Control (MPC)*

3.7.5 State Prediksi dan Variabel Output Model Predictive Control (MPC)

Prosedur berikutnya ialah mengidentifikasi parameter kontroler *Model Predictive Control (MPC)*. Parameter disini adalah *prediction horizon* (N_p), *control horizon* (N_c), dan *tuning parameter* pada indeks performansi (r_w). *Model Predictive Control (MPC)* pada *rewinder roll* dirancang menggunakan prediksi 5 langkah horizon, horizon kontrol 1 langkah, dan penyetelan parameter indeks kinerja 0,2. Berdasarkan persamaan (3.19) dan (3.20), nilai

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

awal yang diprediksi dan variabel terkontrol yang akan datang dapat diubah menjadi persamaan berikut menggunakan persamaan dari (2.30):

$$Y = Fx(k_i) + \Phi \Delta U \quad (3.21)$$

Matriks F dan Φ dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ CA^{N_p-1} & CA^{N_p-1}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Setelah nilai parameter kontroler ditentukan, maka kita dapat menentukan nilai matriks F dan Φ sebagai berikut :

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ CA^4 \\ CA^5 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 \\ CAB & CB \\ CA^2B & CAB \\ CA^3B & CA^2B \\ CA^4B & CA^3B \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Langkah berikutnya adalah *input* persamaan (3.19) nilai dari matriks *augmented model* ke persamaan (3.23). Hasil yang diperoleh seperti persamaan di bawah ini

$$F = \begin{bmatrix} 0.0038 & 0.0170 & 1 \\ -0.0086 & 0.0501 & 1 \\ -0.0327 & 0.0946 & 1 \\ -0.0651 & 0.1470 & 1 \\ -0.1034 & 0.2049 & 1 \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} -0.0052 \\ 0.0118 \\ 0.0449 \\ 0.0894 \\ 0.1418 \end{bmatrix}$$

3.7.6 Indeks Performansi Model Predictive Control (MPC)

Indeks performansi sinyal kontrol dibutuhkan agar keluaran sistem mempunyai nilai yang mendekati *set point*. Setelah matriks Φ dan F didapatkan parameter berikutnya ialah *gain* dari Model Predictive Control (MPC). Supaya mendapatkan nilai K_{MPC} , sebelumnya harus didapatkan nilai dari matriks Y dari persamaan (2.36) sebagai berikut:

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

Setelah perhitungan dari matriks F dan Φ didapat hasilnya sebagai berikut:

$$Y = [-0.0958 \quad 0.2039 \quad 1.2276]$$

Nilai *gain* K_{MPC} ialah baris pertama dari matriks Y . Oleh sebab itu, nilai *gain* K_{MPC} adalah:

$$K_{MPC} = [-0.0958 \quad 0.2039 \quad 1.2276] \quad (3.25)$$

Setelah *gain* K_{MPC} didapatkan, selanjutnya adalah *gain* K_y dari persamaan (2.37). *Gain* dapat dihitung dari nilai matriks Z sebagai berikut:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

$$Z = (\Phi^T \Phi + \bar{R})^{-1} (\Phi^T \bar{R}_s) \tag{3.26}$$

Setelah penghitungan dari matriks F dan Φ , didapat hasilnya sebagai berikut:

$$Z = [0.6138]$$

Gain K_y adalah baris pertama dari matriks Z. Maka nilai K_y adalah:

$$K_y = [0.6138]$$

Notasi ΔU dari persamaan (2.33)

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

Setelah perhitungan dari matriks ΔU didapat hasilnya sebagai berikut:

$$\Delta U = [0.197]$$

Memasukkan nilai-nilai ke persamaan (2.34)

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

Setelah perhitungan dari matriks $\Delta U(k_i)$ didapat hasilnya sebagai berikut:

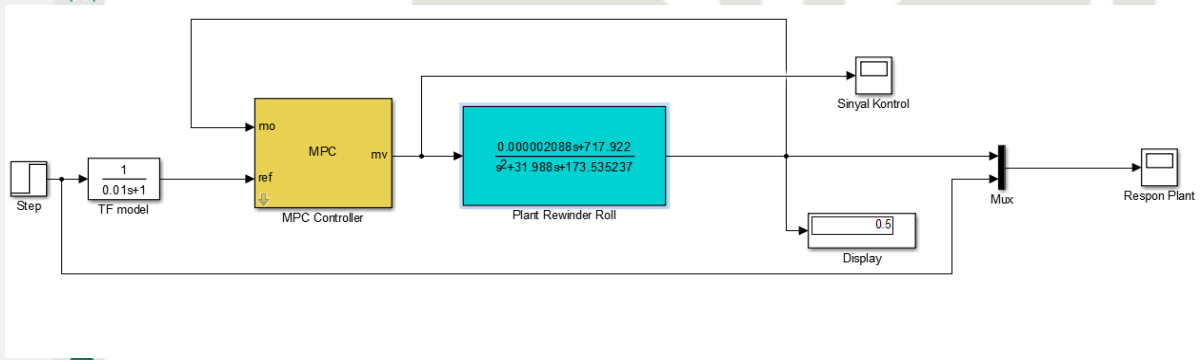
$$\begin{aligned} \Delta U(k_i) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] [0.197] \\ &= 0.197 \end{aligned}$$

yang selanjutnya nilai ΔU akan masuk ke dalam *plant web tension pada sistem rewinder roll*.

