



TUGAS AKHIR - TF 181801

**DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI *BIPOLAR/HYBRID*  
*STEPPER MOTOR* PADA *BALLSCREW SYSTEM*  
MENGUNAKAN METODE KENDALI *ACTIVE DISTURBANCE*  
*REJECTION CONTROL (ADRC)* DENGAN VARIASI TEGANGAN**

ADITYA WIMANSYAH  
NRP. 02311540000127

Dosen Pembimbing:  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  
Murry Raditya, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



TUGAS AKHIR - TF 181801

**DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI *BIPOLAR/HYBRID*  
*STEPPER MOTOR* PADA *BALLSCREW SYSTEM*  
MENGUNAKAN METODE KENDALI *ACTIVE DISTURBANCE*  
*REJECTION CONTROL (ADRC)* DENGAN VARIASI TEGANGAN**

ADITYA WIMANSYAH  
NRP. 02311540000127

Dosen Pembimbing:  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  
Murry Raditya, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***DESIGN SIMULATION CONTROL SYSTEMS OF  
BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR IN BALLSCREW SYSTEM  
BASED ON ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL  
(ADRC) WITH VOLTAGE VARIATIONS***

ADITYA WIMANSYAH  
NRP. 02311540000127

Supervisors:  
Assoc. Prof. Dr. Purwadi Agus Darwito  
Mr. Murry Raditya, M.S.

*Department of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Aditya Wimansyah  
NRP : 02311540000127  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “*DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR PADA BALLSCREW SYSTEM MENGGUNAKAN METODE KENDALI ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL (ADRC) DENGAN VARIASI TEGANGAN*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 18 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Aditya Wimansyah

NRP. 02311540000127

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**TUGAS AKHIR**

***DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR  
PADA BALLSCREW SYSTEM MENGGUNAKAN METODE KENDALI ACTIVE  
DISTURBANCE REJECTION CONTROL (ADRC) DENGAN VARIASI TEGANGAN***

Oleh:

Aditya Wimansyah  
NRP. 02311540000127

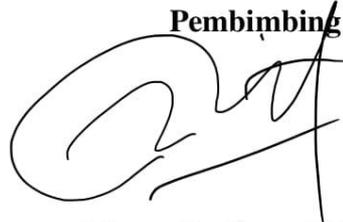
Surabaya,

Menyetujui,  
Pembimbing I



Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  
NIP. 19620822 198803 1 001

Menyetujui,  
Pembimbing II



Murry Raditya, S.T., M.T.  
NIP. 1988201711055

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FTI RS ITS



Dr. Suvanto, S.T., M.T.  
NIP. 19711113 199512 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LEMBAR PENGESAHAN

***DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI BIPOLAR/HYBRID STEPPER  
MOTOR PADA BALLSCREW SYSTEM MENGGUNAKAN METODE  
KENDALI ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL (ADRC)  
DENGAN VARIASI TEGANGAN  
TUGAS AKHIR***

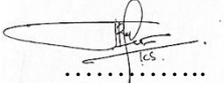
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Aditya Wimansyah**

**NRP. 02311540000127**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  ..... (Pembimbing I)
2. Murry Raditya, S.T., M.T.  ..... (Pembimbing II)
3. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D  ..... (Ketua Penguji)
4. Ir. Harsono Hadi, M.Sc., Ph.D  ..... (Penguji I)
5. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T.  ..... (Penguji II)

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI  
BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR PADA  
BALLSCREW SYSTEM MENGGUNAKAN METODE  
KENDALI ACTIVE DISTURBANCE REJECTION  
CONTROL (ADRC) DENGAN VARIASI TEGANGAN**

**Nama** : Aditya Wimansyah  
**NRP** : 02311540000127  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  
Murry Raditya, S.T., M.T.

**ABSTRAK**

Penggunaan *stepper motor* yang masif di sektor industri membuat *stepper motor* dituntut untuk melakukan manuver yang lebih presisi. Industri menuntut agar ada metode kontrol yang dapat digunakan pada segala macam jenis *plant*. *Active disturbance rejection control (ADRC)* menjawab keluhan dari sektor industri. Maksud dari penelitian ini adalah untuk mendesain dan menerapkan sistem kendali *active disturbance rejection control (ADRC)* pada sistem ulir (*ballscrew*) berbasis simulasi pada *stepper motor* dengan tegangan sebagai variasi, dan beserta membandingkan hasil percobaan antara *active disturbance rejection control (ADRC)* dengan *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID* dengan dan tanpa torsi beban, sehingga dapat diketahui dampak yang dihasilkan dari pengaruh variasi dengan torsi sebagai *feedback*. Hasil dari simulasi adalah metode *active disturbance rejection control (ADRC)* dapat bekerja dengan perpindahan secara signifikan meskipun diberi torsi beban saat dibandingkan dengan metode lain yang diujikan.

**Kata Kunci:** Sistem kendali *stepper motor*, ADRC, tegangan, perpindahan, simulasi

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***DESIGN SIMULATION CONTROL SYSTEMS OF  
BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR IN BALLSCREW  
SYSTEM BASED ON ACTIVE DISTURBANCE REJECTION  
CONTROL (ADRC) WITH VOLTAGE VARIATIONS***

***Name*** : Aditya Wimansyah  
***NRP*** : 02311540000127  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
***Supervisors*** : Assoc. Prof. Dr. Purwadi Agus Darwito  
*Mr. Murry Raditya, M.S.*

**ABSTRACT**

The use of massive stepper motors in the industrial sector makes stepper motors required to perform more precise maneuvers. Industry demands that there are control methods that can be used on all types of plants. Active Disturbance Rejection Control (ADRC) answers complaints from the industrial sector. The purpose of this research is to design and implement an *active disturbance rejection control* (ADRC) control system on a ballscrew based simulation on a stepper motor with voltage as a variation, and to compare the results of experiments between *active disturbance rejection control* (ADRC) and *open loop*, *close loop*, and *close loop* PID with and without load torque, so we can know the impact resulting from the influence of variations with torque as feedback. The result of the simulation is that the *active disturbance rejection control* (ADRC) method can work with significant displacement even though it is given a torque when compared to other methods tested.

***Keywords: Stepper motor control systems, ADRC, voltage, movement, simulation***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul **“DESAIN SIMULASI SISTEM KENDALI *BIPOLAR/HYBRID STEPPER MOTOR* PADA *BALLSCREW SYSTEM* MENGGUNAKAN METODE KENDALI *ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL (ADRC)* DENGAN VARIASI TEGANGAN”**.

Tugas akhir ini membahas mengenai dampak yang dihasilkan dari sebuah sistem kendali *stepper motor* apabila diberi variasi tegangan, dan penulis juga mendapatkan bantuan dari banyak pihak. Oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. sebagai Kepala Departemen Teknik Fisika, FTIRS-ITS dan juga sebagai dosen wali penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc dan Murry Raditya, S.T., M.T. sebagai pembimbing dalam penelitian tugas akhir, mentor, dan orang tua untuk kegiatan riset dan perkuliahan selama masa studi sarjana penulis.
3. Seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Fisika, FTIRS-ITS yang dengan sabar dan ikhlas membimbing saya hingga berada di tahap ini.
4. Keluarga saya sebagai *support system* dan *sponsor* utama saya dalam meneruskan pendidikan saya hingga sampai perguruan tinggi di ITS Surabaya, yaitu Bapak Erwin Adrianto, Ibu Sri Wardani, adik kandung penulis, Sastri Sahita Wimansyah, Kakek Alm. Eko Wijatmo dan Alm. Katimin, serta Nenek Hj. Siti Umnijah dan Dyah Sunarsih.
5. Inspirator dan penyemangat saya untuk berkuliah dan berkarya, sehingga saya dapat menyelesaikan masa studi di ITS sebagai sarjana, Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Herman Sasongko, M.Eng.
6. Rekan seperjuangan angkatan 2015 dan angkatan junior yang telah membantu saya hingga saat ini.
7. Keluarga besar HACOS yang lama menanti kelulusan saya.

8. Rekan seperjuangan dan seangkatan, Rizki Pratama A.P. beserta keluarga yang berkenan mengizinkan fasilitasnya digunakan untuk menunjang tugas akhir saya

Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu. Semoga laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 18 Juli 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iv
COVER PAGE.....	v
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	vii
LEMBAR PENGESAHAN .....	ix
LEMBAR PENGESAHAN .....	xi
ABSTRAK.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
KATA PENGANTAR .....	xvii
DAFTAR ISI.....	xix
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Lingkup Kajian.....	3
1.5 Sistematika Laporan .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Hybrid/Bipolar Stepper Motor</i> .....	5
2.2 <i>Sistem Ulir (Ball screw)</i> .....	9
2.3 <i>PID</i> .....	10
2.4 <i>Active Disturbance Rejection Control</i> .....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17

3.1	Identifikasi Masalah.....	17
3.2	Studi Pustaka.....	17
3.3	Desain Set Simulasi .....	21
3.4	Evaluasi Sistem Simulasi.....	42
3.5	Desain Metode Kontrol.....	42
3.6	Pengujian, Pengambilan Data, dan Analisa Data.....	43
3.7	Penulisan Laporan.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		45
4.1	Skema Simulasi.....	45
4.2	Pengaruh Algoritma Kontrol Pada Pergerakan Dalam Simulasi Dengan Variasi Tegangan .....	139
4.3	Analisis Performansi ADRC Terhadap Simulasi.....	140
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		143
5.1	Kesimpulan .....	143
5.2	Saran .....	143
DAFTAR PUSTAKA.....		145
LAMPIRAN .....		147
BIODATA PENULIS.....		155

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b> Mekanisme dari gerakan ulir ( <i>ballscrew/leadscrew</i> ).....	9
<b>Gambar 2.2.</b> Topologi PID .....	10
<b>Gambar 2.3.</b> Skema ADRC .....	12
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram alir penelitian .....	17
<b>Gambar 3.2.</b> Diagram Proses Sistem Penelitian .....	21
<b>Gambar 3.3.</b> Bagian dari <i>stepper motor</i> .....	23
<b>Gambar 3.4.</b> <i>Bipolar/hybrid stepper motor (2-phase) &amp; unipolar stepper motor (5-phase)</i> .....	24
<b>Gambar 3.5.</b> Model rangkaian listrik HSM .....	25
<b>Gambar 3.6.</b> Model rangkaian listrik HSM dengan frekuensi tinggi .....	27
<b>Gambar 3.7.</b> Gaya mekanik <i>bipolar/hybrid stepper motor</i> . .....	27
<b>Gambar 3.8.</b> Sistem <i>ballscrew/leadscrew</i> .....	29
<b>Gambar 3.9.</b> Analisa gaya .....	30
<b>Gambar 3.10.</b> Model dinamik sistem <i>ballscrew/leadscrew</i> .....	31
<b>Gambar 4.1.</b> Skema MATLAB/SIMULINK <i>open loop</i> .....	45
<b>Gambar 4.2.</b> Skema MATLAB/SIMULINK <i>close loop</i> .....	47
<b>Gambar 4.3.</b> Skema MATLAB/SIMULINK <i>close loop</i> PID .....	48
<b>Gambar 4.4.</b> Skema MATLAB/SIMULINK ADRC.....	50
<b>Gambar 4.5.</b> Respon simulasi <i>open loop</i> 24V tanpa beban .....	51
<b>Gambar 4.6.</b> Respon simulasi tegangan <i>open loop</i> 24V tanpa beban .....	52
<b>Gambar 4.7.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 24V tanpa beban .....	52
<b>Gambar 4.8.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 24V tanpa beban.....	52
<b>Gambar 4.9.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 24V tanpa beban .....	53
<b>Gambar 4.10.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 24V tanpa beban. ....	53
<b>Gambar 4.11.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 24V tanpa beban.....	53
<b>Gambar 4.12.</b> Respon simulasi <i>open loop</i> 24V dengan beban .....	54
<b>Gambar 4.13.</b> Respon simulasi tegangan <i>open loop</i> 24V dengan beban.....	55
<b>Gambar 4.14.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 24V dengan beban .....	55
<b>Gambar 4.15.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 24V dengan beban.....	56
<b>Gambar 4.16.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 24V dengan beban.....	56
<b>Gambar 4.17.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 24V dengan beban .....	56
<b>Gambar 4.18.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 24V dengan beban.....	57

<b>Gambar 4.19.</b> Respon Simulasi <i>open loop</i> 40V tanpa beban .....	58
<b>Gambar 4.20.</b> Respon simulasi tegangan <i>open loop</i> 40V tanpa beban.....	58
<b>Gambar 4.21.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 24V tanpa beban.....	58
<b>Gambar 4.22.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 40V tanpa beban .....	59
<b>Gambar 4.23.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 40V tanpa beban.....	59
<b>Gambar 4.24.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 40V tanpa beban.....	60
<b>Gambar 4.25.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 40V tanpa beban .....	60
<b>Gambar 4.26.</b> Respon Simulasi <i>open loop</i> 40V dengan beban.....	61
<b>Gambar 4.27.</b> Respon simulasi tegangan <i>open loop</i> 40V dengan beban .....	61
<b>Gambar 4.28.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 40V dengan beban .....	62
<b>Gambar 4.29.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 40V dengan beban .....	62
<b>Gambar 4.30.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 40V dengan beban.....	63
<b>Gambar 4.31.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 40V dengan beban.....	63
<b>Gambar 4.32.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 40V dengan beban .....	63
<b>Gambar 4.33.</b> Respon Simulasi <i>open loop</i> 110V tanpa beban.....	63
<b>Gambar 4.34.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 110V tanpa beban.....	65
<b>Gambar 4.35.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 110V tanpa beban .....	66
<b>Gambar 4.36.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 110V tanpa beban.....	66
<b>Gambar 4.37.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 110V tanpa beban.....	67
<b>Gambar 4.38.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 110V tanpa beban .....	68
<b>Gambar 4.39.</b> Respon Simulasi <i>open loop</i> 110V dengan beban.....	68
<b>Gambar 4.40.</b> Respon simulasi tegangan <i>open loop</i> 110V dengan beban .....	68
<b>Gambar 4.41.</b> Respon simulasi arus <i>open loop</i> 110V dengan beban.....	69
<b>Gambar 4.42.</b> Respon simulasi torsi <i>open loop</i> 110V dengan beban .....	69
<b>Gambar 4.43.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>open loop</i> 110V dengan beban.....	70
<b>Gambar 4.44.</b> Respon simulasi sudut <i>open loop</i> 110V dengan beban.....	70
<b>Gambar 4.45.</b> Respon simulasi posisi <i>open loop</i> 110V dengan beban .....	70
<b>Gambar 4.46.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> 24V tanpa beban .....	72
<b>Gambar 4.47.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 24V tanpa beban .....	72
<b>Gambar 4.48.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> 24V tanpa beban .....	73
<b>Gambar 4.49.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> 24V tanpa beban.....	73
<b>Gambar 4.50.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 24V tanpa beban .....	74
<b>Gambar 4.51.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 24V tanpa beban .....	74
<b>Gambar 4.52.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 24V tanpa beban.....	74

<b>Gambar 4.53.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> 24V dengan beban .....	75
<b>Gambar 4.54.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 24V dengan beban .....	76
<b>Gambar 4.55.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> 24V dengan beban .....	76
<b>Gambar 4.56.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> 24V dengan beban.....	76
<b>Gambar 4.57.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 24V dengan beban .....	77
<b>Gambar 4.58.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 24V dengan beban .....	77
<b>Gambar 4.59.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 24V dengan beban. ....	78
<b>Gambar 4.60.</b> Respon simulasi <i>close loop</i> 40V tanpa beban.....	79
<b>Gambar 4.61.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 40V tanpa beban .....	79
<b>Gambar 4.62.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> 40V tanpa beban.....	79
<b>Gambar 4.63.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> 40V tanpa beban .....	80
<b>Gambar 4.64.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 40V tanpa beban.....	80
<b>Gambar 4.65.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 40V tanpa beban.....	81
<b>Gambar 4.66.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 40V tanpa beban .....	81
<b>Gambar 4.67.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> 40V dengan beban .....	82
<b>Gambar 4.68.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 40V dengan beban .....	82
<b>Gambar 4.69.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> 40V dengan beban.....	83
<b>Gambar 4.70.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> 40V dengan beban.....	83
<b>Gambar 4.71.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 40V dengan beban .....	84
<b>Gambar 4.72.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 40V dengan beban .....	84
<b>Gambar 4.73.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 40V dengan beban .....	84
<b>Gambar 4.74.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> 110V tanpa beban .....	85
<b>Gambar 4.75.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 110V tanpa beban .....	86
<b>Gambar 4.76.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> 110V tanpa beban.....	86
<b>Gambar 4.77.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> 110V Tanpa beban. ....	87
<b>Gambar 4.78.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 110V tanpa beban.....	87
<b>Gambar 4.79.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 110V tanpa beban.....	87
<b>Gambar 4.80.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 110V tanpa beban .....	88
<b>Gambar 4.81.</b> Respon simulasi <i>close loop</i> 110V dengan beban.....	89
<b>Gambar 4.82.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> 110V dengan beban .....	89
<b>Gambar 4.83.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 40V Tanpa beban.....	90
<b>Gambar 4.84.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 40V tanpa beban .....	90
<b>Gambar 4.85.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> 110V dengan beban .....	91
<b>Gambar 4.86.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> 110V dengan beban .....	91

<b>Gambar 4.87.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> 110V dengan beban.....	91
<b>Gambar 4.88.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban.....	93
<b>Gambar 4.89.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban .....	93
<b>Gambar 4.90.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban.....	94
<b>Gambar 4.91.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban .....	94
<b>Gambar 4.92.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban.....	95
<b>Gambar 4.93.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban.....	95
<b>Gambar 4.94.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 24V tanpa beban .....	96
<b>Gambar 4.95.</b> Respon simulasi <i>close loop</i> PID 24V dengan beban .....	97
<b>Gambar 4.96.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 24V dengan beban .....	97
<b>Gambar 4.97.</b> Respon simulasi Arus <i>close loop</i> PID 24V dengan beban.....	98
<b>Gambar 4.98.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> PID 24V dengan beban .....	98
<b>Gambar 4.99.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 24V dengan beban .....	99
<b>Gambar 4.100.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 24V dengan beban.....	99
<b>Gambar 4.101.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 24V dengan beban .....	99
<b>Gambar 4.102.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban.....	100
<b>Gambar 4.103.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban .....	101
<b>Gambar 4.104.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban.....	101
<b>Gambar 4.105.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban .....	102
<b>Gambar 4.106.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban .....	102
<b>Gambar 4.107.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban.....	103
<b>Gambar 4.108.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 40V tanpa beban .....	103
<b>Gambar 4.109.</b> Respon simulasi <i>close loop</i> PID 40V dengan beban.....	104
<b>Gambar 4.110.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 40V dengan beban .....	105
<b>Gambar 4.111.</b> Respon simulasi arus <i>close loop</i> PID 40V dengan beban.....	105
<b>Gambar 4.112.</b> Respon simulasi torsi <i>close loop</i> PID 40V dengan beban .....	105
<b>Gambar 4.113.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 40V dengan beban..	106
<b>Gambar 4.114.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 40V dengan beban.....	106
<b>Gambar 4.115.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 40V dengan beban .....	107
<b>Gambar 4.116.</b> Respon Simulasi <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban.....	108
<b>Gambar 4.117.</b> Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban .....	108
<b>Gambar 4.118.</b> Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban...	109
<b>Gambar 4.119.</b> Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban.....	109
<b>Gambar 4.120.</b> Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban .....	110

<b>Gambar 4.121.</b>	Respon simulasi <i>close loop</i> PID 110V dengan beban .....	111
<b>Gambar 4.122.</b>	Respon simulasi tegangan <i>close loop</i> PID 110V dengan beban .....	111
<b>Gambar 4.123.</b>	Respon simulasi arus <i>close loop</i> PID 110V dengan beban.....	112
<b>Gambar 4.124.</b>	Respon simulasi torsi <i>close loop</i> PID 110V dengan beban .....	112
<b>Gambar 4.125.</b>	Respon simulasi kecepatan sudut <i>close loop</i> PID 110V dengan beban	112
<b>Gambar 4.126.</b>	Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 110V dengan beban.....	113
<b>Gambar 4.127.</b>	Respon simulasi posisi <i>close loop</i> PID 110V dengan beban.....	113
<b>Gambar 4.128.</b>	Respon simulasi ADRC 24V tanpa beban.....	114
<b>Gambar 4.129.</b>	Respon simulasi tegangan ADRC 24V tanpa beban .....	115
<b>Gambar 4.130.</b>	Respon simulasi arus ADRC 24V tanpa beban .....	115
<b>Gambar 4.131.</b>	Respon simulasi torsi ADRC 24V tanpa beban.....	116
<b>Gambar 4.132.</b>	Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 24V tanpa beban .....	116
<b>Gambar 4.133.</b>	Respon simulasi sudut ADRC 24V tanpa beban .....	116
<b>Gambar 4.134.</b>	Respon simulasi posisi ADRC 24V tanpa beban .....	117
<b>Gambar 4.135.</b>	Respon Simulasi ADRC 24V dengan beban .....	118
<b>Gambar 4.136.</b>	Respon simulasi tegangan ADRC 24V dengan beban.....	118
<b>Gambar 4.137.</b>	Respon simulasi sudut <i>close loop</i> PID 110V tanpa beban.....	119
<b>Gambar 4.138.</b>	Respon simulasi torsi ADRC 24V dengan beban.....	119
<b>Gambar 4.139.</b>	Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 24V dengan beban .....	119
<b>Gambar 4.140.</b>	Respon simulasi sudut ADRC 24V dengan beban .....	120
<b>Gambar 4.141.</b>	Respon simulasi posisi ADRC 24V dengan beban.....	120
<b>Gambar 4.142.</b>	Respon simulasi ADRC 40V tanpa beban.....	121
<b>Gambar 4.143.</b>	Respon simulasi tegangan ADRC 40V tanpa beban .....	121
<b>Gambar 4.144.</b>	Respon simulasi arus ADRC 40V tanpa beban .....	122
<b>Gambar 4.145.</b>	Respon simulasi torsi ADRC 40V tanpa beban.....	122
<b>Gambar 4.146.</b>	Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 40V tanpa beban .....	123
<b>Gambar 4.147.</b>	Respon simulasi sudut ADRC 40V tanpa beban .....	123
<b>Gambar 4.148.</b>	Respon simulasi posisi ADRC 40V tanpa beban .....	123
<b>Gambar 4.149.</b>	Respon Simulasi ADRC 40V dengan beban .....	124
<b>Gambar 4.150.</b>	Respon simulasi tegangan ADRC 40V dengan beban.....	125
<b>Gambar 4.151.</b>	Respon simulasi arus ADRC 40V dengan beban .....	125
<b>Gambar 4.152.</b>	Respon simulasi torsi ADRC 40V dengan beban.....	126
<b>Gambar 4.153.</b>	Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 40V dengan beban .....	126
<b>Gambar 4.154.</b>	Respon simulasi sudut ADRC 40V dengan beban .....	126

<b>Gambar 4.155.</b> Respon simulasi posisi ADRC 40V dengan beban.....	127
<b>Gambar 4.156.</b> Respon simulasi ADRC 110V tanpa beban .....	128
<b>Gambar 4.157.</b> Respon simulasi tegangan ADRC 110V tanpa beban.....	128
<b>Gambar 4.158.</b> Respon simulasi arus ADRC 110V tanpa beban .....	129
<b>Gambar 4.159.</b> Respon simulasi torsi ADRC 110V tanpa beban.....	129
<b>Gambar 4.160.</b> Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 110V tanpa beban .....	130
<b>Gambar 4.161.</b> Respon simulasi sudut ADRC 110V tanpa beban .....	130
<b>Gambar 4.162.</b> Respon simulasi posisi ADRC 110V tanpa beban.....	130
<b>Gambar 4.163.</b> Respon simulasi ADRC 110V dengan beban .....	131
<b>Gambar 4.164.</b> Respon simulasi tegangan ADRC 110V dengan beban.....	132
<b>Gambar 4.165.</b> Respon simulasi arus ADRC 110V dengan beban.....	132
<b>Gambar 4.166.</b> Respon simulasi torsi ADRC 110V dengan beban .....	133
<b>Gambar 4.167.</b> Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 110V dengan beban.....	133
<b>Gambar 4.168.</b> Respon simulasi sudut ADRC 110V dengan beban.....	133
<b>Gambar 4.169.</b> Respon simulasi posisi ADRC 110V dengan beban.....	134

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi Teknis ( <i>Datasheet</i> ) <i>Stepper Motor</i> Leadshine 60CM30X..	20
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi Teknis ( <i>datasheet</i> ) <i>Driver Stepper Motor</i> Leadshine DMA882S	20
<b>Tabel 4.1</b>	Perbandingan Hasil Perpindahan <i>Ballscrew system</i> dalam tiap metode kendali	135

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, pengembangan perangkat keras yang memiliki kemampuan untuk melakukan proses dengan kecepatan tinggi dan presisi sedang masif. Hal tersebut disebabkan oleh permintaan pasar yang cukup tinggi (Feng, Guo-Hua. 2011). Permintaan pasar yang cukup tinggi dibuktikan dengan masifnya penggunaan motor baik dalam skala industri manufaktur, industri robot, dan industri percetakan, terutama penggunaan *stepper motor*. *Stepper motor* adalah motor elektrik yang mana memiliki prinsip kerja mengubah energi dalam wujud elektrik menjadi pergerakan mekanik (R.G. Vierbergen, 2005). Penggunaan *stepper motor* sangatlah masif, hal tersebut dikarenakan *stepper motor* memiliki kemampuan yang bagus untuk dikendalikan, baik dalam pengendalian putaran, sudut, maupun torsi (Thomson Industries Inc., 2012). Selain itu, alasan *stepper motor* sering digunakan adalah karena *stepper motor* dapat dikendalikan secara presisi, dan presisi merupakan hal yang dibutuhkan oleh industri agar kegiatan produksi dapat berjalan dengan optimal (Han, J. 2009).

Sedangkan untuk mengkonversi gerakan rotasi dari *stepper motor* menjadi gerakan translasi, maka sistem *ballscrew/leadscrew* menjadi alternatif pilihan untuk digunakan. Dalam paten milik Paul V. Wysong dengan judul “*Recirculating Ball Screw*” tahun 1972, sistem *ballscrew/leadscrew* merupakan sistem yang dapat digunakan untuk memindahkan suatu obyek tertentu dari satu titik menuju titik yang lain dalam sumbu yang sama dengan memanfaatkan gaya pemicu yang menghasilkan gerakan rotasi untuk dikonversi menjadi gerakan translasi. Kelebihan dari sistem *ballscrew/leadscrew* adalah mampu untuk menghasilkan gaya gerak yang tinggi dengan minim gesekan (Paul V. Wysong, 1972).

Beberapa metode kendali telah diterapkan pada penggunaan *stepper motor* adalah metode kendali *close loop* yang diteliti oleh Roland Fredriksen dalam penelitian ilmiahnya dengan judul “*Application of the Close-Loop Stepping Motor*” yang dipublikasikan pada tahun 1968. Roland Frederiksen menginisiasi

pengendalian *stepper motors* secara digital dengan menggunakan mikroprosesor sebagai pengendali, sehingga pengendalian *stepper motor* bersifat mudah dan murah (Roland Frederiksen, 1968). Lalu dengan metode kendali Sliding Mode Control (SMC) (Sepasi et. al., 2012). SMC dikenal dengan metode kendali yang cepat dan kokoh (robust). Namun, SMC juga memiliki kendala, yakni *chattering* yang sering muncul sehingga menyebabkan pengendalian menjadi terganggu.

Salah satu metode konvensional dalam mengendalikan *stepper motor* adalah metode Proportional Integral Derivative (PID) yang dapat ditemui di hampir segala sektor industri (Hanifzadegan et. al. 2015). Namun industri menginginkan metode kendali yang lebih optimal dan mudah digunakan pada berbagai macam jenis plant. Maka dari itu, pengembangan dari metode PID berhasil digagas oleh Profesor Jingqin Han yang kemudian dipublikasi dengan judul “*From PID to Active Disturbance Rejection Control*” pada tahun 2009 (Han, J. 2009). *Active disturbance rejection control* pertama kali digagas pada tahun 1990 dan saat ini beberapa industri sudah melakukan penerapan terhadap metode tersebut, dan *ADRC* merupakan pengembangan metode kendali yang berasal dari metode kendali *close loop PID* (Huang Y. et. al. 2014). Perbedaan secara signifikan pada metode kendali *close loop PID* dan *ADRC* adalah pada *ADRC* terdapat pada bagian blok *ADRC* yang terdiri dari *extended state observer (ESO)*, *tracking differentiator (TD)*, dan *nonlinear state error feedback (NLSEF)* yang mana ketiga tersebut menerima inputan berupa *feedback* dari proses pada sistem. kemudian keluaran dari *ADRC* akan dikirim lagi ke kontroler, sehingga kontroler akan melakukan aksi dengan tujuan agar proses dapat berjalan dengan optimal.

Saat ini, *ADRC* banyak digunakan pada penelitian ilmiah dengan topik pengendalian motor. Seperti yang dilakukan oleh Dali Zhou et. al. pada tahun 2015 yang mengangkat pengendalian motor menggunakan metode kendali *ADRC* dengan judul “*ADRC and GA Algorithm for Fixed-Wing UAV*”. Dali Zhou menggunakan *ADRC* pada simulator pesawat F16 buatan *Lockheed Martin* yang dirancang agar pesawat F16 mampu melakukan pergerakan sendiri (*self-driven*) tanpa bantuan manusia (Dali Zhou et. al. 2015). Kemudian Shen Zhonghua pada tahun 2019 juga mengangkat topik *ADRC* sebagai metode kendali pada *motor servo* dalam penelitian ilmiahnya dengan judul “*Design and Simulation of Naval Gun*

*Servo Controller Based on ADRC*". Shen Zhonghua menganalisis topik ilmiahnya dengan menganalisa karakteristik dari sistem *servo* dan pergerakan senjata dengan model matematis, kemudian disimulasikan pada *software simulator* MATLAB/SIMULINK dengan penambahan metode kontrol *ADRC* dan *PID* (Shen Zhonghua, 2019).

Oleh sebab itu, topik penelitian dari tugas akhir ini adalah mendesain dan menerapkan *active disturbance rejection control (ADRC)* berbasis simulasi pada ulir (*ballscrew*) motor DC dengan variasi tegangan, serta membandingkan hasil penelitian dengan metode *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID*. Topik tersebut dipilih oleh penulis, dikarenakan penulis belum menemukan topik penelitian *ADRC* pada *stepper motor* dengan variasi tegangan,

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana mendesain, dan menerapkan *active disturbance rejection control (ADRC)* pada *stepper motor* dalam sistem ulir (*ballscrew*) dengan memvariasikan tegangan, dan beserta membandingkan hasil percobaan antara *ADRC* dengan *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID*.

## **1.3 Tujuan**

Untuk tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk mendesain dan menerapkan sistem kendali *active disturbance rejection control (ADRC)* pada *stepper motor* dalam sistem ulir (*ballscrew*) berbasis simulasi dengan memvariasikan tegangan, dan beserta membandingkan hasil percobaan antara *ADRC* dengan *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID* sehingga dapat diketahui dampak yang dihasilkan dari pengaruh variasi

## **1.4 Lingkup Kajian**

Dalam penelitian ini, awalnya akan dilaksanakan dengan metode eksperimen dengan pengujian alat. Namun, dikarenakan kondisi yang terbatas, maka penelitian

dilanjutkan dengan metode simulasi dengan *software* simulator. Untuk lingkup dalam penelitian tugas akhir ini, antara lain:

- a. Obyek penelitian hanya menggunakan motor berjenis *bipolar/hybrid stepper motor DC*
- b. Sistem pengendalian motor menggunakan teknik *active disturbance rejection control (ADRC)*, *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID*.
- c. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software simulator* MATLAB/SIMULINK r2019b.
- d. Penelitian hanya menggunakan 3 (tiga) variasi tegangan, yaitu 24V, 40V, 110V
- e. Torsi input dari pengujian simulasi sebesar 0 N.m dan 3 N.m.
- f. Arus input dari pengujian simulasi hanya 5 A.
- g. Momen inersia dari pengujian simulasi sebesar 0.69 kg.m<sup>2</sup>.
- h. Variabel fisis yang digunakan sebagai *feedback control* adalah torsi (T), dan sudut ( $\theta$ )
- i. Pengamatan dilakukan dengan membandingkan hasil antara pengujian dengan menggunakan *ADRC* dengan *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID*

## 1.5 Sistematika Laporan

Adapun sistematika dari laporan penelitian adalah penyampaian pendahuluan pada Bab I, kemudian berlanjut pada penyampaian dasar teori dan tinjauan pustaka pada Bab II, lalu pemaparan metode penelitian pada Bab III, kemudian penyampaian hasil eksperimen yang berupa data tabel dan gambar cuplik pada Bab IV, dan penyampaian kesimpulan pada Bab V.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 *Hybrid/Bipolar Stepper Motor*

*Stepper motor* merupakan aktuator yang memungkinkan untuk melakukan aksi kontrol secara presisi melalui posisi sudut. Sistem ini terdiri atas sebuah motor listrik yang dikelilingi dengan beberapa lilitan koil yang berfungsi untuk mendapatkan umpan balik berupa posisi yang dikenal dengan sebutan phase. Dengan bantuan komputer, maka *stepper motor* mampu untuk melakukan aksi bergerak yang membutuhkan posisi yang presisi. Teknik kontrol yang umum yang digunakan pada servomotor adalah kontrol posisi, kecepatan, dan torsi. Motor servo digunakan dalam beragam aplikasi, diantaranya: Mesin CNC, industri manufaktur, dan industri robot (Adafruit, 2012)

Untuk model matematis dari flux *stepper motor bipolar/hybrid* adalah sebagai berikut :

$$\begin{cases} \psi_A = L_A i_A + \psi_{MA} \cos \theta_E \\ \psi_B = L_B i_B + \psi_{MB} \sin \theta_E \end{cases} \quad (2.1)$$

Pada persamaan (1)  $\psi_A$  dan  $\psi_B$  adalah *air-gap* dari total fluks pada lekuk (*windings*) fase-A dan fase-B,  $L_A$  dan  $L_B$  adalah induktansi dari lekuk pada fase A dan fase B,  $i_A$  dan  $i_B$  adalah arus pada lekuk,  $\psi_{MA}$  dan  $\psi_{MB}$  adalah *air-gap* dari fluks magnetik yang dihasilkan oleh *permanent magnet*.  $\theta_E$  merupakan sudut putar dari rotor.

Untuk model matematis dari induktansi motor dijabarkan sebagai berikut :

$$\begin{cases} L_A = L - \frac{k_{tc} i_a}{Z_r |i_a|} \cos \theta_E \\ L_B = L - \frac{k_{tc} i_b}{Z_r |i_b|} \sin \theta_E \end{cases} \quad (2.2)$$

Pada persamaan (2.2),  $L$  adalah konstansta dari *self-inductance*,  $Z_r$  adalah jumlah gigi rotor,  $k_{tc}$  adalah koefisien saturasi dan representasi ukuran komponen dari induktansi.

Untuk model matematis dari persamaan gaya *counter electromotive* adalah sebagai berikut :

$$\left\{ \begin{array}{l} u_A = -\frac{d\theta}{dt}(k_{t\theta} - k_{tc}|i_A|(\sin \theta_E + h_3 \sin (3\theta_E))) \\ u_B = -\frac{d\theta}{dt}(k_{t\theta} - k_{tc}|i_B|(\cos \theta_E + h_3 \cos (3\theta_E))) \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

Pada persamaan (2.3),  $u_A$  dan  $u_B$  adalah persamaan gaya *counter-electromotive* dari fase-A dan fase-B,  $k_{t\theta}$  adalah koefisien nilai torsi,  $\theta$  adalah sudut mekanik dari rotor.

Hubungan antara  $\theta$  dan  $\theta_E$  adalah :

$$\theta_E = Z_r \theta \quad (2.4)$$

Untuk persamaan rangkaian listrik pada *stepper motor bipolar/hybrid* adalah sebagai berikut :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{v_A - i_A R - u_A}{L_A} \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{v_B - i_B R - u_B}{L_B} \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

Pada persamaan (2.5)  $v_A$  dan  $v_B$  adalah total nilai tegangan lekuk pada fase-A dan fase-B.  $R$  adalah nilai resistansi dari lekuk

Persamaan torsi elektromagnetik  $T_A$  dan  $T_B$  adalah sebagai berikut :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_A = -i_A(k_{t\theta} - \frac{k_{tc}}{2}|i_A|)(\sin \theta_E + h_3 \sin (3\theta_E)) \\ T_B = -i_B(k_{t\theta} - \frac{k_{tc}}{2}|i_B|)(\cos \theta_E + h_3 \cos (3\theta_E)) \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

Untuk persamaan posisi torsi  $T_d$  pada *stepper motor bipolar/hybrid* adalah sebagai berikut :

$$T_d = D \sin(4\theta) \quad (2.7)$$

Nilai total torsi elektromagnetik  $T_e$  adalah sebagai berikut

$$T_e = T_a + T_b + T_d \quad (2.8)$$

Sedangkan persamaan dinamik dari *stepper motor bipolar/hybrid* adalah sebagai berikut :

$$T_c = J \frac{d\omega}{dt} + D_x \omega + T_L \quad (2.9)$$

Pada persamaan (2.9),  $J$  adalah nilai rotasi inersia,  $\omega$  adalah kecepatan putar sudut,  $D_x$  adalah koefisien gesek,  $T_L$  adalah nilai dari beban torsi.

Sehingga bila mengikuti model motor Leenhouts, maka model lain dari persamaan *stepper motor bipolar/hybrid* adalah sebagai berikut :

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J} + D \sin \theta + D_x \theta + T_A + T_B - T_L \quad (2.10)$$

Kelebihan dari *stepper motor* adalah :

- a. Positioning. *stepper motor* mampu melakukan manuver dengan melakukan pergerakan secara presisi.
- b. Kecepatan putaran dari *stepper motor* dapat dikendalikan
- c. Mampu mendapatkan torsi maksimum pada kecepatan rendah

Agar dapat bermanuver secara presisi, maka putaran dari *stepper motor* dapat diatur. Pengaturan dari putaran *stepper motor* sendiri bervariasi bergantung pada ukuran motor dan sudut putar. Rentang putaran yang diperlukan *stepper motor* untuk bergerak dalam satu putaran (*steps per revolution*) adalah 4 hingga 400, bergantung dari sudut gerakannya. Umumnya, *stepper motor* yang ada dipasaran memiliki *steps per revolution* 24, 48, dan 200. Untuk mencari nilai *steps per revolution* adalah

$$\frac{\frac{360 \text{ degree}}{1 \text{ revolution}}}{\frac{\text{degree}}{\text{steps}}} = \frac{\text{steps}}{\text{revolution}} \quad (2.11)$$

Sedangkan untuk mencari nilai steps per inch adalah

$$\text{Leadscrew} \cdot \left( \frac{\text{revolution}}{\text{inch}} \right) * \frac{1}{\text{microsteps}} * \text{motor} \frac{\text{steps}}{\text{revolution}} = \frac{\text{steps}}{\text{inch}} \quad (2.12)$$

Untuk menggerakkan *stepper motor*, maka diperlukan sebuah *driver*. *Driver* adalah alat yang sudah terprogram yang mana mampu untuk mengendalikan suatu piranti (*stepper motor*). Untuk menggunakan *driver* tersebut, maka *driver* dihubungkan dengan komputer, kemudian di satu sisi, dihubungkan dengan *stepper motor*. Parameter yang diperlukan dalam menggunakan *driver* untuk menggerakkan *stepper motor* adalah

- a. Tegangan. (Seberapa besar tegangan yang mampu untuk masuk dalam *driver*)
- b. Arus *continuous* (Seberapa besar arus yang mampu untuk masuk dalam *driver*)

Parameter lain yang diperlukan untuk mengendalikan *stepper motor* agar *stepper motor* tidak mengalami kejadian malfungsi adalah

- a. Arus per fase. (Berapa arus maksimum yang dibutuhkan agar motor dapat berputar tanpa mengalami gejala kepanasan (*overheating*))
- b. Hambatan per fase. (Berapa nilai hambatan yang ada dalam satu fase gerakan)

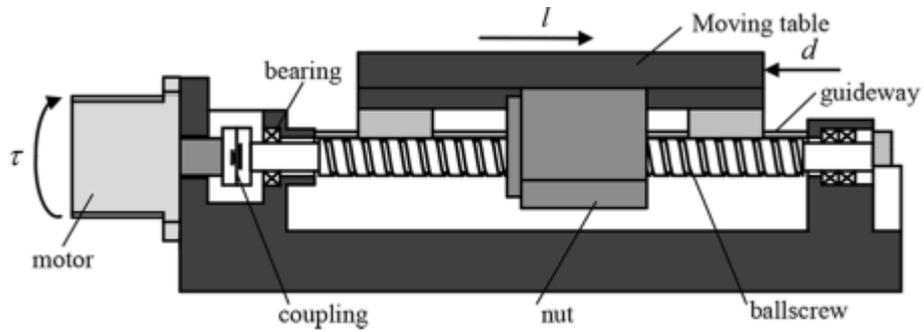
Untuk itu, nilai dari kedua parameter pengendalian motor diatas umumnya dapat diatasi dengan hukum ohm (ohm law)

$$V = I * R \quad (2.13)$$

## 2.2 Sistem Ulir (Ball screw)

Ulir (*ballscrew/leadscrew*) merupakan salah satu teknik mekanik yang memiliki fungsi untuk menggerakkan suatu obyek. Umumnya, teknik ini dikenal dengan sebutan *ratchet mechanism* (mekanisme ratchet) yang mana memiliki gerakan berputar secara linier dan bersifat kontinyu.

Ulir terdiri dari *gear* berputar dan ukiran rak gigi yang memiliki fungsi untuk memindahkan obyek. Untuk menggerakkan ulir pada sistem, diperlukan aktuator. Pada penelitian ini, aktuator yang digunakan adalah *stepper motor bipolar/hybrid*. Model sistem diilustrasikan pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1.** Mekanisme dari gerakan ulir (ballscrew/leadscrew)  
(Chengyong Zhang, 2016)

Untuk model dari sistem ulir, dijelaskan pada model matematis berikut :

$$\begin{bmatrix} x_M(s) \\ x_L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & G_{dM}(s) \\ G_2(s) & G_{dL}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_M \\ F_S \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$G_{dM}(s)$  dan  $G_{dL}(s)$  merupakan fungsi transfer dari  $F_d$  menuju  $x_M$  dan  $x_L$ .  $G_1(s)$  dan  $G_2(s)$  adalah fungsi transfer *rigid-body* dari  $F_M$  menuju  $x_M$  dan  $x_L$ ,

$$G_i(s) = \frac{1}{Ms^2 + Bs} + \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_{ik}s + \beta_{ik}}{s^2 + 2\zeta\omega_{nk}s + \omega_{nk}^2}, i = 1,2 \quad (2.15)$$

Dimana  $M$  merupakan representasi total nilai massa dari motor dan beban.  $B$  adalah nilai redaman *viscous*,  $\omega_{nk}$  adalah nilai frekuensi natural,  $\zeta$  adalah rasio redaman pada mode fleksibel,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah mode residual, dan  $n$  merupakan nilai orde maksimum.

Untuk nilai  $G_1(s)$  dan  $G_2(s)$  direpresentasikan sebagai berikut :

$$G_1(s) = \frac{1}{(M_M + M_L)s^2} \frac{M_L s^2 + cs + k}{M_P s^2 + cs + k}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(M_M + M_L)s^2} \frac{cs + k}{M_P s^2 + cs + k}$$
(2.16)

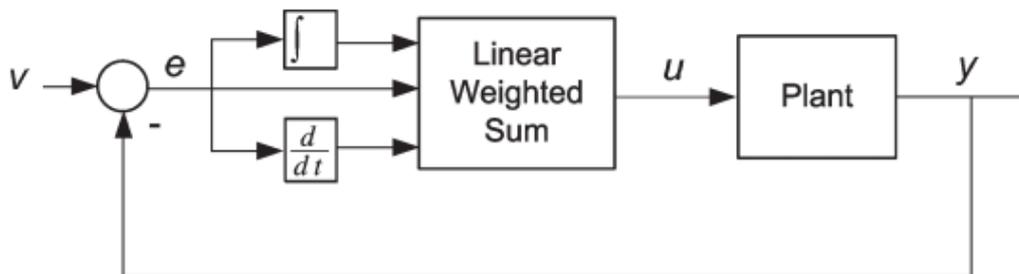
Dimana  $M_P = M_M M_L / (M_M + M_L)$ , massa motor adalah  $M_M$  dan massa beban adalah  $M_L$ ,  $k$  adalah koefisien *stiffness axial* yang dipengaruhi oleh *stiffness* ulir, bearing, baut dan *coupling*,  $c$  adalah koefisien redaman.

Persamaan (2.15) dapat disederhanakan menjadi :

$$G_i(s) = \frac{1}{M s^2 + B s}, i = 1, 2$$
(2.17)

### 2.3 PID

PID merupakan metode kontrol konvensional yang digunakan oleh banyak industri dikarenakan sifatnya mudah untuk diaplikasikan pada berbagai macam sektor industri manufaktur. Masifnya penggunaan metode PID selain dikarenakan implementasinya yang mudah, PID juga merupakan metode yang paling efisien dalam menjawab permasalahan sistem kontrol dalam kehidupan sehari-hari (Kiam Heong Ang, 2005). Untuk skema metode kontrol PID digambarkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



**Gambar 2.2.** Topologi PID  
(Jingqing Han, 2009)

Pada gambar 2.2 dengan deskripsi variabel  $v$  adalah input pada sistem,  $e$  adalah hasil *summing point* antara output proses dengan input sistem,  $u$  merupakan hasil input yang diproses dengan PID, dan  $y$  merupakan output dari sistem.

Ketika nilai error pada setpoint  $v = \text{konstanta}$ , dan  $y = \text{output pada sistem}$ ,  $e = v - y$  dengan turunan  $de/dt$  dan integral  $\int_0^t e d\tau$  digunakan sebagai kombinasi linier untuk merancang sistem control

$$u = k_0 \int_0^t e d\tau + k_1 e + k_2 \frac{de}{dt} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + b_u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.19)$$

Jika  $e = v - y = v - x_1 = e_1$ ,  $\dot{e}_1 = -\dot{x}_1 = e_2$ , dan  $\ddot{e} = -\ddot{x}_1$ , maka error dinamik akan dapat dilihat pada persamaan (2.18) :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_1 v + b u \end{cases} \quad (2.20)$$

Dengan  $e_0 = \int_0^t e d\tau$ , kemudian  $\dot{e}_0 = e = e_1$ , maka persamaan (2.18) akan menjadi :

$$u = k_0 e_0 + k_1 e_1 + k_2 e_2 \quad (2.21)$$

Dan persamaan (2.19) menjadi :

$$\begin{cases} e_0 = e_1 \\ \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bk_0 \left( e_0 + \frac{a_1}{bk_0} v \right) + (a_1 - bk_1) e_1 + (a_2 - bk_2) e_2 \end{cases} \quad (2.22)$$

Yang mana akan stabil jika :

$$\begin{cases} bk_0 > 0, (bk_1 - a_1) > 0, (bk_2 - a_2) > 0 \\ (bk_1 - a_1)(bk_2 - a_2) > bk_0 \end{cases} \quad (2.23)$$

## 2.4 Active Disturbance Rejection Control

*Active disturbance rejection control* (ADRC) merupakan salah satu algoritma yang dikembangkan dengan dasar algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) yang pertama kali diteliti pada tahun 1829 oleh Insinyur Prancis Jean Victor Poncelet. Tujuan awal Poncelet menginisiasi ADRC dicantumkan dalam kutipan artikel “the disturbances must be used to generate an activating signal which will tend to cancel the effect of the same disturbance,” yang kemudian dipublikasi oleh Profesor G.V. Schipanov pada tahun 1939, dan kemudian digunakan sebagai algoritma kontrol untuk beberapa piranti alusista Uni Soviet pada perang dunia kedua. Pada tahun 1970, C.D Johnson melakukan pengembangan algoritma dari Schipanov dengan judul “*Disturbance Accomodation Control*”. Johnson memasukkan *unknown input disturbance observer* (UIDO) dengan tujuan agar mendapatkan umpan balik dari sistem, umpan balik tersebut nantinya dikembalikan ke input dengan harapan agar fictitious state bisa tercapai semaksimal mungkin sehingga memberikan kontrol yang optimal. Pada tahun 1990, Profesor Jingqin Han yang merupakan murid dari Profesor G.V. Schipanov melakukan pengoptimalan dari beberapa versi PID yang dikembangkan dengan menambahkan *extended state observer* (ESO) sebagai umpan balik suatu proses.

Tujuan dirancangnya *ADRC* adalah :

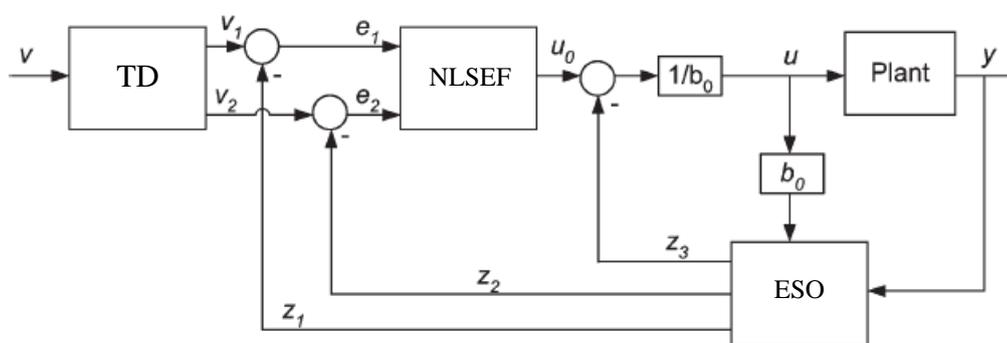
- a. Menyederhanakan plant, sehingga berbagai macam jenis disturbance, gangguan dari luar dan dalam, serta gangguan yang tidak diketahui menjadi satu jenis.
- b. Memperkirakan gangguan dengan cara yang akurat
- c. Merancang bagaimana caranya untuk membatalkan jenis gangguan (noise-cancelling) dengan memanfaatkan umpan balik dari kontrol

ADRC terdiri dari tiga elemen, yakni TD (*tracking differentiator*), ESO (*extended state observer*), dan NLSEF (*non linear state Error Feedback*) dengan skema seperti yang dilampirkan pada gambar 2.3. Pada gambar 2.3, TD digunakan untuk mengatur input proses perpindahan dan mengganti nilai pada sistem. ESO digunakan untuk memberikan nilai output pada persamaan diferensial dan

mengestimasi *disturbance* baik dari internal maupun eksternal pada sistem, dan NLSEF adalah kombinasi nilai error nonlinier pada TD dan ESO.

ADRC sendiri bila ditinjau dari segi penggunaannya, umumnya digunakan pada jenis *plant* yang menggunakan penggerak motor/aktuator motor, seperti pengendalian putaran pada bagian robot yang memerlukan putaran secara presisi, kemudian manuver dari pergerakan *printer* 3D yang juga memerlukan pergerakan secara presisi dengan mengendalikan putaran pada *servo* motor. Hal tersebut dapat ditemui pada buku karangan Hebett Sira-Ramirez et. al. dengan judul “*Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems: A Flatness Based Approach*” keluaran tahun 2017 dalam bab 5, halaman 117 serta buku karangan Bao-Zhu Zhao Guo et. al. dengan judul “*Active Disturbance Rejection Control for Nonlinear Systems: An Introduction*” keluaran tahun 2016 dalam bab 4, halaman 267. Dalam kedua buku tersebut, dijelaskan bahwa ADRC digunakan pada eksperimen dimana plant tersebut menggunakan aktuator *motor*.

Untuk deskripsi secara menyeluruh mengenai ADRC, telah dilampirkan pada Bab 3 Sub-bab 3.3 Desain Set Simulasi.



**Gambar 2.3.** Skema ADRC  
(Jingqin Han, 2009)

- ***Tracking Differentiator***

Persamaan matematis dari *tracking differentiator* sendiri dijabarkan pada persamaan (2.24) berikut :

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = f(z_1, z_2) \end{cases} \quad (2.24)$$

Solusi dari persamaan (2.17) dapat mempengaruhi persamaan (2.25)

$$\lim_{x \rightarrow \infty} z_1(t) = 0, \lim_{x \rightarrow \infty} z_2(t) = 0 \quad (2.25)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \alpha^2 f(x_1 - v(t), \frac{x_2}{\alpha}) \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^T |x_1(a, t) - v(t)| dt = 0 \quad (2.27)$$

Pada persamaan (2.18) faktor kecepatan  $\alpha$  berdampak pada kecepatan *tracking*. Kecepatan *tracking* naik dan output  $x_1$  dapat mendekati sinyal asli. Sedangkan turunan dari  $x_2$  dapat mengacaukan persamaan (2.19) jika nilai  $\alpha$  bertambah.

$$\begin{cases} fhan = -r \left( \frac{a}{d} - sgn(\alpha) \right) s_\alpha - r sgn(\alpha) \\ d = rh^2 \\ a_0 = hx_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + sgn(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = (sgn(y + d) - sgn(y - d))/2 \\ \alpha = \alpha_0 + y - \alpha_2 s_y + \alpha_2 \\ s_\alpha = (sgn(\alpha + d) - sgn(\alpha - d))/2 \end{cases} \quad (2.28)$$

- **NLSEF**

Pada ADRC,  $v_1$  dan  $v_2$  merepresentasikan proses perpindahan dan perbedaan sinyal,  $z_1$  dan  $z_2$  merupakan nilai *output* dan turunan sinyal. Sinyal  $e_1$  adalah *error* dari  $v_1$  dan  $z_1$ , dan  $e_2$  adalah *error* dari  $v_2$  dan  $z_2$ . Kombinasi nonlinier fhan digunakan sebagai berikut :

$$u_0 = -fhan(e_1, ce_2, r_1, h_1) \quad (2.29)$$

Nilai parameter dapat disesuaikan untuk mendapatkan kontrol yang lebih baik dengan mengganti variable  $e_1, ce_2, r_1, h_1$ .

- **ESO**

ESO merupakan parameter terpenting dalam ADRC. Ketika terdapat *disturbance* yang tidak diketahui, maka proses dapat diselesaikan dengan persamaan matematis berikut :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, t, \omega(t)) + b_0 u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2.30)$$

Pada persamaan (23),  $f(x_1, x_2, t, \omega(t))$  merupakan fungsi yang tidak diketahui (*unknown function*),  $\omega(t)$  merupakan *unknown disturbance*,  $x_1$  dan  $x_2$  merupakan *state variable* pada sistem, dan  $x_1$  dapat diukur, jika  $\dot{x}_2$  dijadikan *state variable*, maka *state variable* baru pada  $x_3$  adalah sebagai berikut :

$$x_3 = f(x_1, x_2, t, \omega(t)) \quad (2.31)$$

Persamaan *state observer* pada sistem ini dijabarkan pada persamaan (2.30)

:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} g_1(e_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} g_2(e_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} g_3(e_1) \end{cases} \quad (32)$$

Jika parameter  $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ , dan turunan fungsi nonlinier  $g_1(e_1), g_2(e_1)$ , dan  $g_3(e_1)$  dipilih dengan benar, maka *observer* dapat mengestimasi nilai  $z_1, z_2$  *state variable* dari  $x_1, x_2$  dan nilai *real-time* dari  $a$  pada *state variable*  $x_3$ , maka persamaan (31) dan (32) dapat diperoleh :

$$z_1 \rightarrow x_1, z_2 \rightarrow x_2 \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} z_3 \rightarrow x_3 = a \\ a = f(x_1, x_2, t, \omega(t)) \end{cases} \quad (2.34)$$

Pada persamaan (2.28), fungsi  $fal$  dipilih untuk menggantikan variable  $g$  pada persamaan (2.25)

$$fal(e, a, \delta) = \begin{cases} e/\delta^{|1-a|} & |e| \leq \delta \\ |e|^a \operatorname{sgn}(e) & |e| > \delta \end{cases} \quad (2.35)$$

Pada persamaan (2.33), jika  $f(x_1, x_2, t, \omega(t))$  dan  $\omega(t)$  tidak diketahui, namun nilai  $a$  pada sistem dapat diestimasi

ESO pada penelitian ini, dirancang dengan fungsi  $fal$  pada persamaan (35)

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} fal(e_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} fal(e_1) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_{02} fal(e_1) \end{cases} \quad (2.36)$$

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi mengenai langkah-langkah dari pengerjaan penelitian tugas akhir “Rancang Bangun Sistem Kendali Ulir Pada Motor DC Dengan Metode *active disturbance rejection control (ADRC)* Dengan Variasi Bidang Dan Massa Beban (*Payload*)”. Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan urutan beberapa langkah penelitian seperti pada **Gambar 3.1**.

Penelitian ini memiliki topik utama desain dan simulasi kendali ulir pada motor DC. Tahap simulasi dilakukan dengan menjabarkan permasalahan dengan menggunakan model matematis yang terdapat pada sistem.

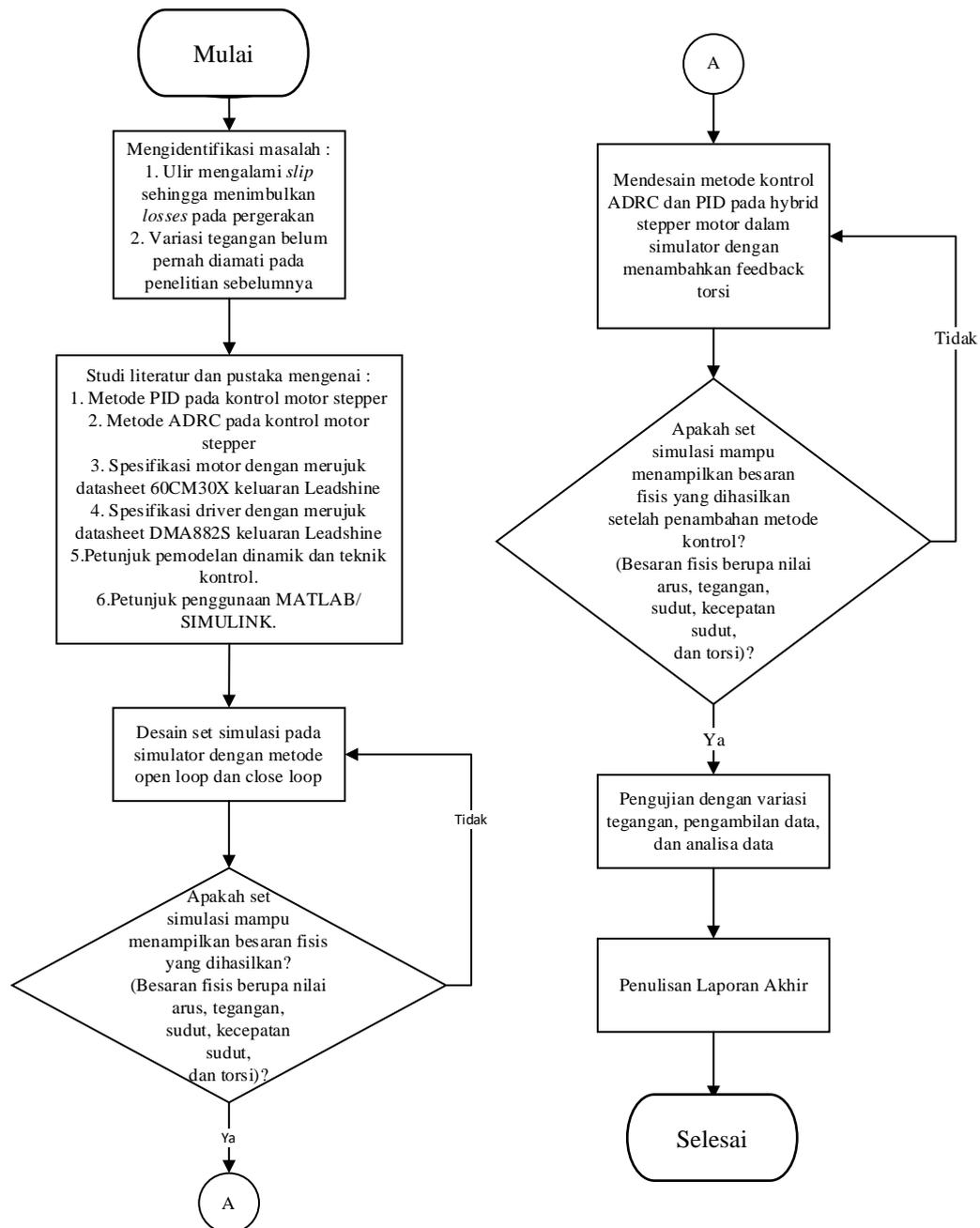
#### **3.1 Identifikasi Masalah**

Identifikasi masalah pada sub-bab ini adalah untuk menjabarkan permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian tugas akhir ini. Terdapat dua permasalahan dalam penelitian ini, yakni *slip* yang terjadi pada ulir sehingga menyebabkan timbulnya *losses*, dan belum adanya variasi tegangan pada penelitian terdahulu

#### **3.2 Studi Pustaka**

Studi pustaka dilakukan untuk mendapatkan pemahaman terhadap aspek-aspek penelitian yang dilakukan dengan pengkajian terhadap pustaka serta penelitian-penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan. Studi pustaka ditujukan untuk membantu proses desain set simulasi, perumusan masalah, penentuan metode dalam eksperimen identifikasi parameter sistem, perancangan dan pengujian algoritma kontrol pada sistem.

Untuk pustaka yang digunakan dalam menyelesaikan penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

- **J. Han, "From PID to Active Disturbance Rejection Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 900–906, 2009**

Dalam artikel ilmiah tersebut, Jingquin Han menginisiasi suatu algoritma kontrol yang optimal sehingga hasil dari suatu proses dapat menjadi optimal dengan berdasarkan algoritma kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), dengan menambahkan *extended state observer* (ESO) sebagai umpan balik. ESO

mendapatkan masukan dari kontroler dan output sehingga dapat menghasilkan umpan balik, dan dikirimkan kembali kepada kontroler untuk memberikan masukan agar dapat menghasilkan proses yang optimal

- ***Y. Huang and W. Xue, "Active disturbance rejection control: Methodology and theoretical analysis," ISA Transactions, vol. 53, no. 4, pp. 963–976, 2014.***

Dalam publikasi tersebut, dijelaskan secara bertahap mengenai persamaan matematis dari *active disturbance rejection control* (ADRC) beserta peran ESO dalam algoritma ADRC

- ***C. Zhang and Y. Chen, "Tracking Control of Ball Screw Drives Using ADRC and Equivalent-Error-Model-Based Feedforward Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 12, pp. 7682–7692, 2016.***

Dalam publikasi tersebut dilakukan investigasi eksperimen terhadap pergerakan ulir (*ballscrew*) pada motor dc dengan metode *active disturbance rejection control* (ADRC) dengan *extended state observer* (ESO) sebagai umpan balik dari hasil proses. Hasil eksperimen tersebut juga membandingkan antara hasil simulasi pada software dan hasil eksperimen di lapangan.

- ***D. Sepasi, R. Nagamune, and F. Sassani, "Tracking Control of Flexible Ball Screw Drives With Runout Effect and Mass Variation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 1248–1256, 2012***

Dalam publikasi ilmiah tersebut, dipaparkan bagaimana meminimalisir *tracking error* pada ulir (*ballscrew*) dengan beban massa sebagai variable bebas. Artikel tersebut secara sistematis memperkenalkan karakteristik motor dc yang digunakan untuk menggerakkan ulir (*ballscrew*) agar bisa melakukan manuver

- ***Fuhua Li and Yao Jiang et al. , “An improved dynamic model of preloaded ball screw drives considering torque transmission and its application to frequency analysis,” Advances in Mechanical Engineering vol. 9(7), pp. 1–11, 2017.***

Pada publikasi tersebut, dilakukan penelitian terhadap mekanisme pergerakan ulir (*ballscrew*) dengan memperhatikan sistem secara dinamik. Pada metode ini, Fuhua Li et. al. melakukan pengamatan dimulai dari model dinamik sistem, kemudian model dinamik dari pergerakan dari transmisi pergerakan rotasi menuju pergerakan translasi yang diawali dengan putaran motor, lalu gaya ditransfer pada *ballscrew*, kemudian ditransmisikan pada *nut* sehingga mampu menggerakkan *working table* secara translasi

- ***M. Hanifzadegan and R. Nagamune, “Tracking and Structural Vibration Control of Flexible Ball–Screw Drives With Dynamic Variations,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 1, pp. 133–142, 2015***

Pada artikel ilmiah tersebut, dilakukan penelitian untuk mengurangi pengaruh friksi pada performa ulir (*ballscrew*). Penelitian diatas menggunakan teknik untuk mengendalikan getaran (*vibration control*) dengan memperhatikan *trajectory tracking* agar mendapatkan nilai *trajectory error* supaya pengoptimalan kendali dapat dilakukan.

- ***Haibo Yu, et. al. “Self-balancing Car Control Based on Active Disturbance Rejection Control (ADRC)” AISC 1117, pp. 382–391, 2020.***

Pada publikasi ilmiah tersebut, Haibo Yu et. al. melakukan penelitian untuk mempertahankan *center of gravity* dari *self-balancing car control* dengan menggunakan metode ADRC. Dalam penelitiannya Haibo Yu et. al. menggunakan metode PD (*Proportional-Derivative*) sebagai kontrol pada sistemnya, kemudian *feedback* yang didapat dari sistem menjadi input pada ADRC untuk mencari nilai *error* dari PD, keluaran dari

ADRC yang merupakan *error* dari kontrol sebelumnya, menjadi input pada PD, dan sistem bekerja secara *looping*.

- **Katsuhiko Ogata, “Systems Dynamics 3<sup>rd</sup> Edition”. Prentice Hall, 1993**  
Buku *Systems Dynamics* karangan Katsuhiko Ogata menjelaskan mengenai permodelan sistem dinamik pada sistem, metode kontrol PID, dan model matematis dari *state observer*.

- **Katsuhiko Ogata, “Modern Control Engineering 5<sup>th</sup> Edition”. Prentice Hall, 2010**  
Buku *Modern Control Engineering* karangan Katsuhiko Ogata menjelaskan mengenai teknik kontrol pada sistem, metode kontrol PID, dan model matematis dari *state observer*.

### 3.3 Desain Set Simulasi

Set simulasi yang dibuat meliputi ulir (*ballscrew*) yang menjadi satu bagian dengan *stepper motor* DC beserta perangkat pendukung aktuator *driver*, dan perangkat keras kontrol yaitu sistem mikrokontroler.

Referensi jenis motor yang digunakan adalah *stepper motor* bipolar/hybrid *Leadshine 60CM30X* NEMA 24 dengan spesifikasi sebagai berikut :

**Tabel 3.1.** Spesifikasi Teknis (*Datasheet*) *Stepper Motor Leadshine 60CM30X*

Sumber : *Shenzen Leadshine Technology Co. Ltd.*

<b>Current Phase</b>	5 A
<b>Voltage</b>	2.3 V
<b>DC Resistance/Phase</b>	0.46 $\Omega$
<b>Inductance/Phase</b>	2.0 mH
<b>Holding Torque</b>	3 n.m
<b>Inertia</b>	0.69 kg.m <sup>2</sup>
<b>Weight</b>	1.3 kg
<b>Step</b>	1.8°
<b>Position Accuracy</b>	1.8° $\pm$ 0.9°
<b>Dielectric Strength</b>	500VAC min
<b>Insulation Resistance</b>	500M $\Omega$
<b>Temp. Max Rise (K)</b>	80

Adapun referensi *driver* yang digunakan dalam set simulasi penelitian ini menggunakan dua tipe *driver*. Yakni *DMA882S* dan *EM542S*, keduanya merupakan hasil manufaktur dari *Shenzen Leadshine Technology Co. Ltd.*

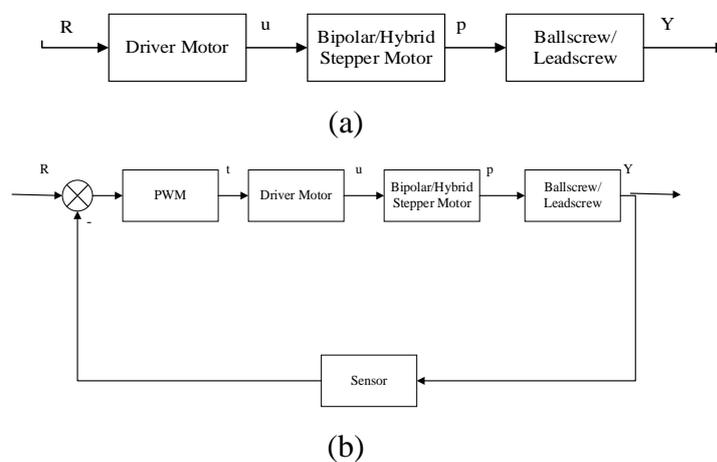
**Tabel 3.2.** Spesifikasi Teknis (*Datasheet*) *Driver Stepper Motor Leadshine DMA882S*

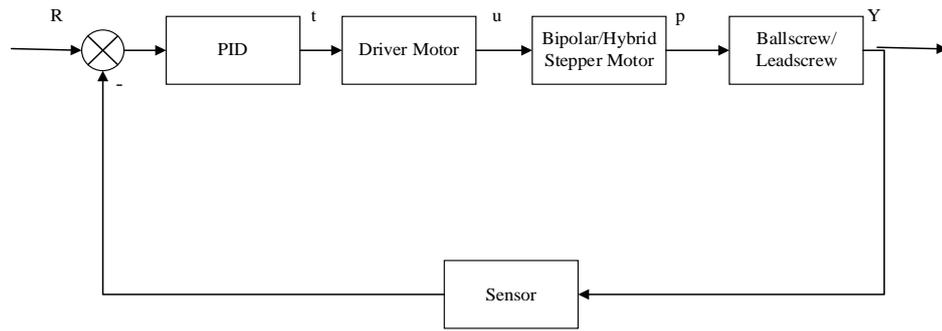
Sumber : *Shenzen Leadshine Technology Co. Ltd.*

Parameter	DMA882S			
	Min	Typical	Max	Unit
Output Current	2.1	-	8.2	A
Supply Voltage	18	36-70	80	VAC
	24	40-90	110	VDC
Logic Signal Current	7	10	16	mA
Pulse Input Frequency	0	-	200	kHz
Minimal Pulse Width	2.5	-	-	$\mu$ S
Minimal Direction Setup	5.0	-	-	$\mu$ S
Isolation Resistance	500	-	-	M $\Omega$

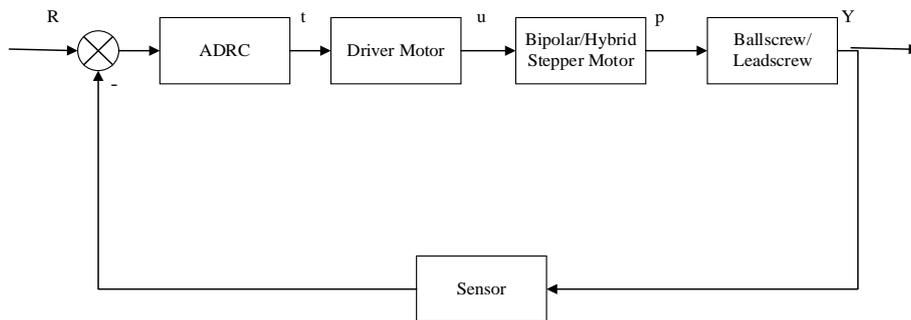
Pada penelitian ini referensi tegangan yang digunakan sebesar 24V, 40V, 110V (referensi tegangan driver *DMA882S*).

Kemudian dalam penelitian ini, dilakukan pengujian pada metode kontrol *active disturbance rejection control* (ADRC), yang kemudian hasil dari pengujian tersebut dibandingkan dengan metode kendali *open loop*, *close loop*, dan *close loop PID* dengan tujuan membandingkan performa di tiap metode kendali yang diujikan. Skema sistem tersebut digambarkan pada **gambar 3.2** dibawah ini.





(c)



(d)

**Gambar 3.2.** Diagram proses sistem penelitian

(a) *open loop*. (b) *close loop*. (c) *close loop PID*. (d) ADRC

Pada gambar 3.2., dimana dalam penelitian ini dilakukan perbandingan terhadap metode kontrol ADRC (gambar 3.2d). Untuk pembandingan metode ADRC, metode kendali yang dipilih sebagai pembandingan adalah *open loop* (gambar 3.2a), *close loop* (gambar 3.2b), dan *close loop PID* (gambar 3.2c).

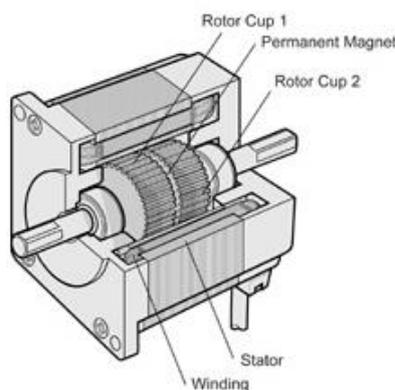
Untuk metode *open loop* dan *close loop*, variabel  $R$  merupakan input sinyal *step* arus menuju *driver*,  $u$  merupakan keluaran dari *driver* sekaligus input pada *stepper motor* berupa sinyal *PWM* untuk *open loop*, *summing point* dari sinyal respon *feedback* menuju *stepper motor* untuk *close loop*, *close loop PID* dan ADRC.  $u$  merupakan keluaran dari *driver* sekaligus input pada motor yang berupa tegangan dan arus,  $p$  merupakan keluaran dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang berupa torsi dan menuju *ballscrew system*, dan  $Y$  merupakan keluaran dari sistem berupa pergerakan translasi. Kemudian *output Y* direspon oleh sensor, lalu menuju kontroler sehingga didapat nilai *error* dari kontroler dengan variabel  $t$ , kemudian *output* dari kontroler menuju sistem dan bekerja secara berulang (*looping*).

Kaitan antar variabel dalam diagram proses pada sistem pada **gambar 3.2.** dijabarkan pada model dinamik dengan persamaan matematis. Untuk kaitan antara input dari sistem menuju *driver (u)*, dijabarkan pada model dinamik dari *driver-bipolar/hybrid stepper motor* pada **gambar 3.3.**

Pada **gambar 3.3**, dijelaskan prosedur kerja dari *bipolar/hybrid stepper motor*. Dimulai dari input berupa *step*, kemudian terjadi konversi energi dari energi listrik menjadi pergerakan mekanik sehingga muncul nilai torsi. Untuk prosedur kerja dari konversi energi pada *bipolar/hybrid stepper motor*, ditampilkan pada **gambar 3.4.**

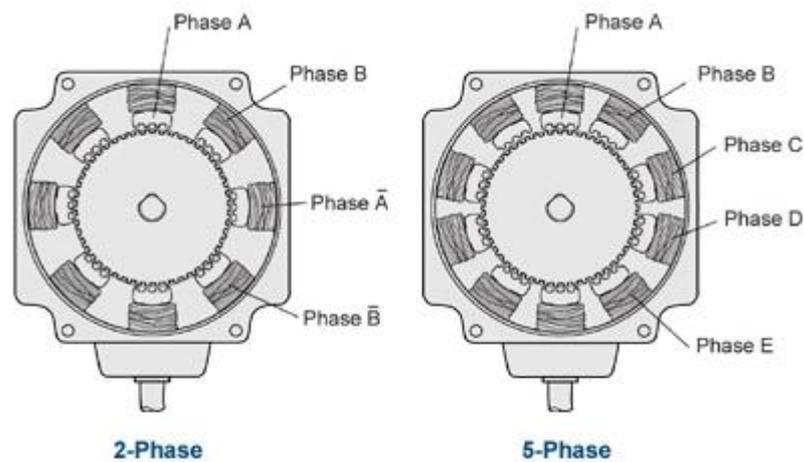
Pada **gambar 3.5**, dijelaskan prosedur kerja dari *ballscrew/leadscrew*. Dimulai dari input berupa torsi yang didapatkan dari proses kerja *bipolar/hybrid stepper motor*, kemudian diproses pada *ballscrew/leadscrew* sehingga menghasilkan pergerakan. *Ballscrew/leadscrew* pada sistem ini juga akan menerima respon dari luar sistem atau yang lebih dikenal sebagai *disturbance*, yakni nilai bobot yang ditopang oleh *ballscrew/leadscrew*. *Disturbance* bobot yang ditopang oleh *ballscrew/leadscrew* turut serta mempengaruhi gaya translasi/pergerakan dari sistem *ballscrew/leadscrew*.

*Stepper motor* adalah jenis motor yang memiliki karakteristik yakni *positioning* secara presisi yang (Oriental Motor, 2018). *Stepper motor* terdiri rotor, stator, *permanent magnet*, dan *windings* seperti yang dilampirkan pada **gambar 3.3** dibawah ini.



**Gambar 3.3.** Bagian dari *steppe motor*  
(Oriental Motor, 2018)

Dalam **gambar 3.3** diatas, rotor adalah bagian mekanik yang berputar karena adanya efek medan magnet, stator merupakan penyetabil dari rotor sehingga putaran rotor menjadi stasioner, *permanent magnet* berfungsi sebagai pemicu gerakan berputar pada rotor, dan *windings* berfungsi sebagai penyetabil medan magnet.



**Gambar 3.4.** *Bipolar/hybrid stepper motor (2-phase) & unipolar stepper motor (5-phase)*

(Oriental Motor, 2018)

**Gambar 3.4** diatas merupakan perbandingan perbedaan antara susunan *bipolar/hybrid stepper motor* dan *unipolar stepper motor*. *Bipolar/hybrid stepper motor* adalah jenis *stepper motor* yang terdiri dari dua *phase*, dan delapan *permanent magnet*. Masing – masing diiniasi dengan A+ dengan A- untuk *phase-A* dan B+ dengan B- untuk *phase-B*. Sedangkan *unipolar stepper motor* terdiri dari lebih dari dua *phase* (umumnya terdiri dari empat sampai lima *phase*, dan bergantung dari penggunaannya) dan jumlah *permanent magnetnya* mengikuti dari jumlah *phasenya*. Misal, apabila *phasenya* sebanyak lima, maka jumlah *permanent magnetnya* sebanyak sepuluh. Masing-masing diiniasi dengan *phase-A*, *phase-B*, *phase-C*, *phase-D*, dan *phase-E*.

Untuk model matematis dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang disimulasikan, merujuk pada *final project* Ricardo Picatoste Ruipole pada tugas akhirnya dengan judul “*Modelling and Control of Stepper Motor For High*

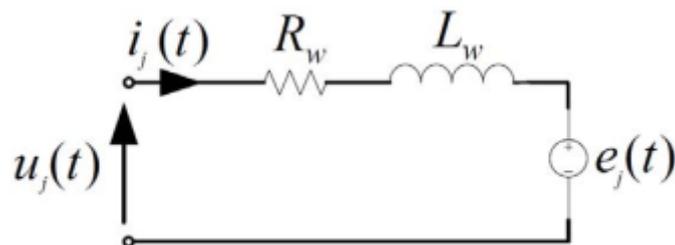
*Accuracy Positioning System used in Radioactive Environment*” tahun 2017 sebagai berikut :

- *Bipolar/Hybrid Stepper Motor*

Pada dasarnya, stepper motor merupakan aktuator yang memiliki karakteristik yakni bergerak memutar secara step. Gerakan memutar tersebut merupakan hasil efek mekanik dari gerakan memutar pada motor. Efek mekanik pada motor tersebut didapat dari energi berupa listrik dari sumber. Sehingga pada stepper motor, didapat dua bagian yang dapat dianalisa. Yakni bagian elektrik dan bagian mekanik :

- Elektrik

Pada bagian elektrik bipolar/hybrid stepper motor yang dimodelkan pada model rangkaian listrik RL pada gambar 1 oleh Ricardo Picatoste Ruipole pada tugas akhirnya dengan judul “*Modelling and Control of Stepper Motor For High Accuracy Positioning System used in Radioactive Environment*” tahun 2017 dimodelkan pada persamaan (37).



**Gambar 3.5.** Model rangkaian listrik *bipolar/hybrid stepper motor*  
(Ricardo Picatoste, 2017)

Dalam **gambar 3.5** diatas merupakan representasi dari rangkaian listrik pada *bipolar/hybrid stepper motor*. Dalam rangkaian tersebut, terdapat alur dari variabel  $u_j$  dan  $i_j$  yang merupakan tegangan input dan arus *phase* berturut-turut yang memicu gaya gerak listrik pada variabel  $e_j$  melalui rangkaian  $R_\omega$

dan  $L_\omega$  merupakan resistansi dan induktansi pada *phase*, berturut-turut. Untuk dapat mengetahui nilai dari variabel tersebut, maka dapat diketahui dengan persamaan (3.1) berikut ini :

$$L_\omega \frac{di_j(t)}{dt} = -R_\omega i_j(t) - e_j(t) + u_j(t) \text{ untuk } j = A, B \quad (3.1)$$

Pada persamaan (3.2),  $R_\omega$  merupakan resistansi pada *phase*,  $L_\omega$  adalah induktansi pada *phase*,  $i_j$  adalah arus *phase*,  $u_j$  nilai tegangan, dan  $e_j$  adalah nilai gaya gerak listrik. Nilai gaya gerak listrik ( $e_j$ ) dideskripsikan pada persamaan (3.2) berikut :

$$\begin{aligned} e_A(t) &= -K_m \omega_m \sin p \theta_m \\ e_B(t) &= K_m \omega_m \cos p \theta_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dengan  $K_m$  merupakan konstanta motor,  $p$  adalah jumlah *pole* motor yang terpasang,  $\omega_m$  kecepatan sudut dari rotor, dan  $\theta_m$  sudut putar dari motor. Persamaan (3.2) bila dikonversi pada transformasi laplace agar diketahui model dinamikanya, maka akan menjadi :

$$I_j(s) = \frac{1}{Z_{mot}} (U_j(s) - E_j(s)) \quad \text{untuk } j = A, B \quad (3.3)$$

Dengan

$$Z_{mot}(s) = L_\omega s + R_\omega \quad (3.4)$$

Yang mana  $Z_{mot}$  merupakan impedansi dari motor.

Pada penerapannya, dibutuhkan kecepatan dengan frekuensi tinggi agar *stepper motor* dapat bergerak secara optimal. Namun, frekuensi tinggi tersebut menimbulkan permasalahan, yakni suhu panas pada area motor. Sehingga suhu panas tersebut dianggap sebagai *losses* yang ditimbulkan. *Losses* panas yang dihasilkan pada *stepper motor* juga akan mempengaruhi performa dari *stepper*

motor. Losses panas dari *stepper motor* mempengaruhi impedansi. Sehingga nilai impedansi pada *stepper motor* frekuensi tinggi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (3.5) sebagai berikut :

$$Z_{mot}^{HF} = \frac{R_{\omega} + sL_{eq}}{1 + s\tau_p} \quad (3.5)$$

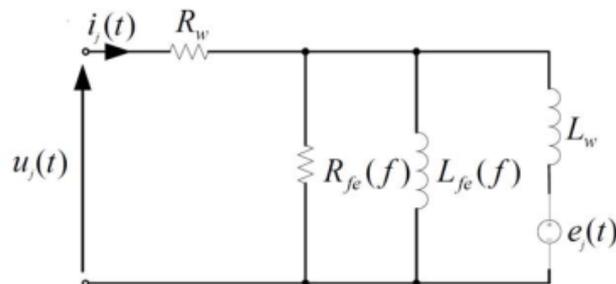
$Z_{mot}^{HF}$  adalah impedansi motor pada frekuensi tinggi.  $R_{\omega}$  adalah resistansi pada fase,  $L_{eq}$  merupakan nilai ekuivalen dari  $L_{fe}$  dan  $L_{\omega}$  pada persamaan (3.6) :

$$L_{eq} = \frac{L_{fe}L_{\omega}}{L_{fe} + L_{\omega}} \quad (3.6)$$

Dengan  $\tau_p$  adalah nilai ekuivalen dari persamaan (3.7)

$$\tau_p = \frac{R_{fe}}{L_{eq}} \quad (3.7)$$

Dengan  $R_{fe}$  dan  $L_{fe}$  adalah nilai resistansi dan induktansi berturut – turut yang didapat dari model sistem rangkaian listrik RL dengan frekuensi tinggi pada **gambar 3.6** dibawah ini :



**Gambar 3.6.** Model rangkaian listrik *bipolar/hybrid stepper motor* dengan frekuensi tinggi.

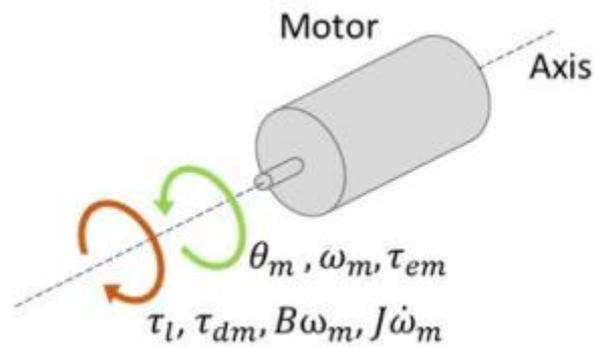
(Ricardo Picatoste, 2017)

Pada **gambar 3.6** yang merupakan representasi dari rangkaian listrik pada *bipolar/hybrid stepper motor* yang dioperasikan pada frekuensi tinggi. Dalam rangkaian tersebut, terdapat alur dari variabel  $u_j$  dan  $i_j$  yang merupakan tegangan input dan arus *phase* berturut-turut yang memicu gaya gerak listrik pada variabel

$e_j$  melalui rangkaian  $R_w$  dan  $L_w$  merupakan resistansi dan induktansi pada *phase*, berturut-turut, serta adanya rangkaian  $R_{fe}(f)$  dan  $L_{fe}(f)$  merupakan resistansi dan induktansi pada *phase* bila dioperasikan dalam frekuensi tinggi.

- Model mekanik

Dari sumber listrik yang kemudian dikonversi menjadi gerak mekanik pada *stepper motor*, maka timbul efek gerakan mekanik yang disebut sebagai gerakan rotasi. Gerakan rotasi pada *stepper motor* digambarkan pada **gambar 3.7**, dan dimodelkan pada persamaan (43) dibawah ini :



**Gambar 3.7** Gaya dari pergerakan mekanik *bipolar/hybrid stepper motor*.

(Ricardo Picatoste, 2017)

Dalam gambar 3.7 diatas merupakan representasi dari model pergerakan yang ada pada *bipolar/hybrid stepper motor*. Dalam pergerakan tersebut, motor menggerakkan *shaft* dengan cara berputar. Putaran tersebut disebabkan oleh adanya medan magnet yang dipicu dari aliran sumber listrik. Dengan demikian, putaran dari *bipolar/hybrid stepper motor* tersebut dapat diamati parameter fisiknya. Parameter fisis tersebut dapat diketahui dalam persamaan (3.7) dibawah ini.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \tau_{em} - B\omega_m - \tau_{dm} - \tau_l \quad (3.7)$$

Dengan  $J$  adalah momen inersia,  $\omega_m$  adalah kecepatan sudut pada motor,  $B$  adalah koefisien gesek *viscous* dari motor,  $\tau_{em}$  adalah torsi elektromagnetik dari motor,  $\tau_{dm}$  torsi penahan dan  $\tau_l$  adalah torsi beban eksternal. Nilai  $\tau_{em}$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.8) dibawah ini :

$$\tau_{em} = K_m(-i_{mot_A} \sin p\theta_m + i_{mot_B} \cos p\theta_m) \quad (3.8)$$

Dengan  $K$  adalah konstanta motor,  $i_{mot_A}$  dan  $i_{mot_B}$  adalah nilai arus pada *phase A* dan *phase B* berturut-turut,  $p$  adalah jumlah pole yang terpasang pada motor, dan  $\theta_m$  adalah sudut putar pada motor.

Untuk nilai  $\tau_{dm}$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.9) dibawah ini :

$$\tau_{dm} = T_{dm} \sin(2p\theta_m + \phi) \quad (3.9)$$

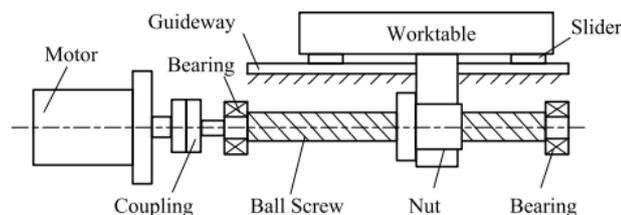
Dimana  $T_{dm}$  adalah amplitudo dari torsi penahan,  $p$  adalah jumlah pole yang terpasang pada motor,  $\theta_m$  adalah sudut putar pada motor, dan  $\phi$  adalah pergeseran fase.

Dari model pergerakan rotasi pada motor, kemudian mempengaruhi gerakan translasi pada *ballscrew/leadscrew system*. Gerakan translasi dijelaskan dengan permodelan dinamik dari *ballscrew/leadscrew system* sehingga mengakibatkan gerak translasi.

- *Ballscrew/Leadscrew System*

*Ballscrew/Leadscrew* merupakan salah satu jenis mekanisme pergerakan mekanik yang sering digunakan untuk mengubah mekanisme gerak rotasi menjadi gerak translasi. Gaya rotasi didapatkan dari pergeseran *stepper motor* yang telah dibahas pada poin sebelumnya, dan kemudian didapatkan besaran fisis berupa torsi lalu ditransmisikan pada bidang kerja *ballscrew/leadscrew system* sehingga menimbulkan efek gerak translasi. Dalam kajian Fuhua Li et. al. yang dipublikasikan pada tahun 2017 dengan judul “*An Improved Dynamics Model of Preloaded Ball-Screw Drives Considering*

*Torque Transmission and Its Application to Frequency Analysis.*” dijelaskan mengenai transmisi gaya dari gaya rotasi menjadi gaya translasi beserta analisisnya pada *ballscrew/leadscrew system*.

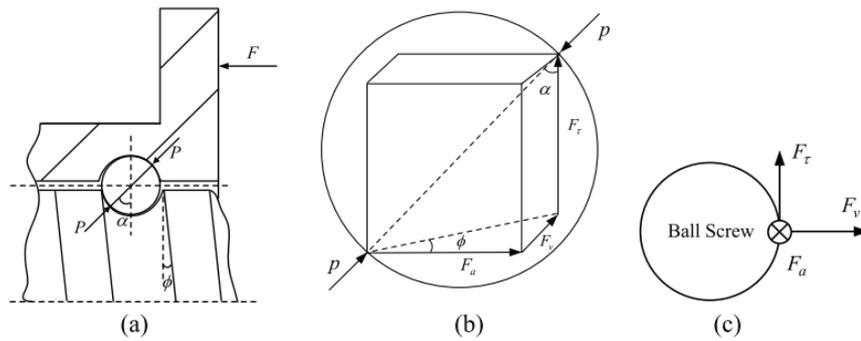


**Gambar 3.8.** Sistem *ballscrew/leadscrew*

(Fuhua Li, 2018)

Dalam **gambar 3.8**, komponen *ballscrew/leadscrew system* terdiri dari motor, *coupling*, *bearing*, *ballscrew*, *nut*, *guideway*, *slider*, dan *work table*. Gerakan dipicu dari putaran motor yang kemudian dihubungkan pada *ballscrew* dengan bantuan *coupling* sebagai penghubung dan *bearing* untuk meminimalisir friksi dari gerakan. Lalu putaran tersebut menggerakkan *ballscrew* dan *nut* sehingga menimbulkan gerakan translasi pada *working table*.

Pada mekanisme gaya translasi dalam *ballscrew/leadscrew system*, *ballscrew* mengalami putaran yang dihasilkan dari gaya rotasi pada motor. Kemudian *ballscrew* berinteraksi dengan *nut* sehingga terjadi gerakan translasi pada *moving table*. Interaksi antara *ballscrew* dan *nut* disebut sebagai gaya kontak (*contact force*) yang digambarkan pada **gambar 3.9a**. Pada *contact force* antara *ballscrew* dan *nut* dibagi menjadi tiga, yakni gaya aksial ( $F_a$ ), gaya tangensial ( $F_t$ ), dan gaya radial ( $F_v$ ), yang digambarkan pada **gambar 3.9b**. Gaya aksial adalah gaya yang terjadi pada arah gerak putar, gaya tangensial adalah gaya yang dihasilkan pada arah gerak, dan gaya radial adalah gaya yang arahnya menuju bidang normal pada gerak putar (Ivan Norma Susila, 2013), yang digambarkan pada **gambar 3.9c**. Model persamaan dari ketiga gaya tersebut adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.9.** (a) Analisa gaya pada *rolling bar*. (b) Pergerakan gaya kontak. (c) Proyeksi gaya

(Fuhua Li, 2018)

Dalam **gambar 3.9** tersebut, **gambar 3.9a** merupakan gaya putar pada *rolling bar* dalam *ballscrew*. Fungsi dari *rolling bar* pada *ballscrew* bertujuan untuk meminimalisir friksi antar benda sehingga *ballscrew* dapat bekerja secara optimal. Untuk **gambar 3.9b** merupakan sumbu pergerakan gaya kontak pada dalam *ballscrew*. Sedangkan **gambar 3.9c** merupakan proyeksi gaya putar pada *ballscrew*. Untuk mengetahui nilai dari pergerakan pada gambar tersebut, maka persamaan (3.10) dibawah dapat digunakan untuk mencari nilai fisis dari pergerakan tersebut

$$F_a = P \sin \alpha \cos \phi \quad (3.10a)$$

$$F_\tau = P \sin \alpha \sin \phi \quad (3.10b)$$

$$F_v = P \cos \alpha \quad (3.10c)$$

Dimana  $\alpha$  adalah sudut kontak antara *rolling ball* dengan jalur,  $P$  adalah gaya kontak, dan  $\phi$  adalah sudut helix antar *ballscrew*.

Ketiga persamaan tersebut dalam pergerakan *ballscrew* menyebabkan terjadinya pergerakan pada *moving table*. Efek gaya dorong  $F$  beserta torsi dari pergerakan tersebut dijabarkan secara matematis pada persamaan 3.11a dan 3.11b dibawah ini :

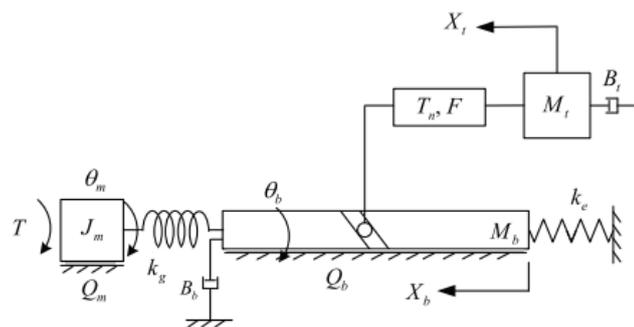
$$F = zPR \sin \alpha \cos \phi \quad (3.11a)$$

$$T_n = zPR \sin \alpha \sin \phi \quad (3.11b)$$

Dengan  $z$  adalah jumlah dari *rolling bar*,  $P$  adalah gaya kontak,  $R$  adalah radius dari *ballscrew*,  $\alpha$  adalah sudut kontak antara *rolling ball* dengan jalur, dan  $\phi$  adalah sudut helix antar *ballscrew*. Pada persamaan 3.11a dan 3.11b, hubungan antara gaya dorong ( $F$ ) dan torsi ( $T_n$ ) secara matematis akan menjadi persamaan sebagai berikut :

$$T_n = FR \tan \phi \quad (3.12)$$

Setelah didapatkan model pergerakan dari *ballscrew*, kemudian menganalisa sistem dari *ballscrew* secara keseluruhan yang digambarkan pada **gambar 3.10**



**Gambar 3.10** Model dinamik sistem *ballscrew/leadscrew*

(Fuhua Li, 2018)

Pada **gambar 3.10** diatas, merupakan model dinamik dari sistem *ballscrew* dengan sistem empat derajat kebebasan, yang terdiri dari sistem rotor yang menghubungkan antara *ballscrew* dengan *working table*. Dalam gambar tersebut,  $F$  adalah hentakan,  $T_n$  adalah torsi,  $J_m$  adalah momen inersia pada motor,  $J_b$  adalah inersia dari *ballscrew*,  $M_b$  adalah massa dari *ballscrew*,  $M_t$  adalah massa *working table*,  $k_g$  adalah nilai kekakuan torsional antara *ballscrew* dan *coupling*  $k_e$  adalah nilai kekakuan aksial antara *ballscrew* dan *bearing*,  $\theta_m$  adalah sudut putar pada motor,  $\theta_b$  adalah sudut putar pada *ballscrew*,  $X_b$  adalah perpindahan aksial pada *ballscrew*,  $X_t$  adalah perpindahan aksial pada *working table*,  $Q_m$  adalah koefisien redaman putar pada motor,  $Q_b$  adalah koefisien redaman putar pada *ballscrew*,  $B_b$

koefisien redaman aksial pada *ballscrew*, dan  $B_t$  koefisien redaman aksial pada *working table*.