3.8 Perancangan Pengendali

3.8.1 Perancangan Pengendali MPC

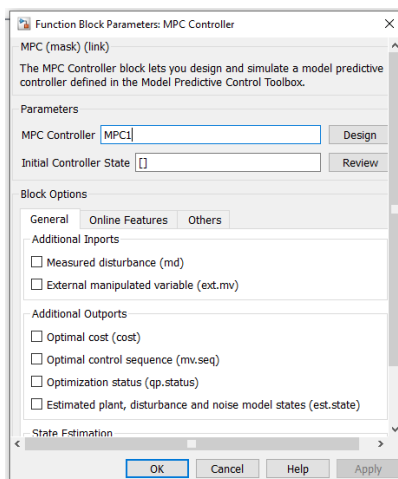
Pertama kali yang harus dilakukan dalam penelitian ini adalah merangkai simulink pada matlab, bertujuan agar dapat memberi gambaran pada respon suatu sistem, di bawah ini perancangan menggunakan Matlab.



Gambar 3. 5 Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *Model Predictive Control* MPC) Pada blok *MPC Controller* lakukan 2 kali klik sehingga muncul tampilan seperti di bawah ini:

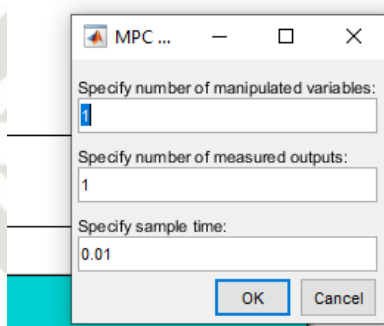
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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



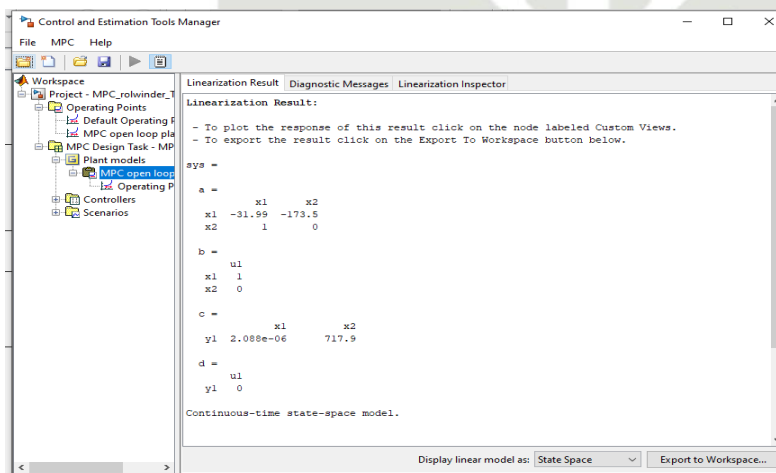
3.6 Gambar Tampilan Blok Simulink Mpc

Setelah muncul seperti ini *design* kembali MPC Controller dengan cara menghapus mpc1 lalu tekan *apply* dan tekan *design* tunggu beberapa saat sehingga muncul tampilan seperti ini



3.7 Gambar Tampilan Blok Simulink MPC

Setelah tampilan seperti ini muncul *manipulated variables* dan *measured outputs* diberi nilai sebesar 1 dengan *semple time* 0.01 lalu tekan ok dan tunggu.