Semua variabel yang telah digambarkan pada gambar 3 dan disebutkan pada paragraf sebelumnya, kemudian dimodelkan pada persamaan dinamik (3.13) dibawah ini :

$$\begin{bmatrix} J_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_b \\ \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_t \\ \dot{\theta}_b \\ \dot{X}_b \\ \dot{X}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_g & -k_g & 0 & 0 \\ -k_g & k_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_m \\ Q_b \\ X_b \\ X_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dalam kinerja *ballscrew* yang sehingga menyebabkan terjadinya efek gerak translasi pada *working table*, terdapat tiga indikator yang menyebabkan terjadinya pergerakan *working table*. Yakni perpindahan aksial yang disebabkan oleh putaran dari *ballscrew* ( $X_{t1}$ ), kemudian getaran aksial yang ditimbulkan dari gerakan *ballscrew* ( $X_{t2}$ ), dan deformasi aksial yang disebabkan karena kontak antara *ballscrew & nut* dengan area sekitarnya. Sehingga perpindahan *working table* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (3.14) sebagai berikut :

$$X_t = X_{t1} + X_{t2} + X_{t3} \quad (3.14)$$

Dengan nilai  $X_{t1}$ ,  $X_{t2}$ ,  $X_{t3}$  dapat diketahui dengan menggunakan rumus :

$$X_{t1} = \frac{U \cdot \theta_b}{2\pi}, \text{ dengan } U \text{ adalah } lead \text{ pada } ballscrew,$$

$$X_{t2} = X_b, \text{ dengan } X_b \text{ adalah perpindahan pada } ballscrew,$$

$$X_{t3} = -\delta_a, \text{ dengan } \delta_a \text{ adalah deformasi kontak aksial,}$$

Nilai deformasi kontak aksial dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (51) dibawah ini :

$$\delta_a = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\sin \alpha \cos \phi} \quad (3.15)$$

Dengan  $\delta_1$  dan  $\delta_2$  berturut-turut adalah gaya kontak adalah *ball* dengan *ballscrew* dan gaya kontak antara *ball* dan *nut*.  $\alpha$  adalah sudut kontak antara *rolling ball* dengan jalur, dan  $\phi$  adalah sudut helix dari *ballscrew*.

Gaya kontak ( $\delta$ ) pada persamaan (3.15) digunakan untuk mengamati perubahan akibat interaksi antar dua benda. Gaya kontak dapat diketahui dengan persamaan (3.15) berikut ini :

$$\delta_a = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\sin \alpha \cos \phi} \quad (3.16)$$

$$\delta = \frac{2k}{\pi \cdot ma} \left\{ \frac{1}{8} \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{1-u_1^2}{E_1} - \frac{1-u_2^2}{E_2} \right) \right]^2 \right\}^{1/3} (\Sigma\rho)^{-1/3} P^{2/3} \quad (3.17)$$

Dimana  $k$  dan  $ma$  adalah koefisien *hertz*,  $u_1$  dan  $u_2$  rasio *poisson* antara kontak dua benda,  $E_1$  dan  $E_2$  adalah modulus elastisitas,  $\Sigma\rho$  merupakan jumlah lengkungan dari titik kontak.

Sehingga, bila persamaan (3.16) bila disubstitusi ke persamaan (3.17) akan menjadi :

$$\delta_a = (k_{e1} + k_{e2}) F_b^{2/3} \quad (3.18)$$

Dengan  $F_b$  adalah dorongan aksial dari *ball*,  $k_{e1}$  dan  $k_{e2}$  adalah koefisien kontak yang nilainya dapat diketahui pada persamaan (3.19) :

$$k_{ei} = \frac{2k}{\pi \cdot M_a} \left\{ \frac{1}{8} \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{1-u_1^2}{E_1} - \frac{1-u_2^2}{E_2} \right) \right]^2 \right\}^{1/3} \frac{1}{(\sin \alpha \cos \phi)^{5/3}} (\Sigma\rho)^{1/3} \quad i = 1,2 \quad (3.19)$$

Dimana  $k$  dan  $M_a$  adalah koefisien *hertz*,  $u_1$  dan  $u_2$  rasio *poisson* antara kontak dua benda,  $E_1$  dan  $E_2$  adalah modulus elastisitas,  $\Sigma\rho$  merupakan jumlah lengkungan dari titik kontak.

Gerak translasi pada *moving table* dalam *ballscrew system* juga menimbulkan gaya kontak pada *nut* dalam *ballscrew system* sebanyak dua dengan diinisiasi sebagai *nut A* dan *nut B*, dan pergerakan dari kedua *nut* tersebut juga bergantung pada gaya *preload* pada sistem ( $F_p$ ). Gaya kontak aksial *nut A* diinisiasi

dengan  $F_1$ , dan gaya kontak aksial *nut B* diinisiasi dengan  $F_2$ . Untuk mengetahui hubungan antara gaya aksial dan deformasi aksial, maka dapat digunakan pada persamaan (56) berikut :

$$k_e \left( \frac{F_1 + F_p}{z} \right)^{2/3} - k_e \left( \frac{F_p}{z} \right)^{2/3} = \delta_b \quad (3.20a)$$

$$k_e \left( \frac{F_p}{z} \right)^{2/3} - k_e \left( \frac{F_p - F_2}{z} \right)^{2/3} = \delta_b \quad (3.20b)$$

$$F_1 + F_2 = F \quad (3.20c)$$

$k_e$  adalah jumlah dari  $k_{e1}$  dan  $k_{e2}$ ,  $z$  adalah jumlah *rolling bar*, dan nilai deformasi aksial didapat dari persamaan berikut :

$$(k_{e1} + k_{e2}) \left( \frac{F_p}{z} \right)^{2/3} = \delta_{ax} \quad (3.21)$$

Persamaan (3.21) berlaku bila gaya *preload* ( $F_p$ ) tidak kurang dari gaya aksial ( $F$ ). Bila gaya *preload* lebih rendah dari gaya aksial, maka persamaan yang berlaku adalah :

$$k_e \left( \frac{F_1 + F_p}{z} \right)^{2/3} - k_e \left( \frac{F_p}{z} \right)^{2/3} = \quad (3.22)$$

$$k_e \left( \frac{F_p}{z} \right)^{2/3} - k_e \left( \frac{F_2 - F_p}{z} \right)^{2/3} = \delta_b$$

Gerakan translasi dari *moving table* yang merupakan hasil efek dari pergerakan *ballscrew* dan *nut* pada *ballscrew/leadscrew system* juga menimbulkan efek getaran yang disebabkan oleh efek pergerakan *moving table* tersebut yang dikenal dengan sebutan efek resonansi. Untuk menghitung efek resonansi pada *ballscrew/leadscrew system*, maka persamaan (3.22) dapat diadopsi dengan penambahan variabel  $\kappa$  sebagai koefisien gesek dari gelombang tangensial antara *ballscrew* dan *shaft motor*.  $\gamma$  adalah perpindahan aksial dari *shaft ballscrew* yang disebabkan dari efek rotasi, dan  $k_n$  adalah kekakuan dari *nut* yang diperoleh dari persamaan (59).

$$k_n = \frac{z^{2/3} F_p^{2/3}}{k_{e1} + k_{e2}} \quad (3.23)$$

Dengan  $z$  adalah jumlah *rolling ball*,  $F_p$  adalah gaya *preload*  $k_{e1}$  dan  $k_{e2}$  adalah koefisien kontak dari *nut*. Kemudian, frekuensi resonansi dapat dicari dengan menggunakan persamaan (3.24) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} J_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_b \\ \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{\theta}_t \\ \dot{\theta}_b \\ \dot{X}_b \\ \dot{X}_t \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} k_g & -k_g & 0 & 0 \\ -k_g & k_g + d\kappa\gamma k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_n + k_e & -k_n \\ 0 & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_m \\ Q_b \\ X_b \\ X_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Untuk model matematis dari *PID* yang disimulasikan, merujuk pada publikasi Jingqin Han dengan judul “*From PID to Active Disturbance Rejection Control*” tahun 2009 dengan sebagai berikut :

- *PID*

*PID* merupakan metode kontrol konvensional yang digunakan oleh banyak industri dikarenakan sifatnya mudah untuk diaplikasikan pada berbagai macam sektor industri manufaktur.

Pada **gambar 2.2** dengan deskripsi variabel  $v$  adalah input pada sistem,  $e$  adalah hasil *summing point* antara output proses dengan input sistem,  $u$  merupakan hasil input yang diproses dengan *PID*, dan  $y$  merupakan output dari sistem.

Ketika nilai error pada setpoint  $v = \text{konstanta}$ , dan  $y = \text{output pada sistem}$ ,  $e = v - y$  dengan turunan  $de/dt$  dan integral  $\int_0^t e d\tau$  digunakan sebagai kombinasi linier untuk merancang sistem control

$$u = k_0 \int_0^t e d\tau + k_1 e + k_2 \frac{de}{dt} \quad (3.26)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + b_u \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3.27)$$

Jika  $e = v - y = v - x_1 = e_1$ ,  $\dot{e}_1 = -\dot{x}_1 = e_2$ , dan  $\ddot{e} = -\ddot{x}_1$ , maka error dinamik akan dapat dilihat pada persamaan (3.28) :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_1 v + bu \end{cases} \quad (3.28)$$

Dengan  $e_0 = \int_0^t e \, d\tau$ , kemudian  $\dot{e}_0 = e = e_1$ , maka persamaan (3.28) akan menjadi :

$$u = k_0 e_0 + k_1 e_1 + k_2 e_2 \quad (3.29)$$

Dan persamaan (3.28) menjadi :

$$\begin{cases} e_0 = e_1 \\ \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bk_0 \left( e_0 + \frac{a_1}{bk_0} v \right) + (a_1 - bk_1) e_1 + (a_2 - bk_2) e_2 \end{cases} \quad (3.30)$$

Yang mana akan stabil jika :

$$\begin{cases} bk_0 > 0, (bk_1 - a_1) > 0, (bk_2 - a_2) > 0 \\ (bk_1 - a_1)(bk_2 - a_2) > bk_0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Untuk model dari metode ADRC digambarkan pada **gambar 2.2**, merujuk pada publikasi Jingqin Han dengan judul “*From PID to Active Disturbance Rejection Control*” pada tahun 2009 dengan sebagai berikut :

- ADRC

ADRC merupakan metode kendali yang terdiri dari tiga elemen, yakni TD (*tracking differentiator*), ESO (*extended state observer*), dan NLSEF (*non linear state error feedback*) yang akan dijelaskan dengan deskripsi dan persamaan di bawah ini :

- *Tracking Differentiator*

*Tracking differentiator* pada ADRC berfungsi untuk memecah sinyal yang didapat dari sistem yang awalnya input berupa respon sinyal dari sistem, lalu dipecah sehingga menghasilkan output respon sinyal *trajectory* dan respon sinyal

diferensial. Untuk persamaan matematis dari *tracking differentiator*, didapat sebagaimana berikut.

Dengan merujuk pada model sistem PID pada poin sebelumnya dengan persamaan (3.27),  $y$  sebagai *output*, dan  $v$  sebagai *input* dari sistem, maka didapat persamaan umum *tracking differentiator* sebagai berikut :

$$y = \frac{1}{\tau} \left( 1 - \frac{1}{\tau s + 1} \right) v \quad (3.32)$$

Bila dikonversi dalam domain waktu, akan menjadi :

$$y(t) = \frac{1}{\tau} (v(t) - v(t - \tau)) \approx \dot{v}(t) \quad (3.33)$$

Dikarenakan persamaan diatas bukan merupakan persamaan yang bagus untuk mencari nilai pendekatan dari  $\dot{v}(t)$ , maka pendekatan nilai  $\dot{v}(t)$  dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t - \tau_1) - v(t - \tau_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3.34)$$

Dari persamaan tersebut, maka didapat fungsi transfer dari *tracking differentiator* pada persamaan (3.35) :

$$w_1(s) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \left( \frac{1}{\tau_1 s + 1} - \frac{1}{\tau_2 s + 1} \right) \quad (3.35)$$

Bila merujuk pada model sistem *tracking differentiator* pada ADRC di **gambar 2.2**, dengan  $v$  sebagai input, dan  $v_1$  dan  $v_2$  sebagai output yang mana  $v_1$  adalah keluaran dari respon sinyal *trajectory* dan  $v_2$  adalah keluaran respon sinyal diferensial, maka didapat model persamaan untuk *tracking differentiator* :

$$\begin{cases} v_1 = v_1 + hv_2 \\ v_2 = v_1 + hu \end{cases} \quad (3.36)$$

Dengan  $u$  adalah

$$fhan = (v_1 - v, v_2, r, h) \quad (3.37)$$

$fhan$  : Fungsi kontrol waktu optimal

$r$  : Parameter adjusted

$h$  : Periode sampling

#### o ESO

Pada **gambar 2.2**, dari *tracking differentiator*, maka output respon  $v_1$  dan  $v_2$  menuju *extended state observer* (ESO), fungsi ESO dalam metode ADRC adalah untuk memperbaiki *error* dari respon sinyal diferensial hasil output dari TD sekaligus berfungsi sebagai *summing point* antara sinyal respon dari  $u$  setelah di estimasi pada  $b_0$  dengan respon output dari sistem. Dalam ESO, didapatkan model matematis pada persamaan (3.35) berikut ini :

$$ESO \left\{ \begin{array}{l} e = z_1 - y \\ z_1 = z_1 - h z_2 - \beta \cdot e \\ z_2 = z_2 - h(z_3 + bu) - \beta \cdot fe \\ z_3 = z_3 - \beta \cdot fe \\ fe = fal(e, a, h) \\ e = z_1 - y \\ u = -\frac{fhan(v_1 - v, v_2, r, h)}{z_3} \end{array} \right. \quad (3.38)$$

Dengan  $\beta$  adalah gain *adjusted*,  $fal$  adalah fungsi nonlinier,  $a$  merupakan variabel *adjusted*,  $y$  output dari sistem.

Untuk fungsi transfer dari ESO sendiri, didapatkan persamaan yang dari simulator sebagai berikut

$$transfer\ function = \frac{1250\ s}{s^2 - 1.585\ s - 0.7924} \quad (3.39)$$

#### o NLSEF

Setelah dari ESO dan diproses sehingga menghasilkan *output*  $z_1$ ,  $z_2$ , dan  $z_3$ , maka output dari ESO diteruskan menuju *non-linear state error feedback* (NLSEF). Fungsi dari NLSEF sendiri pada metode ADRC dalam **gambar 2.2** adalah sebagai *summing point* antara output dari TD dan ouput dari ESO. Untuk model matematis pada NLSEF didapatkan pada persamaan sebagai berikut :

$$e_1 = v_1 - z_1 \quad (3.40)$$

$$e_2 = v_2 - z_2 \quad (3.41)$$

Dalam **gambar 2.2**, *output* dari NLSEF ada  $u_0$  yang kemudian dikali dengan satu-per estimator ( $1/b_0$ ) yang kemudian menjadi  $u$  yang merupakan *output* dari ADRC sendiri.

Untuk fungsi transfer dari NLSEF sendiri didapatkan persamaan yang berasal dari simulator sebagai berikut :

$$\text{transfer function} = \frac{8.164e^{08}}{s + 1.03e05} \quad (3.42)$$

Fungsi transfer dari ADRC sendiri juga didapatkan persamaan yang berasal dari simulator sebagai berikut :

$$\text{transfer function} = \frac{8.164e08 s^2 - 1.294e09 s - 6.469e^{08}}{s^3 + 1.001e07 s^2 + 1.02e12 s + 1.743e^{08}} \quad (3.43)$$

Untuk set simulasi yang digunakan menggunakan software MATLAB/SIMULINK dengan blok sistem sebagai berikut :

- Set blok *stepper motor bipolar/hybrid*

Set blok aktuator dalam penelitian ini berfungsi sebagai aktuator dari sistem yang disimulasikan. Aktuator yang digunakan pada penelitian ini adalah *stepper motor* dengan spesifikasi yang dilampirkan pada **tabel 3.1**.

- Set blok *driver*

Set blok driver dalam penelitian ini berfungsi sebagai penyuplai daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan aktuator. Driver yang di simulasikan dalam penelitian ini merujuk pada referensi *datasheet DMA882S* milik *Leadshine* dengan spesifikasi yang dilampirkan pada **tabel 3.2**.

- Set blok ulir (*ballscrew/leadscrew*)

Set blok ulir dalam penelitian ini berfungsi sebagai simulasi mekanisme gerak dengan yang berbentuk *ballscrew/leadscrew*.

- Set blok *controller*

Set blok *controller* dalam penelitian ini berfungsi sebagai algoritma kontrol, yang mana algoritma kontrol yang digunakan dalam penelitian ini ditujukan untuk mengetahui nilai efisiensi dari sistem yang disimulasikan. Algoritma yang digunakan dalam adalah ADRC yang penggunaannya dikombinasikan dengan PID *control*.

### 3.4 Evaluasi Sistem Simulasi

Evaluasi dilakukan untuk memastikan sistem pada set eksperimen telah siap untuk digunakan dan performanya telah sesuai dengan kebutuhan pada penelitian ini. Parameter yang ditentukan dari evaluasi sistem simulasi ini adalah sukses atau gagalnya model yang di simulasikan dengan cara melihat besaran fisis yang dihasilkan pada *toolbox scope*. Besaran fisis yang diamati adalah tegangan, arus, kecepatan sudut, sudut, dan torsi.

Evaluasi simulasi dilakukan sebanyak dua kali. Evaluasi pertama dilakukan pengamatan pada model simulasi yang di desain tanpa pemasangan metode kontrol, dan evaluasi kedua dilakukan model pengamatan pada model simulasi yang di desain dengan pemasangan metode kontrol.

### 3.5 Desain Metode Kontrol

Metode kontrol yang dicoba pada simulator di desain sesuai dengan rujukan pada metode yang yang diperoleh dari studi pustaka dan pustaka. Metode kontrol kemudian diimplementasikan pada simulator. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai fisis yang dihasilkan dari model sistem. Simulasi yang dilakukan merujuk pada metode yang diperoleh dari studi pustaka dan pustaka

Untuk evaluasi algoritma kontrol, parameter yang digunakan untuk mengetahui apakah algoritma kontrol dapat bekerja pada simulator atau tidak adalah dengan melihat data yang dihasilkan pada *spreadsheet*, kemudian dibandingkan dengan *datasheet* motor dan *driver* (**tabel 3.1 dan tabel 3.2**) yang dijadikan sebagai validasi dalam pengujian simulasi. Parameter kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah torsi (T).

### 3.6 Pengujian, Pengambilan Data, dan Analisa Data

Pengujian dilakukan untuk memperoleh data performa sistem kontrol ketika diterapkan pada sistem. Pengujian dan pengambilan data dilakukan dengan mengambil sampel data pada metode kontrol ADRC, *open loop*, *close loop*., dan *close loop* PID dengan variasi tegangan 24V, 40V, dan 110V.

Setelah dilakukan pengujian dengan metode kontrol ADRC, *open loop*, *close loop* dan *close loop* PID dengan variasi tegangan 24V, 40V, dan 110V, maka dilakukan pengambilan data pada model simulasi. Pengambilan data simulasi berada pada *toolbox scope*, kemudian data di transfer pada lembar kerja *spreadsheet* dengan format *xlsx*,

Analisa terhadap data pengujian dilakukan untuk memperoleh kesimpulan terhadap penelitian yang dilakukan. Analisa data dilakukan dengan mengamati dan menghitung hasil simulasi sistem dari ADRC, *open loop*, *close loop*. dan *close loop* PID dengan variasi tegangan 24V, 40V, dan 110V, kemudian hasil simulasi dibandingkan dengan *datasheet* dan dicari nilai deviasi dari hasil simulasi dengan nilai pada *datasheet*.

### 3.7 Penulisan Laporan

Laporan dari kegiatan penelitian tugas akhir disusun dalam bentuk tulisan ilmiah yang berisi dokumentasi seluruh tahapan penelitian tugas akhir.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, variasi metode kontrol yang digunakan meliputi; (i) *open loop*; (ii) *close loop*; (iii) *close loop* PID; (iv) ADRC. Untuk tegangan, variasi nilai yang dipilih sebesar 24V, 40V, 110V (referensi tegangan driver DMA882S). Sedangkan waktu pengamatan, dilakukan selama 2 sekon untuk mengetahui respon dalam rentang waktu tersebut, dan massa yang digunakan 190 N. Nilai 190 N didapatkan dari bobot triplek seberat 19kg yang umum dijual di pasaran/*e-commerce*, sehingga  $19kg \times 10 = 190N$ .

Untuk nilai acuan dari hasil simulasi ini adalah nilai arus input pada motor sebesar 5 *ampere*, momen inersia sebesar  $0.69 kg.m^2$ , dan sudut putar sebesar  $1.8^\circ$  yang didapatkan dari referensi *datasheet* pada tabel 3.1. Sedangkan nilai acuan tegangan dari simulasi ini sebesar 24V, 40V, 110V yang didapatkan dari referensi *datasheet* pada tabel 3.2. Sedangkan untuk referensi pembanding, dilakukan simulasi dengan input beban torsi sebesar 0 N.m, kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi dengan beban torsi sebesar 3 N.m merujuk pada spesifikasi *stepper motor*

Untuk simulasi dari penelitian ini menggunakan software MATLAB/SIMULINK r2019b dengan model skema yang disimulasikan merujuk pada diagram sistem dalam gambar 3.2.

#### 4.1 Skema Simulasi

Skema simulasi dari penelitian ini digambarkan pada gambar set blok dari MATLAB/SIMULINK :

- *Open loop*

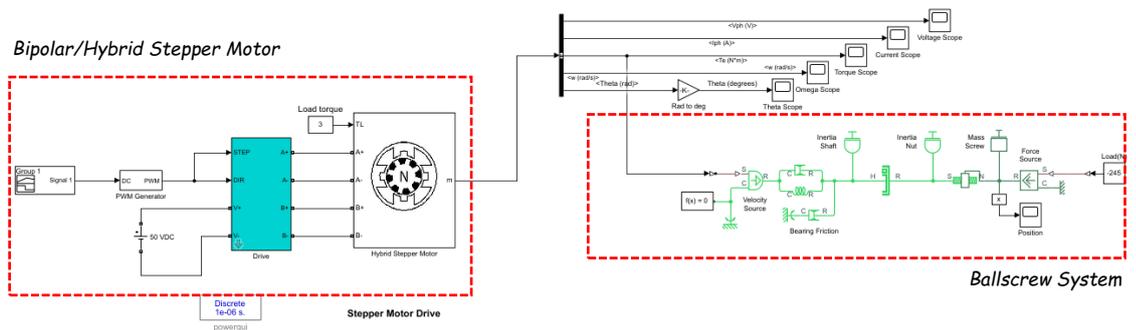
Skema simulasi dari metode *open loop* sendiri adalah dengan memberikan *trigger*, yakni *signal builder* yang berupa sinyal PWM, dan sumber tegangan. Adapun nilai tegangan yang diberikan sebesar 24V, 40V, dan 110V. Kemudian tegangan akan masuk pada bagian *port driver* dengan notasi + dan -. Maksud dari notasi + dan – adalah bagian dari polaritas

tegangan, dengan notasi + merupakan polaritas tegangan yang mengalir dari potensial tinggi menuju potensial rendah, dan notasi – merupakan sebaliknya. Dari input driver yang merupakan kombinasi antara *signal builder* dan sumber tegangan, maka driver akan menghasilkan tegangan A+, A-, B+, dan B-. Maksud dari tegangan A+, A-, B+, dan B-, adalah merujuk pada spesifikasi *stepper motor*. *Stepper motor bipolar/hybrid* yang disimulasikan memiliki spesifikasi *bipolar/hybrid*, yakni *phase* yang dimiliki berjumlah dua (dinotasikan dalam karakter A dan B), dan masing-masing *phase* pada *stepper motor* memiliki polaritas tegangan. Sehingga, *stepper motor bipolar/hybrid* memiliki empat polaritas tegangan, dimana empat polaritas tersebut yakni A+, A-, B+, dan B-. Dari empat polaritas tegangan yang dihasilkan dari *driver*, kemudian diinputkan pada *stepper motor bipolar/hybrid* beserta *torque load* yang nilainya sudah ditentukan merujuk pada *datasheet*.

Dari proses simulasi *stepper motor bipolar/hybrid*, akan keluar nilai besaran fisis yang dapat diamati. Yakni, tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, dan sudut yang dihasilkan dari simulasi.

Dari kelima besaran fisis yang dihasilkan, besaran fisis torsi diteruskan pada model sistem *ratchet leadscrew mechanicsm* sebagai model dari *ballscrew/leadscrew*. Dan pada model *ratchet leadscrew mechanicsm*, ditambahkan bobot yang nilainya sama dengan bobot dari bidang dan massa yang disimulasikan.

Untuk gambar 4.1, desain model simulator merujuk pada **gambar 3.2a** *Open loop*, dengan  $R$  pada gambar 4.1 sebagai input sinyal step menuju PWM,  $u$  adalah respon dari sinyal PWM kemudian menuju *driver stepper motor* bersamaan dengan tegangan input,  $p$  adalah respon sinyal dari *driver* dengan besaran fisis tegangan dan arus + – bersama dengan torsi beban yang menuju *bipolar/hybrid stepper motor*. Kemudian  $T$  adalah respon torsi dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang diteruskan menuju *ballscrew system*, dan  $Y$  output dari sistem, yakni respon pergerakan translasi dari sistem



**Gambar 4.1** Skema MATLAB/SIMULINK *open loop*

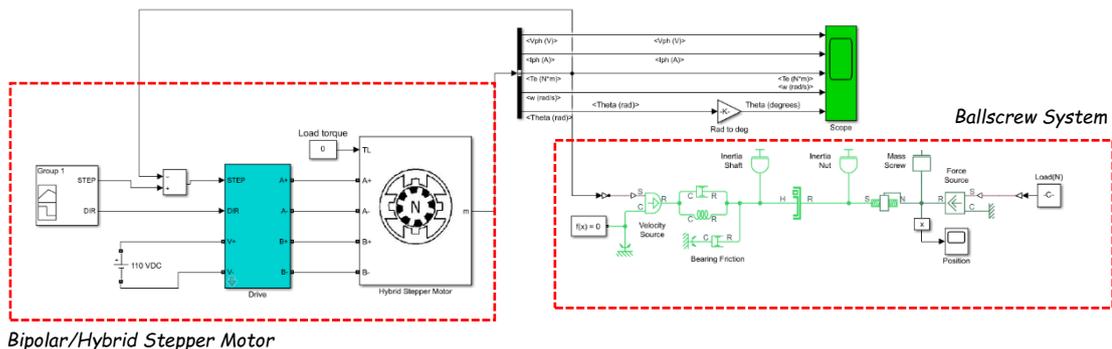
- *Close loop*

Skema simulasi dari metode *open loop* sendiri adalah dengan memberikan *trigger*, yakni *signal builder* yang berupa sinyal PWM, dan sumber tegangan. Adapun nilai tegangan yang diberikan sebesar 24V, 40V, dan 110V. Kemudian tegangan akan masuk pada bagian *port driver* dengan notasi + dan -. Maksud dari notasi + dan - adalah bagian dari polaritas tegangan, dengan notasi + merupakan polaritas tegangan yang mengalir dari potensial tinggi menuju potensial rendah, dan notasi - merupakan sebaliknya. Dari input driver yang merupakan kombinasi antara *signal builder* dan sumber tegangan, maka driver akan menghasilkan tegangan A+, A-, B+, dan B-. Maksud dari tegangan A+, A-, B+, dan B-, adalah merujuk pada spesifikasi *stepper motor*. *Stepper motor bipolar/hybrid* yang disimulasikan memiliki spesifikasi *bipolar/hybrid*, yakni *phase* yang dimiliki berjumlah dua (dinotasikan dalam karakter A dan B), dan masing-masing *phase* pada *stepper motor* memiliki polaritas tegangan. Sehingga, *stepper motor bipolar/hybrid* memiliki empat polaritas tegangan, dimana empat polaritas tersebut yakni A+, A-, B+, dan B-. Dari empat polaritas tegangan yang dihasilkan dari *driver*, kemudian diinputkan pada *stepper motor bipolar/hybrid* beserta *torque load* yang nilainya sudah ditentukan merujuk pada *datasheet*.

Dari proses simulasi *stepper motor bipolar/hybrid*, akan keluar nilai besaran fisis yang dapat diamati. Yakni, tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, dan sudut yang dihasilkan dari simulasi.

Dari kelima besaran fisis yang dihasilkan, besaran fisis torsi diteruskan pada model sistem *ratchet leadscrew mechanicsm* sebagai model dari *ballscrew/leadscrew*. Dan pada model *ratchet leadscrew mechanicsm*, ditambahkan bobot yang nilainya sama dengan bobot dari bidang dan massa yang disimulasikan. Untuk *feedback* dari metode *close loop*, parameter yang digunakan sebagai *feedback* adalah nilai fisis dari torsi

Untuk gambar 4.2, desain model simulator merujuk pada gambar 3.2b *Close loop*, dengan  $R$  pada gambar 4.2 sebagai input sinyal step menuju kontroler PWM,  $u$  adalah respon dari sinyal PWM kemudian menuju *driver stepper motor* bersamaan dengan tegangan input,  $p$  adalah respon sinyal dari *driver* dengan besaran fisis tegangan dan arus + - bersama dengan torsi beban yang menuju *bipolar/hybrid stepper motor*. Kemudian  $T$  adalah respon torsi dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang diteruskan menuju *ballscrew system*, dan  $Y$  output dari sistem, yakni respon pergerakan translasi dari sistem. Respon  $Y$  menjadi *feedback* dari sistem yang kemudian menuju ke *summing point* sebagai perhitungan dari *error*, kemudian kembali ke sistem melalui kontroler PWM, dan proses berlangsung kembali secara berulang



**Gambar 4.2.** Skema MATLAB/SIMULINK *close loop*.

- *Close loop* PID

Skema simulasi dari metode *open loop* sendiri adalah dengan memberikan *trigger*, yakni *signal builder* yang berupa sinyal PWM, dan

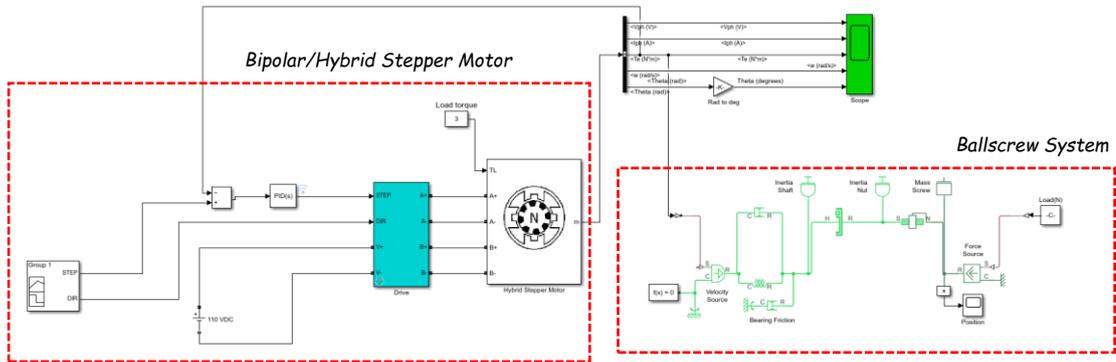
sumber tegangan. Untuk *signal builder*, sebelum masuk pada proses simulasi, terlebih dahulu masuk pada *toolbox* PID. Adapun nilai tegangan yang diberikan sebesar 24V, 40V, dan 110V. Kemudian tegangan akan masuk pada bagian *port driver* dengan notasi + dan -. Maksud dari notasi + dan - adalah bagian dari polaritas tegangan, dengan notasi + merupakan polaritas tegangan yang mengalir dari potensial tinggi menuju potensial rendah, dan notasi - merupakan sebaliknya. Dari input driver yang merupakan kombinasi antara *signal builder* dan sumber tegangan, maka driver akan menghasilkan tegangan A+, A-, B+, dan B-. Maksud dari tegangan A+, A-, B+, dan B-, adalah merujuk pada spesifikasi *stepper motor*. *Stepper motor bipolar/hybrid* yang disimulasikan memiliki spesifikasi *bipolar/hybrid*, yakni *phase* yang dimiliki berjumlah dua (dinotasikan dalam karakter A dan B), dan masing-masing *phase* pada *stepper motor* memiliki polaritas tegangan. Sehingga, *stepper motor bipolar/hybrid* memiliki empat polaritas tegangan, dimana empat polaritas tersebut yakni A+, A-, B+, dan B-. Dari empat polaritas tegangan yang dihasilkan dari *driver*, kemudian diinputkan pada *stepper motor bipolar/hybrid* beserta *torque load* yang nilainya sudah ditentukan merujuk pada *datasheet*.

Dari proses simulasi *stepper motor bipolar/hybrid*, akan keluar nilai besaran fisis yang dapat diamati. Yakni, tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, dan sudut yang dihasilkan dari simulasi.

Dari kelima besaran fisis yang dihasilkan, besaran fisis torsi diteruskan pada model sistem *ratchet leadscrew mechanics* sebagai model dari *ballscrew/leadscrew*. Dan pada model *ratchet leadscrew mechanics*, ditambahkan bobot yang nilainya sama dengan bobot dari bidang dan massa yang disimulasikan. Untuk *feedback* dari metode *close loop*, parameter yang digunakan sebagai *feedback* adalah nilai fisis dari torsi.

Untuk gambar 4.3, desain model simulator merujuk pada gambar 3.2c *Close loop PID*, dengan  $R$  pada gambar 4.3 sebagai input sinyal step menuju kontroler PWM,  $u$  adalah respon dari sinyal PWM kemudian menuju *driver stepper motor* bersamaan dengan tegangan input,  $p$  adalah

respon sinyal dari *driver* dengan besaran fisis tegangan dan arus + – bersama dengan torsi beban yang menuju *bipolar/hybrid stepper motor*. Kemudian  $T$  adalah respon torsi dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang diteruskan menuju *ballscrew system*, dan  $Y$  output dari sistem, yakni respon pergerakan translasi dari sistem. Respon  $Y$  menjadi *feedback* dari sistem yang kemudian menuju ke *summing point* sebagai perhitungan dari *error*, kemudian menuju ke kontroler PID untuk dioptimalkan. Setelah dari kontroler PID, maka sinyal respon kembali ke sistem, dan proses berlangsung kembali secara berulang.



**Gambar 4.3.** Skema MATLAB/SIMULINK *Close loop* PID

- ADRC

Skema simulasi dari metode *open loop* sendiri adalah dengan memberikan *trigger*, yakni *signal builder* yang berupa sinyal PWM, dan sumber tegangan. Untuk *signal builder*, sebelum masuk pada proses simulasi, terlebih dahulu masuk pada *toolbox PID*. Adapun nilai tegangan yang diberikan sebesar 24V, 40V, dan 110V. Kemudian tegangan akan masuk pada bagian *port driver* dengan notasi + dan -. Maksud dari notasi + dan – adalah bagian dari polaritas tegangan, dengan notasi + merupakan polaritas tegangan yang mengalir dari potensial tinggi menuju potensial rendah, dan notasi – merupakan sebaliknya. Dari input driver yang merupakan kombinasi antara *signal builder* dan sumber tegangan, maka driver akan menghasilkan tegangan A+, A-, B+, dan B-. Maksud dari tegangan A+, A-, B+, dan B-, adalah merujuk pada spesifikasi *stepper*

*motor. Stepper motor bipolar/hybrid* yang disimulasikan memiliki spesifikasi *bipolar/hybrid*, yakni *phase* yang dimiliki berjumlah dua (dinotasikan dalam karakter A dan B), dan masing-masing *phase* pada *stepper motor* memiliki polaritas tegangan. Sehingga, *stepper motor bipolar/hybrid* memiliki empat polaritas tegangan, dimana empat polaritas tersebut yakni A+, A-, B+, dan B-. Dari empat polaritas tegangan yang dihasilkan dari *driver*, kemudian diinputkan pada *stepper motor bipolar/hybrid* beserta *torque load* yang nilainya sudah ditentukan merujuk pada *datasheet*.

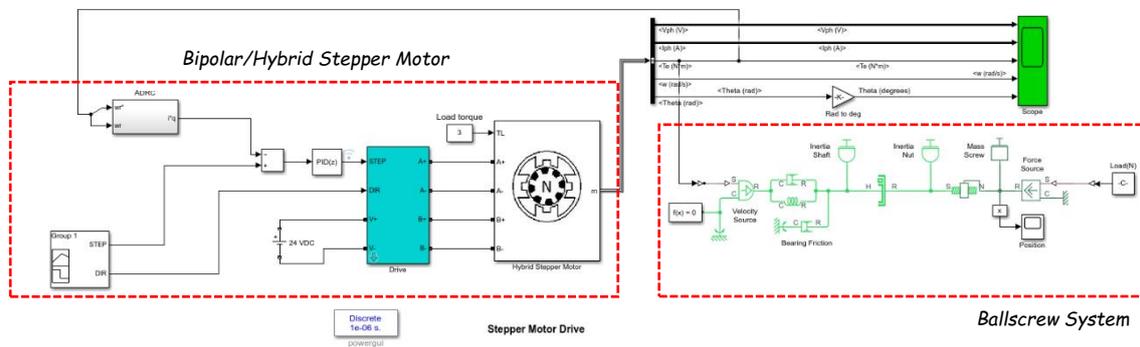
Dari proses simulasi *stepper motor bipolar/hybrid*, akan keluar nilai besaran fisis yang dapat diamati. Yakni, tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, dan sudut yang dihasilkan dari simulasi.

Dari kelima besaran fisis yang dihasilkan, besaran fisis torsi diteruskan pada model sistem *ratchet leadscrew mechanics* sebagai model dari *ballscrew/leadscrew*. Dan pada model *ratchet leadscrew mechanics*, ditambahkan bobot yang nilainya sama dengan bobot dari bidang dan massa yang disimulasikan.

Untuk *feedback* dari metode *close loop*, parameter yang digunakan sebagai *feedback* adalah nilai fisis dari torsi. *Feedback* dari torsi akan kembali menjadi input pada tahap awal, dan *feedback* dari sudut dan kecepatan sudut sebelum menjadi input pada tahap awal, terlebih dahulu diproses pada *toolbox ADRC*, kemudian setelah diproses pada *toolbox ADRC*, akan menjadi keluaran dari *ADRC* dan kembali pada tahap awal sebagai nilai input.

Untuk **gambar 4.4**, desain model simulator merujuk pada **gambar 3.2d** *Close loop PID*, dengan  $R$  pada **gambar 4.4** sebagai input sinyal step menuju kontroler PWM,  $u$  adalah respon dari sinyal PWM kemudian menuju *driver stepper motor* bersamaan dengan tegangan input,  $p$  adalah respon sinyal dari *driver* dengan besaran fisis tegangan dan arus + – bersamaan dengan torsi beban yang menuju *bipolar/hybrid stepper motor*. Kemudian  $T$  adalah respon torsi dari *bipolar/hybrid stepper motor* yang diteruskan menuju *ballscrew system*, dan  $Y$  output dari sistem, yakni respon pergerakan

translasi dari sistem. Respon  $Y$  menjadi *feedback* dari sistem yang kemudian menuju ke kontroler ADRC untuk dioptimalkan. Setelah dari kontroler ADRC, maka sinyal error menuju *summing point* kembali ke sistem, dan proses berlangsung kembali secara berulang.



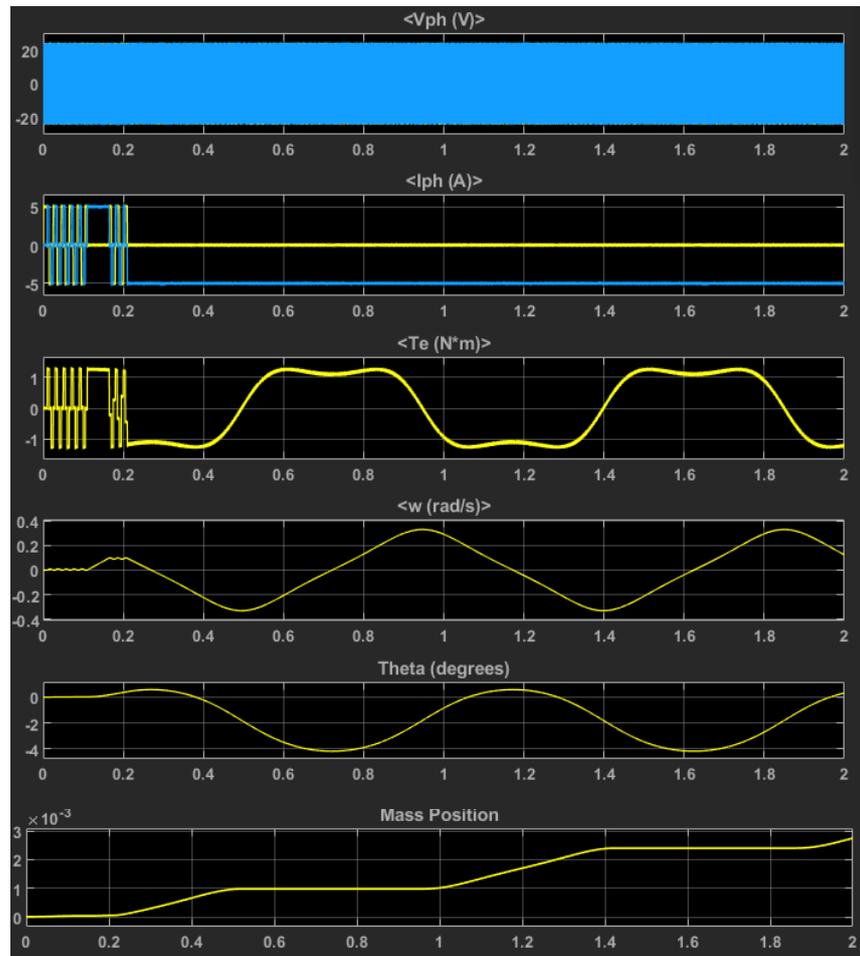
**Gambar 4.4.** Skema MATLAB/SIMULINK ADRC

- **Hasil Simulasi *Open loop***

Pada sub-bab ini, hasil skema simulasi yang berupa plot grafik dari hasil simulasi *software* MATLAB/SIMULINK ditampilkan pada **Gambar 4.5** hingga **Gambar 4.45**. Gambar yang ditampilkan dalam sub-bab ini meliputi hasil simulasi dengan arus 5 *ampere*, torsi input 0 *N.m* (tanpa beban) dengan simulasi pembandingan torsi input 3 *N.m*, (dengan beban), dan tegangan masing-masing 24V, 40V, dan 110V dengan variabel fisis yang diamati adalah tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system*. Untuk model simulasi *open loop* merujuk pada diagram proses gambar 3.2a yang telah dilampirkan pada sub-bab 3.3 Desain Simulasi pada Bab 3.

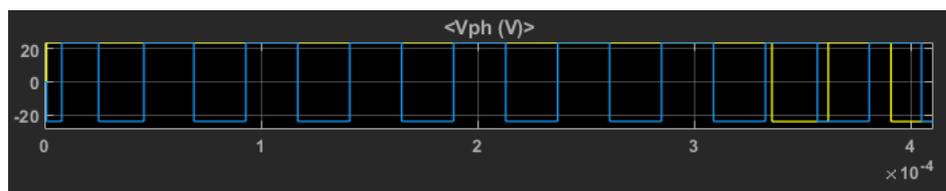
- ***Open loop* 24V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* pada **gambar 4.5** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.5.** Respon simulasi *open loop* 24V tanpa beban

- **Tegangan *open loop* 24V tanpa beban**

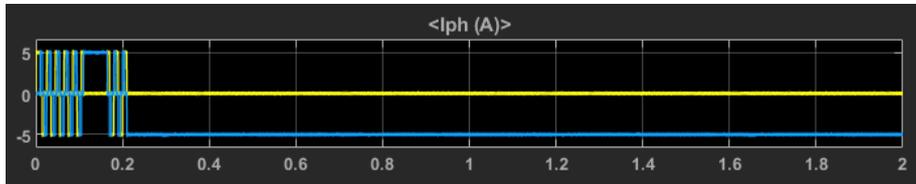


**Gambar 4.6.** Respon simulasi tegangan *open loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.6**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,3 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa

pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

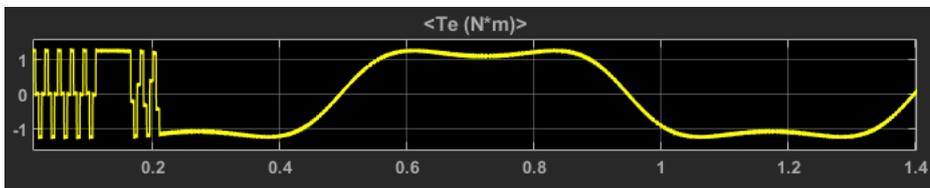
- **Arus *open loop* 24V tanpa beban**



**Gambar 4.7.** Respon simulasi arus *open loop* 24V Tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.7**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,11 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,21 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

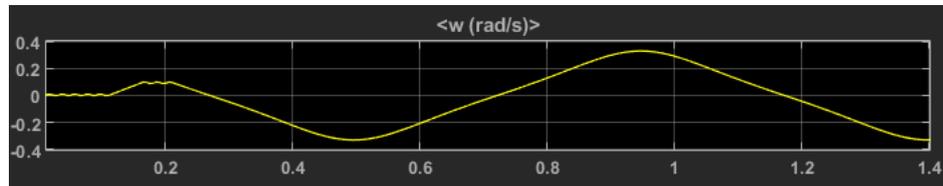
- **Torsi *open loop* 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.8.** Respon simulasi torsi *open loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.8**, didapat respon torsi output sebesar 1,32 N yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* dari periode 0,01 s hingga 0,11 s, kemudian respon sinyal stasioner hingga 0,165 s, lalu memberikan respon sinyal dengan pola *squarewave* kembali hingga - 1,32N pada 0,21 s, lalu memberikan respon kenaikan di waktu 0,4 s hingga mencapai 1,32 N, dan bergerak turun sehingga sinyal memberikan pola respon berosilasi hingga 2 s

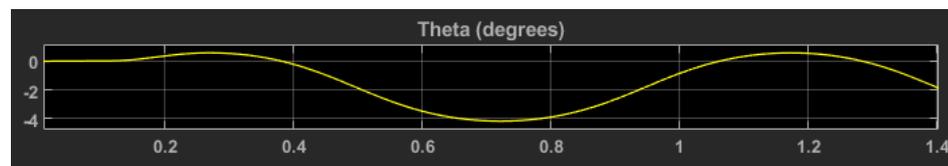
- **Kecepatan sudut *open loop* 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.9.** Respon simulasi kecepatan sudut *Open loop* 24V Tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.9**, didapat respon kecepatan sudut yang mengalami kenaikan di angka  $0,15 \text{ rad/s}$  pada rentang periode  $0,11\text{s}$  hingga  $0,21\text{s}$ , lalu mengalami penurunan hingga  $-0,32 \text{ rad/s}$  hingga periode  $0,5 \text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,35 \text{ rad/s}$  hingga  $0,94\text{s}$ , dan kemudian membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode  $2 \text{ s}$

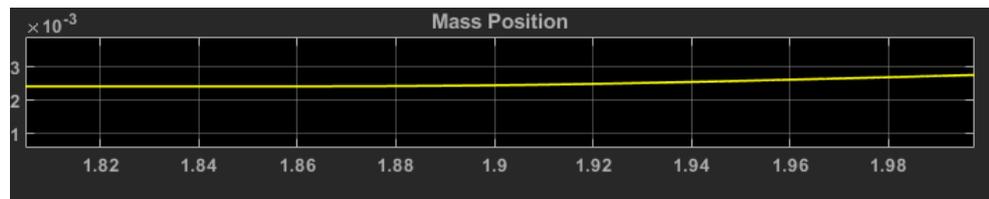
- **Sudut *open loop* 24V tanpa beban**



**Gambar 4.10.** Respon simulasi sudut *open loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.10**, didapat respon sudut di angka  $0,5 \text{ rad}$  sampai  $0,28\text{s}$ , lalu mengalami penurunan hingga  $-4 \text{ rad/s}$  hingga periode  $0,75 \text{ s}$ , dan membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode  $2 \text{ s}$ .

- **Posisi *open loop* 24V tanpa beban**

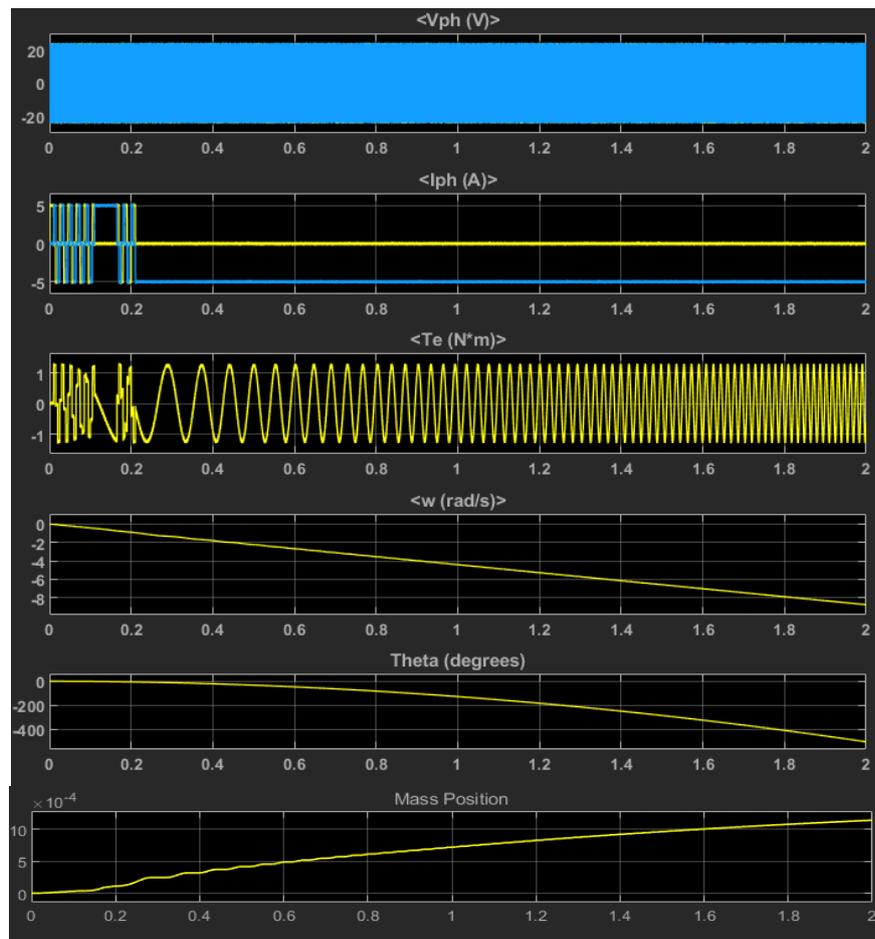


**Gambar 4.11.** Respon simulasi posisi *open loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam gambar 4.11, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $27 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

○ **Open loop 24V dengan beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan



**Gambar 4.12.** Respon simulasi *open loop* 24V dengan beban posisi dari *ballscrew system* pada **gambar 4.12** beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.

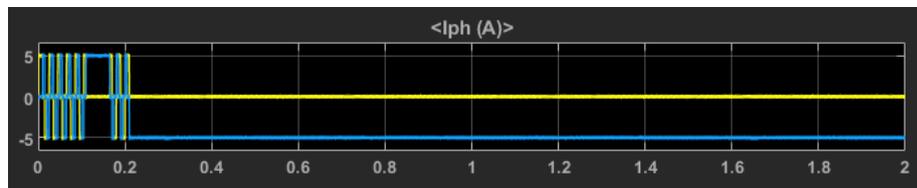
- **Tegangan *open loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.13.** Respon simulasi tegangan *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.13**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,4 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

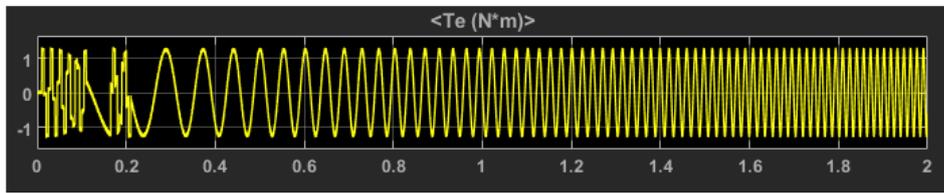
- **Arus *open loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.14.** Respon simulasi arus *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.14**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,115 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,21 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

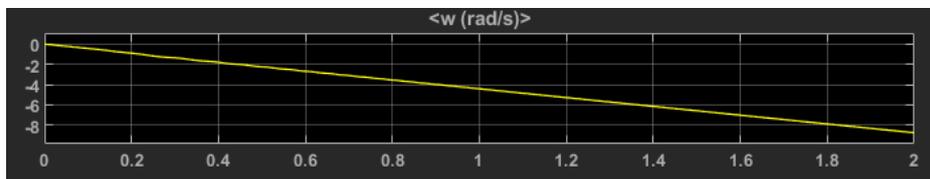
- **Torsi *open loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.15.** Respon simulasi torsi *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.15**, didapat respon torsi output sebesar 1,32 N yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* hingga 0,115 s, kemudian respon sinyal menurun hingga - 1,32N di periode 0,165s, lalu memberikan respon sinyal fluktuatif dan hingga 0,21 s, lalu memberikan respon penurunan di waktu 0,245 s, dan mengalami kenaikan sehingga respon sinyal beresilasi mencapai 1,32 N hingga 2 s

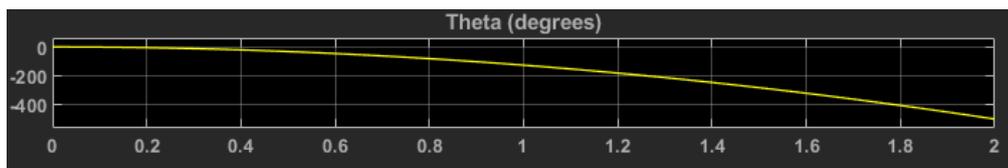
- **Kecepatan sudut *open loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.16.** Respon simulasi kecepatan sudut *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.16**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai -8,7 radian/s

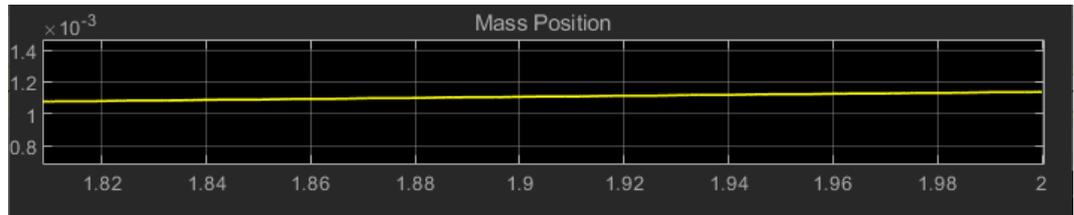
- **Sudut *open loop* 24V Dengan beban**



**Gambar 4.17.** Respon simulasi sudut *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.17**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai -505 radian

- **Posisi *open loop* 24V Dengan beban**

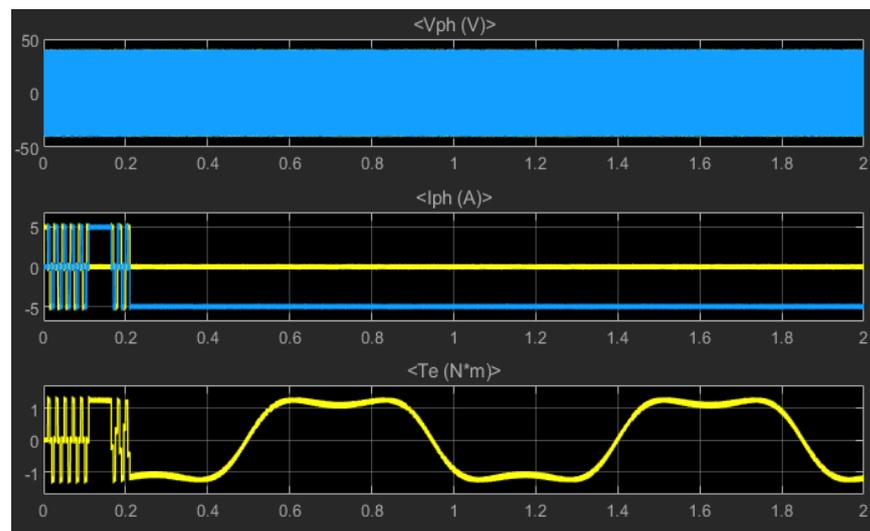


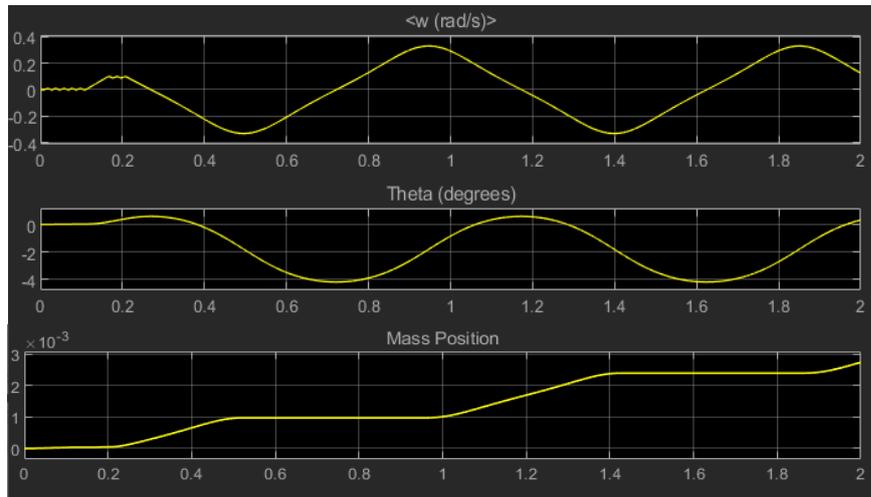
**Gambar 4.18.** Respon simulasi posisi *open loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.18**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $11,3 \times 10^{-4}$  *m* dalam periode 2 *s*

- ***Open loop* 40V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* pada **gambar 4.19** beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.19.** Respon simulasi *open loop* 40V tanpa beban

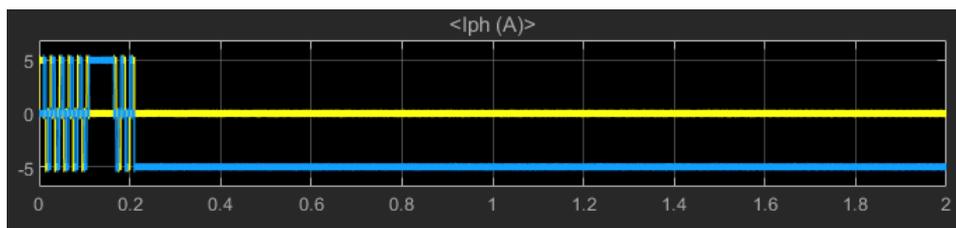
- **Tegangan *open loop* 40V tanpa beban**



**Gambar 4.20.** Respon simulasi tegangan *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.20**, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4} \text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

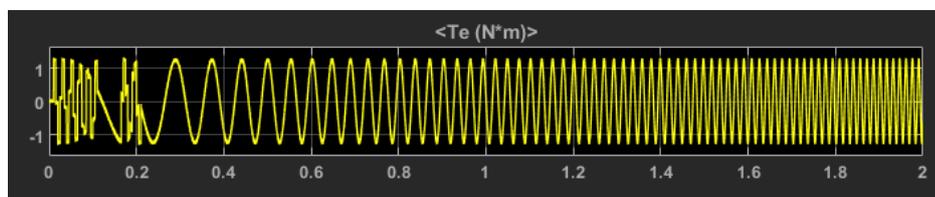
- **Arus *Open loop* 40V Tanpa beban**



**Gambar 4.21.** Respon simulasi arus *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.21**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,11 s. lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,21 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

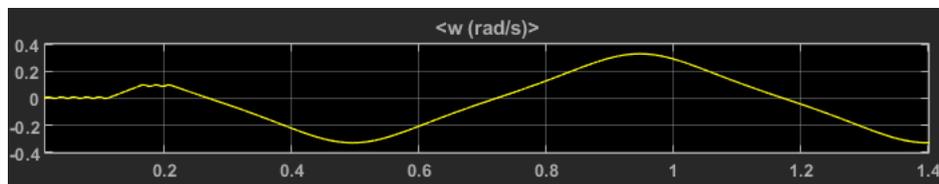
- **Torsi *open loop* 40V tanpa beban**



**Gambar 4.22.** Respon simulasi torsi *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.22**, didapat respon torsi output sebesar 1,32 N yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* dari periode 0,01 s hingga 0,11 s kemudian respon sinyal stasioner hingga 0,165 s, lalu memberikan respon sinyal dengan pola *squarewave* kembali hingga -1,32N pada 0,21 s, lalu memberikan respon kenaikan di waktu 0,4 s hingga mencapai 1,32 N, dan bergerak turun sehingga sinyal memberikan pola respon berosilasi hingga 2 s

- **Kecepatan sudut *open loop* 40V tanpa beban**

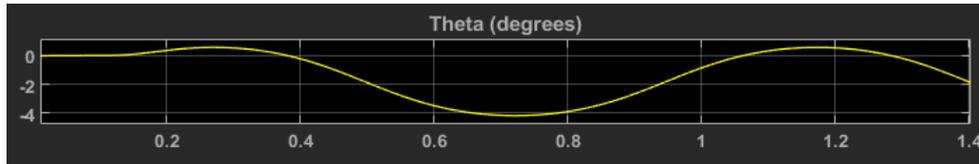


**Gambar 4.23.** Respon simulasi kecepatan sudut *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.23**, didapat respon kecepatan sudut yang mengalami kenaikan di angka 0,15 rad/s pada rentang periode 0,11s hingga 0,21s, lalu mengalami penurunan hingga -0,32 rad/s hingga periode 0,5 s, lalu respon

mengalami kenaikan mencapai 0,35 rad/s hingga 0,94s, dan kemudian membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode 2 s

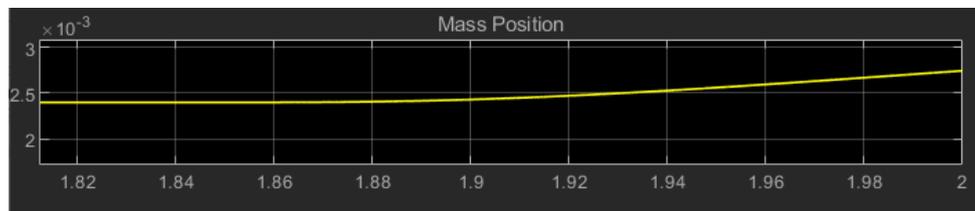
- **Sudut *Open loop* 40V Tanpa beban**



**Gambar 4.24.** Respon simulasi sudut *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 0 N.m dalam **gambar 4.24**, didapat respon sudut di angka 0,6 rad sampai 0,28s, lalu mengalami penurunan hingga - 4 rad/s hingga periode 0,75 s, dan membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode 2 s.

- **Posisi *Open loop* 40V Tanpa beban**

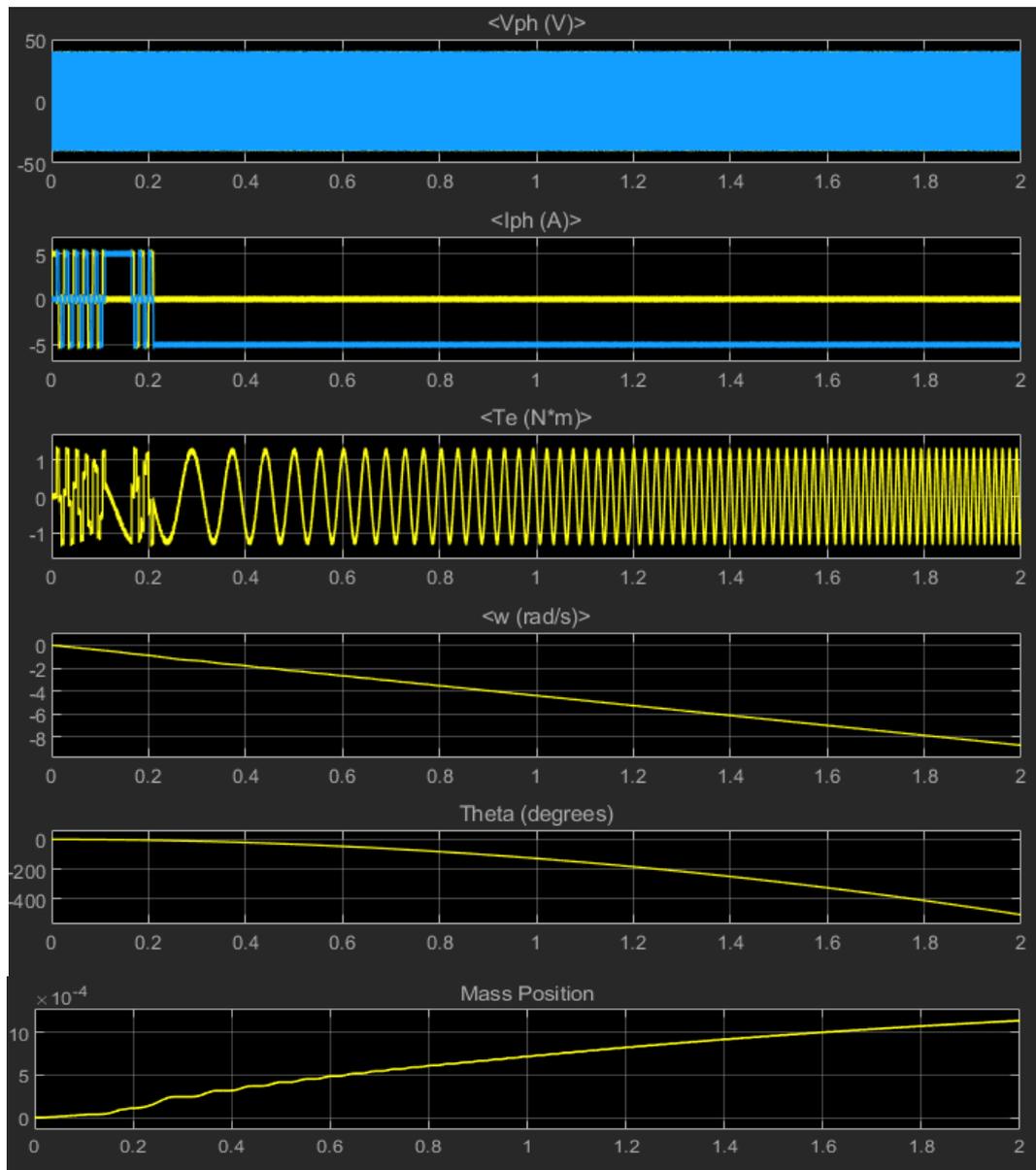


**Gambar 4.25.** Respon simulasi posisi *open loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban 0 N.m dalam **gambar 4.25**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $2,72 \times 10^{-4} m$  dalam periode 2 s

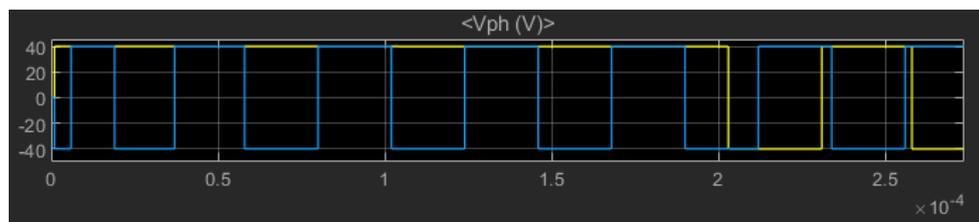
- ***Open loop* 40V dengan beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* pada **gambar 4.26** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.26.** Respon Simulasi *open loop* 40V dengan beban

▪ **Tegangan *open loop* 40V Dengan beban**



**Gambar 4.27.** Respon simulasi tegangan *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.27**, didapat tegangan output sebesar  $40\text{V}$  dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode  $2\text{ s}$

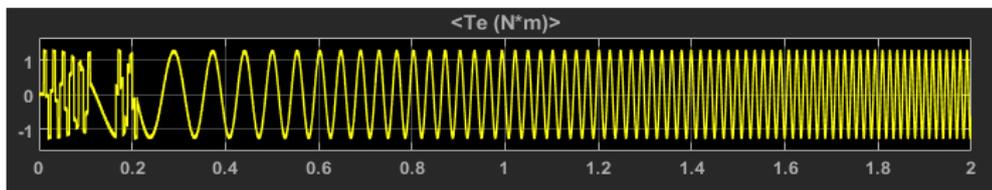
- **Arus *open loop* 40V Dengan beban**



**Gambar 4.28.** Respon simulasi arus *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.28**, didapat tegangan output  $5\text{A}$  dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,115\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga  $0,21\text{ s}$ , dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

- **Torsi *open loop* 40V Dengan beban**

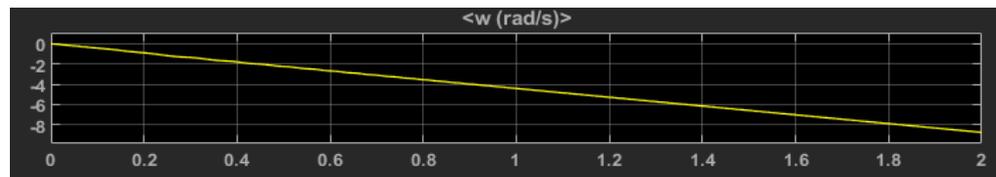


**Gambar 4.29.** Respon simulasi torsi *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.29**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32\text{ N}$  yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* hingga  $0,115\text{ s}$ , kemudian respon sinyal menurun hingga  $-1,32\text{ N}$  di periode  $0,165\text{ s}$ , lalu

memberikan respon sinyal fluktuatif dan hingga 0,21 s, lalu memberikan respon penurunan di waktu 0,245 s, dan mengalami kenaikan sehingga respon sinyal berhasil mencapai 1,32 N hingga 2 s

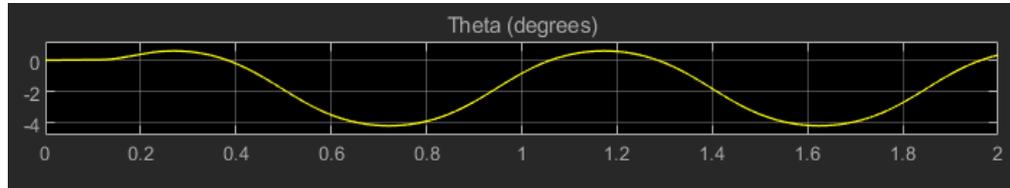
- **Kecepatan Sudut *Open loop* 40V Dengan beban**



**Gambar 4.30.** Respon simulasi kecepatan sudut *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 N.m dalam **gambar 4.30**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai -8,7 radian/s

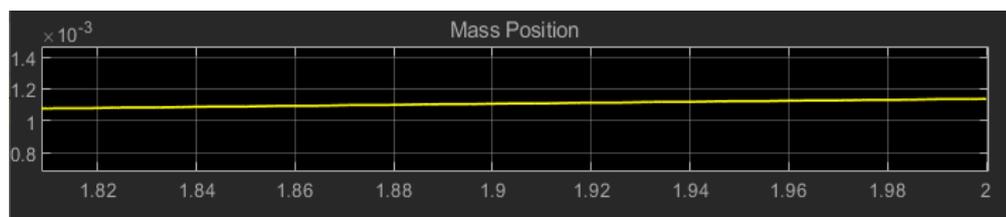
- **Sudut *open loop* 40V dengan beban**



**Gambar 4.31.** Respon simulasi sudut *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 N.m pada **gambar 4.31**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai - 505 radian

- **Posisi *Open loop* 40V Dengan beban**

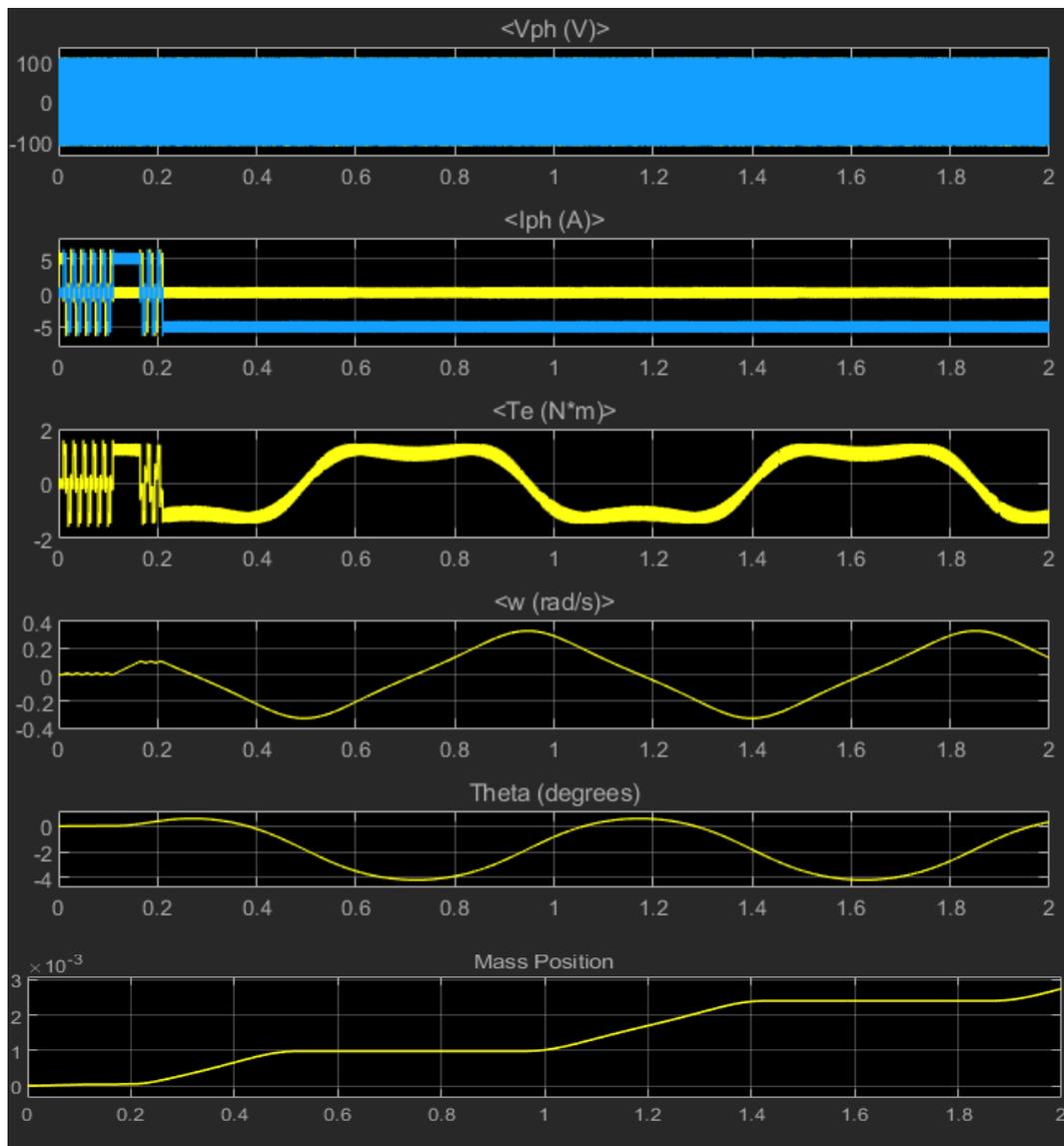


**Gambar 4.32.** Respon simulasi posisi *open loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.32**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $1,13 \times 10^{-3} \text{ m}$  dalam periode  $2 \text{ s}$

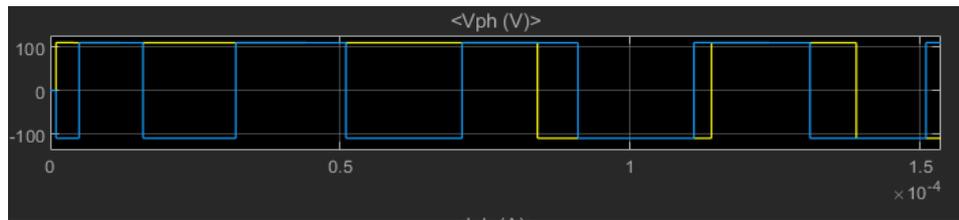
○ **Open loop 110V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.33** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.33.** Respon Simulasi *open loop* 110V tanpa beban

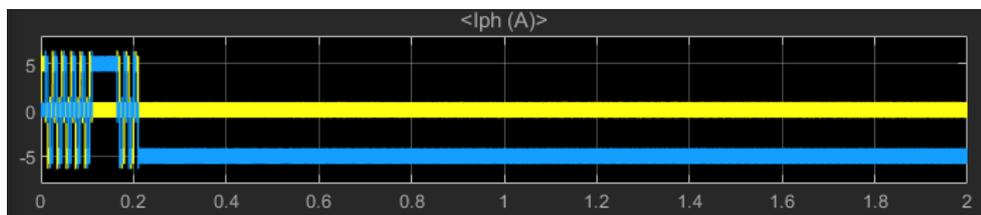
- **Tegangan *open loop* 110V Tanpa beban**



**Gambar 4.33.** Respon simulasi tegangan *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.33**, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,9 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

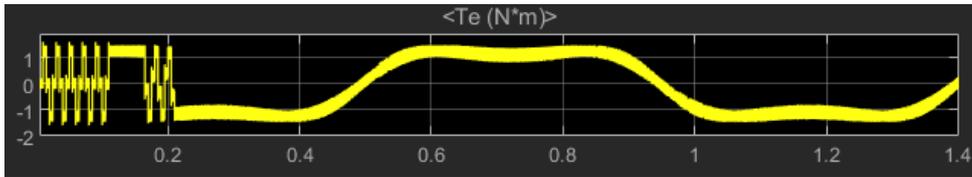
- **Arus *open loop* 110V tanpa beban**



**Gambar 4.34.** Respon simulasi arus *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.34**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,11 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,21 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

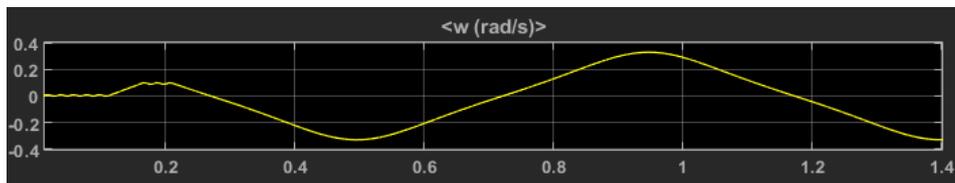
- **Torsi *open loop* 110V tanpa beban**



**Gambar 4.35.** Respon simulasi torsi *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.35**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32\text{ N}$  yakni dengan proses respon membentuk pola squarewave dari periode  $0,01\text{ s}$  hingga  $0,11\text{ s}$ , kemudian respon sinyal stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , lalu memberikan respon sinyal dengan pola *squarewave* kembali hingga  $-1,32\text{ N}$  pada  $0,21\text{ s}$ , lalu memberikan respon kenaikan di waktu  $0,4\text{ s}$  hingga mencapai  $1,32\text{ N}$ , dan bergerak turun sehingga sinyal memberikan pola respon berosilasi hingga  $2\text{ s}$

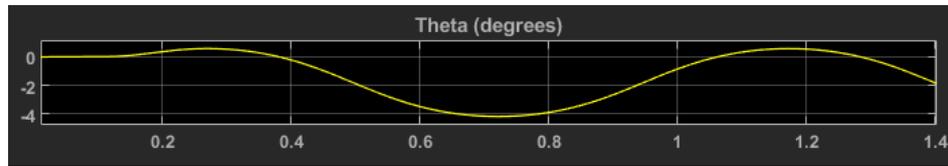
- **Kecepatan sudut *open loop* 110V tanpa beban**



**Gambar 4.36.** Respon simulasi kecepatan sudut *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.36**, didapat respon kecepatan sudut yang mengalami kenaikan di angka  $0,15\text{ rad/s}$  pada rentang periode  $0,11\text{ s}$  hingga  $0,21\text{ s}$ , lalu mengalami penurunan hingga  $-0,32\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,5\text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,35\text{ rad/s}$  hingga  $0,94\text{ s}$ , dan kemudian membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

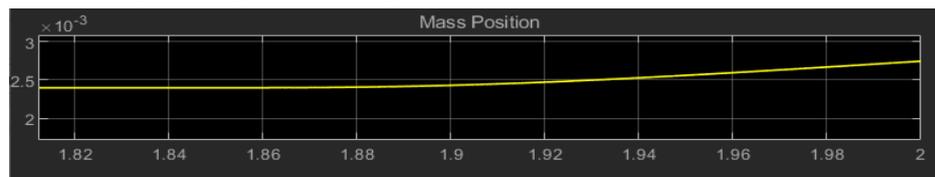
- **Sudut *open loop* 110V Tanpa beban**



**Gambar 4.37.** Respon simulasi sudut *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.37**, didapat respon sudut di angka  $0,6\text{ rad}$  sampai  $0,28\text{ s}$ , lalu mengalami penurunan hingga  $-4\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,75\text{ s}$ , dan membentuk pola yang berulang sehingga nampak memberikan respon berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$ .

- **Posisi *open loop* 110V tanpa beban**

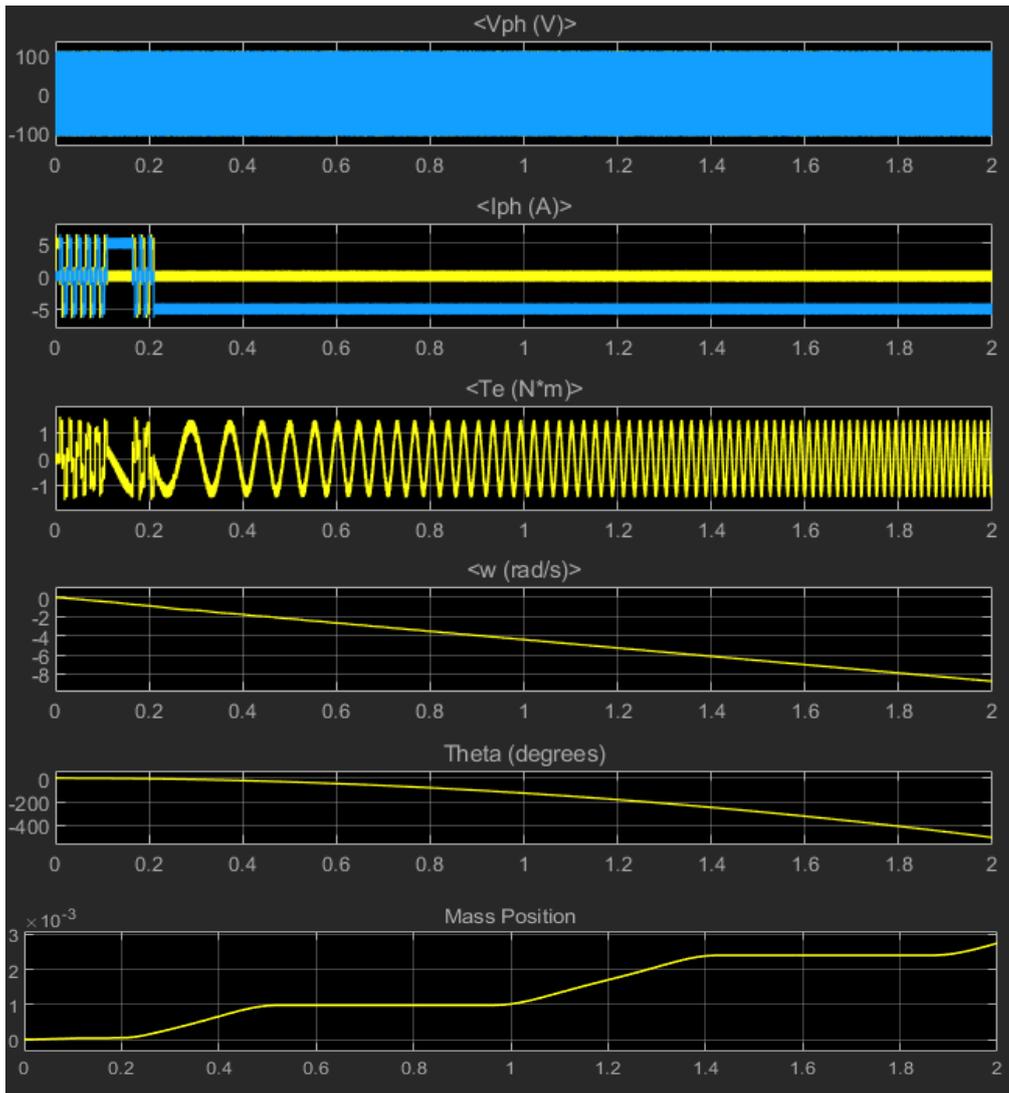


**Gambar 4.38.** Respon simulasi posisi *open loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.38**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $2,72 \times 10^{-3}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- **Open loop 110V dengan beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.39** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.39.** Respon Simulasi *open loop* 110V dengan beban

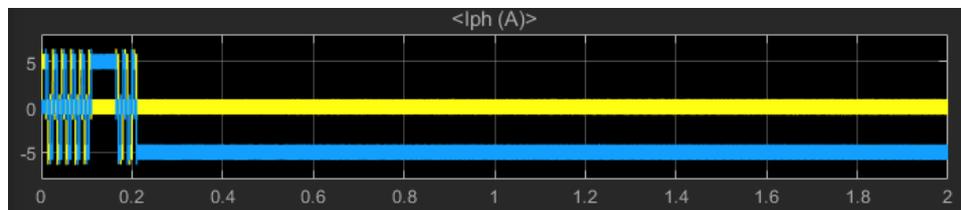
- **Tegangan *Open loop* 110V Dengan beban**



**Gambar 4.40.** Respon simulasi tegangan *open loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *open loop* beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.40**, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,8 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

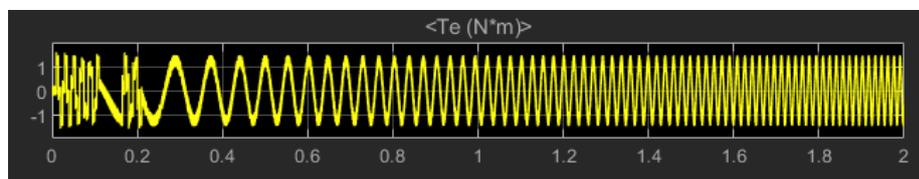
- **Arus *open loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.41.** Respon simulasi arus *open loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.41**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,115 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,21 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

- **Torsi *Open loop* 110V Dengan beban**

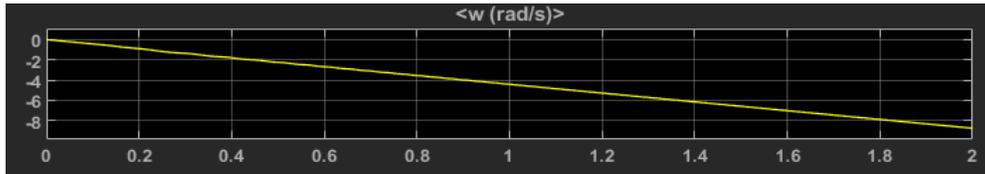


**Gambar 4.42.** Respon simulasi torsi *open loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.42**, didapat respon torsi output sebesar 1,32 N yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* hingga 0,115 s,

kemudian respon sinyal menurun hingga - 1,32 N di periode 0,165s, lalu memberikan respon sinyal fluktuatif dan hingga 0,21 s, lalu memberikan respon penurunan di waktu 0,245 s, dan mengalami kenaikan sehingga respon sinyal berhasil mencapai 1,32 N hingga 2 s

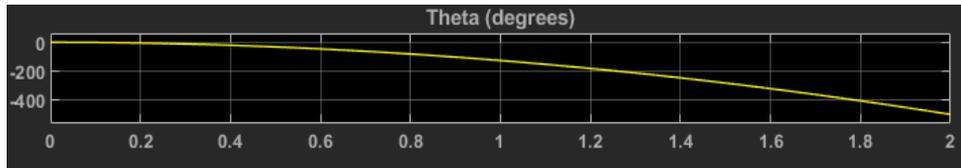
- **Kecepatan sudut *open loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.43.** Respon simulasi kecepatan sudut *open loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 N.m dalam **gambar 4.43**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai - 8,7 radian/s

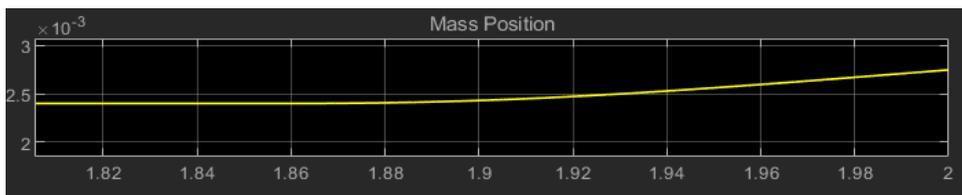
- **Sudut *Open loop* 110V Dengan beban**



**Gambar 4.44.** Respon simulasi sudut *open loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 N.m dalam **gambar 4.44**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai - 505 radian

- **Posisi *open loop* 110V Dengan beban**



**Gambar 4.45.** Respon simulasi posisi *open loop* 110V dengan beban

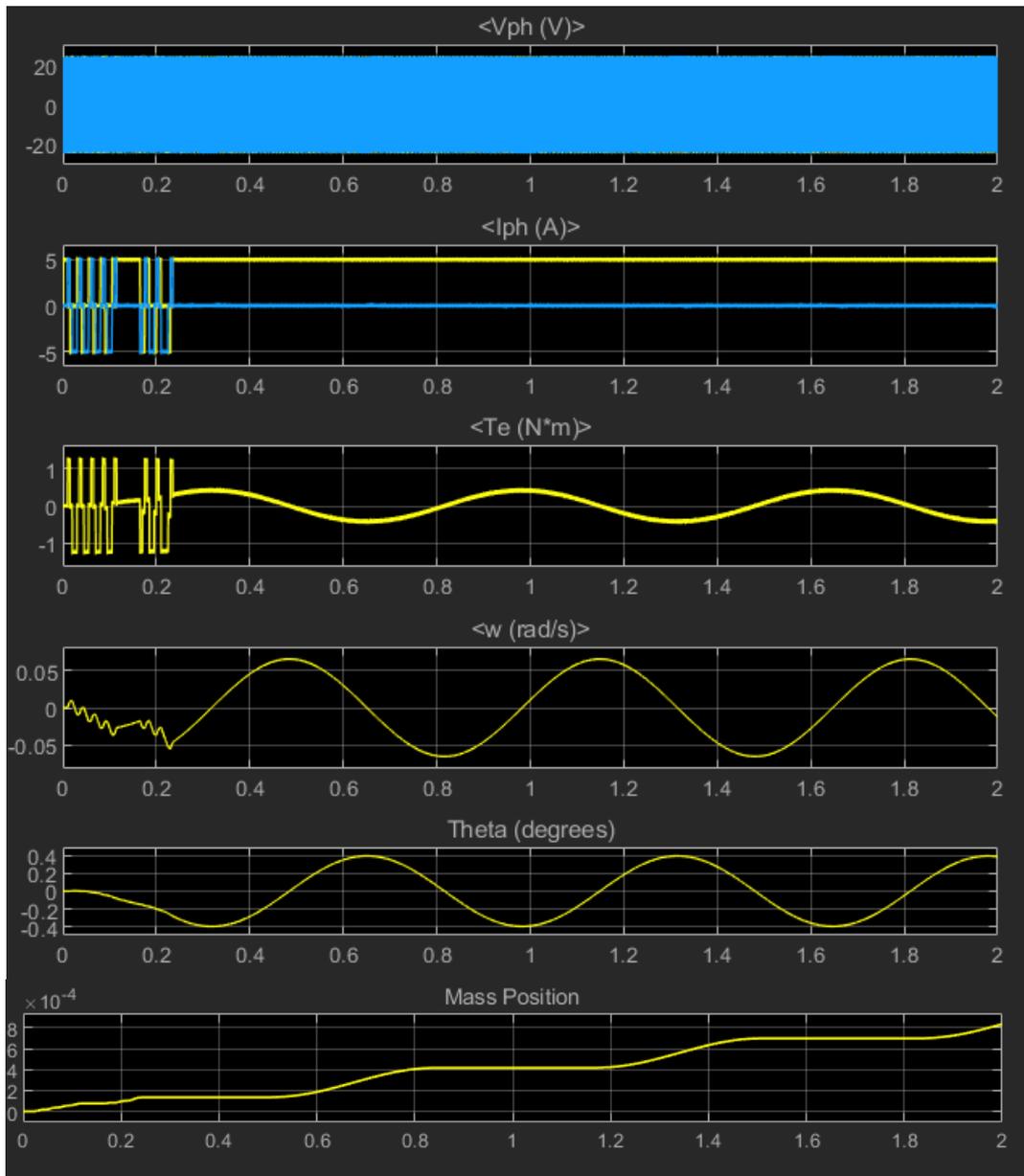
Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.45**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $2,72 \times 10^{-3}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- **Hasil simulasi *close loop***

Pada sub-bab ini, hasil skema simulasi yang berupa plot grafik dari hasil simulasi *software* MATLAB/SIMULINK ditampilkan dalam **Gambar 4.46** hingga **Gambar 4.87**. Gambar yang ditampilkan dalam sub-bab ini meliputi hasil simulasi dengan arus  $5\text{ ampere}$ , torsi input  $0\text{ N.m}$  (tanpa beban) dengan simulasi pembanding torsi input  $3\text{ N.m}$ , (dengan beban) dan tegangan masing-masing  $24\text{V}$ ,  $40\text{V}$ , dan  $110\text{V}$  dengan variabel fisis yang diamati adalah tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system*. Untuk model simulasi *open loop* merujuk pada diagram proses **gambar 3.2b** yang telah dilampirkan pada sub-bab 3.3 Desain Simulasi pada Bab 3.