3.8 Gambar Tampilan Blok Simulink Mpc

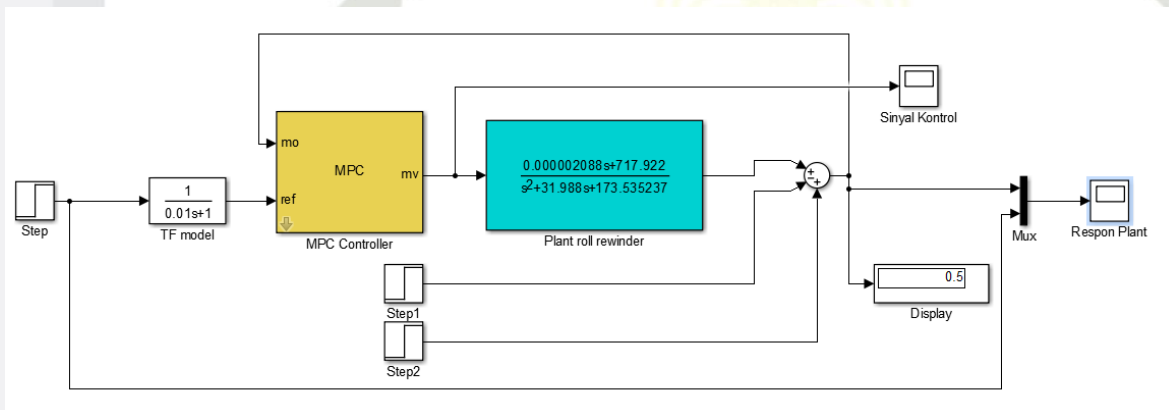
Akan muncul tampilan seperti diatas dan *design MPC* telah selesai dilakukan kembalikan ketampilan *simulink* dan masukkan nilai model referensi yang sesuai.

Tabel 3.2 model referensi

τ (tau)	Rise time (Tr)	Delay Time (Td)	MaximumOvershoot (Mp)	Error Steady State (Ess)
0.01	0.051	0.034	0%	0

Dari tabel model referensi diatas ketika nilai τ sebesar 0.01 maka *rise time* yang dihasilkan sebesar 0.051 sedangkan *rise time web tension* pada sistem *rewinder roll* secara *open loop* mempunyai nilai sebesar 0.061 detik jadi semakin kecil nilai τ semakin mendekati nilai yang *rise time* yang diharapkan. Setelah menemukan nilai model referensi yang sesuai dan mendapatkan respon sistem yang diharapkan. Model referensi yang diinginkan mendapatkan masukan dari sinyal *step*. Sehingga keluaran dari sistem mampu mengikuti model referensi yang diinginkan .

3.8.2 Perancangan Pengendali MPC Dengan Gangguan 6% dan 10% Dari Set Point



Gambar 3. 9 Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Dengan Gangguan 6% dan 10% Dari *Set Point*

Pada rangkaian di atas diberi gangguan senilai 6% dan 10% dari *setpoint*. Adanya gangguan ini bertujuan untuk menguji apakah Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Mampu mengatasi gangguan tersebut.

3.9 Hasil Data Penelitian yang Akan Diambil

3.9.1 Grafik dari Setiap Pengujian Sistem

Grafik yang akan diambil yaitu berdasarkan simulasi sistem secara *open loop* menggunakan pengendali *Model Predictive Control* (MPC) mengikuti *setpoint* dari jurnal rujukan. Tahapan yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

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

Pada proses ini data-data yang dibutuhkan untuk dianalisis berupa grafik hasil dari setiap pengujian pada sistem yaitu :

1. Respon *transient* dari hasil simulasi Secara *Open Loop*
2. Respon *transient* dari hasil simulasi menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)
3. Respon *transient* dari hasil simulasi pengendali terhadap gangguan sinyal kendali

3.9.2 Respon Transient Sistem dari Setiap Pengujian

Pada penelitian ini akan diambil data respon transient dari setiap pengujian meliputi:

1. *Rise Time* / Waktu Tunak (t_r)

Pada penelitian ini *rise time* yang digunakan ialah 5%-95%, dimana waktu ini didapatkan dengan mencari selisih waktu dari kondisi respon saat 95% dengan kondisi respon saat 5% dari setpoint.

2. *Time Settling* / Waktu Tunak (t_s)

Pada penelitian ini ukuran waktu yang digunakan ialah ukuran waktu yang menyatakan respon telah masuk $\pm 2\%$ dari keadaan *steady state*.

3. *Delay Time* / waktu tunda (t_d)

Ukuran waktu yang menyatakan faktor keterlambatan respon output terhadap input, ukuran mulai dari $t=0$ sampai dengan respon 50% dari *respon steady state*

4. Maksimum Overshoot (MP)

Nilai puncak kurva tanggapan diukur dari satuan.

5. *Error Steady State*

Selisih nilai yang terukur dengan nilai yang sebenarnya.

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

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa dari respon sistem dalam pengendalian ketegangan kertas dapat disimpulkan bahwa pengendali *Model Predictive Control (MPC)* dapat mengatasi *overshoot* dan *error steady state*. Nilai koefisien τ yang digunakan sebesar 0.01. Menggunakan pengendali (MPC) pada sistem *rewinder roll* menghasilkan *error steady state* = 0 N, dengan *delay time* (T_d) = 0.034 detik *rise time* (T_r) = 0.051 *maximum overshoot* = 0% .

Pada penelitian ini sistem *rewinder roll* diberi gangguan dan kendali (MPC) dapat mengatasi gangguan yang diberikan pada detik ke 10 dan detik ke 25 memerlukan waktu sebesar 8.7 detik untuk kembali ke posisi stabil.

5.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian ini dapat dilihat bahwa sistem yang dikendalikan dalam penelitian ini telah mencapai posisi stabil dengan tujuan yang telah tercapai namun pada saat diberi gangguan memerlukan waktu 8.7 detik dalam mencapai posisi stabil sehingga diharapkan pada penelitian selanjutnya ditemukan pengendali tambahan untuk menutupi kekurangan dari penelitian ini dengan metode-metode terbaru.

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 PUSTAKA

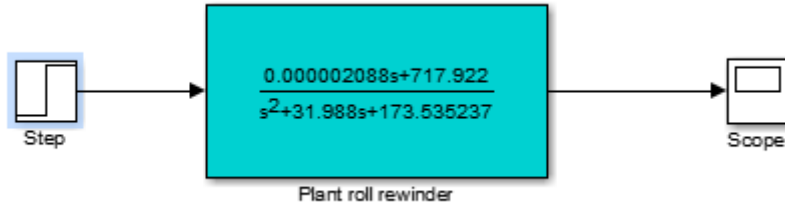
- [1] A. P. Yudha, “*Produktivitas industri pulp dan kertas,*” Edisi Maret 2019, jakarta: War. Ekspor, 2019. <http://djpen.kemendag.go.id>
- [2] G. P. A. Suharsono, ahmasari, “Pengaruh Pengungkapan Corporate Social Responsibility (CSR) Terhadap Cost of Capital (COC),” *Jurnal Telaah Bisnis*, vol. 109, no. 1. pp. 109–119, 23 maret 2016.
- [3] Y. Yudianto, L. Parinduri, B. Harahap, “Penerapan Metode Statistical Process Control Dalam Mengendalikan Kualitas Kertas Bobbin (Studi Kasus : Pt. Pusaka Prima Mandiri),” *Bul. Utama Tek.*, vol. 14, no. 2, pp. 106–111, Januari 2018.
- [4] T. R. Biyanto, “Sistem Pengendalian *Web Tension* Menggunakan Kontroler Robust PID,” *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 7, No. 2, Oktober 2005
- [5] H. Hwang, J. Lee, S. Eum, K. Nam, “Kalman-filter-based tension control design for industrial roll-to-roll system,” *Algorithms*, vol. 12, no. 4, 2019, doi: 10.3390/A12040086.
- [6] G. Ponniah, M. Z. Yang-, H. O. I. Doh, K. Choi, “Fuzzy logic based control design for active dancer closed loop web tension control,” *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 2, no. 3, pp. 438–443, 2012.
- [7] H. Juliesty “*Desain Pengendali Auto Tuning Menggunakan Fuzzy Untuk Pengendalian Web Tension Pada Sistem Rewinder Roll.*” skripsi, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.
- [8] J. Syukron dkk, “*Desain Pengendalian Web Tension Pada Roll Winder Menggunakan Kendali Optimal LQR,*” skripsi, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2018.
- [9] E. D. Puspitarini, R. Effendie, J. Pramudijanto, “*Desain Pengaturan Level pada Coupled Tank Process dengan Menggunakan Metode Model Predictive Control,*” Tugas Akhir. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017
- [10] I. Fauzi *et al*, “*Penerapan Model Predictive Control (MPC) Pada Flowline Sistem Produksi Menggunakan Aljabar Max-Plus (MPC) for Flow Line Production*

- © Hak cipta milik UIN Suska Riau
- State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
- System Using Max-Plus Algebra,*” *jurnal unej*, vol.13 no.1 2016
DOI: <https://doi.org/10.19184/kdma.v13i1.31309> .
- [11] T. B. Setiyo, A. Triwiyatno, “*Perancangan Model Predictive Control (MPC) Pada Proses Quadruple Tank Metode.*” Thesis ,Semarang: Jurusan Teknik Elektro,Universitas Diponegoro Semarang, 2013 .
- [12] H. Mudia, M. Rameli, R. Efendi, “*Perancangan Model Predictive Torque Control (MPTC) Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Phasa Dengan Robust Stator Flux Observer.*” Thesis ,Surabaya: Jurusan Teknik Elektro,Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,2015.
- [13] K. Djati, “*Modul Konsep Umum Model dan Model Matematis,*” diakses dari <http://repository.ut.ac.id/3901/1/MATA4324-M1.pdf> pada tanggal 5 juni 2022
- [14] Y. Awab, “*Pengendalian Kualitas Produk Kertas Pada Paper dan Board Manufacturer PT . Surya Pamenang Kediri di Bagian converting,*” Thesis, Malang: universitas muhammadiyah malang, 2006.
- [15] K. Ogata, *Discrete-Time Control System Second Edition* ,2nd Edition .New Jersey: Prentice-Hall International,Inc, 1995.
- [16] K. Ogata, “*Teknik Kontrol Automatik(Sistem Pengaturan),*” 1995.
- [17] C. Erryni, “*Perancangan Model Predictive Control (MPC) Untuk Pengendalian Temperatur Pada Annealing Lehr,*” *skripsi*, Pekanbaru: UIN Sultan Syarif Kasim Riau, 2021.
- [18] L. Wang, “*Model Predictive Control Design And Implementation Using MATLAB,* AIC. Verlag London : Spring, 2009.