- ***Close loop* 24V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.46** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.46.** Respon simulasi *close loop* 24V tanpa beban

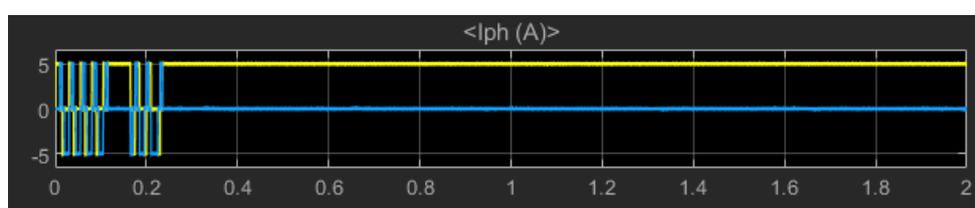
- **Tegangan *Close loop* 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.47.** Respon simulasi tegangan *close loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.47**, didapat tegangan output sebesar  $24\text{V}$  dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,4 \times 10^{-4}\text{s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode  $2\text{ s}$

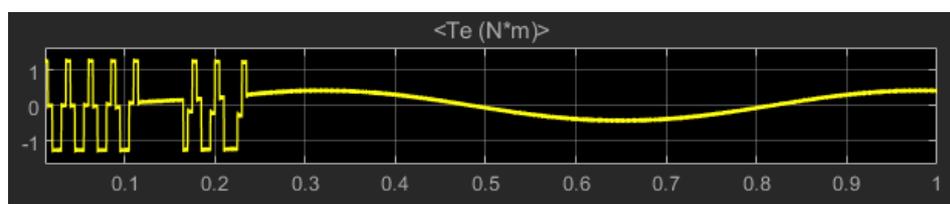
- **Arus *close loop*  $24\text{V}$  tanpa beban**



**Gambar 4.48.** Respon simulasi arus *close loop*  $24\text{V}$  tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.48**, didapat tegangan output  $5\text{A}$  dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,11\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga  $0,235\text{ s}$ , dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

- **Torsi *close loop*  $24\text{V}$  tanpa beban**

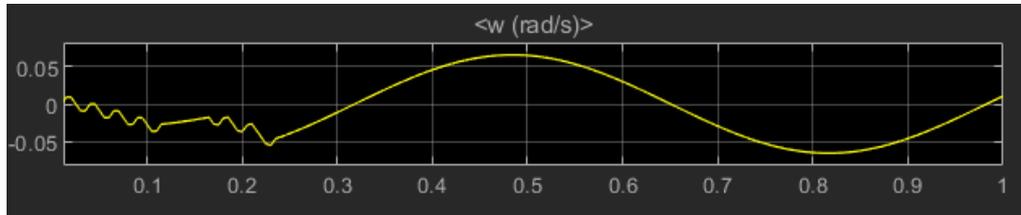


**Gambar 4.49.** Respon simulasi torsi *close loop*  $24\text{V}$  tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.49**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32\text{ N}$  yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* dari periode  $0,01\text{ s}$  hingga  $0,115\text{ s}$ , kemudian respon sinyal stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , lalu memberikan respon kenaikan di waktu

0,235 s hingga mencapai 1,32 N, dan bergerak turun sehingga sinyal memberikan pola respon sinyal berosilasi hingga 2s

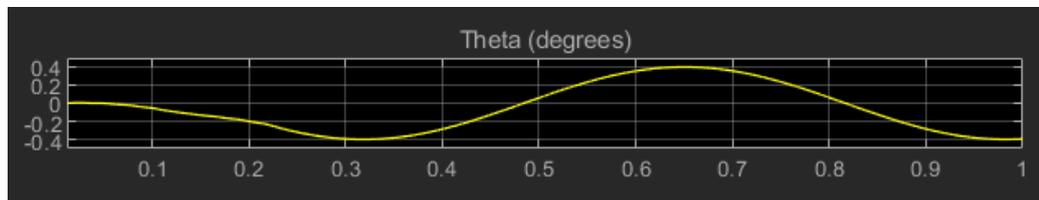
- **Kecepatan sudut *close loop* 24V tanpa beban**



**Gambar 4.50.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.50**, didapat respon kecepatan sudut mengalami tren penurunan hingga  $-0,056\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,225\text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,055\text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

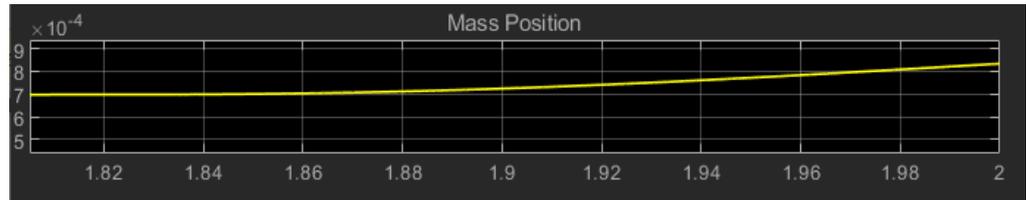
- **Sudut *close loop* 24V tanpa beban**



**Gambar 4.51.** Respon simulasi sudut *close loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.51**, didapat respon kecepatan sudut, nilai respon sudut mengalami penurunan  $-0,4\text{ rad}$  pada periode  $0,35\text{ s}$ , lalu mengalami kenaikannya hingga  $0,4\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,65\text{ s}$ , dan kemudian memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

- **Posisi *close loop* 24V Tanpa beban**

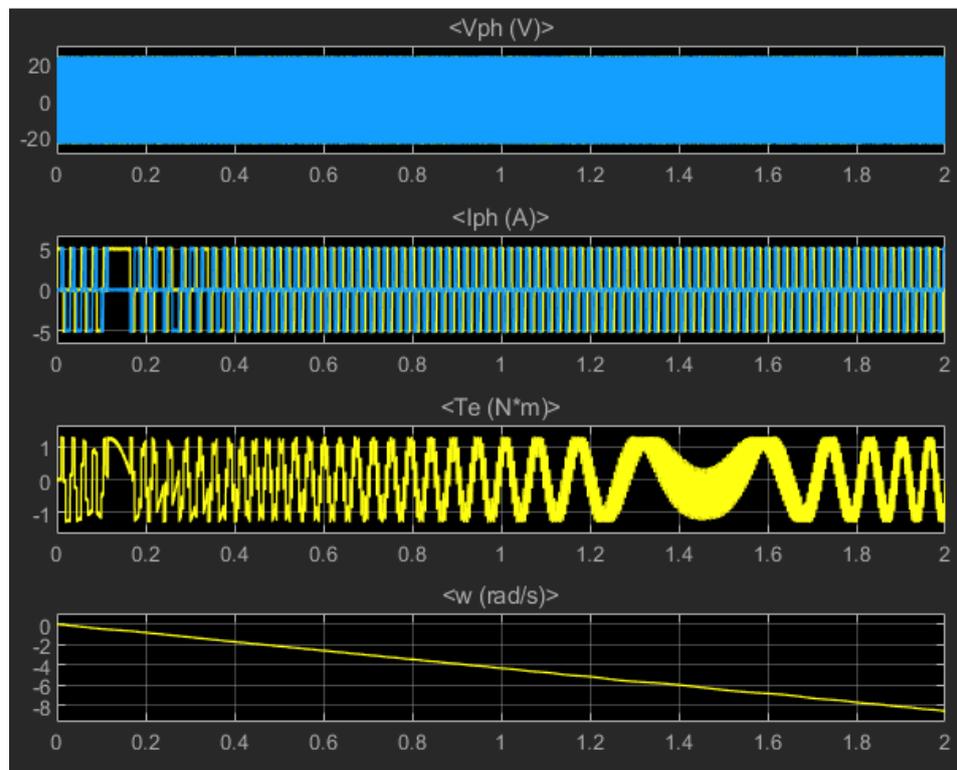


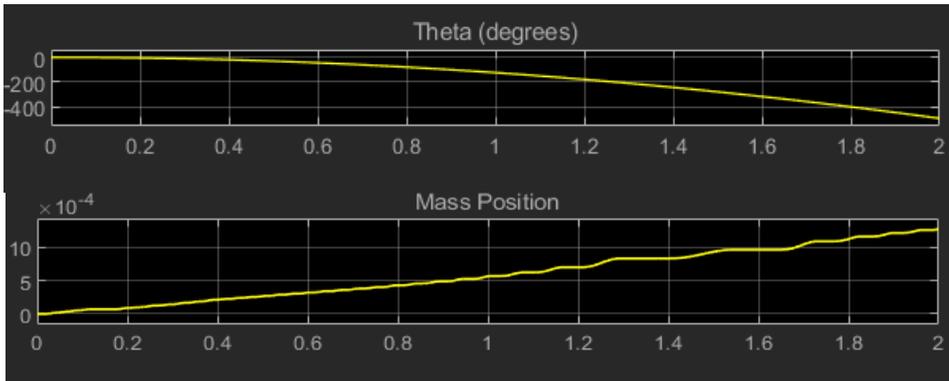
**Gambar 4.52.** Respon simulasi posisi *close loop* 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.52**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $8,4 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- ***Close loop* 24V dengan beban**

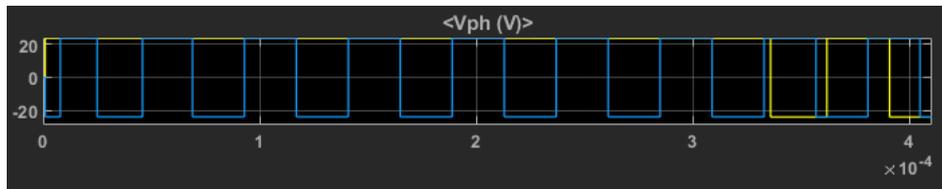
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.53** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.53.** Respon simulasi *close loop* 24V dengan beban

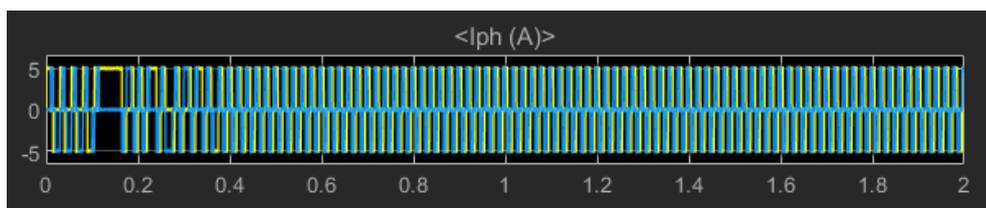
- **Tegangan *close loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.54.** Respon simulasi tegangan *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.54**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,4 \times 10^{-4} s$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave A* lebih lebar dibandingkan *squarewave B*, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

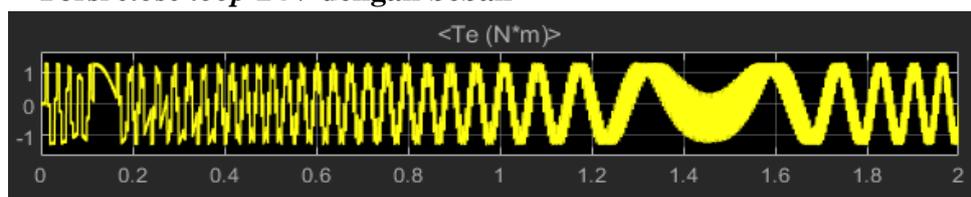
- **Arus *close loop* 24V Dengan beban**



**Gambar 4.55.** Respon simulasi arus *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.55**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,115\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga  $0,21\text{ s}$ , dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

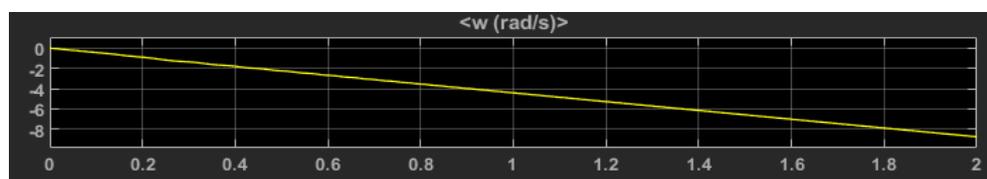
- **Torsi *close loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.56.** Respon simulasi torsi *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.56**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32\text{ N}$  yakni dengan proses respon sinyal fluktuatif dari awal hingga periode  $2\text{ s}$ . Untuk periode  $0,01\text{ s}$  hingga  $0,11\text{ s}$ , respon sinyal membentuk pola *squarewave* namun belum teratur, kemudian respon sinyal menjadi pola *squarewave* yang teratur hingga di periode  $1,165\text{ s}$ , lalu memberikan respon sinyal sinusoidal namun polanya tidak teratur dan hingga  $2\text{ s}$ .

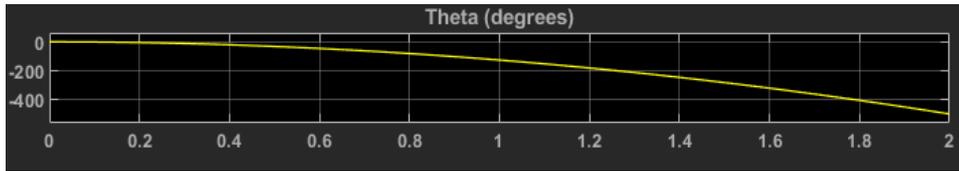
- **Kecepatan sudut *close loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.57.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.57**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,7\text{ radian/s}$

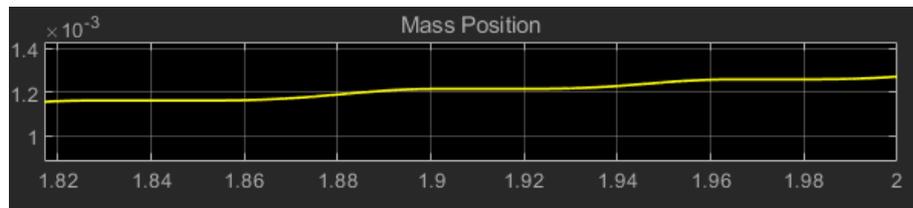
- **Sudut *close loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.58.** Respon simulasi sudut *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.58**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai -500 radian

- **Posisi *close loop* 24V dengan beban**

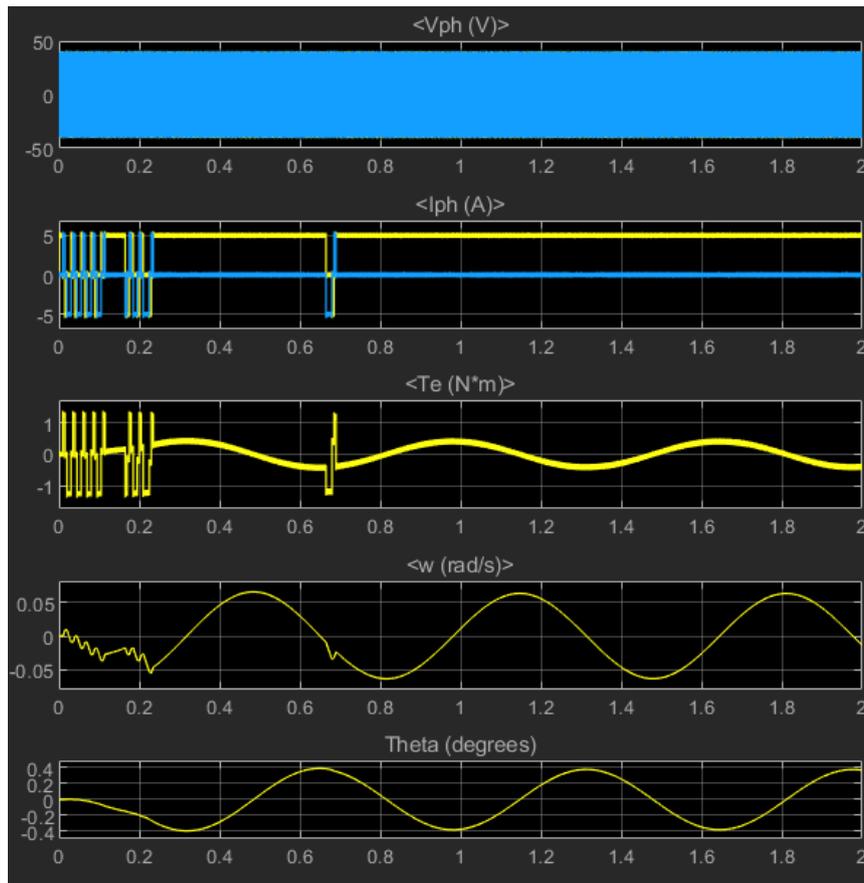


**Gambar 4.59.** Respon simulasi posisi *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.59**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $2,72 \times 10^{-4}$  *m* dalam periode 2 *s*

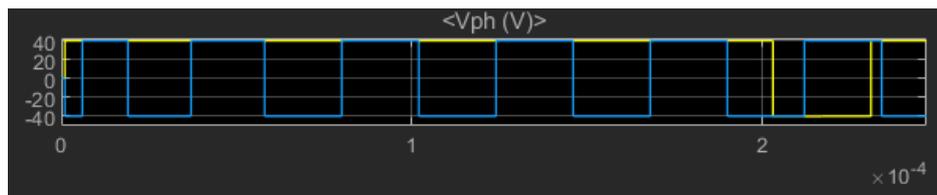
- ***Close loop* 40V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.60** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.60.** Respon simulasi *close loop* 40V tanpa beban

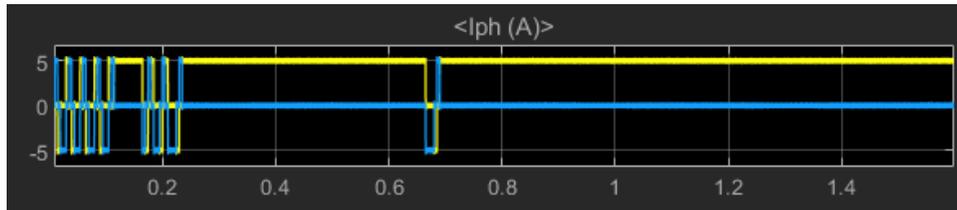
▪ **Tegangan *Close loop* 40V Tanpa beban**



**Gambar 4.61.** Respon simulasi tegangan *close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.61**, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

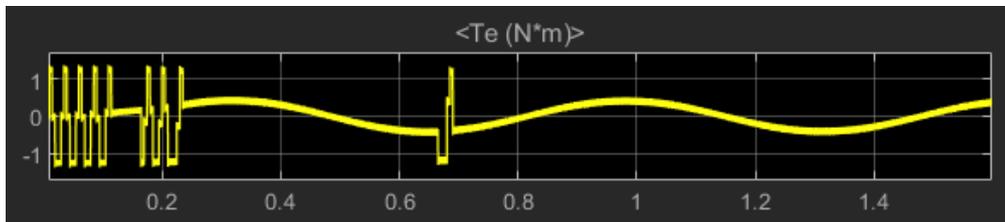
- **Arus *close loop* 40V tanpa beban**



**Gambar 4.62.** Respon simulasi arus *close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.62**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,11\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola *squarewave* yang sama hingga  $0,234\text{ s}$ , lalu memberikan respon stasioner kembali hingga  $0,67\text{ s}$ , lalu membentuk pola *squarewave* kembali hingga  $0,69\text{ s}$ , dan dilanjutkan dengan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

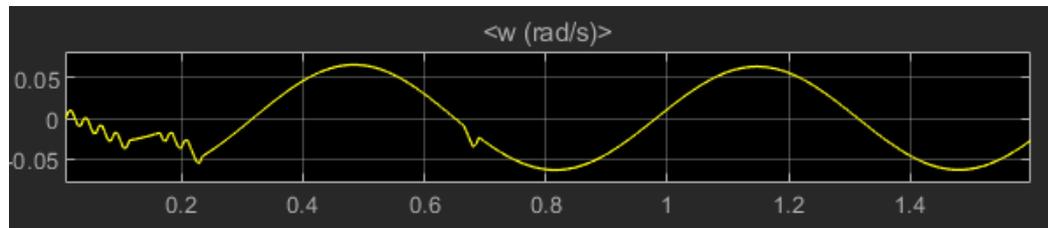
- **Torsi *Close loop* 40V Tanpa beban**



**Gambar 4.63.** Respon simulasi torsi *close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.63**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,11\text{ s}$  lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola *squarewave* yang sama hingga  $0,234\text{ s}$ , lalu memberikan respon stasioner kembali hingga  $0,67\text{ s}$ , lalu membentuk pola *squarewave* kembali hingga  $0,69\text{ s}$ , dan dilanjutkan dengan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

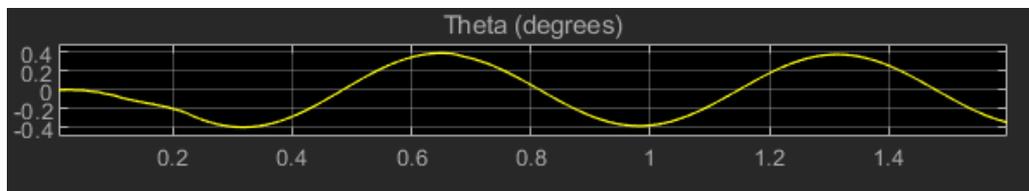
- **Kecepatan sudut *close loop* 40V tanpa beban**



**Gambar 4.64.** Respon simulasi kecepatan sudut *Close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.64**, didapat respon kecepatan sudut mengalami tren penurunan hingga  $-0,056 \text{ rad/s}$  hingga periode  $0,225 \text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,055 \text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2 \text{ s}$

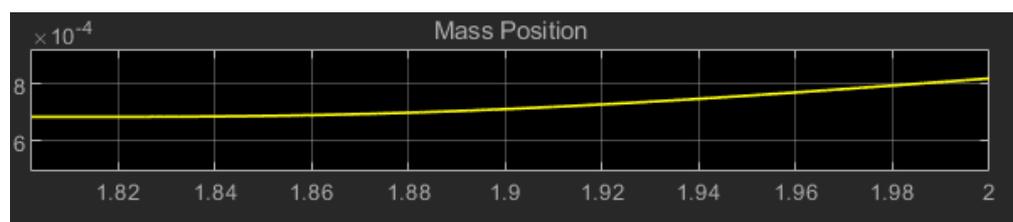
- **Sudut *close loop* 40V tanpa beban**



**Gambar 4.65.** Respon simulasi sudut *close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.65**, didapat respon sudut mengalami penurunan  $-0,4 \text{ rad}$ , lalu mengalami kenaikan hingga  $0,4 \text{ rad/s}$  hingga periode  $0,65 \text{ s}$ , dan kemudian memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2 \text{ s}$

- **Posisi *close loop* 40V tanpa beban**

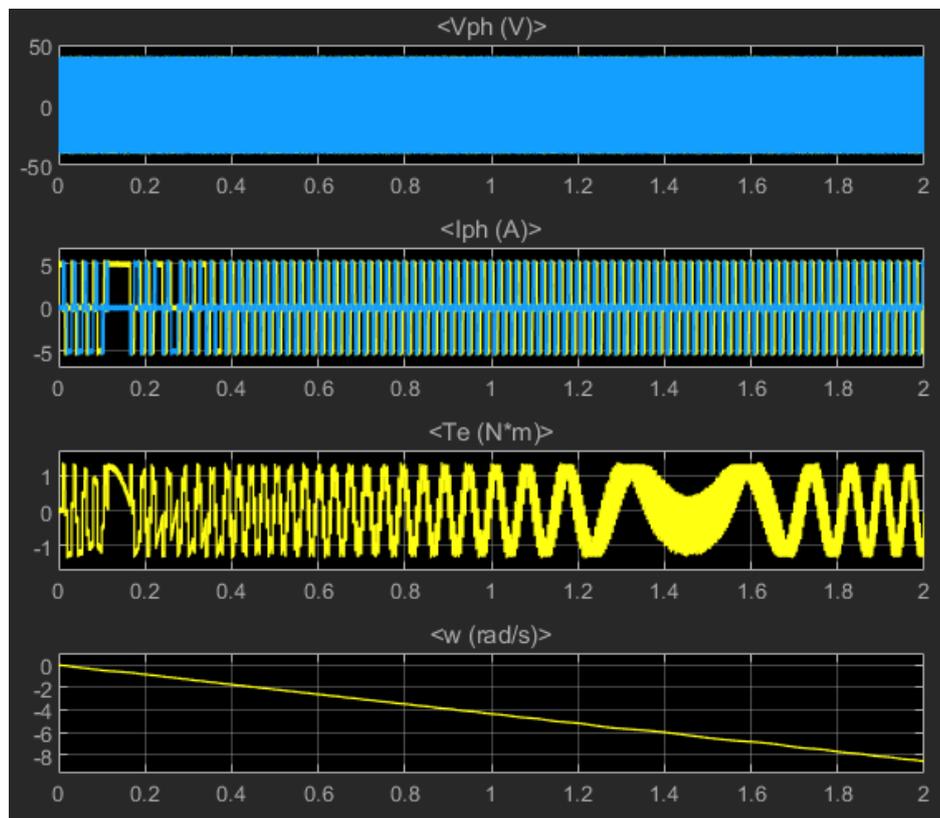


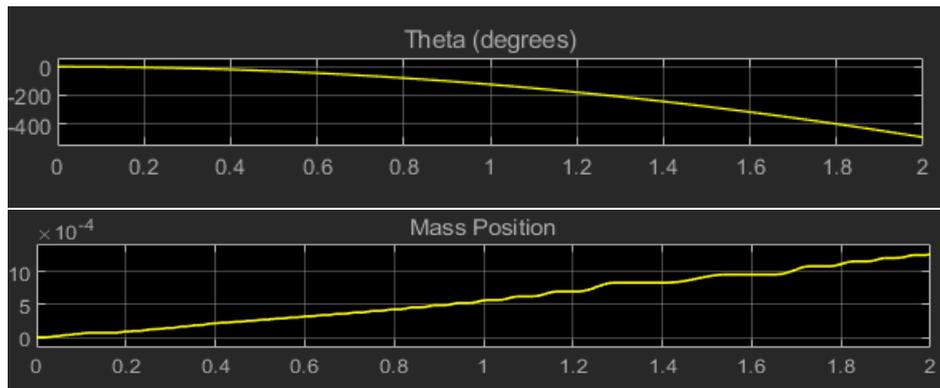
**Gambar 4.66.** Respon simulasi posisi *close loop* 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.66**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $8,18 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- **Close loop 40V dengan beban**

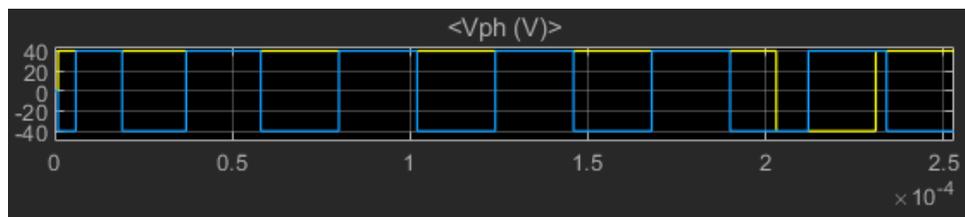
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.67** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.67.** Respon simulasi *close loop* 40V dengan beban

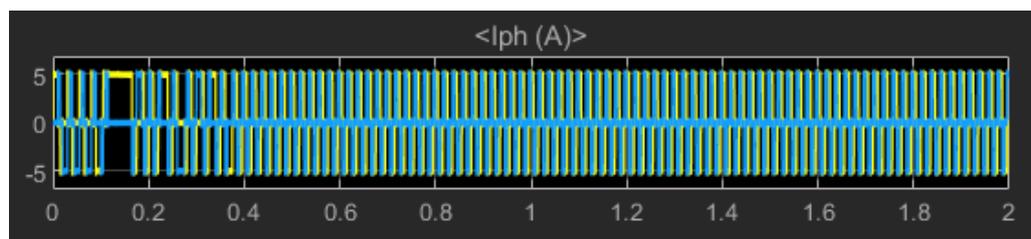
- **Tegangan *close loop* 40V Dengan beban**



**Gambar 4.68.** Respon simulasi tegangan *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.68**, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,4 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

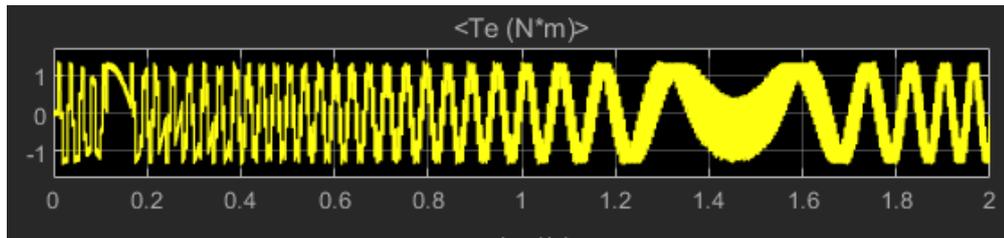
- **Arus *close loop* 40V dengan beban**



**Gambar 4.69.** Respon simulasi arus *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.69**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,115\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165\text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga  $0,21\text{ s}$ , dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga  $2\text{ s}$

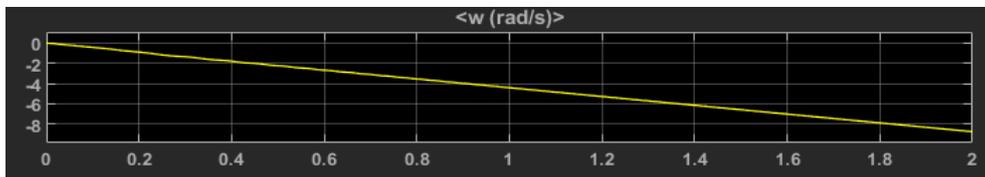
- **Torsi *close loop* 40V dengan beban**



**Gambar 4.70.** Respon simulasi torsi *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.70**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32\text{ N}$  yakni dengan proses respon sinyal fluktuatif dari awal hingga periode  $2\text{ s}$ . Untuk periode  $0,01\text{ s}$  hingga  $0,11\text{ s}$ , respon sinyal membentuk pola *squarewave* namun belum teratur, kemudian respon sinyal menjadi pola *squarewave* yang teratur hingga di periode  $1,165\text{ s}$ , lalu memberikan respon sinyal sinusoidal namun polanya tidak teratur dan hingga  $2\text{ s}$ .

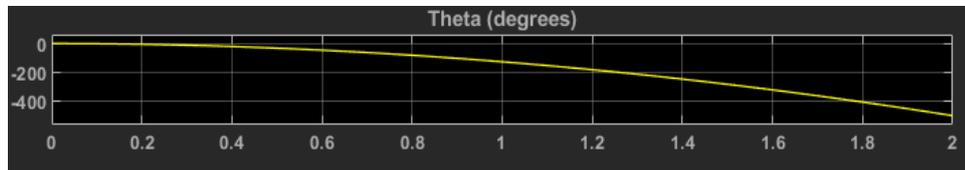
- **Kecepatan sudut *close loop* 40V dengan beban**



**Gambar 4.71.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.71**, didapat respon respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,7\text{ radian/s}$

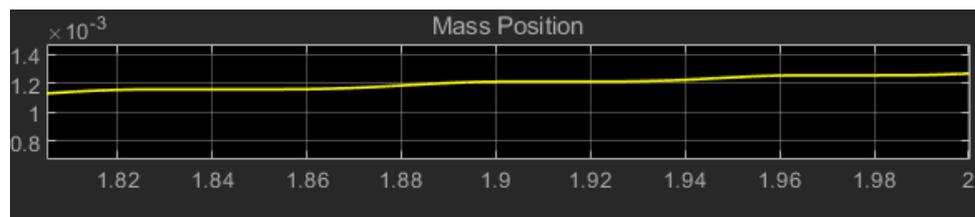
- **Sudut *close loop* 40V dengan beban**



**Gambar 4.72.** Respon simulasi sudut *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.72**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai -500 radian

- **Posisi *Close loop* 40V Dengan beban**

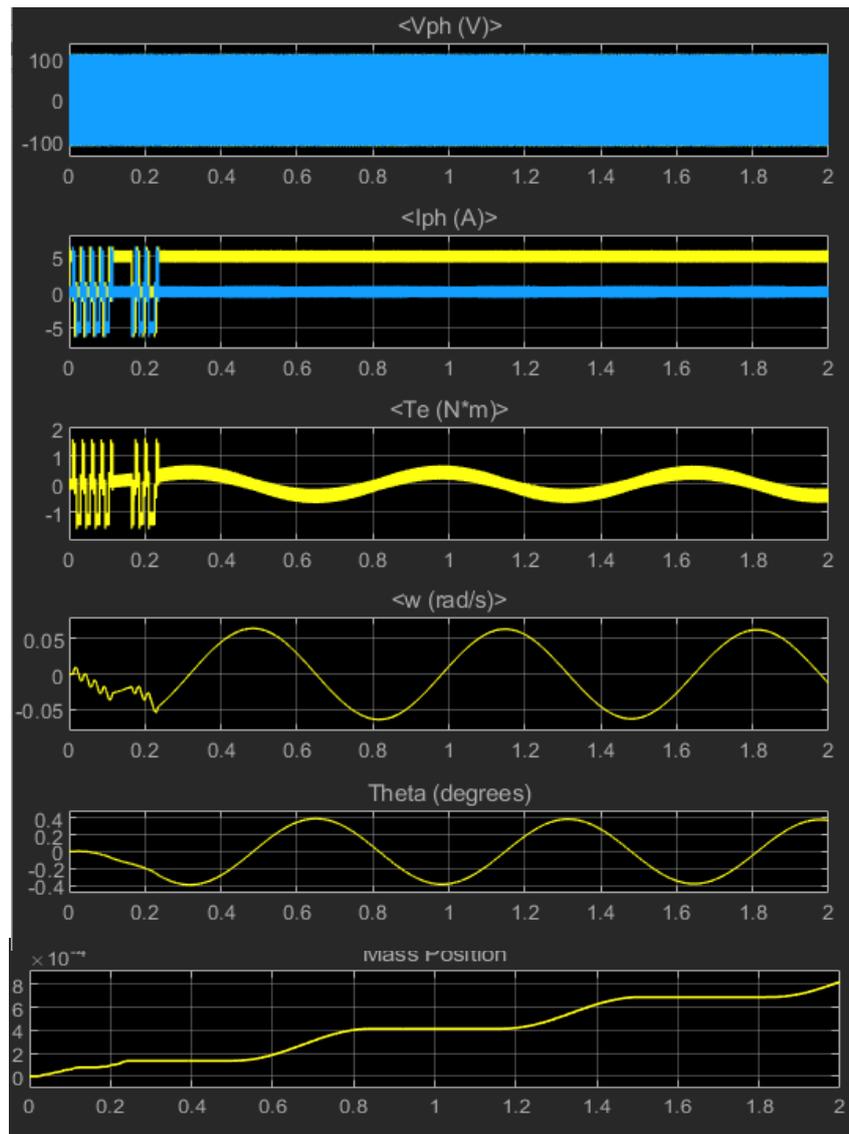


**Gambar 4.73.** Respon simulasi posisi *close loop* 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban 0 *N.m* dalam **gambar 4.73**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $1,22 \times 10^{-4}$  m dalam periode 2 s

- ***Close loop* 110V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.74** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.74.** Respon simulasi *close loop* 110V tanpa beban

- **Tegangan *close loop* 110V tanpa beban**

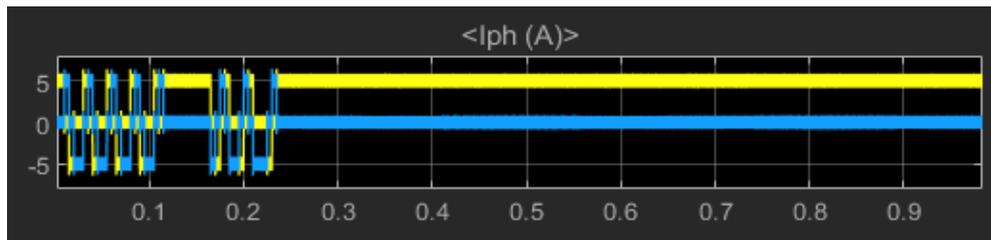


**Gambar 4.75.** Respon simulasi tegangan *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban  $0$   $N.m$  dalam **gambar 4.75**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan

kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,7 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

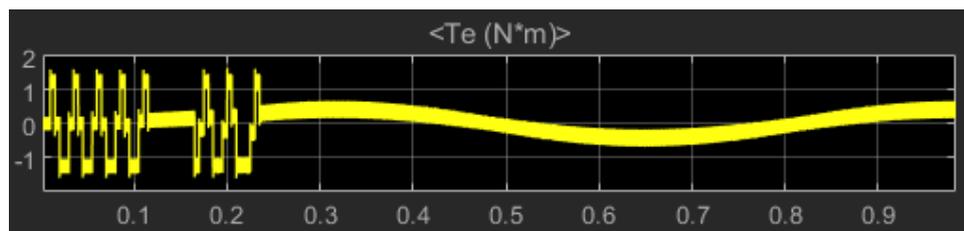
- **Arus close loop 110V tanpa beban**



**Gambar 4.76.** Respon simulasi arus *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.76**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,11 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,165 s, kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga 0,235 s, dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga 2 s

- **Torsi close loop 110V Tanpa beban**

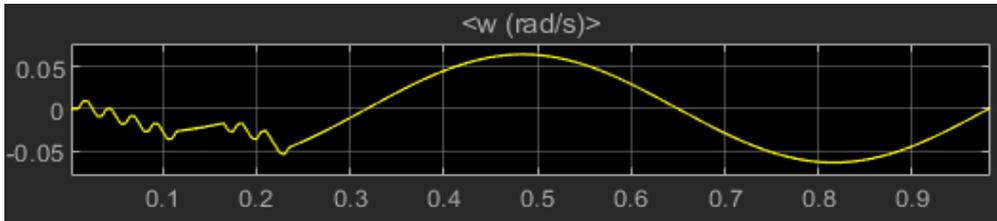


**Gambar 4.77.** Respon simulasi torsi *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.77**, didapat respon torsi output sebesar 1,32 N yakni dengan proses respon membentuk pola *squarewave* dari periode 0,01 s hingga 0,115 s, kemudian respon sinyal stasioner hingga 0,165 s, lalu memberikan respon kenaikan di waktu

0,235 s hingga mencapai 1,32 N, dan bergerak turun sehingga sinyal memberikan pola respon sinyal berosilasi hingga 2s

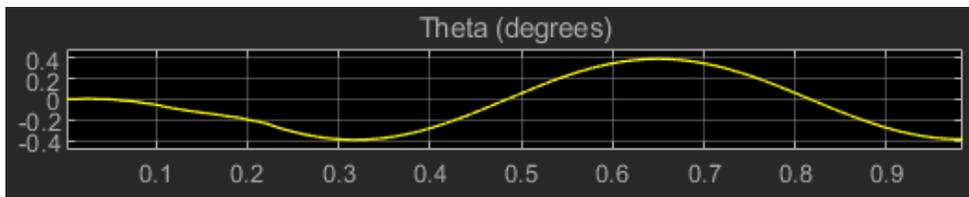
- **Kecepatan sudut *close loop* 110V tanpa beban**



**Gambar 4.78.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.78**, didapat respon kecepatan sudut mengalami tren penurunan hingga  $-0,056\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,225\text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,055\text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

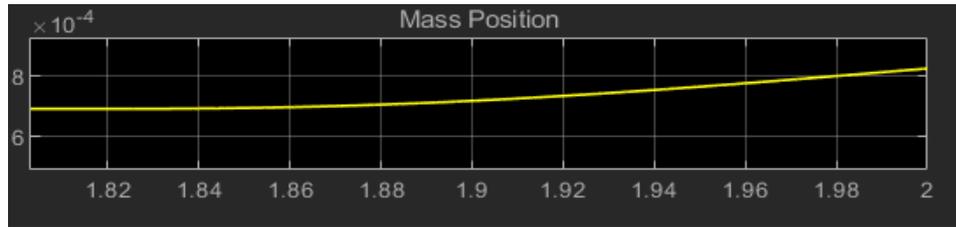
- **Sudut *close loop* 110V tanpa beban**



**Gambar 4.79.** Respon simulasi sudut *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.79**, didapat respon kecepatan sudut, nilai respon sudut mengalami penurunan  $-0,4\text{ rad}$  pada periode  $0,35\text{ s}$ , lalu mengalami kenaikann hingga  $0,4\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,65\text{ s}$ , dan kemudian memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

- **Posisi *close loop* 110V tanpa beban**

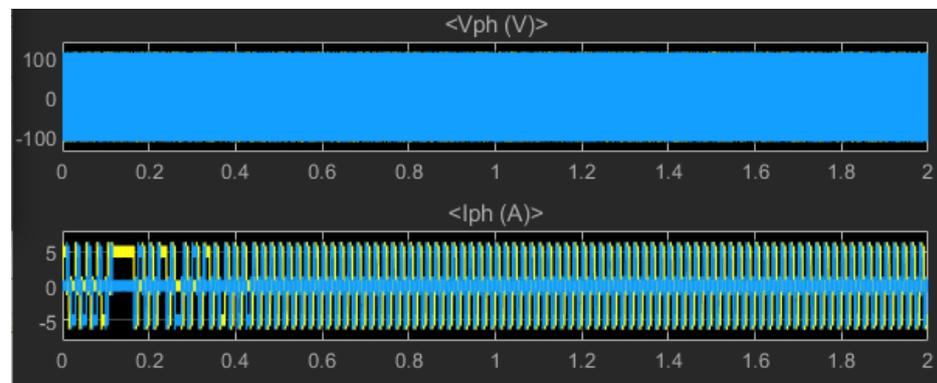


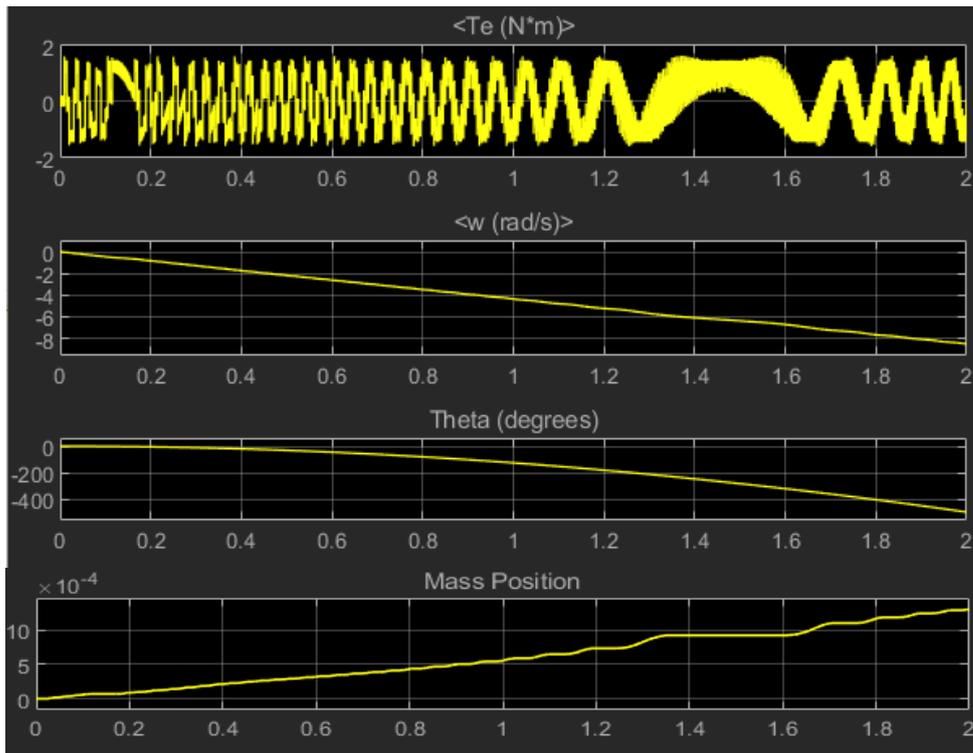
**Gambar 4.80.** Respon simulasi posisi *close loop* 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.80**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $8,2 \times 10^{-4} \text{ m}$  dalam periode  $2 \text{ s}$

- ***Close loop* 110V dengan beban**

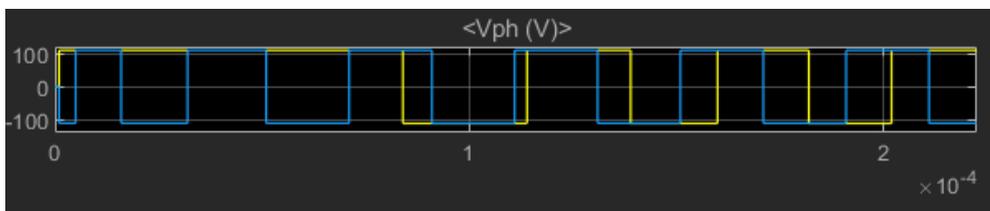
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.81** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.81.** Respon simulasi *close loop* 110V dengan beban

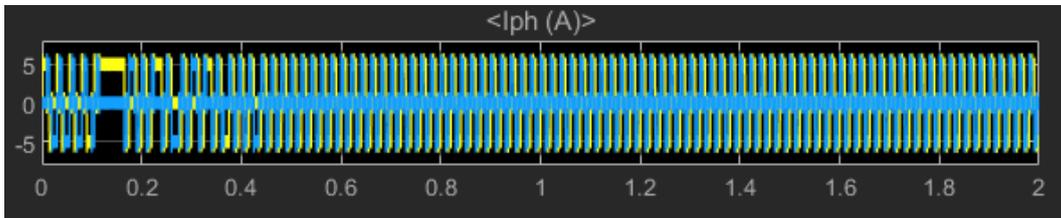
- **Tegangan *close loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.82.** Respon simulasi tegangan *close loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban 3 *N.m* dalam gambar 4.6, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}$  s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

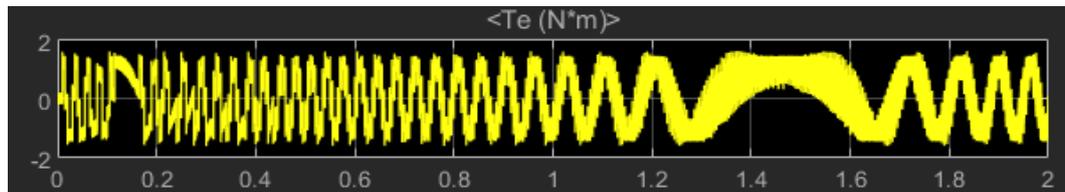
- **Arus *close loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.83.** Respon simulasi arus *close loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.83**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,115 \text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga  $0,165 \text{ s}$ , kemudian bergerak dengan pola yang sama hingga  $0,21 \text{ s}$ , dan sinyal kembali memberikan respon stasioner hingga  $2 \text{ s}$

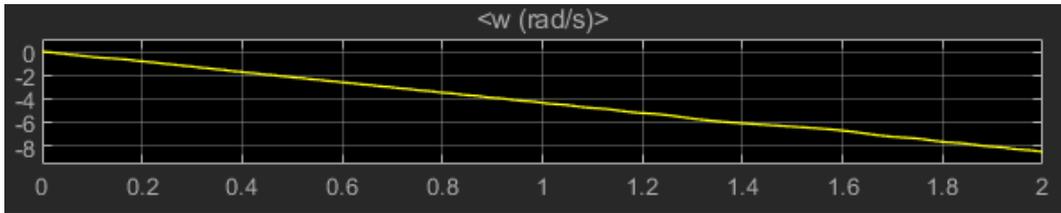
- **Torsi *close loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.84.** Respon simulasi torsi *close loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.84**, didapat respon torsi output sebesar  $1,32 \text{ N}$  yakni dengan proses respon sinyal fluktuatif dari awal hingga periode  $2 \text{ s}$ . Untuk periode  $0,01 \text{ s}$  hingga  $0,11 \text{ s}$ , respon sinyal membentuk pola *squarewave* namun belum teratur, kemudian respon sinyal menjadi pola *squarewave* yang teratur hingga di periode  $1,165 \text{ s}$ , lalu memberikan respon sinyal sinusoidal namun polanya tidak teratur dan hingga  $2 \text{ s}$ .

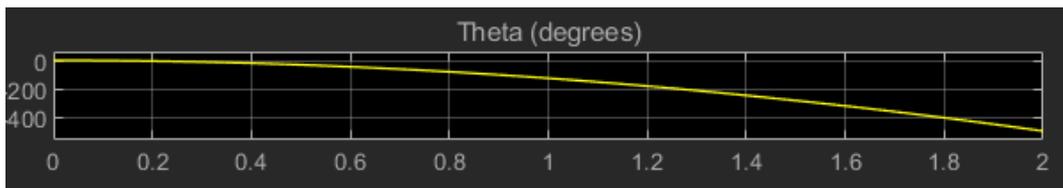
- **Kecepatan Sudut *close loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.85.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.85**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,7 \text{ radian/s}$

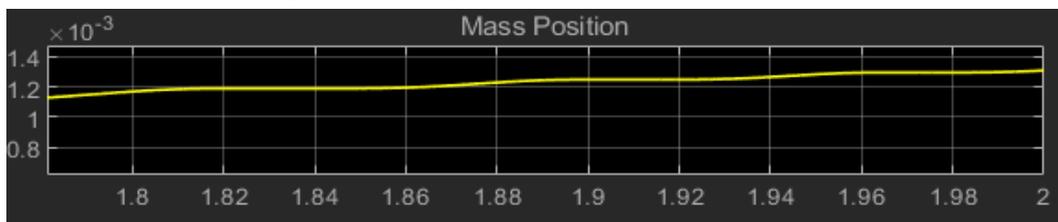
- **Sudut *close loop* 24V dengan beban**



**Gambar 4.86.** Respon simulasi sudut *close loop* 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.86**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-500 \text{ radian}$

- **Posisi *close loop* 110V dengan beban**



**Gambar 4.87.** Respon simulasi posisi *open loop* 110V dengan beban

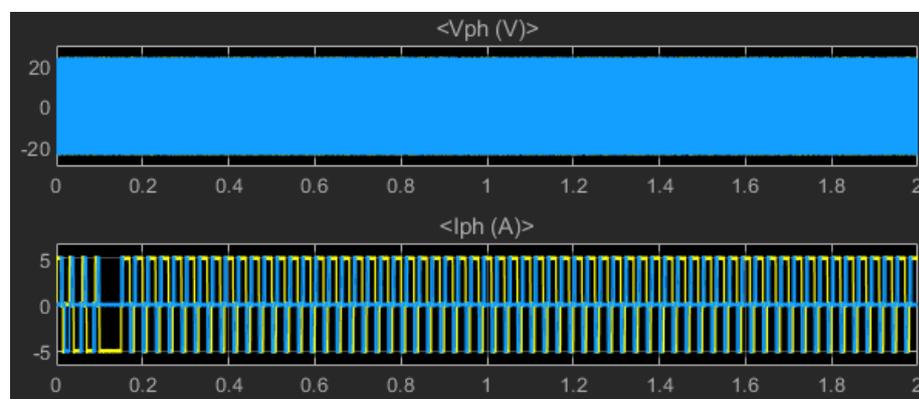
Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *open loop* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.87**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $1,3 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

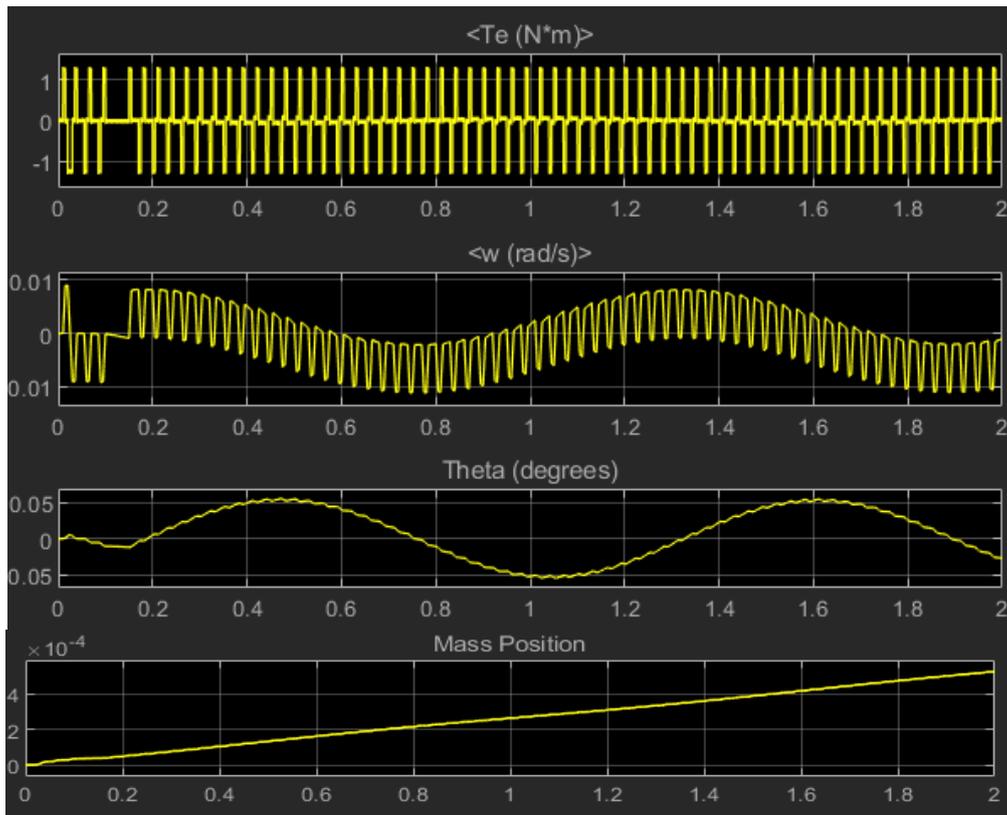
- **Hasil simulasi *close loop* PID**

Pada sub-bab ini, hasil skema simulasi yang berupa plot grafik dari hasil simulasi *software* MATLAB/SIMULINK ditampilkan dalam gambar **4.88** hingga **Gambar 4.127**. Gambar yang ditampilkan dalam sub-bab ini meliputi hasil simulasi dengan arus  $5\text{ ampere}$ , torsi input  $0\text{ N.m}$  (tanpa beban) dengan simulasi pembanding torsi input  $3\text{ N.m}$ , (dengan beban) dan tegangan masing-masing  $24\text{V}$ ,  $40\text{V}$ , dan  $110\text{V}$  dengan variabel fisis yang diamati adalah tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system*. Untuk model simulasi *open loop* merujuk pada diagram proses gambar 3.2c yang telah dilampirkan pada sub-bab 3.3 Desain Simulasi pada Bab 3.