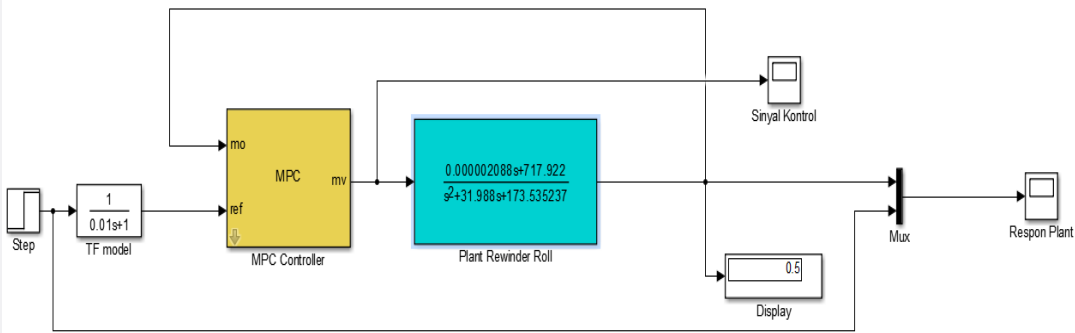
LAMPIRAN A

RANGKAIAN PENGENDALI PADA SIMULINK

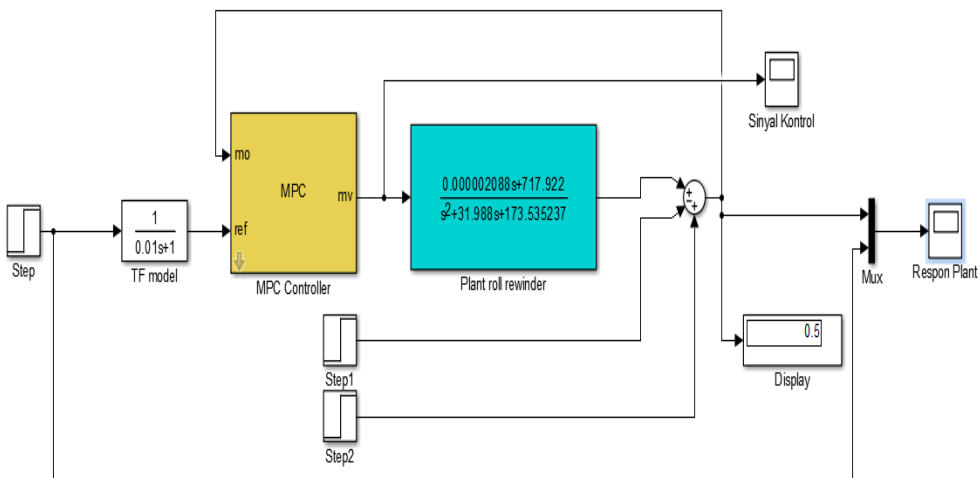
1. Rangkaian web tension pada sistem *rewinder roll*



2. Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)



3. Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Dengan Gangguan 6% dan 10% Dari Set Point

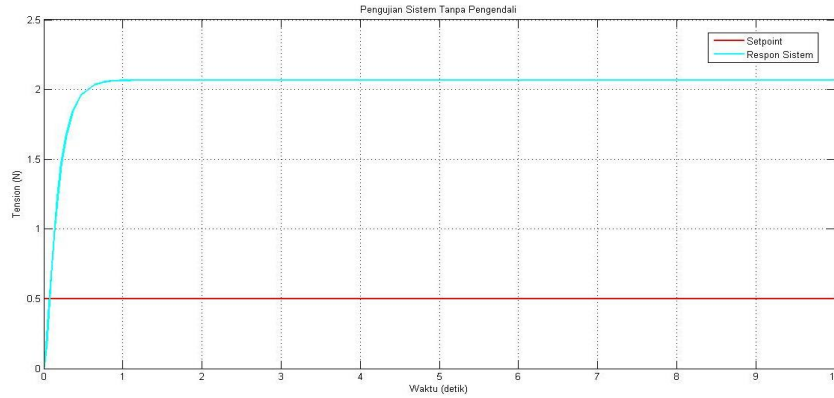


- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan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