- ***Close loop* PID 24V Tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.88** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.88.** Respon simulasi *close loop* PID 24V tanpa beban

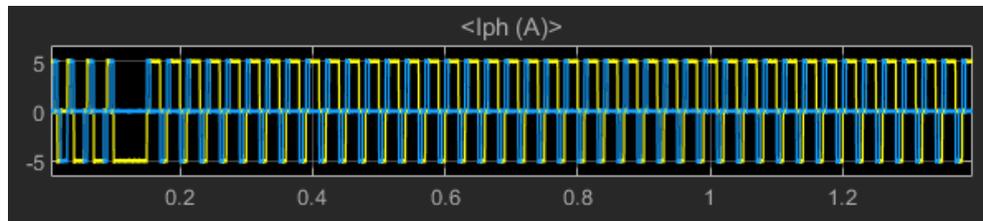
▪ **Tegangan *close loop* PID 24V tanpa beban**



**Gambar 4.89.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop PID* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.89**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,4 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave A* lebih lebar dibandingkan *squarewave B*, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

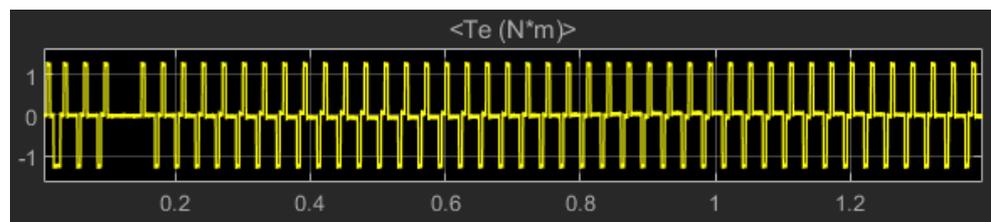
- **Arus Close loop 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.90.** Respon simulasi arus *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam gambar 4.90, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga *squarewave* hingga 0,1 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,15 s, kemudian memberikan respon pola *squarewave* hingga 2 s.

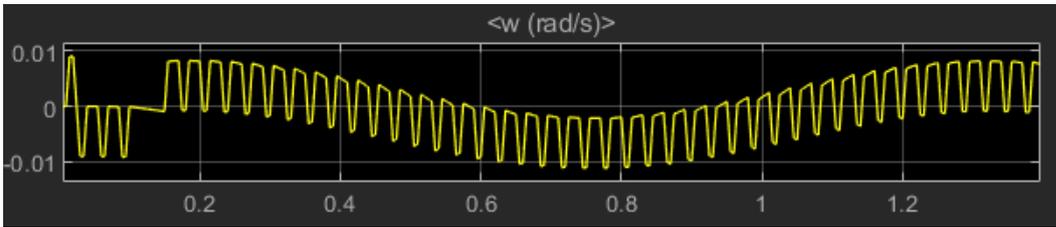
- **Torsi close loop PID 24V tanpa beban**



**Gambar 4.91.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.91**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga *squarewave* hingga 0,1 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,15 s, kemudian memberikan respon pola *squarewave* hingga 2 s.

- **Kecepatan sudut *close loop* PID 24V tanpa beban**



**Gambar 4.92.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.92**, didapat respon kecepatan sudut mengalami tren penurunan. Kenaikan awal berada di angka  $0,0008\text{ rad/s}$ , lalu mengalami penurunan hingga  $-0,0008\text{ rad/s}$ , kemudian kembali ke angka  $0$ , lalu mengalami penutunan kembali hingga periode  $0,1\text{ s}$ , lalu respon mengalami kenaikan hingga  $0,0008\text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal *squarewave* hingga periode  $2\text{ s}$

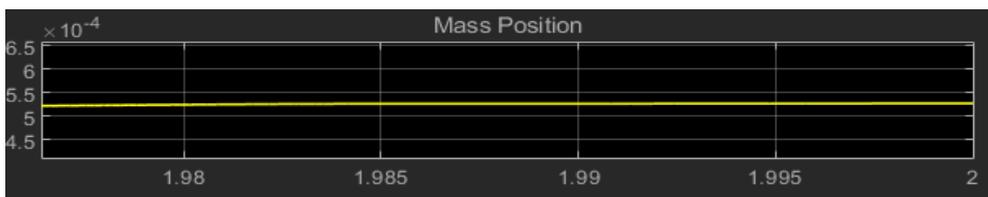
- **Sudut *Close loop* PID 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.93.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.93**, didapat respon kecepatan sudut, nilai respon sudut mengalami penurunan  $-0,01\text{ rad}$ , lalu mengalami kenaikann hingga  $0,05\text{ rad/s}$  hingga periode  $0,5\text{ s}$ , lalu mengalami tren penurunan hingga  $-0,05\text{ rad/s}$  dan kemudian memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2\text{ s}$

- **Posisi *Close loop* PID 24V Tanpa beban**

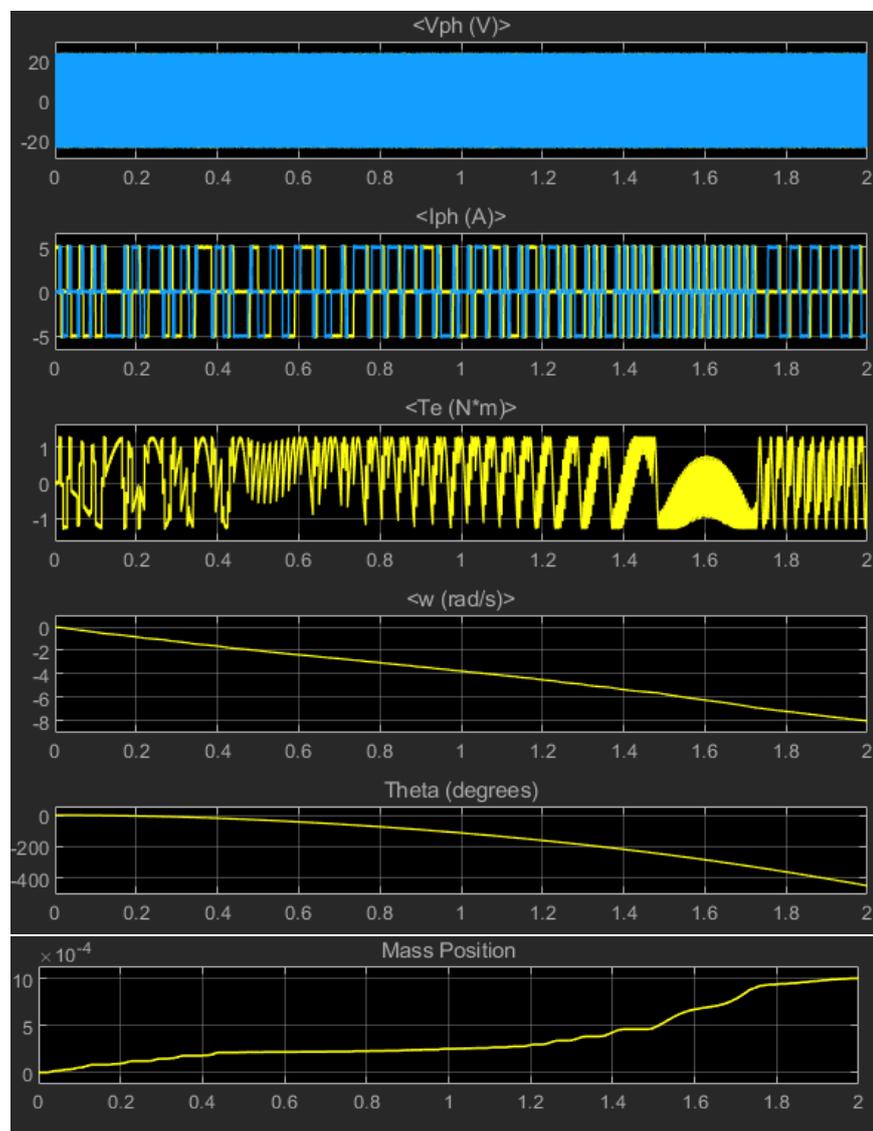


**Gambar 4.94.** Respon simulasi posisi *close loop* PID 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.94**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $5,3 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

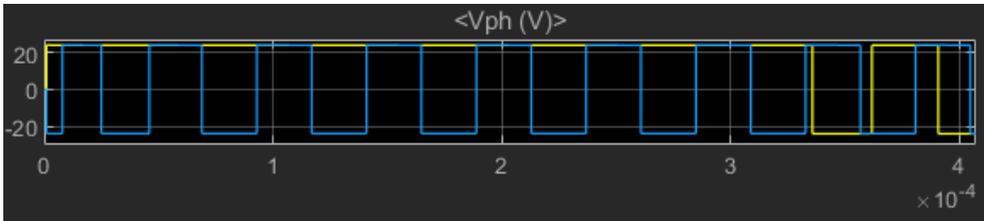
○ **Close loop 24V PID dengan beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.95** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.95.** Respon simulasi *close loop* PID 24V dengan beban

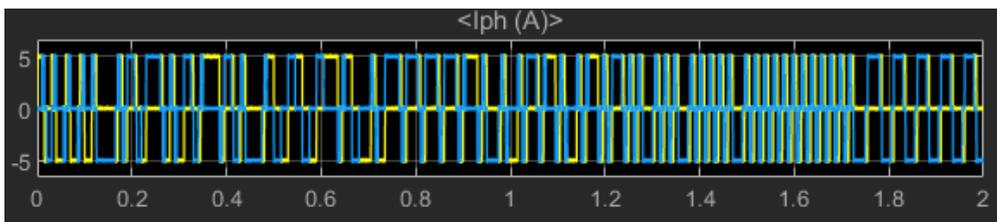
- **Tegangan *close loop* PID 24V Dengan beban**



**Gambar 4.96.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop PID* beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.96**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,4 \times 10^{-4} \text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

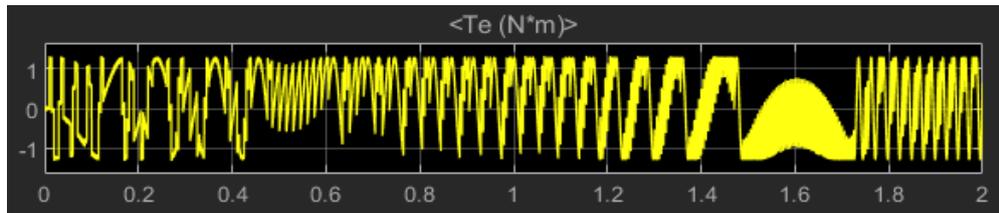
- **Arus *close loop* PID 24V dengan beban**



**Gambar 4.97.** Respon simulasi arus *close loop* 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.97**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 2 s

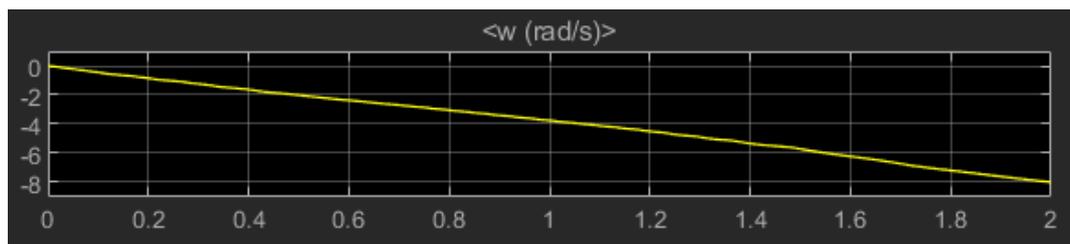
- **Torsi *close loop* PID 24V dengan beban**



**Gambar 4.98.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.98**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $2\text{ s}$ .

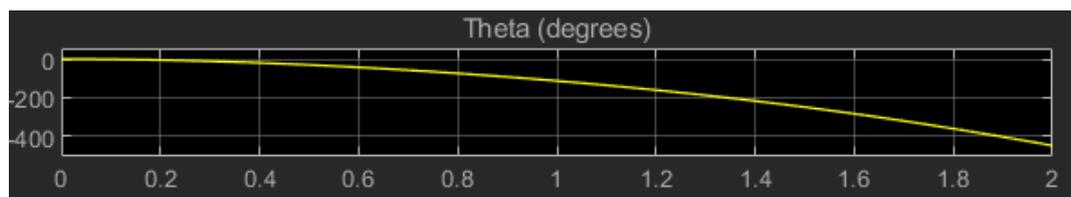
- **Kecepatan sudut *close loop* PID 24V dengan beban**



**Gambar 4.99.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.99**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,7\text{ radian/s}$

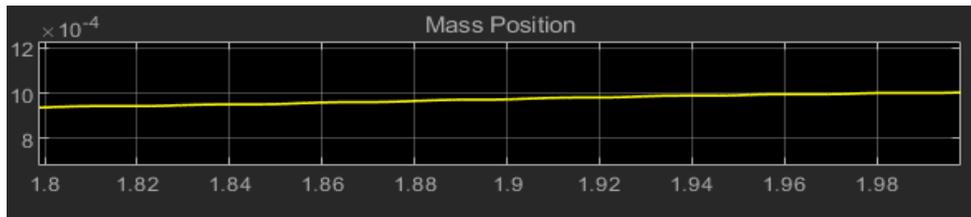
- **Sudut *Close loop* PID 24V Dengan beban**



**Gambar 4.100.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.100**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-500$  radian

- **Posisi *close loop* PID 24V dengan beban**

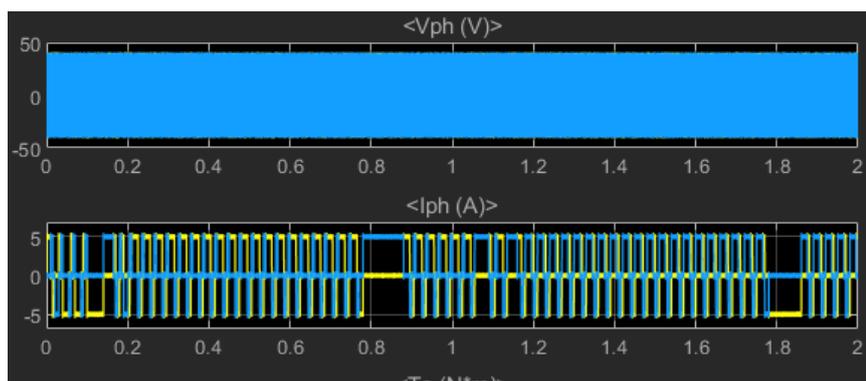


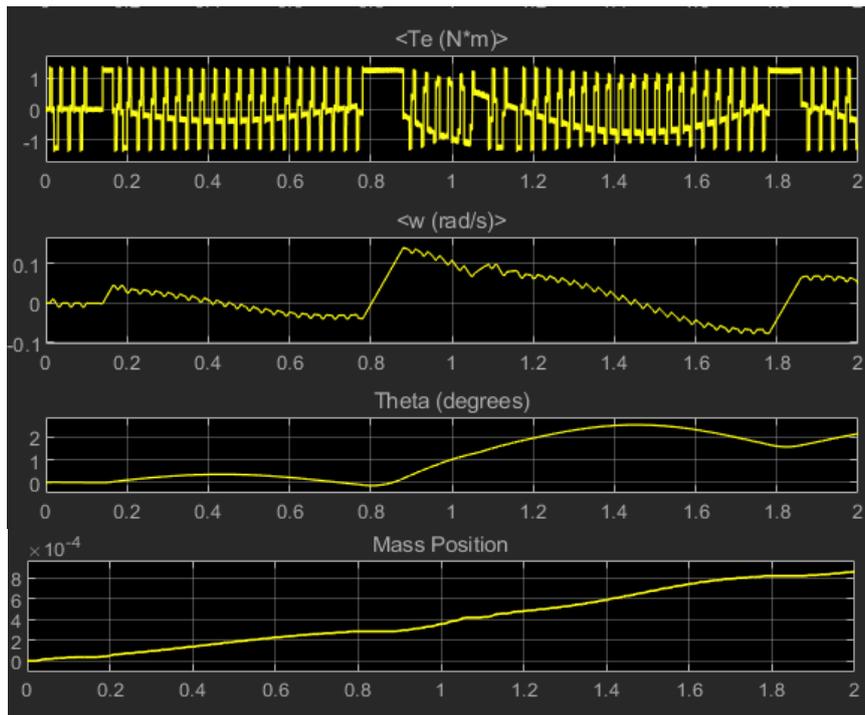
**Gambar 4.101.** Respon simulasi posisi *close loop* PID 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.101**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $10 \times 10^{-4} \text{ m}$  dalam periode  $2 \text{ s}$

- ***Close loop* PID 40V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.102** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.102.** Respon simulasi *close loop* PID 40V tanpa beban

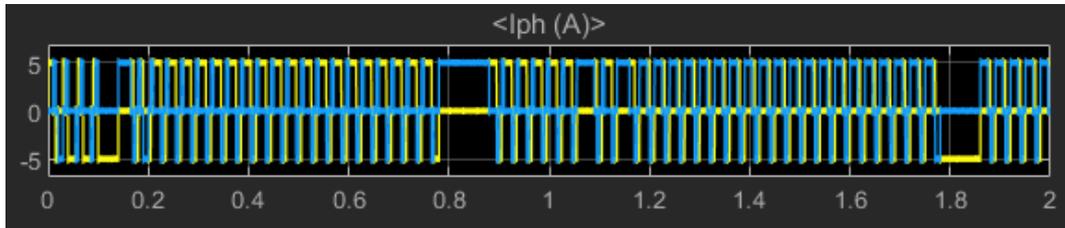
■ **Tegangan *Close loop* PID 40V Tanpa beban**



**Gambar 4.103.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam gambar 4.103, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4} \text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

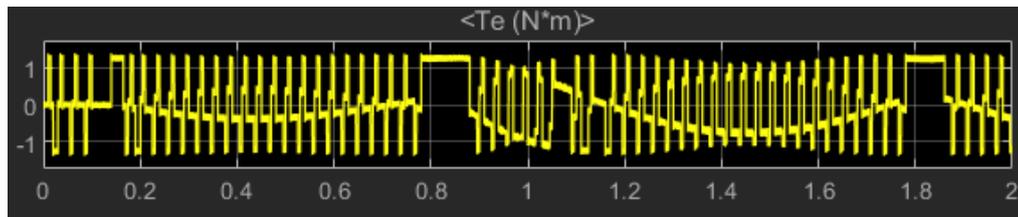
- **Arus *close loop* PID 40V tanpa beban**



**Gambar 4.104.** Respon simulasi arus *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$ , didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,1 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,14 s. Kemudian memberikan respon pola *squarewave* hingga 0,77s, lalu mengalami respon stasioner hingga 0,87s, kemudian membentuk pola *squarewave* hingga periode 1,78s, kemudian mengalami respon stasioner kembali hingga 1,86s. Lalu membentuk pola *squarewave* kembali hingga 2 s.

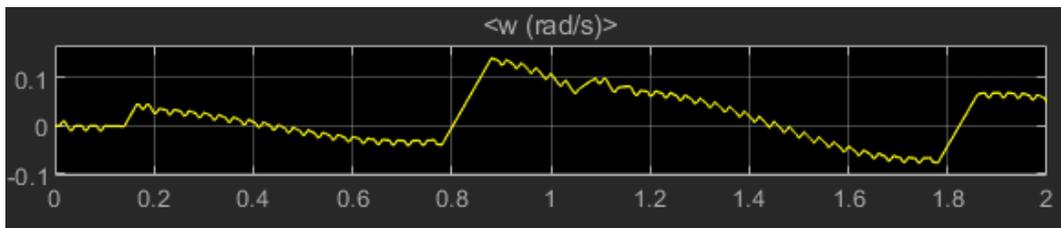
- **Torsi *close loop* PID 40V tanpa beban**



**Gambar 4.105.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$ , didapat torsi output 1.32 N, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,14 s, kemudian respon sinyal stasioner hingga 0,165 s. Lalu memberikan respon sinyal dengan pola *squarewave* kembali hingga 0,78 s, kemudian memberikan respon stasioner hingga periode 0,88. Kemudian didapat respon berpola *squarewave* hingga periode 1,78 s, kemudian didapat respon stasioner hingga 1,87 s, dan bergerak memberikan pola respon *squarewave* kembali hingga 2 s.

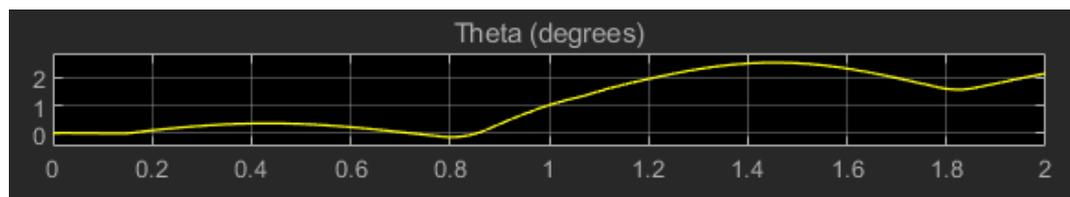
- **Kecepatan sudut *close loop* PID 40V tanpa beban**



**Gambar 4.106.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.106**, didapat respon kecepatan sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,14\text{ s}$  hingga  $0,04\text{ rad/s}$ . Lalu mengalami tren penurunan hingga  $-0,008\text{ rad/s}$  periode  $0,78\text{s}$ . Kemudian respon mengalami kenaikan hingga  $0,15\text{ rad/s}$  dan mengalami penurunan hingga  $-0,008\text{ rad/s}$  di periode  $1,78\text{s}$ . Lalu mengalami kenaikan kembali hingga  $0,008\text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal beresilasi hingga periode  $2\text{ s}$

- **Sudut *close loop* PID 40V tanpa beban**

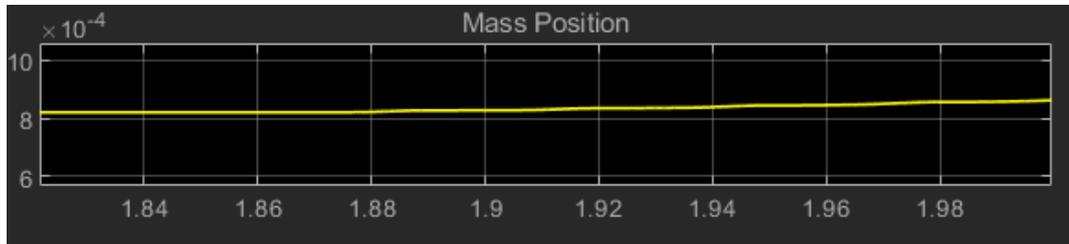


**Gambar 4.107.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.107**, didapat respon sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,16\text{ s}$  sebesar  $0,3\text{ rad}$  hingga  $0,55\text{s}$ . Lalu mengalami tren penurunan hingga nol periode  $0,8\text{s}$ . Kemudian respon mengalami kenaikan hingga  $2,8\text{ rad}$  di periode  $1,55\text{s}$  dan mengalami penurunan hingga  $-0,008\text{ rad/s}$  di periode  $1,78\text{s}$ . Lalu mengalami penurunan

menjadi hingga 1,5 rad di periode 1,81s. Lalu respon sinyal mengalami kenaikan 2,2 rad hingga periode 2 s

- **Posisi *close loop* PID 40V tanpa beban**

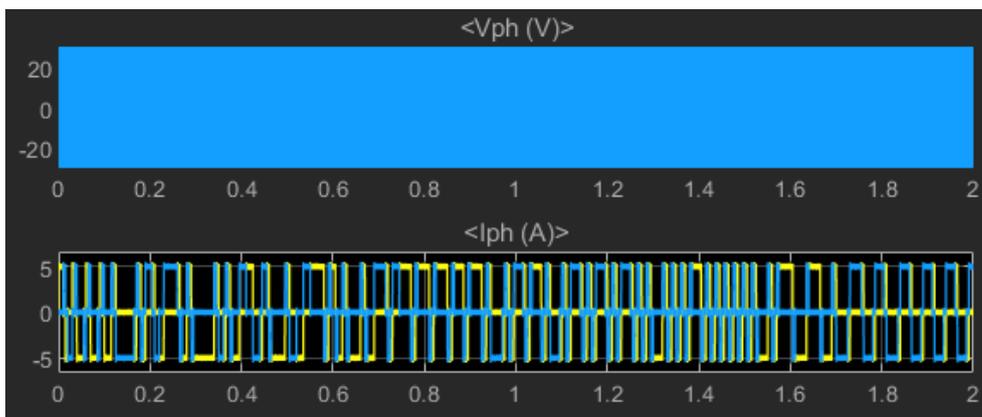


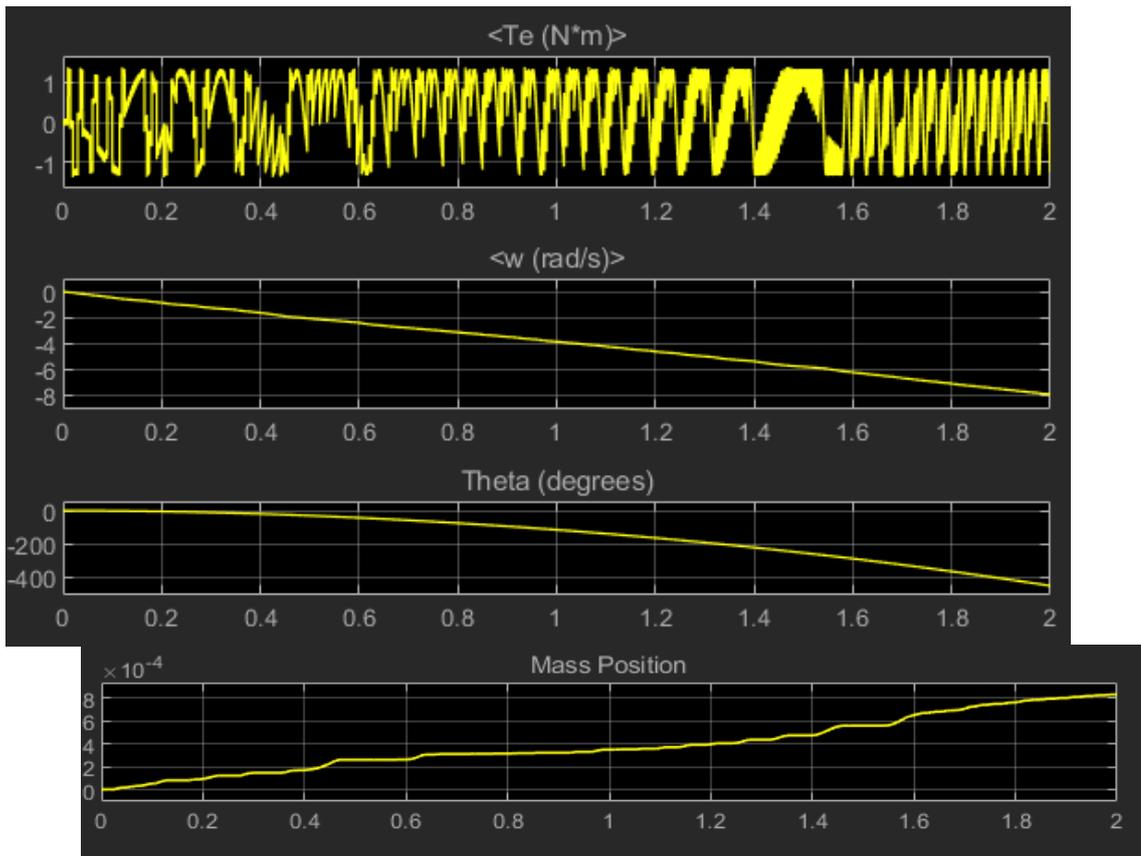
**Gambar 4.108.** Respon simulasi posisi *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban 0 N.m dalam **gambar 4.108**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $8,6 \times 10^{-4} m$  dalam periode 2 s.

- ***Close loop* PID 40V dengan beban**

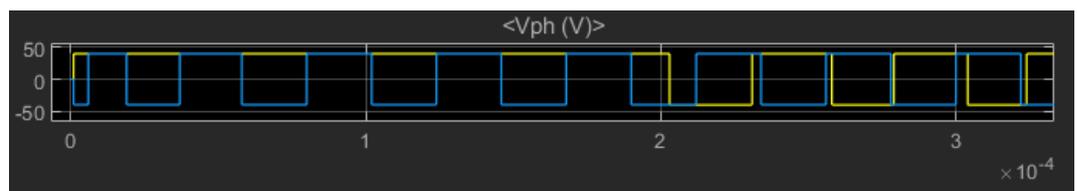
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam gambar 4.109 dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya





**Gambar 4.109.** Respon simulasi *close loop* PID 40V dengan beban

- **Tegangan *close loop* PID 40V dengan beban**

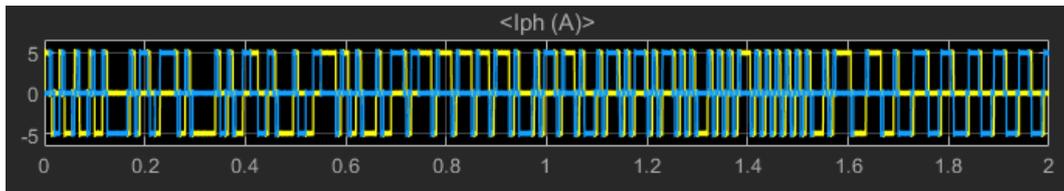


**Gambar 4.110.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* PID beban 3 N.m dalam **gambar 4.110**, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa

pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

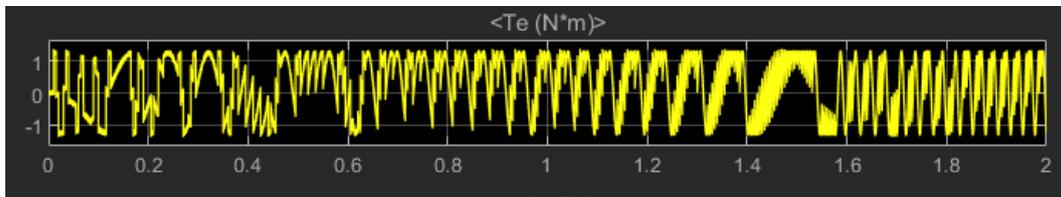
- **Arus *close loop* PID 40V dengan beban**



**Gambar 4.111.** Respon simulasi arus *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.111**, didapat tegangan output sebesar 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 2 s.

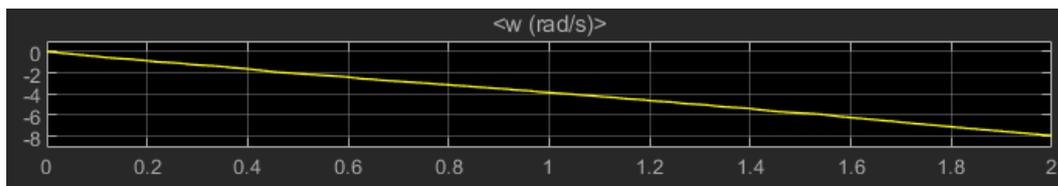
- **Torsi *close loop* PID 40V Dengan beban**



**Gambar 4.112.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *close loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.112**, didapat torsi output sebesar 1.32 N dengan didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 2s

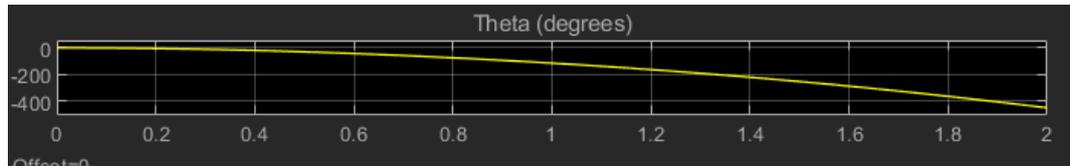
- **Kecepatan Sudut *Close loop* PID 40V Dengan beban**



**Gambar 4.113.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.113**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,6\text{ radian/s}$

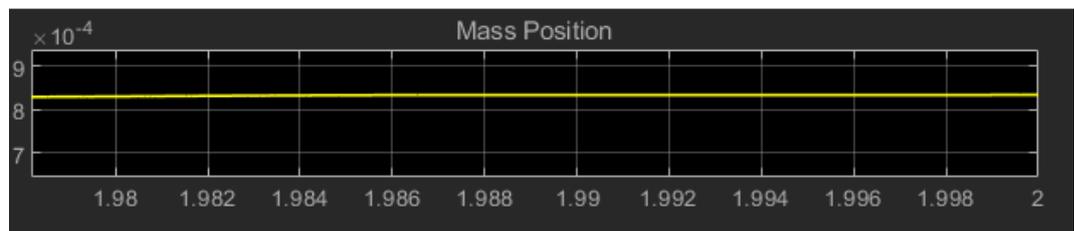
- **Sudut *close loop* PID 40V dengan beban**



**Gambar 4.114.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.114**, didapat respon sudut mengalami tren penurunan. Pada periode 0 hingga  $0,2\text{ s}$ , nilai respon sudut stasioner, lalu mengalami penurunan hingga  $450\text{ rad}$  periode  $2\text{ s}$

- **Posisi *close loop* PID 40V dengan beban**

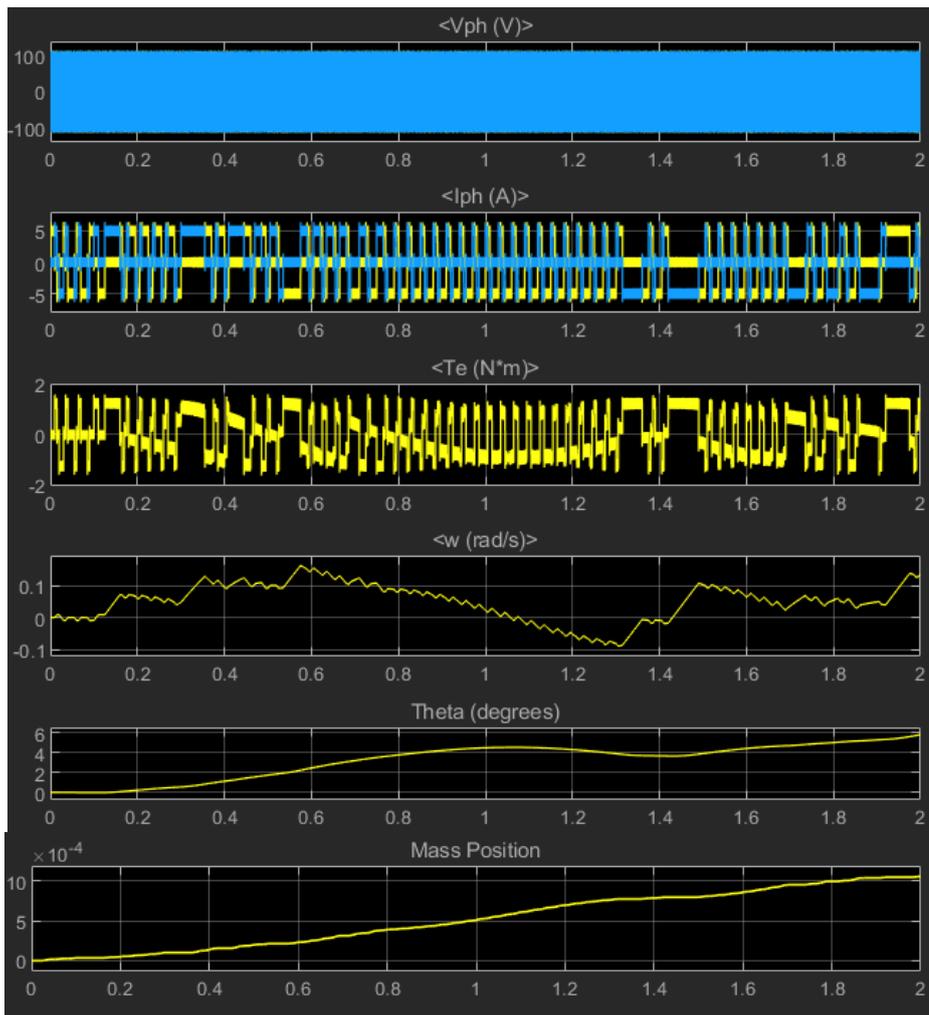


**Gambar 4.115.** Respon simulasi posisi *close loop* PID 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.115**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $8,38 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$ .

- ***Close loop* PID 110V tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.116** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya



**Gambar 4.116.** Respon simulasi *close loop* PID 110V tanpa beban

▪ **Tegangan *Close loop* PID 110V tanpa beban**

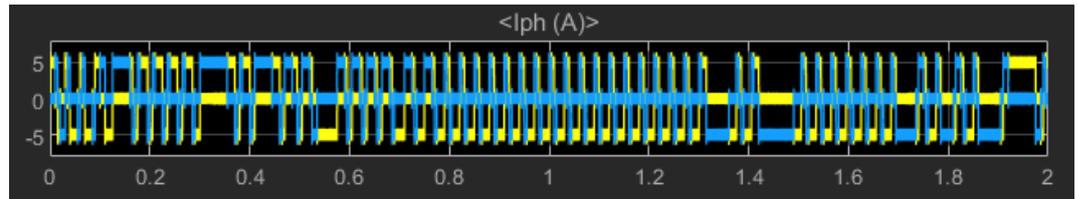


**Gambar 4.117.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.117**, didapat tegangan output sebesar  $24\text{V}$  dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,82 \times 10^{-4}\text{s}$ . Untuk lebar

pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

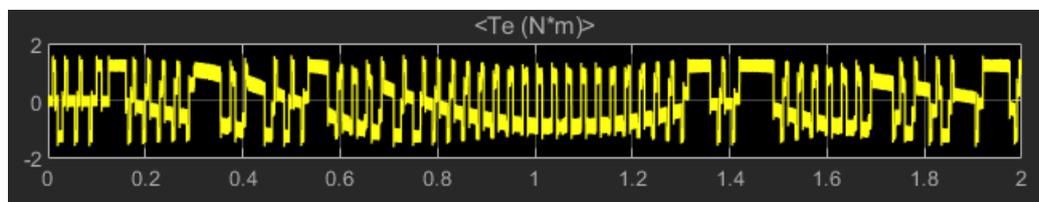
- **Arus *close loop* PID 110V tanpa beban**



**Gambar 4.118.** Respon simulasi arus *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.118**, didapat tegangan output sebesar 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 2 s.

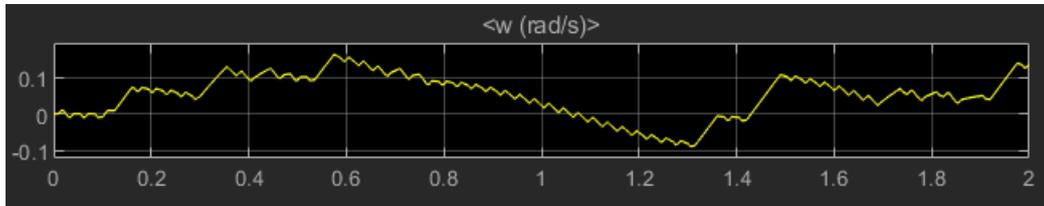
- **Torsi *Cclose loop* PID 110V tanpa beban**



**Gambar 4.119.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.119**, didapat tegangan output sebesar 1.32 N, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 2 s.

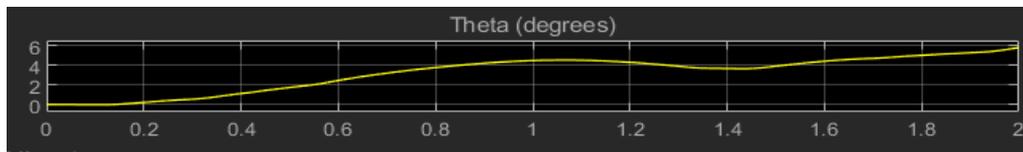
- **Kecepatan sudut *close loop* PID 110V Tanpa beban**



**Gambar 4.120.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.120**, didapat respon kecepatan sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,14\text{ s}$  hingga  $0,18\text{ rad/s}$ . Lalu mengalami tren penurunan hingga  $-0,1\text{ rad/s}$  periode  $1,3\text{ s}$ . Kemudian respon mengalami kenaikan hingga  $0,1\text{ rad/s}$  dan mengalami penurunan hingga  $0,02\text{ rad/s}$  di periode  $1,68\text{ s}$ . Lalu mengalami kenaikan kembali hingga  $0,15\text{ rad/s}$  dan memberikan respon sinyal beresilasi hingga periode  $2\text{ s}$

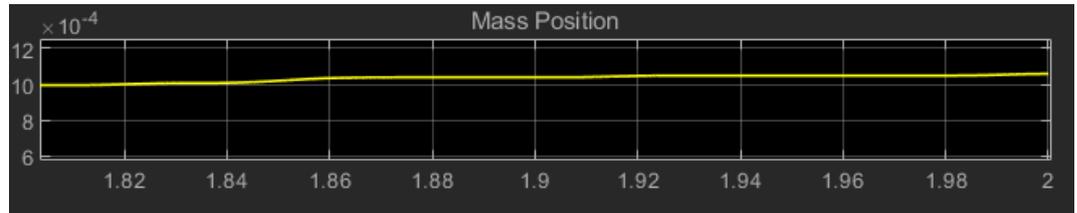
- **Sudut *close loop* PID 110V tTanpa beban**



**Gambar 4.121.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.121**, didapat respon respon sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,16\text{ s}$  sebesar  $4,1\text{ rad}$  hingga  $1,1\text{ s}$ . Lalu mengalami tren penurunan hingga  $4\text{ rad}$  di periode  $1,31\text{ s}$ . Kemudian respon mengalami kenaikan hingga  $5,8\text{ rad}$  hingga periode  $2\text{ s}$

- **Posisi *cClose loop* PID 110V tanpa beban**

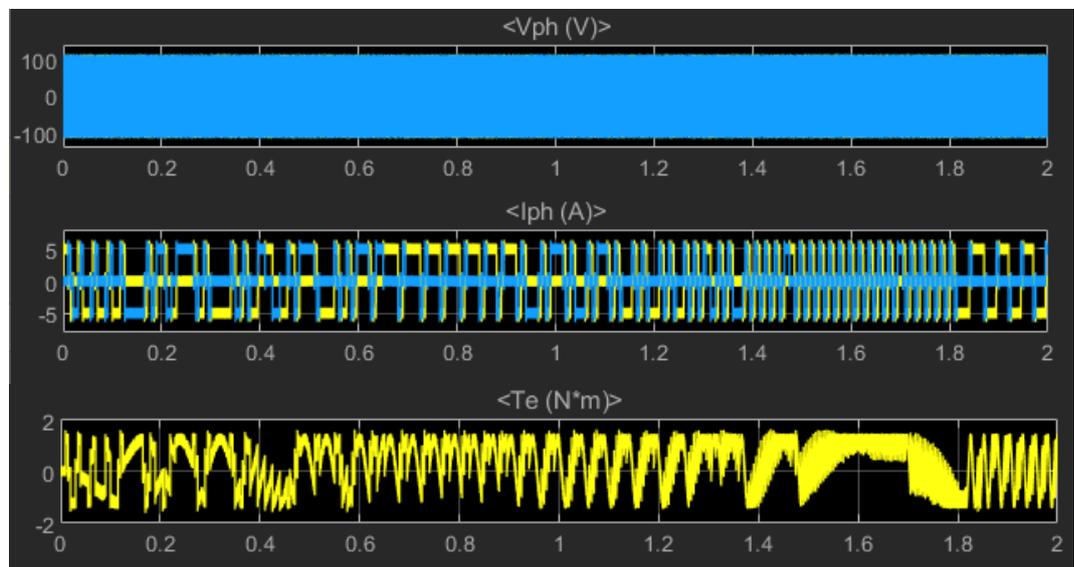


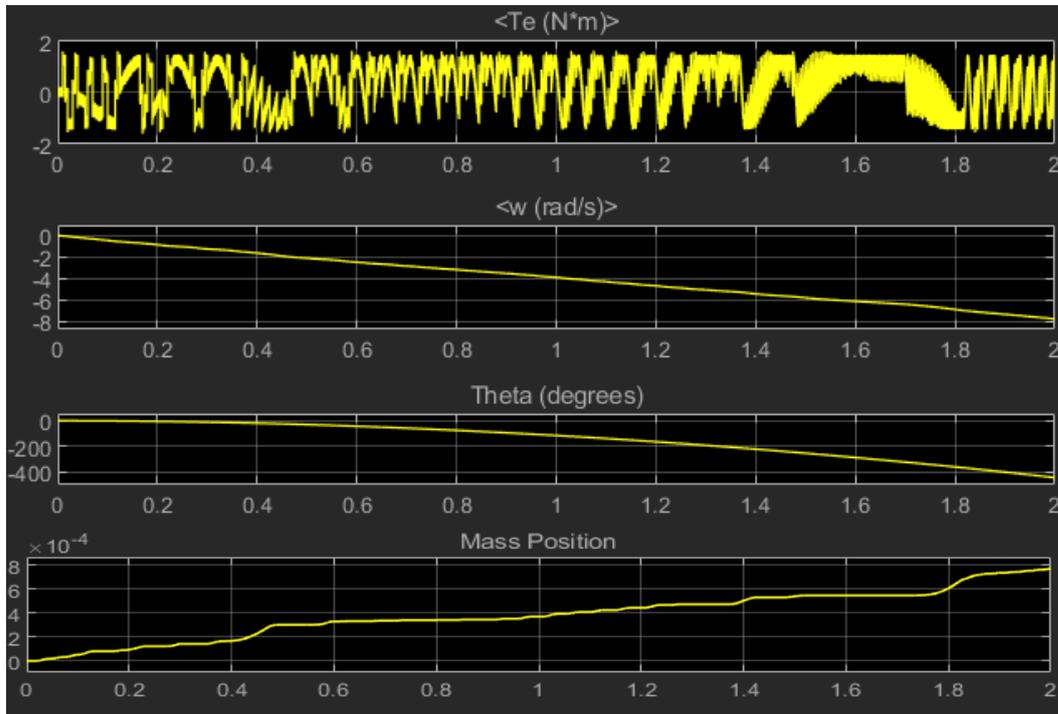
**Gambar 4.122.** Respon simulasi posisi *close loop* PID 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.122**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $10,15 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- ***Close loop* PID 110V dengan beban**

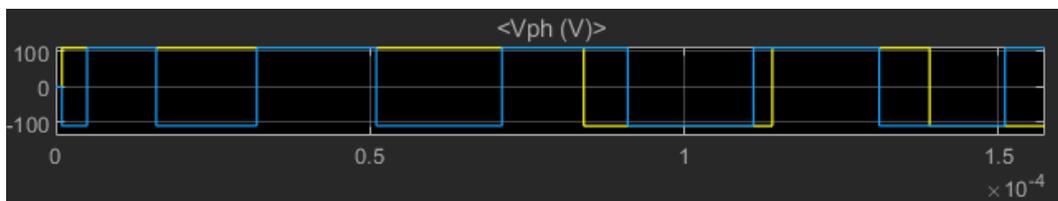
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.121** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.123.** Respon simulasi *close loop* PID 110V dengan beban

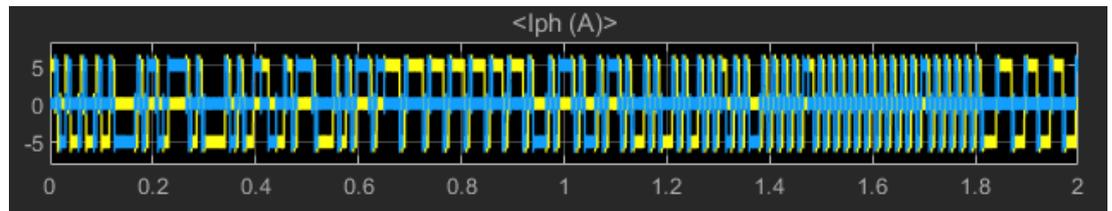
▪ **Tegangan *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.124.** Respon simulasi tegangan *close loop* PID 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *close loop PID* beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.124**, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,81 \times 10^{-4} \text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s.