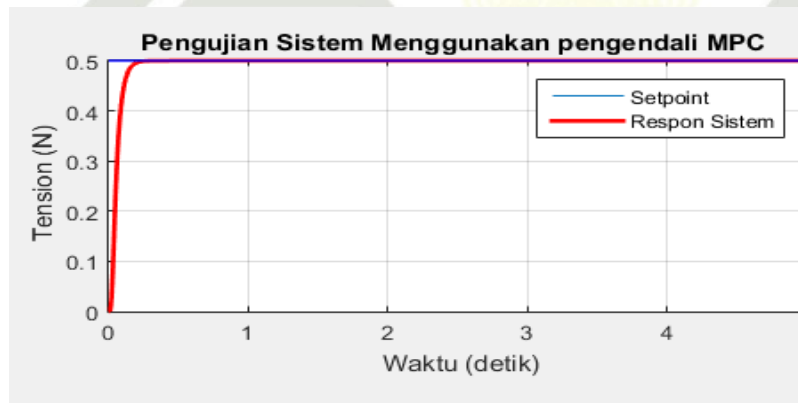
LAMPIRAN B

HASIL SIMULASI

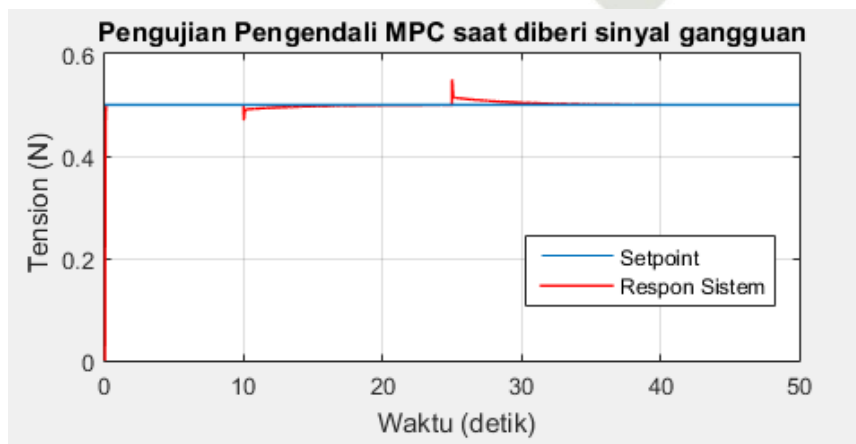
1. Hasil Simulasi Sistem Secara *Open Loop*



2. Hasil Simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC)



3. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian Gangguan Sinyal Kendali 6% dan 10% Dari *Setpoint*



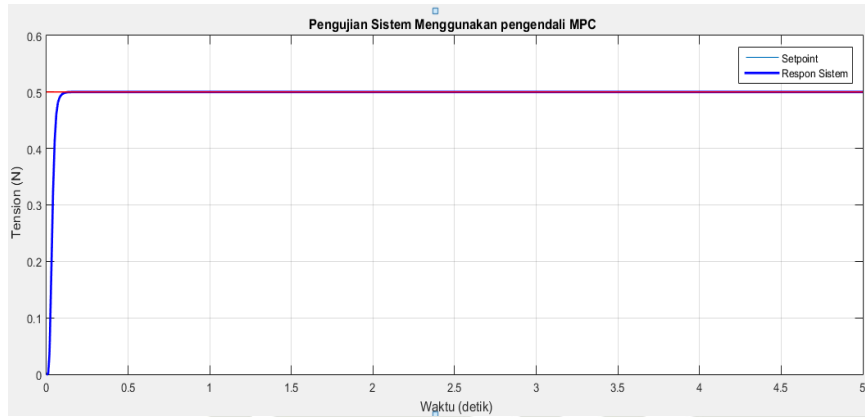
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

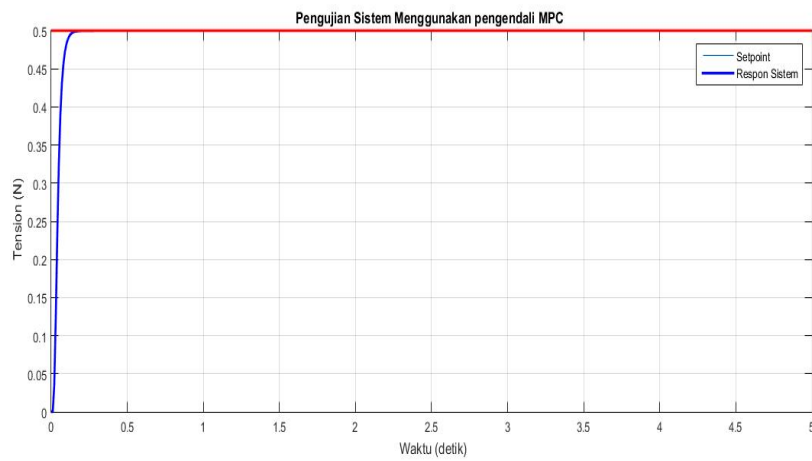
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

4. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.01



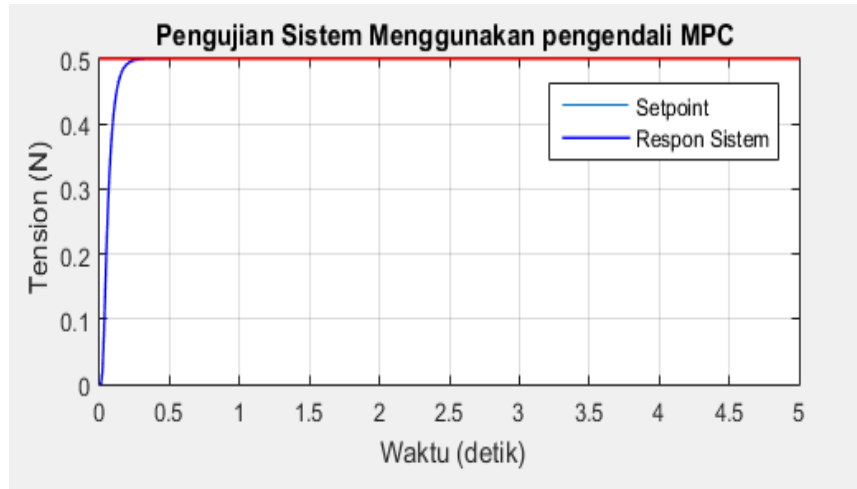
5. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.02



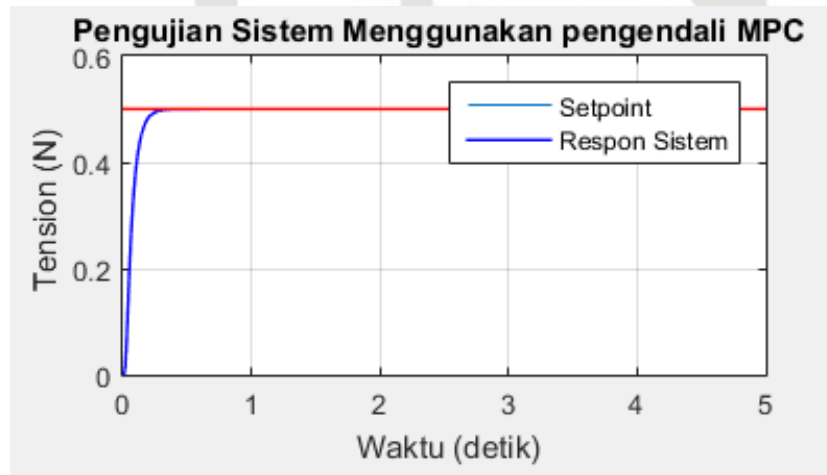
6. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.03



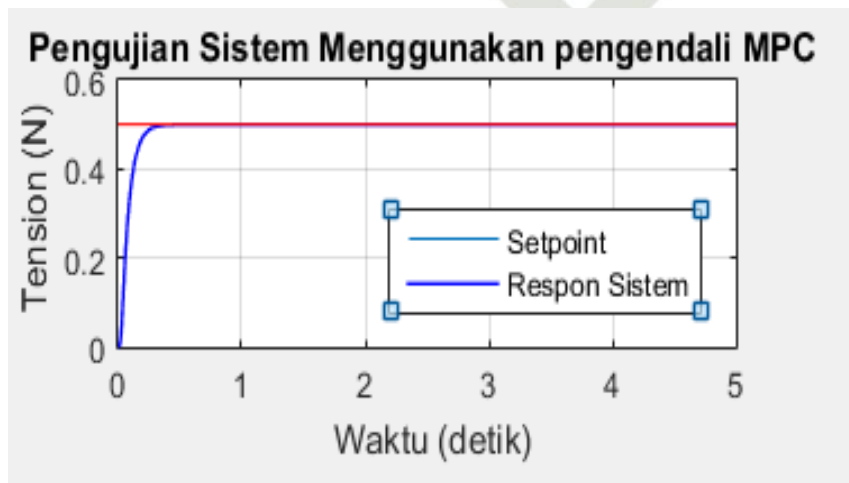
7 Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.04



8 Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.05



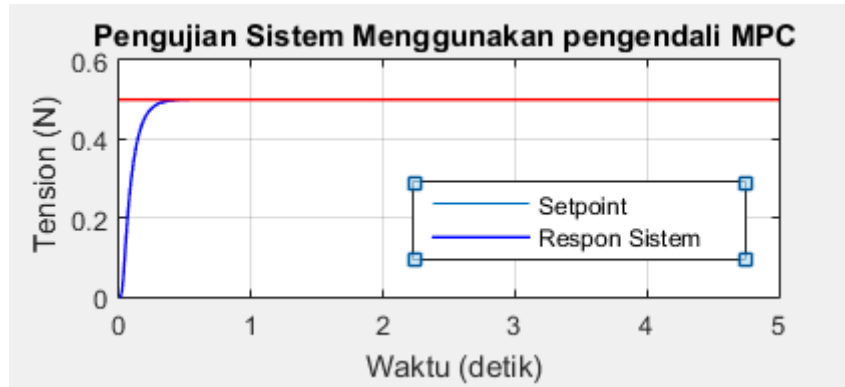
9 Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.06



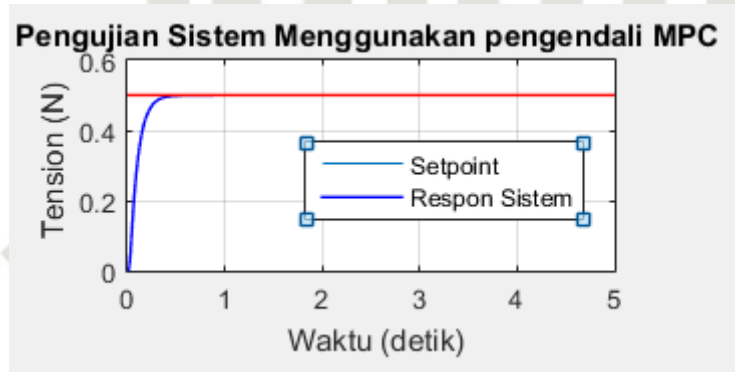
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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.

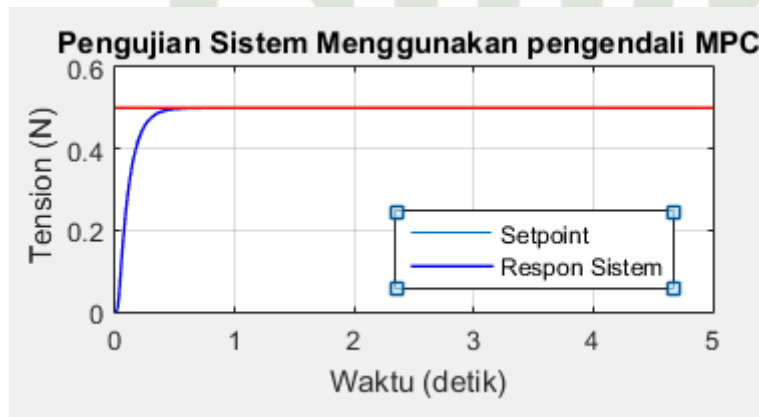
11. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.07



11. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.08



12. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.09



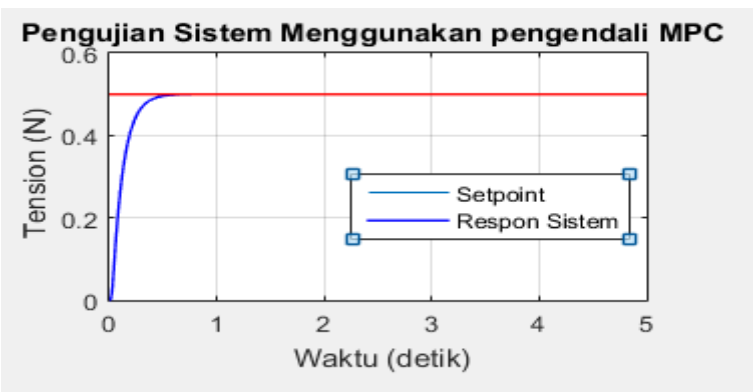
13. Hasil simulasi Sistem *rewinder roll* Menggunakan Pengendali *Model Predictive Control* (MPC) Pengujian model referensi 0.1

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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

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

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



UIN SUSKA RIAU

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

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





DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Mutiara Purnama Sari, lahir di kuranji 29 Juni 1999 merupakan anak kelima dari lima bersaudara dari pasangan Tasman dan Erna Wati yang beralamat Di Belubus Kenagarian Sungai Talang Kec.Guguak Kab.Lima Puluh Kota Sumatera Barat

Email : 11755200017@students.uin-suska.ac.id

HP :082284218869

Pengalaman pendidikan yang dilalui dari SD Negeri 02 Sungai Talang S2006-2012 kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 4 kec.Guguak pada tahun 2012-2015.setelah itu melanjutkan pendidikan SMA Negeri 1 Kec.Guguak pada tahun 2015-2017.setelah lulus SMA penulis melanjutkan pendidikan di program studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi.Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dengan mengambil Bidang kajian Elektronika dan Instrumentasi pada tahun 2017. Penulis menyelesaikan masa studi selama 5 tahun dan lulus pada tahun 2022 dengan penelitian tugas akhir berjudul **“PERANCANGAN MODEL PREDICTIVE CONTROL (MPC) UNTUK PENGENDALIAN WEB TENSION PADA SISTEM REWINDER ROLL”**