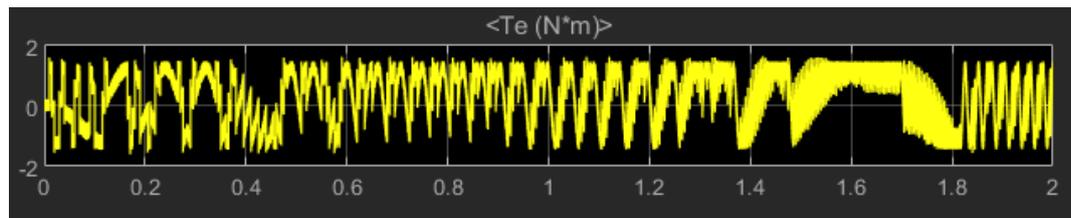
- **Arus *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.125.** Respon simulasi arus *close loop* PID 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.125**, didapat arus output sebesar  $5\text{ A}$  dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga  $2\text{ s}$ .

- **Torsi *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.126.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *close loop PID* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.126**, didapat tegangan output sebesar  $1.32\text{ N}$ , didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga  $2\text{ s}$ .

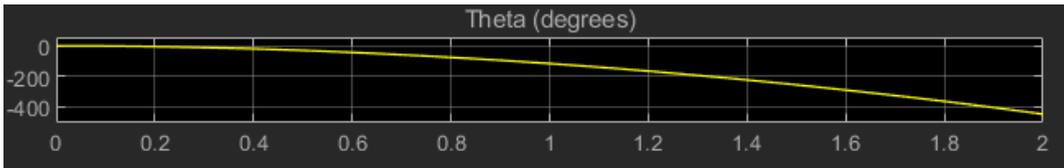
- **Kecepatan sudut *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.127.** Respon simulasi kecepatan sudut *close loop* PID 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.127**, didapat respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai -8,7 radian/s

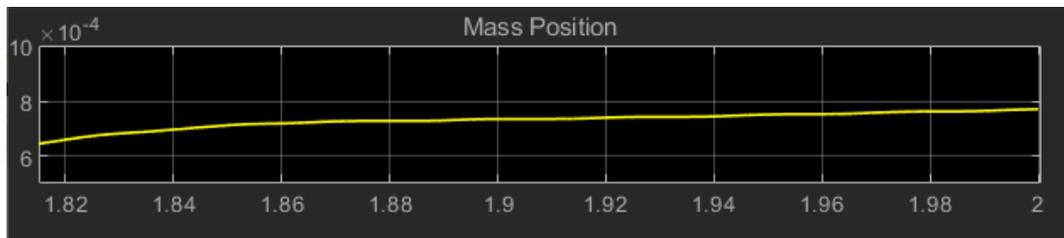
- **Sudut *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.127.** Respon simulasi sudut *close loop* PID 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *open loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.127**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai -500 radian

- **Posisi *close loop* PID 110V dengan beban**



**Gambar 4.128.** Respon simulasi posisi *close loop* PID110V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *close loop PID* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.128**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $7,9 \times 10^{-4}$  m dalam periode 2 s

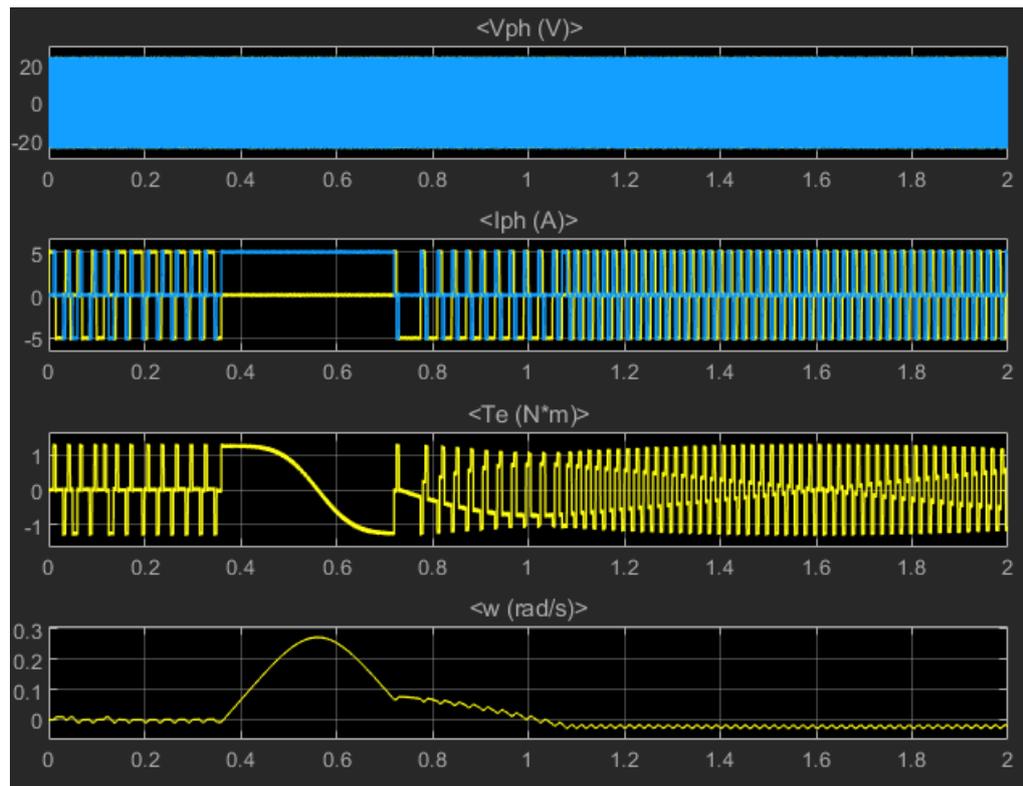
- **Hasil Simulasi ADRC**

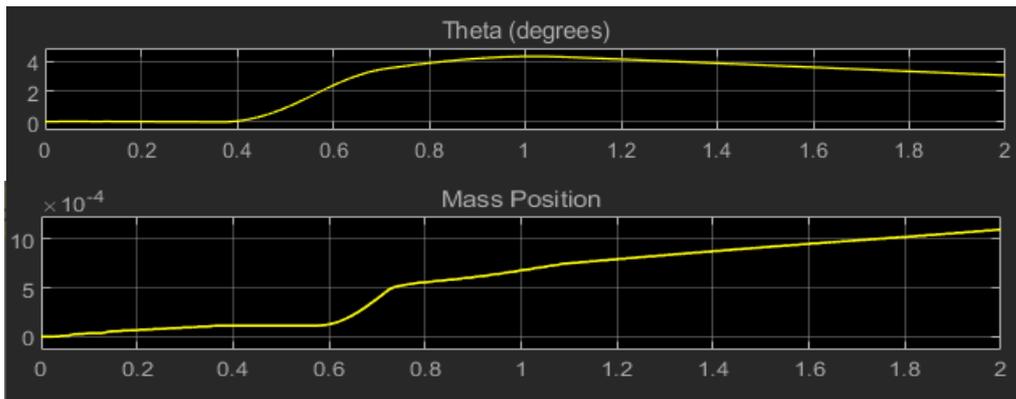
Pada sub-bab ini, hasil skema simulasi yang berupa plot grafik dari hasil simulasi *software* MATLAB/SIMULINK ditampilkan dalam gambar **4.129** hingga **Gambar 4.169**. Gambar yang ditampilkan dalam sub-bab ini meliputi hasil

simulasi dengan arus 5 *ampere*, torsi input 0 *N.m* (tanpa beban) dengan simulasi pembandingan torsi input 3 *N.m*, (dengan beban) dan tegangan masing-masing 24V, 40V, dan 110V dengan variabel fisis yang diamati adalah tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system*. Untuk model simulasi *open loop* merujuk pada diagram proses gambar 3.2d yang telah dilampirkan pada sub-bab 3.3 Desain Simulasi pada Bab 3

○ **ADRC 24V Tanpa beban**

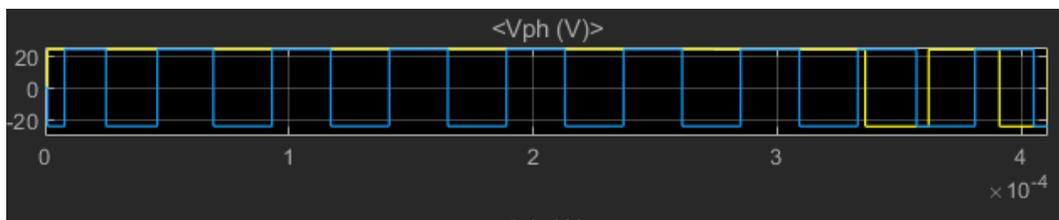
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam gambar 4.128 dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.129.** Respon simulasi ADRC 24V tanpa beban

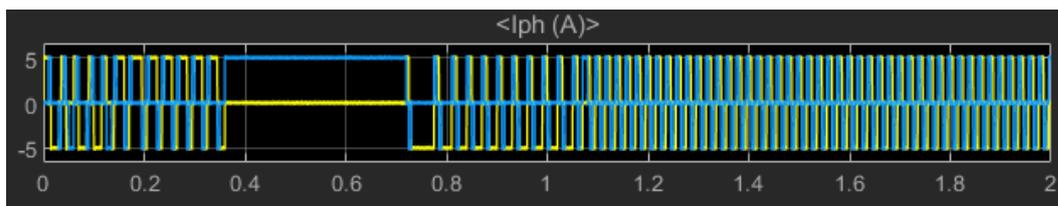
- **Tegangan ADRC 24V Tanpa beban**



**Gambar 4.130.** Respon simulasi tegangan ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.130**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,2 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

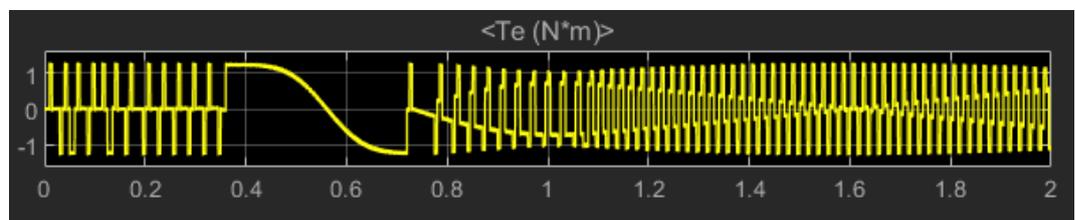
- **Arus ADRC 24V tanpa beban**



**Gambar 4.131.** Respon simulasi arus ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.131**, didapat tegangan output 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,36 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga 0,72 s, kemudian memberikan respon pola *squarewave* hingga 2 s.

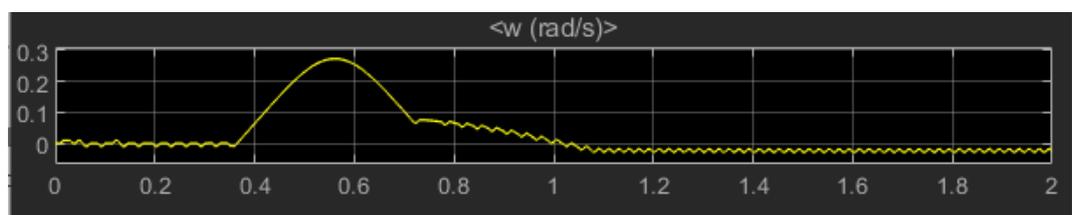
- **Torsi ADRC 24V tanpa beban**



**Gambar 4.132.** Respon simulasi torsi ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.132**, didapat torsi output 1.32 N dengan respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,35 s, lalu sinyal memberikan respon penurunan hingga 0,71 s, kemudian memberikan respon pola *squarewave* hingga 2 s.

- **Kecepatan sudut ADRC PID 24V tanpa beban**

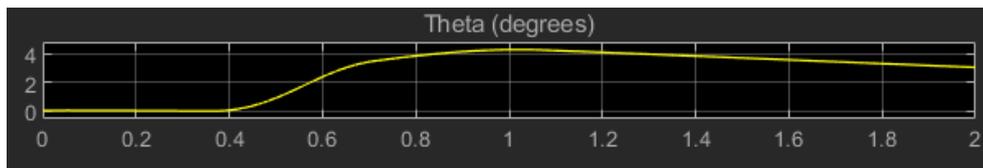


**Gambar 4.133.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.133**, didapat respon kecepatan sudut mengalami perubahan signifikan pada periode 0,35 s hingga 0,28 rad/s. Lalu

mengalami tren penurunan di periode 0,57s dan memberikan respon sinyal beresilasi hingga periode 2 s

- **Sudut ADRC 24V tanpa beban**



**Gambar 4.134.** Respon simulasi sudut ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.134**, didapat nilai respon sudut mengalami perubahan signifikan pada periode 0,4 s hingga 4,2 rad. Lalu mengalami tren penurunan di periode 1s hingga periode 2 s

- **Posisi ADRC 24V tanpa beban**

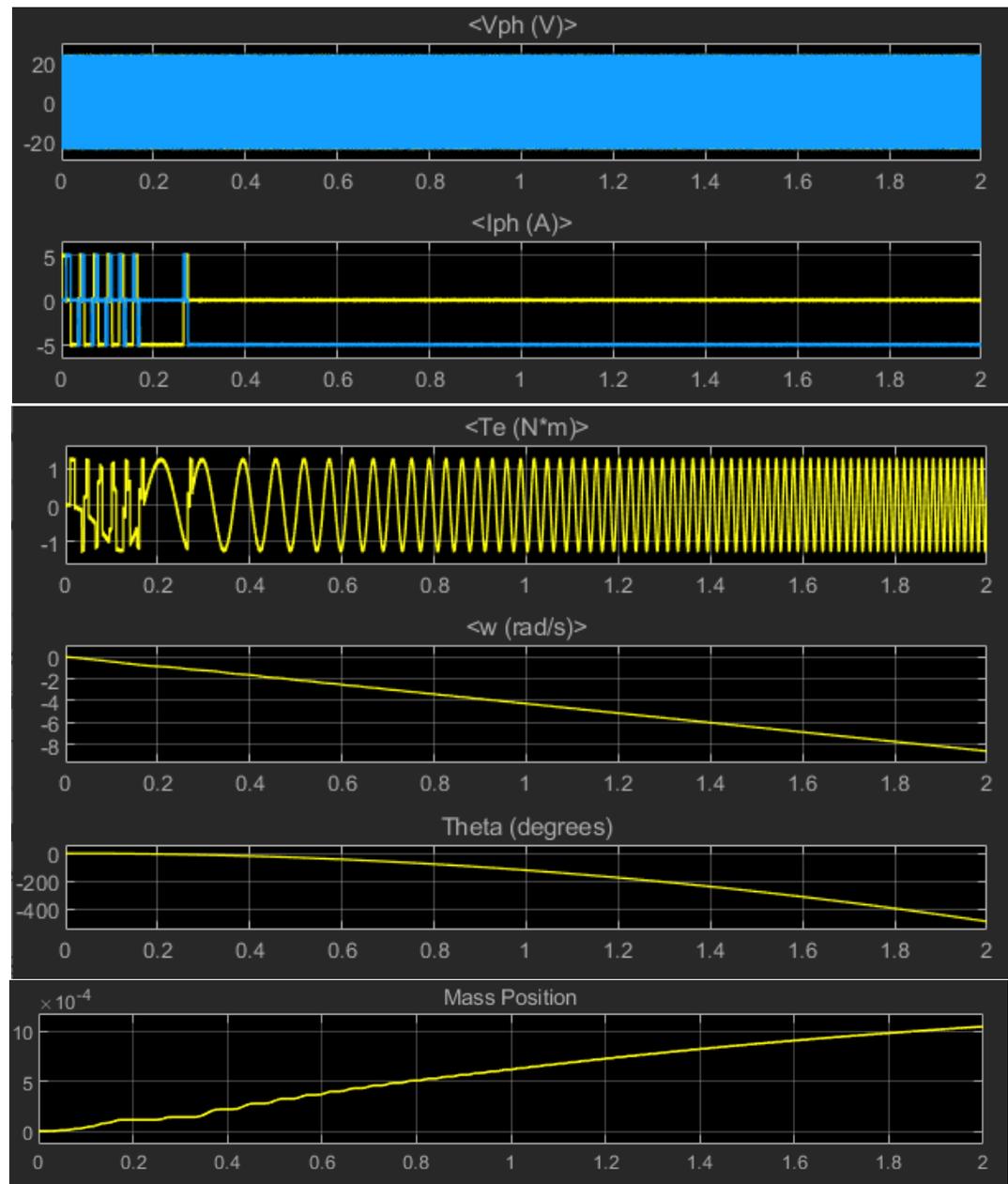


**Gambar 4.135.** Respon simulasi posisi ADRC 24V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.135**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $10,8 \times 10^{-3}\text{ m}$  dalam periode 2 s

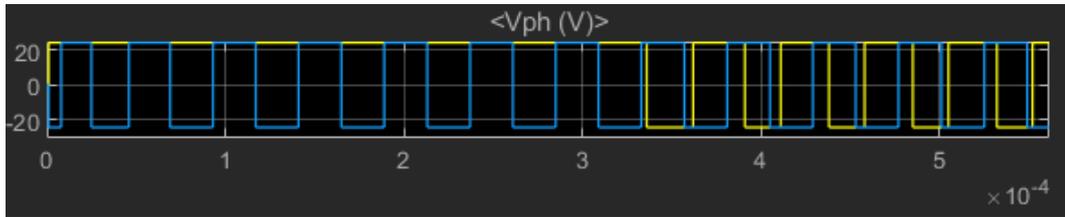
○ **ADRC 24V Dengan beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.136** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.136.** Respon simulasi ADRC 24V dengan beban

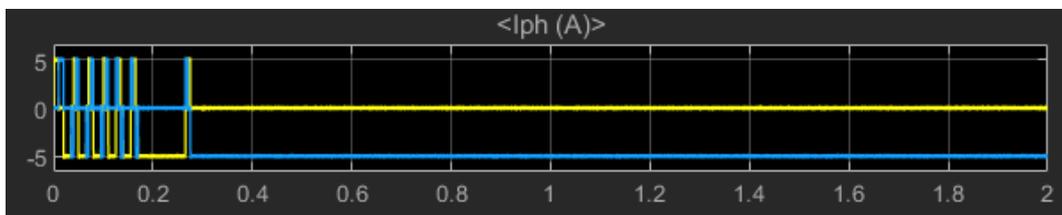
- **Tegangan ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.137.** Respon simulasi tegangan ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.137**, didapat tegangan output sebesar 24V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $3,2 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave A* lebih lebar dibandingkan *squarewave B*, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

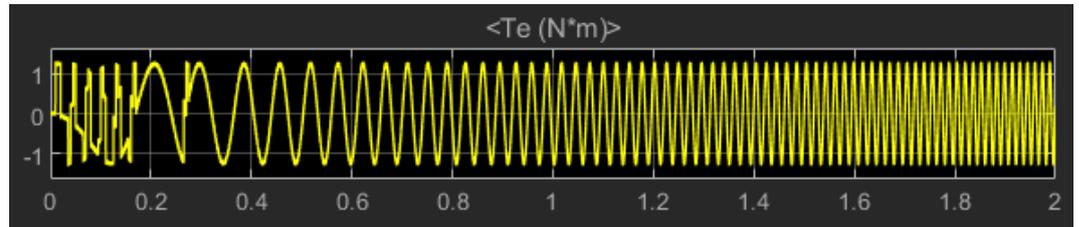
- **Arus ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.138.** Respon simulasi arus ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.138**, didapat tegangan output 5 A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, dengan respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0,17 s, lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga periode 0,27 s, kemudian membentuk pola *squarewave* hingga 0,28s. Kemudian memberikan respon stasioner kembali hingga 2 s.

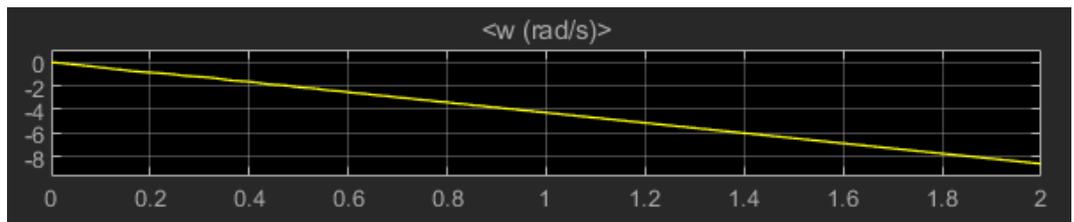
- **Torsi ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.139.** Respon simulasi torsi ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.139**, didapat tegangan output 5A dengan respon yang membentuk pola *squarewave* hingga 0.2 s, kemudian dilanjut dengan respon berosilasi hingga 2s.

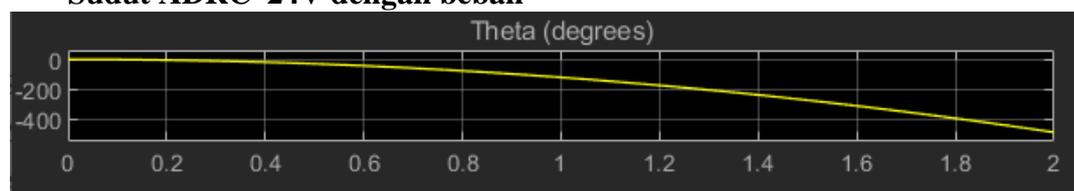
- **Kecepatan sudut ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.140.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.140**, didapat respon Respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai -8,7 radian/s

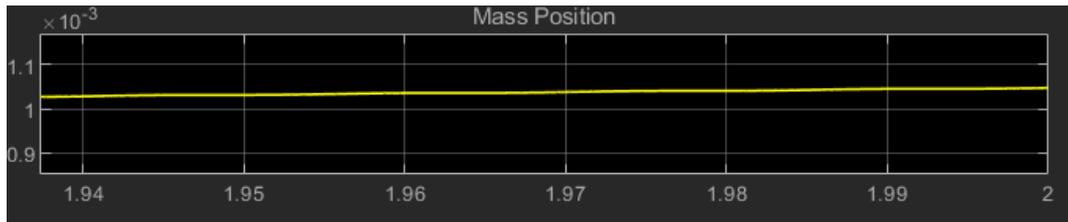
- **Sudut ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.141.** Respon simulasi sudut ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.141**, didapat respon sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,3\text{ s}$ . Lalu mengalami tren penurunan hingga  $-450\text{ rad}$  di periode  $2\text{ s}$  hingga periode  $2\text{ s}$

- **Posisi ADRC 24V dengan beban**

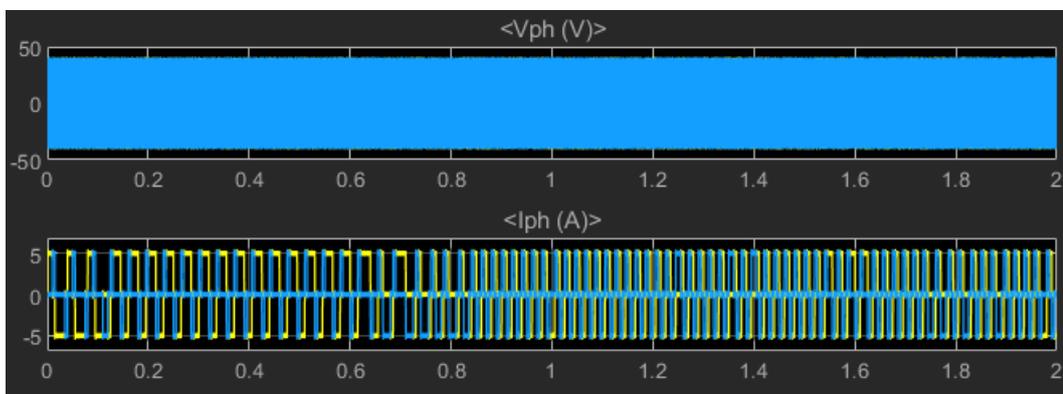


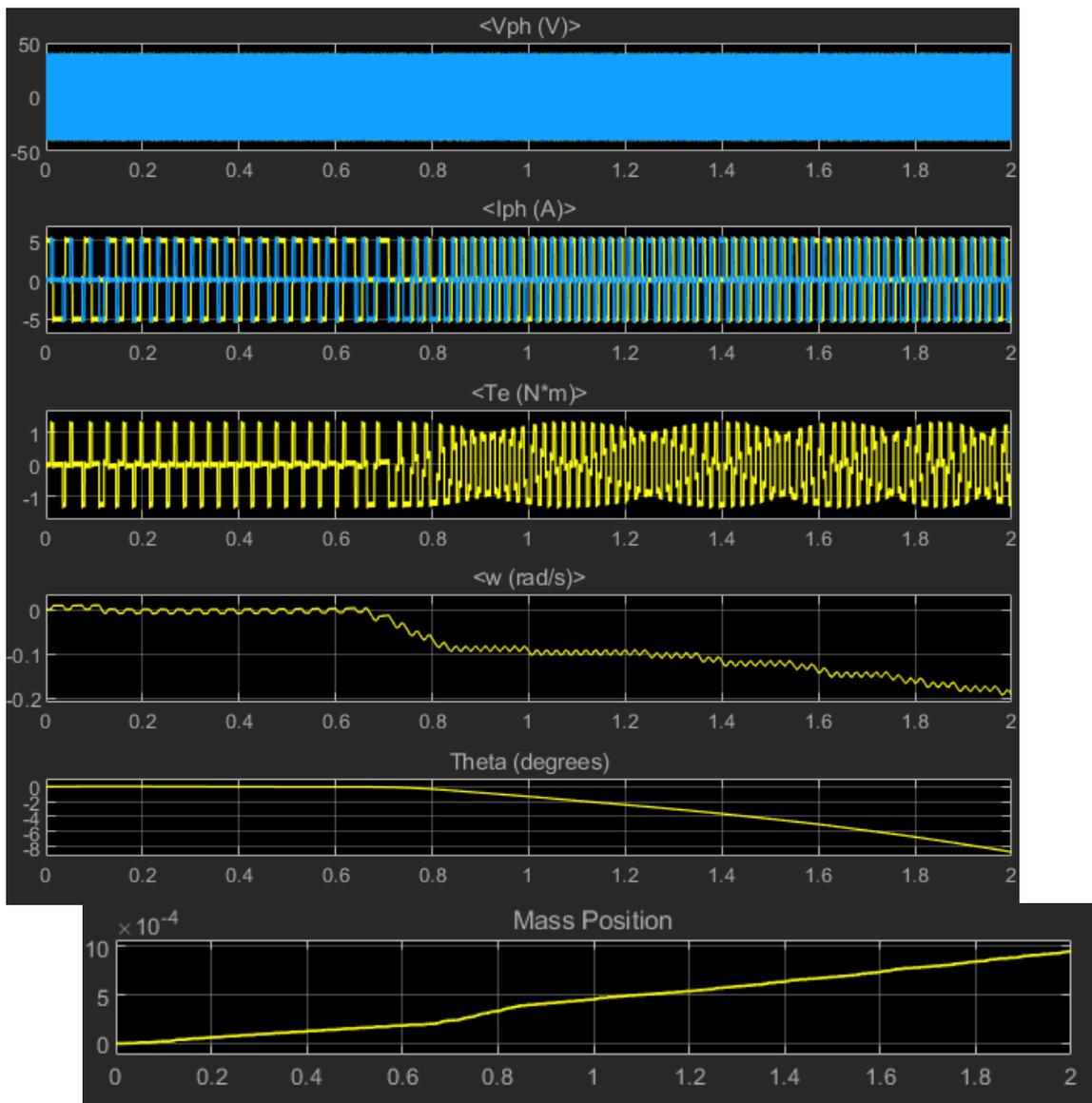
**Gambar 4.142.** Respon simulasi posisi ADRC 24V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.142**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $1,04 \times 10^{-3}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

- **ADRC 40V tanpa beban**

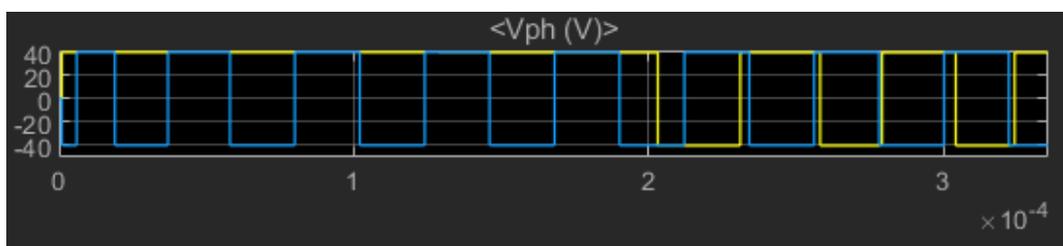
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.143** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.143.** Respon simulasi ADRC 40V tanpa beban

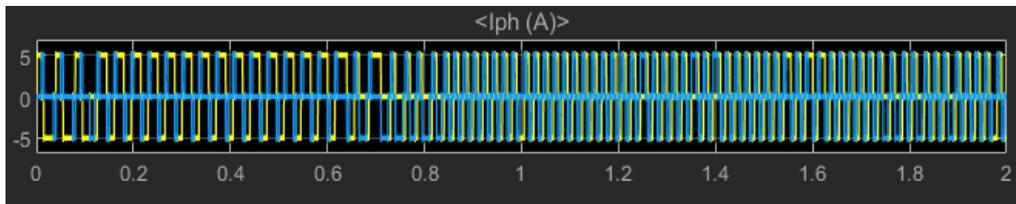
- **Tegangan ADRC 40V tanpa beban**



**Gambar 4.144.** Respon simulasi tegangan ADRC 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.144**, didapat tegangan output sebesar  $40\text{V}$  dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}\text{s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode  $2\text{ s}$

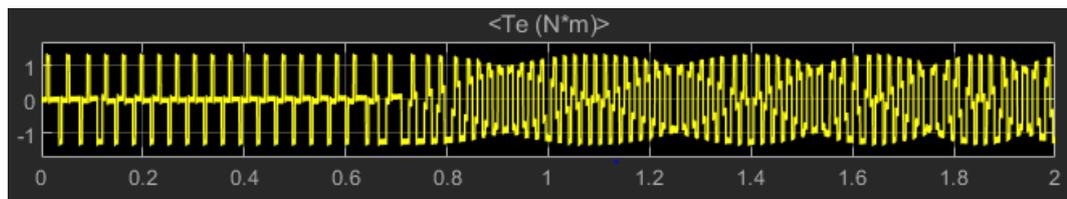
- **Arus ADRC 40V tanpa beban**



**Gambar 4.145.** Respon simulasi arus ADRC 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.145**, didapat tegangan output sebesar  $5\text{A}$  dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga  $2\text{ s}$ .

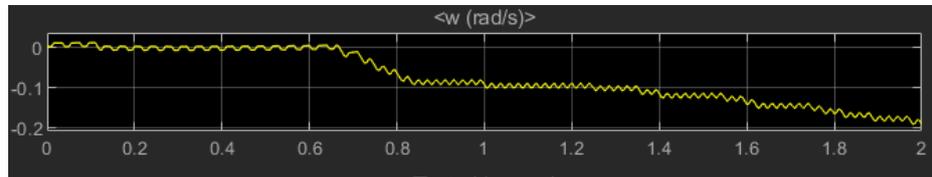
- **Torsi ADRC 40V tanpa beban**



**Gambar 4.146.** Respon simulasi torsi *close loop* PID 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.146**, didapat torsi output sebesar  $1.32\text{ N}$  dengan respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga  $2\text{ s}$ .

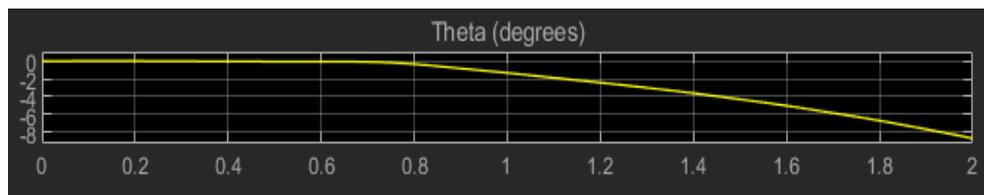
- **Kecepatan sudut ADRC 40V tanpa beban**



**Gambar 4.147.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.147**, didapat respon kecepatan sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,67 \text{ s}$  dengan mengalami tren penurunan dan memberikan respon sinyal berosilasi hingga periode  $2 \text{ s}$

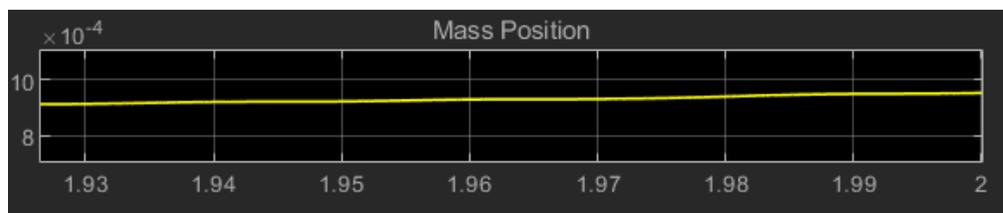
- **Sudut ADRC 40V tanpa beban**



**Gambar 4.148.** Respon simulasi sudut ADRC 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.148**, didapat respon sudut mengalami perubahan signifikan pada periode  $0,7 \text{ s}$  dan mengalami tren penurunan dan hingga periode  $2 \text{ s}$ .

- **Posisi ADRC 40V tanpa beban**

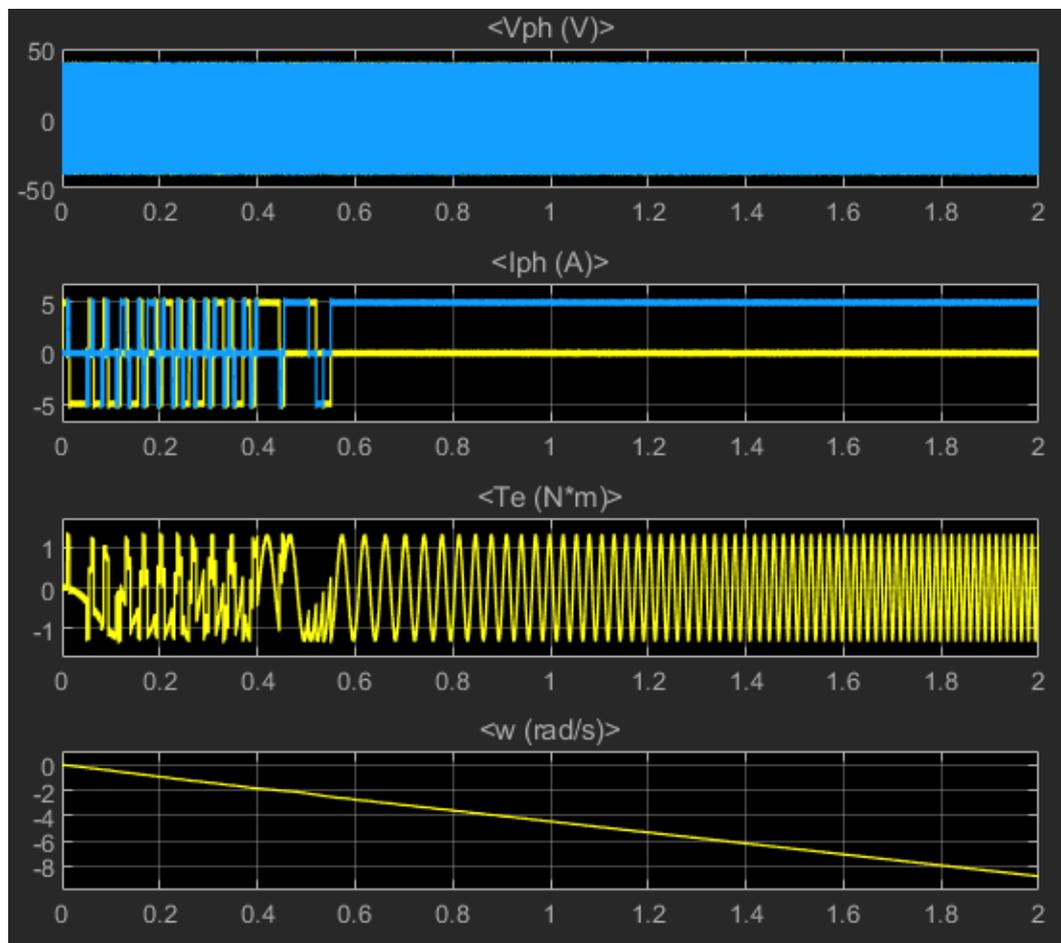


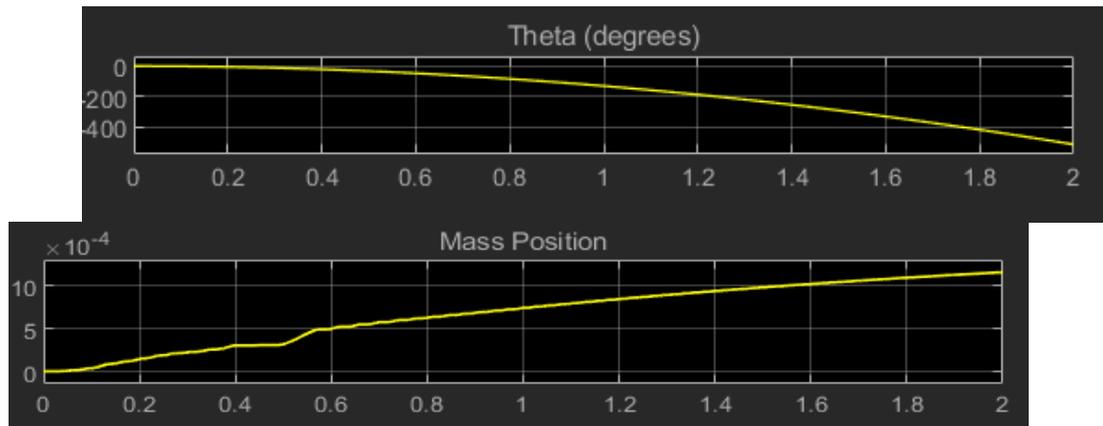
**Gambar 4.149.** Respon simulasi posisi ADRC 40V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.149**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $9,4 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

○ **ADRC 40V dengan beban**

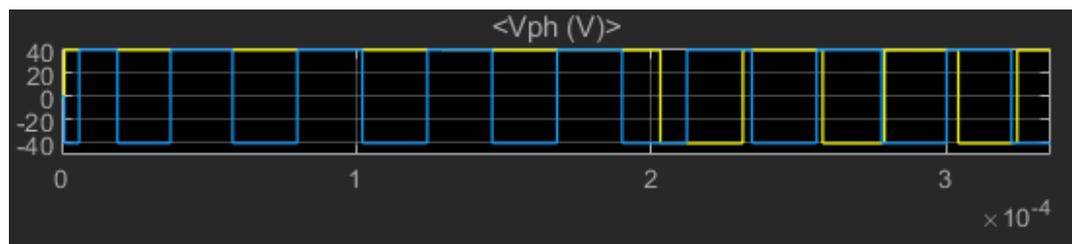
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.149** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.149.** Respon simulasi ADRC 40V dengan beban

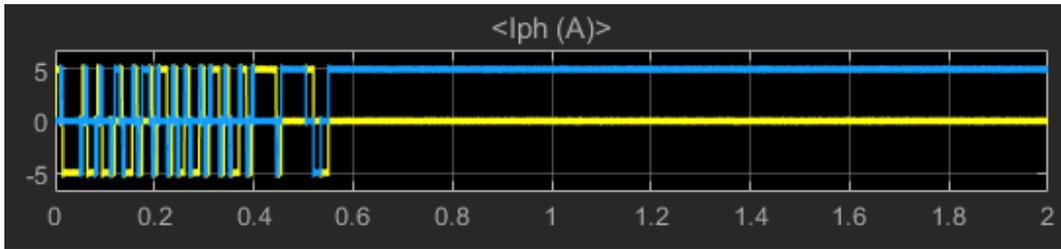
- **Tegangan ADRC 40V dengan beban**



**Gambar 4.150.** Respon simulasi tegangan ADRC 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.150**, didapat tegangan output sebesar 40V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $2,1 \times 10^{-4}$ s. Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s.

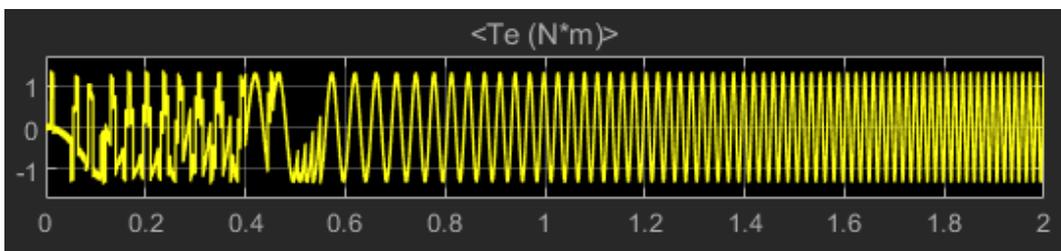
- **Arus ADRC 40V dengan beban**



**Gambar 4.151.** Respon simulasi arus ADRC 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.151**, didapat tegangan output sebesar  $5\text{A}$  dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk membentuk pola *squarewave* hingga  $0,55\text{ s}$ , lalu sinyal memberikan respon stasioner hingga periode  $2\text{ s}$

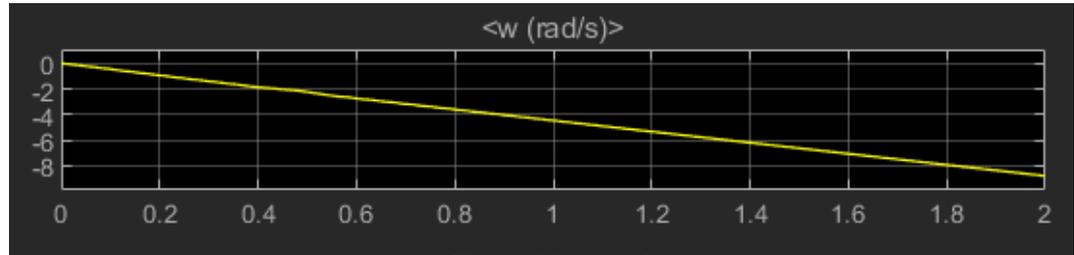
- **Torsi ADRC 40V dengan beban**



**Gambar 4.152.** Respon simulasi torsi ADRC 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan torsi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.152**, didapat torsi output sebesar  $1.32\text{ N}$  dengan didapat respon yang membentuk pola *squarewave* hingga  $0,55\text{ s}$ , kemudian respon sinyal membentuk pola berosilasi mencapai  $2\text{ s}$

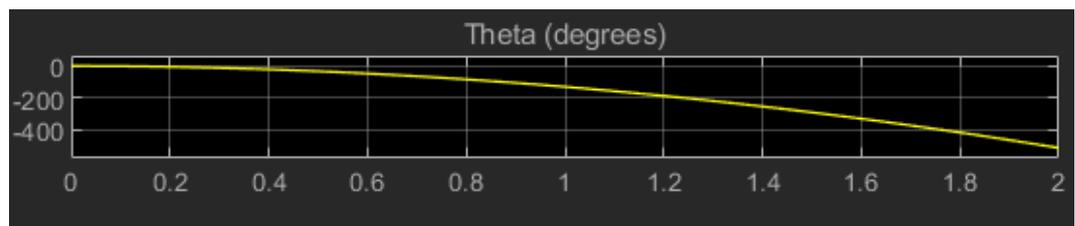
- **Kecepatan sudut ADRC 40V dengan beban**



**Gambar 4.153.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.153**, didapat respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-8,6 \text{ radian/s}$

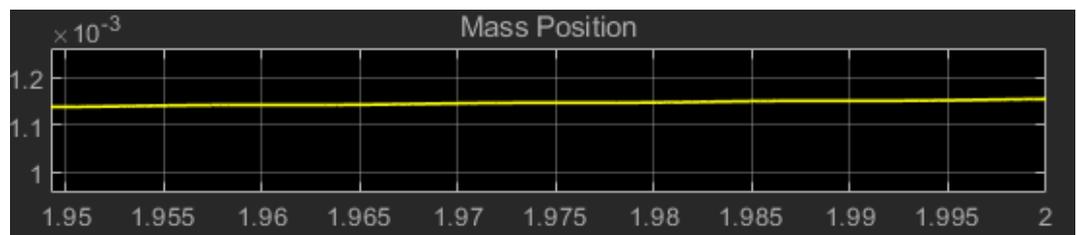
- **Sudut ADRC 40V dengan beban**



**Gambar 4.154.** Respon simulasi sudut ADRC 40V Ddengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.154**, didapat respon sudut mengalami tren penurunan sejak awal hingga mengalami penurunan hingga  $-450 \text{ rad}$  dalam periode  $2 \text{ s}$

- **Posisi ADRC 40V dengan beban**

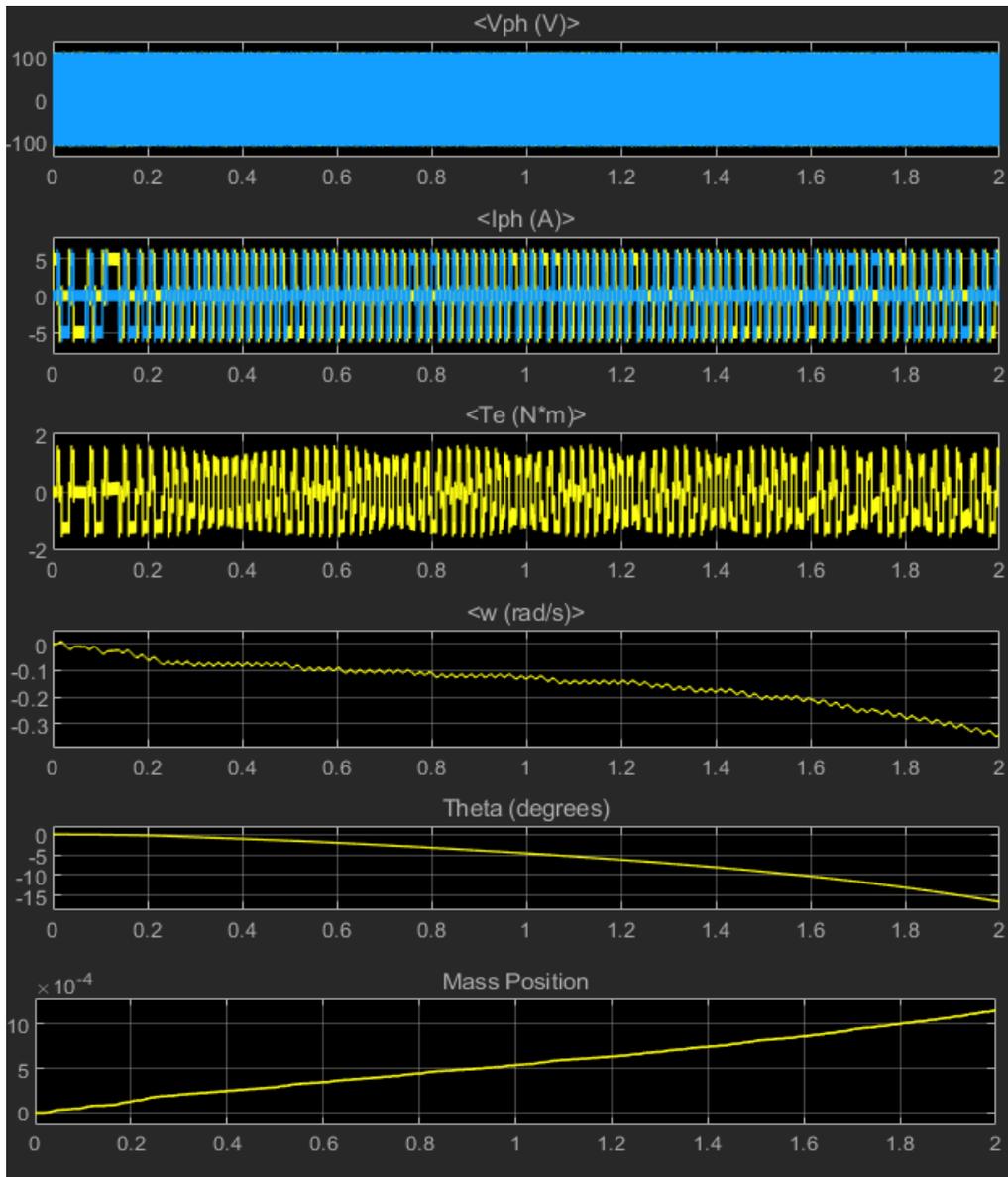


**Gambar 4.155.** Respon simulasi posisi ADRC 40V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.155**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $11,15 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

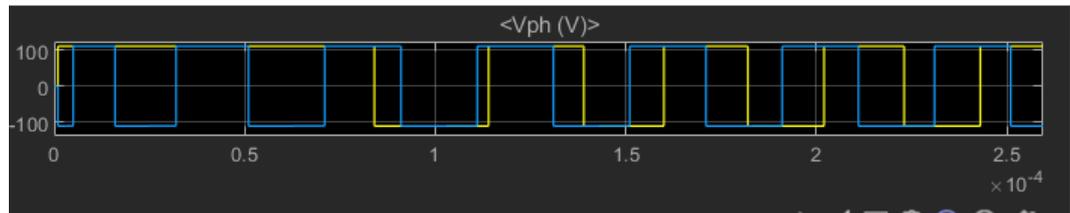
○ **ADRC 110V Tanpa beban**

Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.156** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.



**Gambar 4.156.** Respon simulasi ADRC 110V tanpa beban

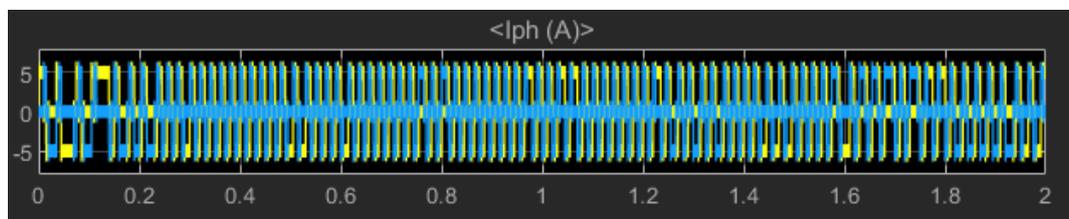
- **Tegangan ADRC 110V tanpa beban**



**Gambar 4.157.** Respon simulasi tegangan ADRC 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.157**, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,8 \times 10^{-4}\text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave* A lebih lebar dibandingkan *squarewave* B, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

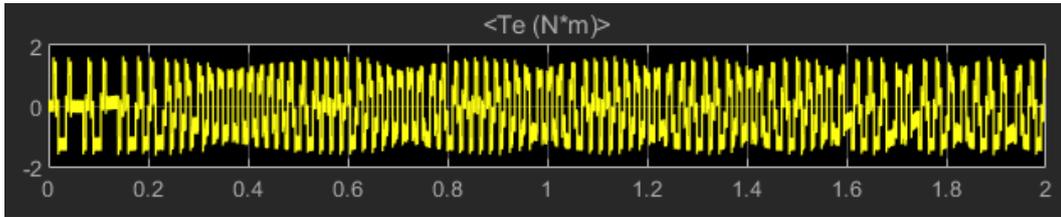
- **Arus ADRC 110V tanpa beban**



**Gambar 4.158.** Respon simulasi arus ADRC 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.158**, didapat tegangan output sebesar 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 2 s.

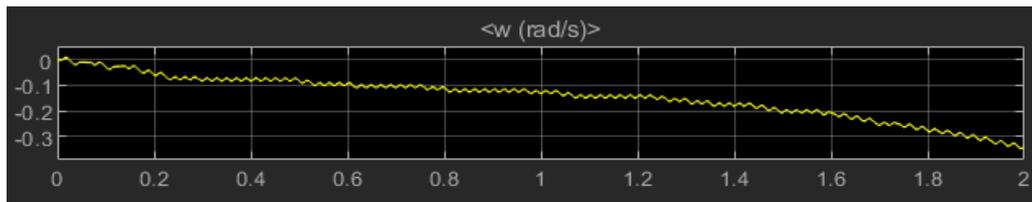
- **Torsi ADRC 110V tanpa beban**



**Gambar 4.159.** Respon Simulasi ADRC 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.159**, didapat tegangan output sebesar  $1.32\text{ N}$ , didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga  $2\text{ s}$ .

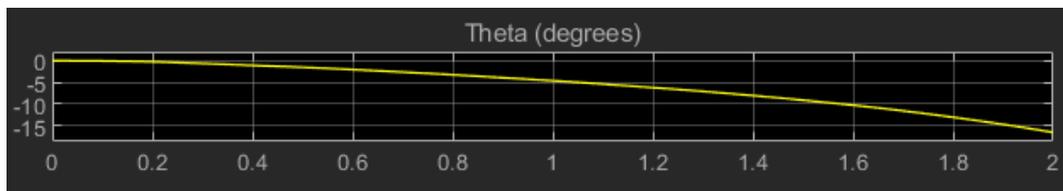
- **Kecepatan sudut ADRC 110V tanpa beban**



**Gambar 4.160.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 110V tanpa beban.

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.160**, didapat respon kecepatan sudut mengalami tren penurunan sejak awal dengan mengalami tren penurunan hingga periode  $2\text{ s}$  sebesar  $-0,35\text{ rad/s}$

- **Sudut ADRC 110V tanpa beban**

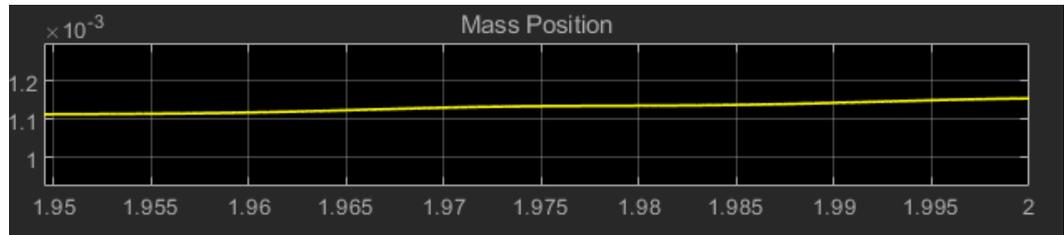


**Gambar 4.161.** Respon simulasi sudut ADRC 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.161**, didapat respon kecepatan sudut

mengalami tren penurunan sejak awal hingga mengalami penurunan hingga  $-17$  rad dalam periode  $2$  s

- **Posisi ADRC 110V tanpa beban**

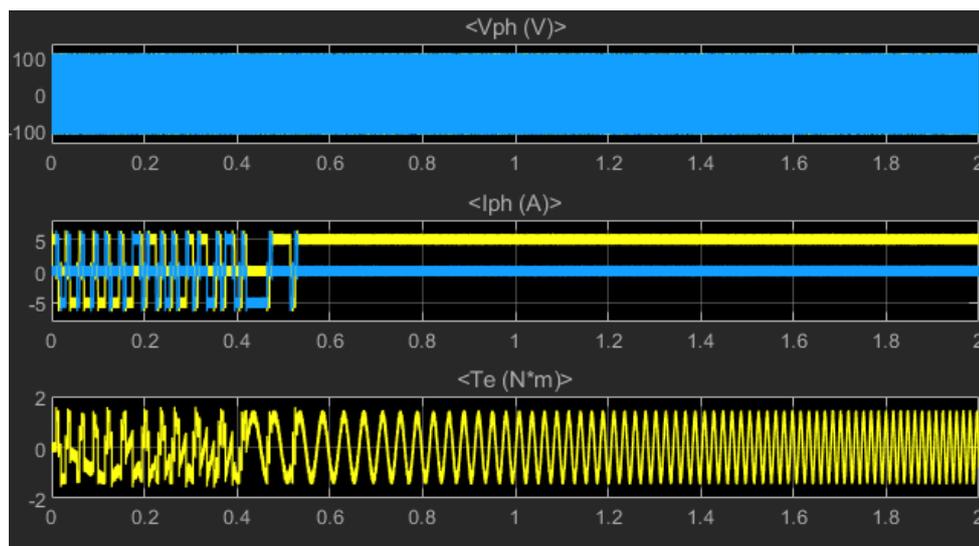


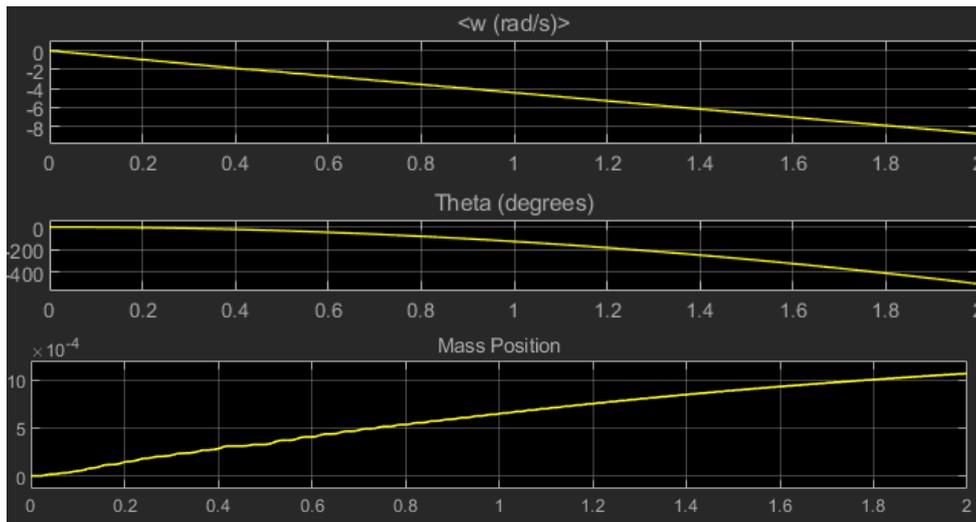
**Gambar 4.162.** Respon simulasi posisi ADRC 110V tanpa beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $0$  *N.m* dalam **gambar 4.162**, didapat respon pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $11,2 \times 10^{-4}$  *m* dalam periode  $2$  s

- **ADRC 110V dengan beban**

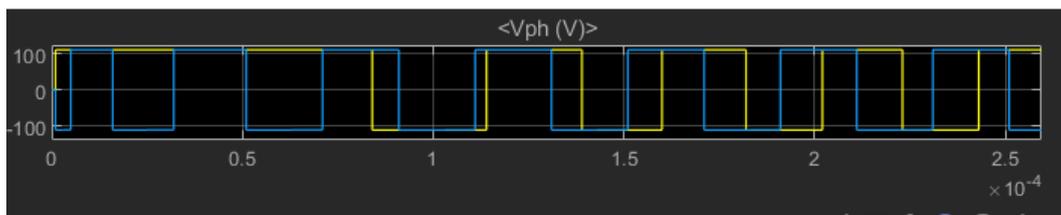
Pada sub-bab ini, ditampilkan hasil simulasi berupa perubahan respon dari tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, sudut, dan perpindahan posisi dari *ballscrew system* dalam **gambar 4.163** dibawah ini beserta pembahasannya pada sub-bab berikutnya.





**Gambar 4.163.** Respon simulasi ADRC 110V dengan beban

- **Tegangan ADRC 110V Dengan beban**



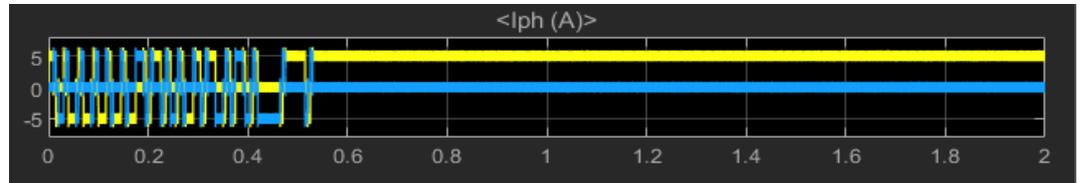
**Gambar 4.164.** Respon simulasi tegangan ADRC 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan tegangan pada simulasi *ADRC* beban  $3 \text{ N.m}$  dalam **gambar 4.164**, didapat tegangan output sebesar 110V dengan kuning sebagai *phase A*, dan biru sebagai *phase B*. Tegangan *phase B* telah memberikan respon sejak awal, sedangkan tegangan *phase A* baru memberikan respon *squarewave* pada detik  $0,82 \times 10^{-4} \text{ s}$ . Untuk lebar pulsa pada *squarewave A* lebih lebar dibandingkan *squarewave B*, Kemudian kedua *squarewave* memberikan respon yang serupa hingga periode 2 s

- **Arus ADRC 110V Dengan beban**

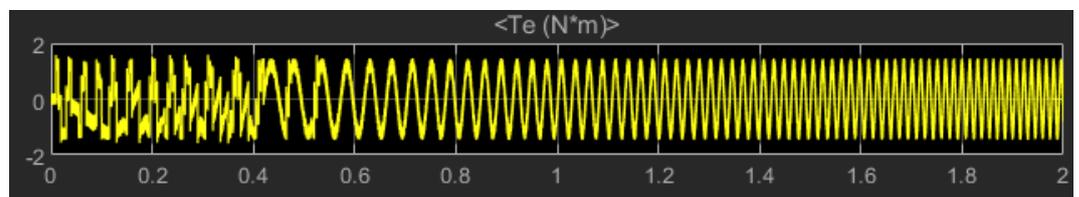
Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3 \text{ N.m}$  dalam gambar 4.165, didapat arus output sebesar 5A dengan kuning adalah *phase A* dan biru adalah *phase B*, didapat respon yang membentuk

pola *squarewave* tak beratur hingga 0.52s, kemudian dilanjut dengan respon stasioner hingga 2s.



**Gambar 4.165.** Respon simulasi arus ADRC 110V dengan beban

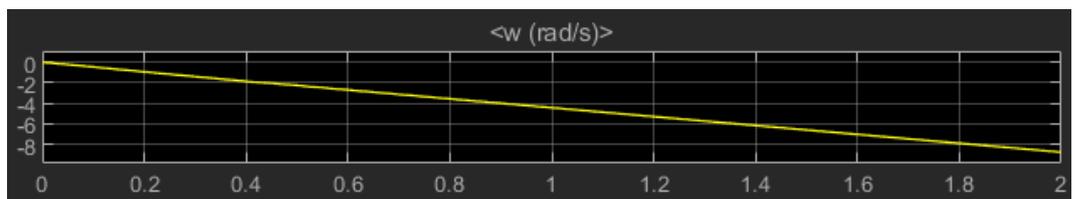
- **Torsi ADRC 110V dengan beban**



**Gambar 4.166.** Respon simulasi torsi ADRC 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan arus pada simulasi *ADRC* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.166**, didapat tegangan output sebesar 1.32 N, didapat respon yang membentuk pola *squarewave* tak beratur hingga 0.52s, kemudian dilanjut dengan respon stasioner hingga 2s.

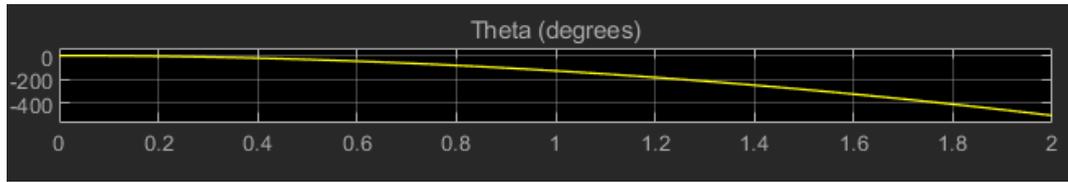
- **Kecepatan Sudut ADRC 110V dengan beban**



**Gambar 4.167.** Respon simulasi kecepatan sudut ADRC 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan kecepatan sudut pada simulasi *close loop* dengan beban 3 *N.m* dalam **gambar 4.167**, didapat respon kecepatan sudut menurun hingga menyentuh nilai -8,6 radian/s

- **Sudut ADRC 24V dengan beban**



**Gambar 4.168.** Respon simulasi sudut ADRC 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan sudut pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.168**, didapat respon sudut menurun hingga menyentuh nilai  $-500$  radian

- **Posisi ADRC 110V dengan beban**



**Gambar 4.169.** Respon simulasi posisi ADRC 110V dengan beban

Pada hasil pengamatan posisi pada simulasi *ADRC* dengan beban  $3\text{ N.m}$  dalam **gambar 4.169**, didapat respon Pergerakan pada *ballscrew* sejauh  $10,68 \times 10^{-4}\text{ m}$  dalam periode  $2\text{ s}$

#### 4.2 Pengaruh Algoritma Kontrol Pada Pergerakan Dalam Simulasi Dengan Variasi Tegangan

Pada sub-bab ini, pengamatan dilakukan pada empat algoritma kontrol yang diterapkan pada simulasi. Parameter yang diamati adalah pergerakan *ballscrew system* dengan satuan meter yang hasilnya telah dilampirkan pada sub-bab 4.1 pada tiap metode kendali dari empat metode kendali, yakni *Open loop*, *Close loop*, *Close loop PID*, dan *ADRC* dengan variasi tegangan 24V, 40V, dan 110V dengan nilai torsi beban  $3.0\text{ N.m}$ , lalu dibandingkan dengan model yang serupa dengan nilai torsi beban sebesar  $0\text{ N.m}$ . Metode perbandingan ini sebelumnya telah dilakukan oleh Alexandru Morar dalam Publikasinya yang Berjudul “*The Modelling and Simulation of Bipolar Hybrid Stepping Motor by Matlab/Simulink*” tahun 2015

**Tabel 4.1.** Perbandingan Hasil Perpindahan *Ballscrew System* dalam tiap metode kendali

Metode Kendali	Tegangan (V)	Perpindahan <i>Ballscrew System</i> dengan Torsi Beban $0\text{ N.m}$ (Meter)	Perpindahan <i>Ballscrew System</i> dengan Torsi Beban $3\text{ N.m}$ (Meter)
<i>Open loop</i>	24	$27 \times 10^{-4}$	$11,3 \times 10^{-4}$
	40	$27 \times 10^{-4}$	$11,3 \times 10^{-4}$
	110	$27 \times 10^{-4}$	$27 \times 10^{-4}$
<i>Close loop</i>	24	$8,4 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$
	40	$8,18 \times 10^{-4}$	$1,22 \times 10^{-4}$
	110	$8,18 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$
<i>Close loop PID</i>	24	$5,3 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$
	40	$8,6 \times 10^{-4}$	$8,38 \times 10^{-4}$
	110	$10,15 \times 10^{-4}$	$8,2 \times 10^{-4}$
<i>ADRC</i>	24	$10,9 \times 10^{-4}$	$10,4 \times 10^{-4}$
	40	$9,4 \times 10^{-4}$	$11,5 \times 10^{-4}$
	110	$11,2 \times 10^{-4}$	$10,6 \times 10^{-4}$

\Dari hasil perpindahan *ballscrew system* pada tiap-tiap metode kendali, *open loop* memiliki kestabilan apabila menggunakan tegangan sebesar 110V. Untuk kedua tegangan yang lain mengalami penurunan setelah dilakukan penambahan torsi beban.

Untuk *close loop*, semua variasi tegangan mengalami penurunan drastis setelah dilakukan penambahan torsi beban.

*Close loop PID* mengalami kenaikan performa apabila menggunakan tegangan sebesar 24V, untuk kedua tegangan yang lain mengalami penurunan setelah dilakukan penambahan torsi beban

Sedangkan ADRC mengalami kenaikan performa apabila menggunakan tegangan sebesar 40V, untuk kedua tegangan yang lain mengalami penurunan setelah dilakukan penambahan torsi beban

Sedangkan untuk pengamatan respon pada simulasi *bipolar/hybrid stepper motor*, dapat dilihat perbandingan antara model simulasi sebelum dilakukan penambahan torsi beban dan setelah dilakukan penambahan torsi beban. Hasilnya, respon kecepatan sudut dan sudut dari tiap – tiap metode kendali mengalami penurunan. Hal tersebut selaras dengan percobaan yang telah dilakukan oleh Alexandru Morar dalam Publikasinya yang Berjudul “*The Modelling and Simulation of Bipolar Hybrid Stepping Motor by Matlab/Simulink*” tahun 2015. Dalam publikasinya, Morar melampirkan bahwa ketika torsi beban input melebihi torsi beban yang dihasilkan oleh *stepper motor*, maka respon sistem akan cepat kembali ke nol. (Alexandru Morar, 2015)

### **4.3 Analisis Performansi ADRC Terhadap Simulasi**

Dalam model simulasi pada gambar 4.4, memiliki skema sistem yakni dengan input *step* arus, kemudian menuju *driver stepper motor*. *Driver stepper motor* kemudian juga menerima *input*, yakni torsi beban dan tegangan. Ketiga *input* dalam *driver stepper motor* kemudian menjadi *output* berupa tegangan per *phase*. *Phase* yang muncul dalam *output driver* sebanyak dua, yakni A+, A-, B+, dan B- dengan menyesuaikan tipe *stepper motor* yang digunakan (*bipolar/hybrid stepper motor*).

Setelah dari *stepper motor*, maka muncul respon tegangan, arus, torsi, kecepatan sudut, dan sudut yang kemudian muncul pada *scope* dan hasilnya ditampilkan pada sub-bab skema simulasi 4.1 dalam bab 4. Lalu, respon *torsi* yang didapat kemudian diteruskan menuju *ballscrew system* agar dapat dikonversi menjadi gerakan translasi, sehingga dapat diketahui jarak yang ditempuh selama rentang periode 2 sekon. Kemudian respon torsi dijadikan sebagai *feedback* yang kemudian menjadi input pada kontroler PID dengan tujuan untuk dicari nilai *error* pada sistem agar dapat bergerak secara optimal, lalu *ouput* respon dari kontroler PID menjadi *input* pada sistem, kemudian keluar dari sistem melalui *feedback* yang nantinya menjadi input pada kontroler *ADRC*. Tujuan dari *ADRC* sendiri adalah untuk mencari nilai *error* pada keluaran respon *PID*, lalu keluaran respon dari *ADRC* nantinya akan menjadi input pada *PID*, dan sistem terus bergerak secara *looping*.

Dari hasil yang didapatkan dari *ADRC* bila dibandingkan dengan metode *close loop* dan *close loop PID* yang diujikan pada tabel 4.1, menunjukkan bahwa performa *ADRC* dari perpindahan pada *ballscrew system* memiliki nilai yang lebih tinggi, baik dari sebelum diberi torsi beban, maupun setelah diberi torsi beban. Selain itu juga variasi tegangan memberikan dampak yang berbeda. Pada dasarnya, variasi tegangan dalam pengujian *stepper motor* memiliki performa yang berbeda di setiap tegangan yang dipilih. Pemilihan tegangan pada *driver stepper motor* turut serta mempengaruhi performa induktansi pada *stepper motor*. Semakin besar tegangan yang dipilih, maka performa induktansi akan semakin tinggi (Jens-Onno Kraah, 1999).



## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

- Metode kendali *active disturbance rejection control* (ADRC) mampu menghasilkan pergerakan yang optimal dengan menggunakan tegangan 40V, meskipun simulasi sistem diberi torsi beban yang melebihi keluaran torsi sistem
- Variasi tegangan pada penelitian ini dapat diamati perubahannya pada simulasi penelitian. Hal tersebut dibuktikan dengan grafik respon pada penelitian menampilkan nilai yang bervariasi di setiap metode kontrol yang diujikan.

#### **5.2 Saran**

Untuk saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Melakukan penelitian berbasis *comparative study* untuk membandingkan nilai dari hasil simulasi dan nilai eksperimen.
- Untuk melanjutkan riset ADRC, disarankan untuk menambah persiapan yang lebih matang, meliputi persiapan *hardware* dan perencanaan *timeline* yang sesuai agar mendapatkan hasil riset yang lebih optimal.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- Roland Frederiksen, (1968). "Application of the Closed-Loop Stepping Motor".  
IEEE Transaction on Automatic Control. 464-474.
- Ro, P. et. Al. (1993). Model Reference Adaptive Control of Dual-Mode  
Micro/Macro Dynamics of Ball Screws for Nanometer Motion," Journal of  
Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 115, no. 1, pp. 103–108.
- Chen, C. et. al. (2004). Modeling and high-precision control of a ball-screw-driven  
stage," Precision Engineering, vol. 28, no. 4, pp. 483–495,.
- R.G. Vierbergen, (2005). "Predicting and improving the behaviour of stepping  
motors". Master Thesis Eindhoven University of Technology.
- Han, J. (2009). From PID to Active Disturbance Rejection Control," IEEE  
Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 3, pp. 900–906.
- Feng, Guo-Hua. (2011). "Investigation of Ball Screw Preload Variation based on  
Dynamic Modelling of a Preload Adjustable Feed-Drive system and  
Spectrum Analysis of Ball-Nuts sensed Vibration Signal". International  
Journal of Machine Tools and Manufacture. Pages 85-96.
- Fukada, B. et. al. (2011). Experimental analysis and simulation of nonlinear  
microscopic behavior of ball screw mechanism for ultra-precision  
positioning," Precision Engineering, vol. 35, no. 4, pp. 650–668,.
- Sepasi, D. et. al. (2012). Tracking Control of Flexible Ball Screw Drives With  
Runout Effect and Mass Variation," IEEE Transactions on Industrial  
Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 1248–1256,
- Adafruit (2012). "All About Stepper Motor," Adafruit
- Thomson Industries Inc., (2012). "Thomson Linear – Linear Motion Optimized  
Catalogue.
- Huang Y, et. al. (2014). Active disturbance rejection control: Methodology and  
theoretical analysis," ISA Transactions, vol. 53, no. 4, pp. 963–976
- Morar. A. (2015). "The Modelling and Simulation of Bipolar/Hybrid Stepping  
Motor by Matlab/Simulink". Procedia Technology 19 (2015) 576 – 583.

- Hanifzadegan, M. et. al. (2015). Tracking and Structural Vibration Control: of Flexible Ball–Screw Drives With Dynamic Variations,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 1, pp. 133–146.
- Dali Zhou et. al. (2015).. “ADRC and GA Algorithm for Fixed-Wing UAV”. International Conference on Intelligent Human-Machine System and Cybernetics. 248-251”.
- Agarwal, T. et. al. (2016). The Stepper Motor Basics: Types, Working Operation and Applications,”.
- Zhang, C. et. al (2016). Tracking Control of Ball Screw Drives Using ADRC and Equivalent-Error-Model-Based Feedforward Control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 12, pp. 7682–7692.
- Zhe, X. et. al. (2016) "Stepping Motor Close-Loop Based on Active Disturbance Rejection Control". Proceedings of the 35th Chinese Control Conference, July 27-29, pp. 5998-6002.
- Bao-Zhu Zhao Guo et. al. (2016) “Active Disturbance Rejection Control for Nonlinear Systems: An Introduction” Wiley Book
- Sira-Ramirez, H. et. al (2017). Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems,” Active Disturbance Rejection Control of Dynamic Systems. Springer
- Shen Zhonghua (2019). “Design and Simulation of Naval Gun Servo Controller Based on ADRC”. International Conference of Measuring Technology and Mechatronics Automation. 345-349.
- Haibo Yu, et. al. (2020). “Self-balancing Car Control Based on Active Disturbance Rejection Control (ADRC)”. AISC 1117, pp. 382–391, 2020.

## LAMPIRAN

- **Kode Matlab**

```
A = table(ScopeDataCurrent.time, ScopeDataCurrent.signals.values)
writetable(A, 'ScopeDataCurrent12vdc3commalnt1.xlsx')
```

```
B = table(ScopeDataOmega.time, ScopeDataOmega.signals.values)
writetable(B, 'ScopeDataOmega12vdc3commalnt1.xlsx')
```

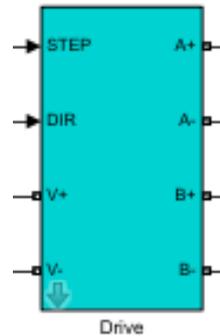
```
C = table(ScopeDataTheta.time, ScopeDataTheta.signals.values)
writetable(C, 'ScopeDataTheta12vdc3commalnt1.xlsx')
```

```
D = table(ScopeDataTorque.time, ScopeDataTorque.signals.values)
writetable(D, 'ScopeDataTorque12vdc3commalnt1.xlsx')
```

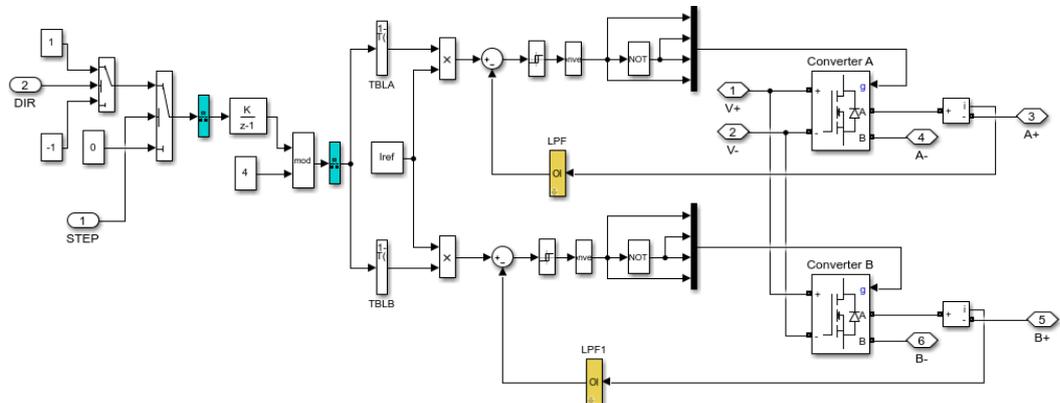
```
E = table(ScopeDataVoltage.time, ScopeDataVoltage.signals.values)
writetable(E, 'ScopeDataVoltage12vdc3commalnt1.xlsx')
```

- **Toolbox**

- Set blok driver

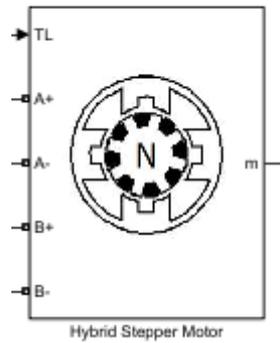


Gambar 1. Blok Driver Motor

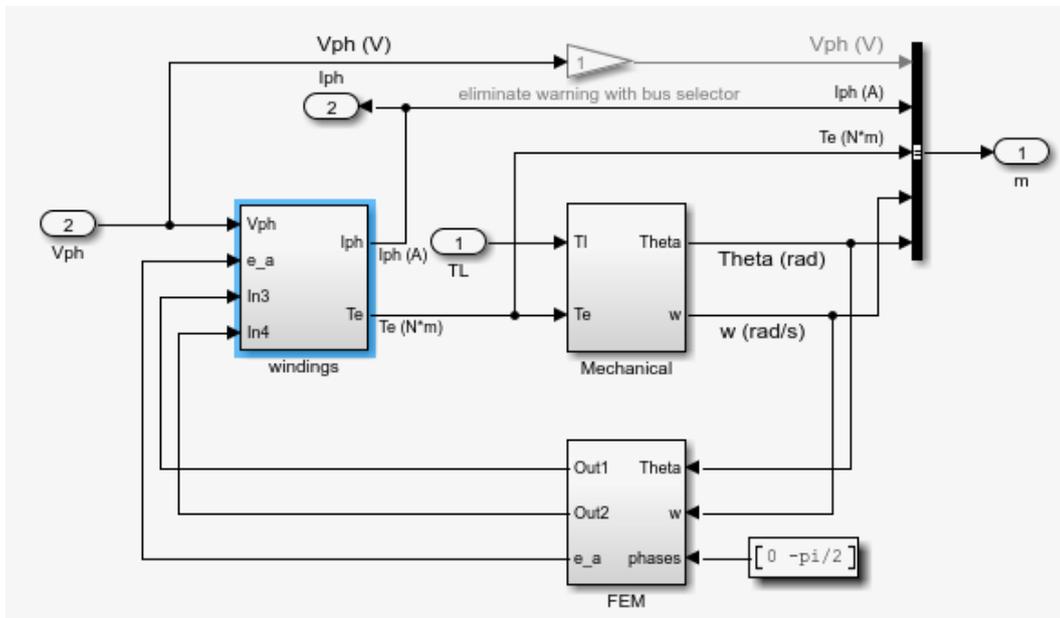


Gambar 2. Rangkaian Sistem Blok Driver Motor

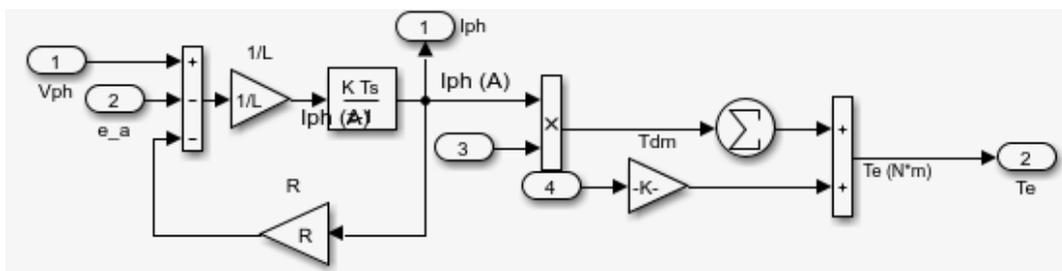
- Set blok *stepper motor* bipolar/hybrid



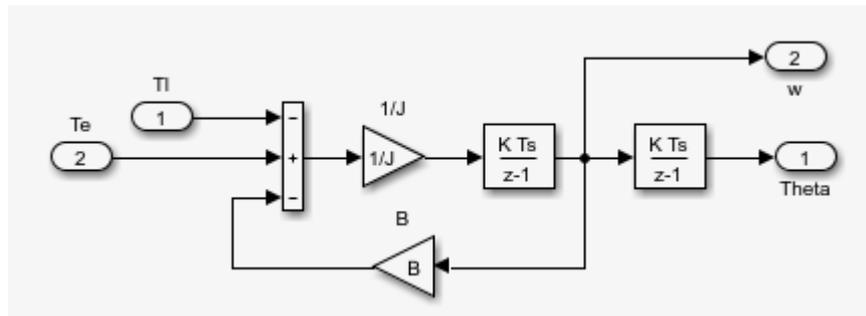
Gambar 3. Blok *Stepper motor* Bipolar/Hybrid



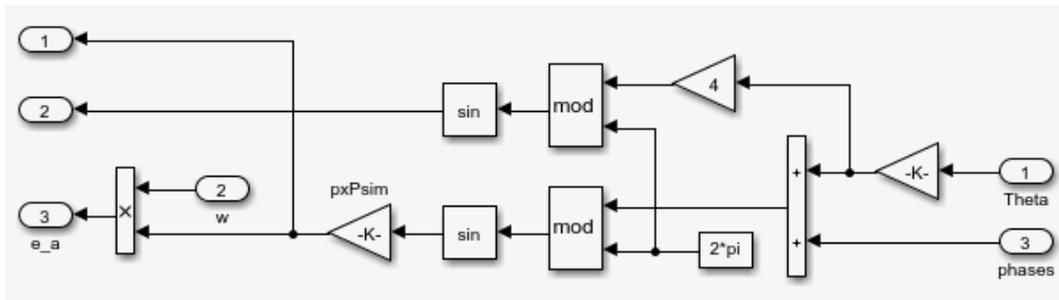
Gambar 4. Rangkaian Sistem Blok *Stepper motor* Bipolar/Hybrid



Gambar 5. Rangkaian Sistem Blok Winding (Lekuk) Pada Sistem Blok *Stepper motor* Bipolar/Hybrid

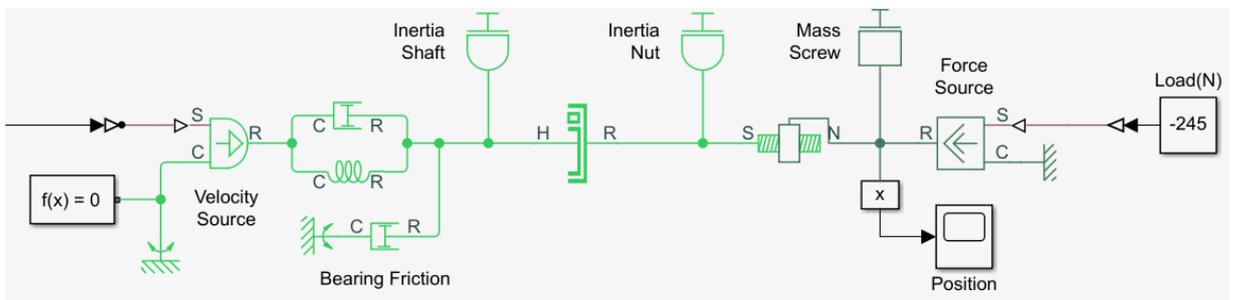


Gambar 6. Rangkaian Sistem Blok *Mechanical* Pada Sistem Blok *Stepper motor* Bipolar/Hybrid



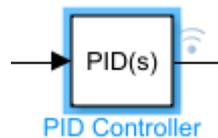
Gambar 7. Rangkaian Sistem Blok *Field Electromagnetic* Pada Sistem Blok *Stepper motor* Bipolar/Hybrid

- o Set blok ulir (ballscrew/leadscrew)

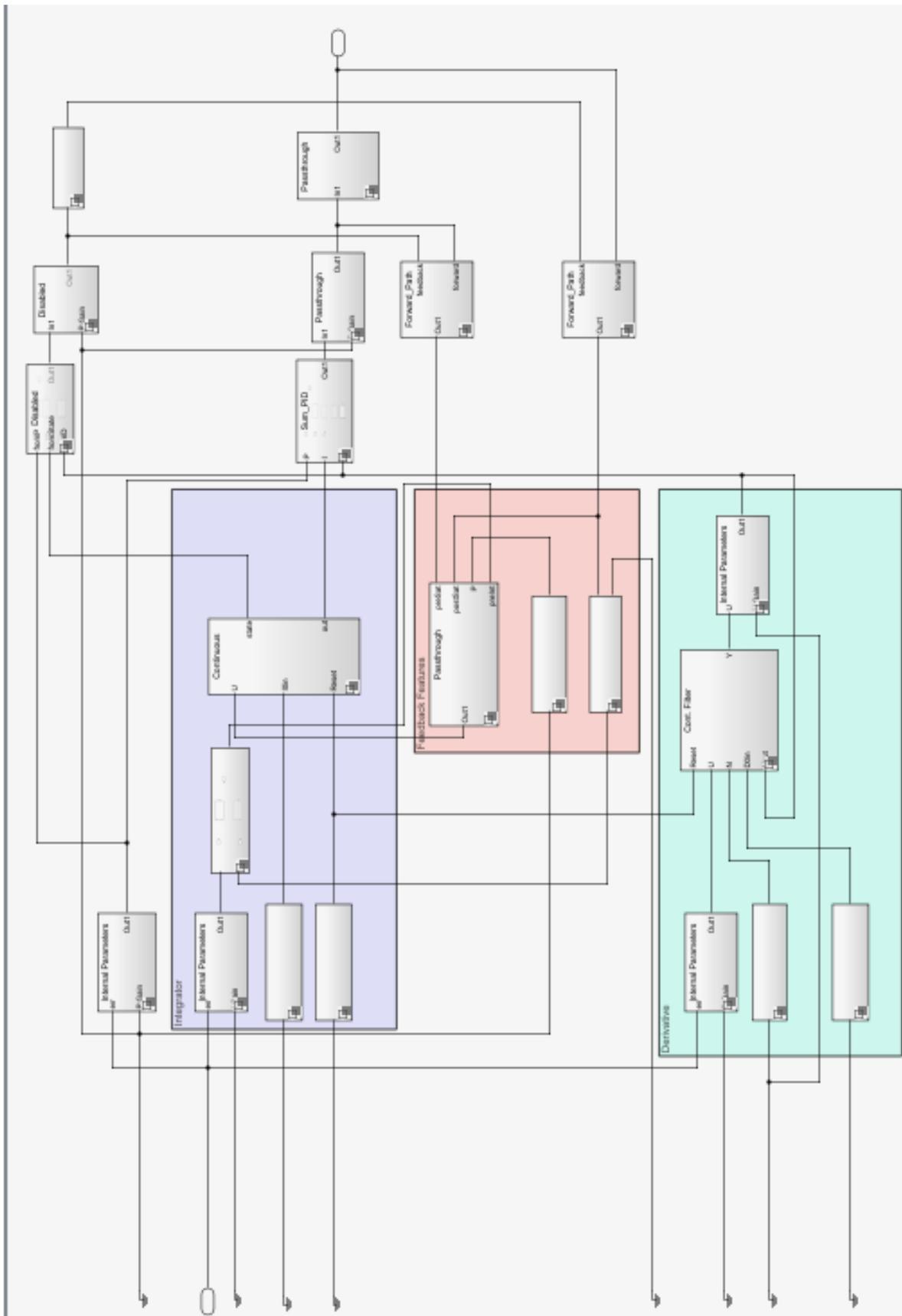


Gambar 8. Rangkaian Sistem Blok Ulir (Ballscrew/Leadscrew)

- o Set blok PID

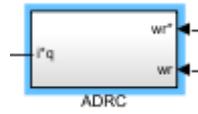


Gambar 9. Set Blok PID

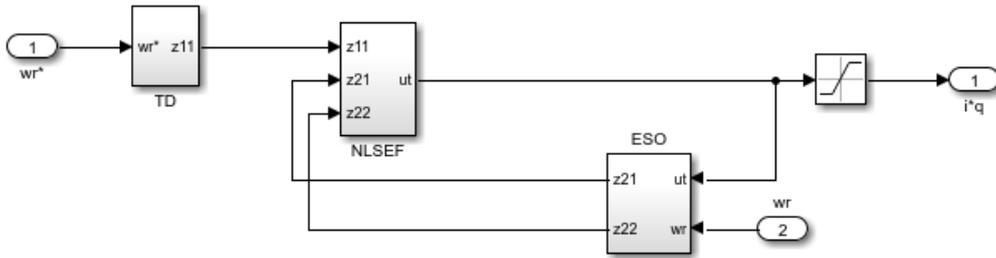


Gambar 10. Rangkaian Set Blok Sistem PID

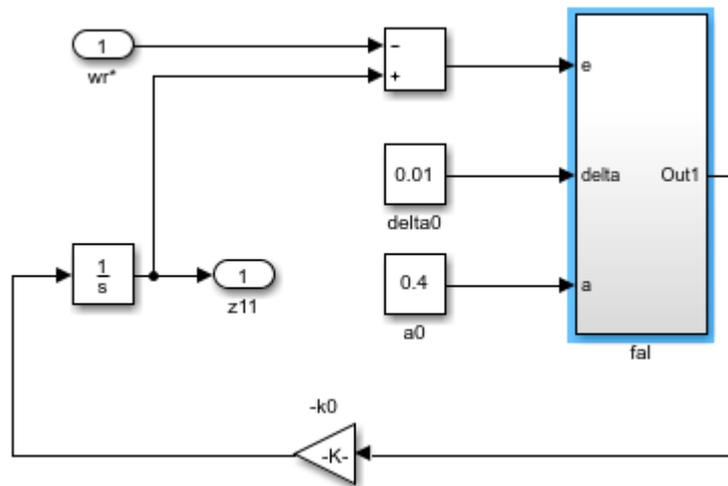
○ Set Blok ADRC



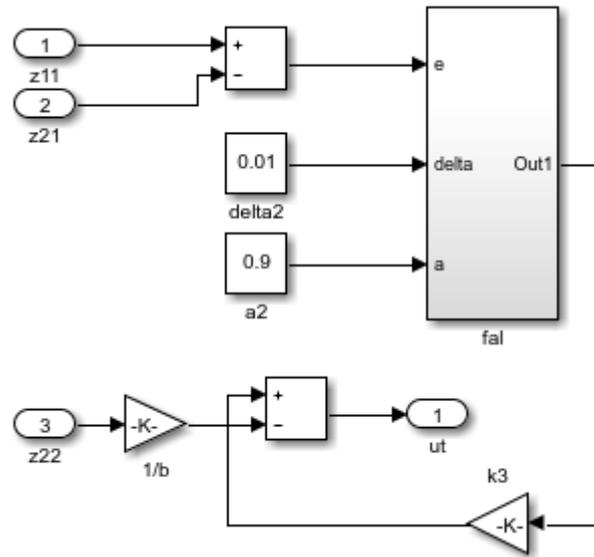
Gambar 11. Set Blok ADRC



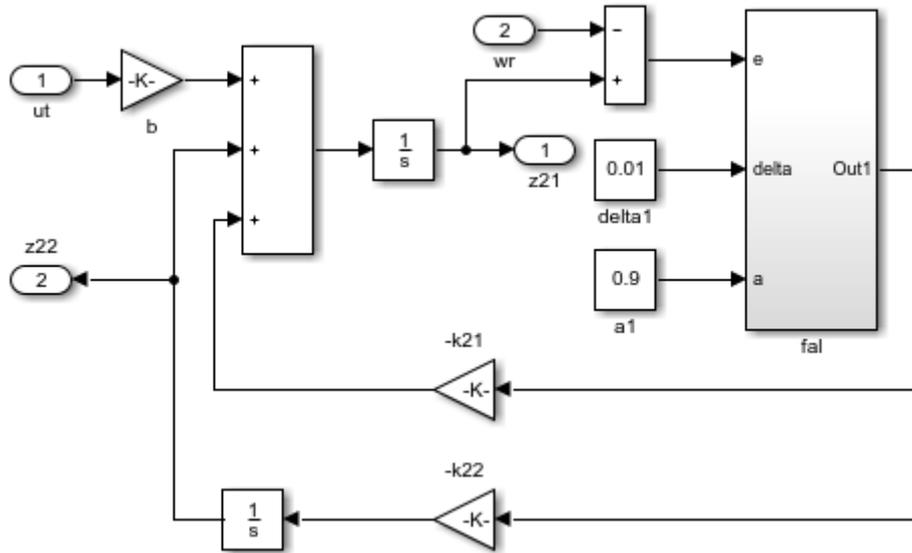
Gambar 12. Rangkaian Set Blok Sistem ADRC



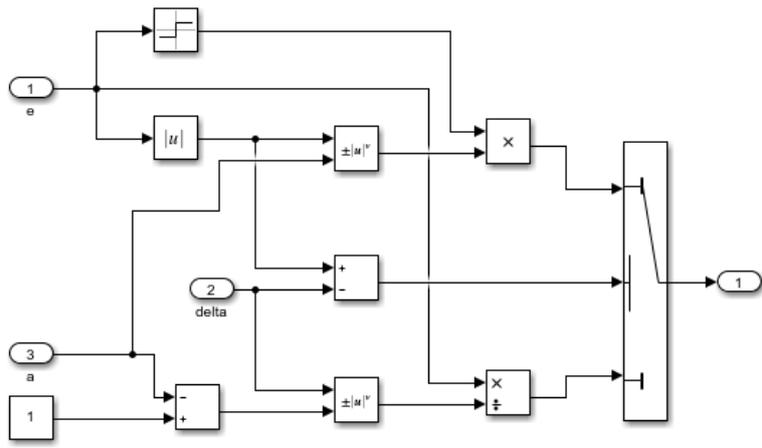
Gambar 13. Rangkaian Set Blok TD pada ADRC



Gambar 14. Rangkaian Set Blok NLSEF pada ADRC



Gambar 15. Rangkaian Set Blok ESO pada ADRC



Gambar 16. Rangkaian Set Blok Fal pada TD, NLSEF, dan ESO dalam ADRC

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Surabaya, pada 18 Juli 1996 dengan menempuh pendidikan di Program Sarjana Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, dengan fokus kendali motor. Kemudian pernah melaksanakan *internship* di PT. PJB UP Paiton Unit 1 dengan menganalisa kebocoran boiler pada unit 1, dan di PT. VS Bandung dengan mendesain *Vessel ID detector*. Untuk menghubungi penulis dapat dilakukan dengan kontak via email [wimansyah.mailbox@gmail.com](mailto:wimansyah.mailbox@gmail.com).