

**KONTROL POSISI MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PI
PADA LINEAR SLIDE AKTUATOR ROBOT DIVISI KRAI**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2019**

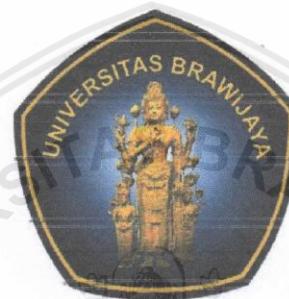
LEMBAR PENGESAHAN

KONTROL POSISI MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PI PADA LINEAR SLIDE AKTUATOR ROBOT DIVISI KRAI

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RAHMAT ARDIANSYAH
NIM.155060300111034

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 12 Juni 2019

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

M. Aziz Muslim S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

Goegoes Dwi Nusantoro S.T., M.T.
NIP. 19711013 200604 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro



JUDUL SKRIPSI :

KONTROL POSISI MOTOR DC MENGGUNAKAN KONTROLER PI PADA LINEAR
SLIDE AKTUATOR ROBOT DIVISI KRAI

Nama Mahasiswa : RAHMAT ARDIANSYAH

NIM : 155060300111034

Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

Konsentrasi : TEKNIK KONTROL

Komisi Pembimbing :

Ketua : Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.

Anggota : Goegoes Dwi Nusantoro, S.T., M.T.

Tim Dosen Penguji :

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, M.T.

Dosen Penguji 2 : Ir. Mohammad Rusli, Dipl.Ing.

Dosen Penguji 3 : Rahmadwati, S.T., M.T., Ph.D.

Tanggal Ujian : 24 Mei 2019

SK Penguji : 1089 Tahun 2019

LEMBAR ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juni 2019

Mahasiswa,

Rahmat Ardiansyah
NIM.155060400111034

*Teriring Ucapat Terima Kasih kepada:
Ayahanda dan Ibunda Tercinta*



PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kontrol Posisi Motor DC Menggunakan Kontroler PI pada *Linear Slide* Aktuator Robot Divisi KRAI” dengan baik. Tak lepas shalawat serta salam tercurahan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih sebesar-besarnya kepada:

- Kedua orang tua, Bapak Sunardi dan Ibu Sudarti yang selalu memberikan dukungan, semangat, kasih saying dan do'a yang tiada akhir serta kepada Kakak dan Adikku yang selalu memberikan dukungan dan semangat.
- Bapak Ir. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D., IPM. selaku ketua jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ibu Ir. Nurussa'adah, M.T. selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ibu Rahmadwati, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Bapak Muhammad Aziz Muslim S.T., M.T., Ph.D. selaku KKJF Teknik Kontrol sekaligus Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan, saran dan masukkan.
- Bapak Goegoes Dwi Nusantoro S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Mekatronika dan Robotika sekaligus Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan saran dan masukkan.
- Tim Robotika 2015 Syahidan, Gerdy, Pei, Shamsul, Ikrar, Godam, Sholikin, Chandra, Andrian, Toni, Danu, Aby, Cita, Rif'al, Valen, Alif, Yayak, Yola, Nadia yang telah selalu memberikan semangat dan canda tawa setiap malam.
- Tim KRAI Ashar, Banu, Bram, Dayat, Daffa, Ghiffary, Greg yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung.
- Adik-adik Tim Robotika 2016 dan 2017.

- Teman-teman Lab. Sistem Kontrol Galih, Kukuh, Karil, Firda, Ateng, Fajar, Nike yang telah memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung.
- Keluarga besar Teknik Kontrol 2015 dan SERVO 2015 yang telah memberikan banyak pengalaman, dukungan dan semangat.
- Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Dalam penyusunan ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna karena keterbatasan ilmu yang dimiliki serta terdapat kendala-kendala lain yang terjadi selama penggerjaan skripsi ini. Oleh karena itu penulis berharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan dimasa mendatang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Juni 2019

Penulis



RINGKASAN

Rahmat Ardiansyah, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2019, *Kontrol Posisi Motor DC Menggunakan Kontroler PI pada Linear Slide Aktuator Robot Divisi KRAI*, Dosen Pembimbing: Muhammad Aziz Muslim dan Goegoes Dwi Nusantoro.

Kontes Robot ABU Indonesia (KRAI) adalah salah satu divisi yang diperlombakan dalam ajang Kontes Robot Indonesia (KRI) yang diselenggarakan setiap tahunnya oleh DIKTI. Tema dan aturan pelombaan KRAI mengacu pada ABU Robocon (*Asia-Pacific Broadcasting Union*). Tema dan aturan tersebut berbeda setiap tahunnya tergantung dengan tuan rumah penyelenggara ABU Robocon. *Linear slide actuator (slider)* adalah salah satu mekanisme yang digunakan pada robot ketika dibutuhkan perpanjangan sehingga robot dapat melakukan tugasnya lebih efisien. Perpanjangan digerakkan oleh motor DC dan posisi dibaca oleh sensor *rotary encoder*. Kontroler yang digunakan adalah kontroler PI. Penentuan parameter kontroler K_p dan K_i dilakukan dengan menggunakan metode *Root Locus* dan didapatkan nilai parameter kontroler $K_p = 2.4819$ dan $K_i = 9$. Setelah dilakukan pengujian pada sistem didapatkan nilai *settling time* rata-rata sebesar 1.685 detik pada pengujian tanpa beban, 1.822 detik pada pengujian berbeban, nilai *error steady state* kurang dari 2.5% dan *overshoot* kurang dari 2.1%.

Kata Kunci: Motor DC, Kontroler PI, *Root Locus*, *Linear Slide* Aktuator, *Slider*.



SUMMARY

Rahmat Ardiansyah, Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, May 2019, Position Control of DC Motor Using PI Controller on Linear Slide Actuator KRAI Robot Division, Academic Supervisor: Muhammad Aziz Muslim and Goegoes Dwi Nusantoro.

The Indonesian ABU Robot Contest (KRAI) is one of the divisions competed in the Indonesian Robot Contest (KRI) held annually by the DIKTI. The theme and rules of the KRAI refer to the ABU Robocon (Asia Pacific Broadcasting Union). The themes and rules differ each year depending on the hosts of ABU Robocon organizers. Linear slide actuators are one of the mechanisms used in robots when an extension is needed to do their job more efficiently. The extension is driven by a DC motor and the position is read by the rotary encoder sensor. The controller used is the PI controller. K_p and K_i controller parameters are determined using the Root Locus method and obtained controller parameter values $K_p = 2.4819$ and $K_i = 9$. After testing on the system, the average settling time is 1,685 seconds on load-free testing, 1,822 seconds on load testing, steady state error value is less than 2.5% and overshoot is less than 2.1%.

Keywords: DC Motor, PI Controller, Root Locus, Linear Slide Actuator, Slider



DAFTAR ISI

PENGANTAR.....	i
RINGKASAN.....	iii
SUMMARY	v
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1. Motor DC.....	3
2.2. <i>Rotary Encoder</i>	4
2.3. Driver Motor H-Bridge	5
2.4. Mikrokontroler STM32F407	6
2.5. PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	8
2.6. Kontroler	8
2.7. Root Locus	10
2.8. Software STM Studio	12
BAB III METODE PENELITIAN.....	13
3.1. Perancangan Blok Diagram Sistem	13
3.2. Spesifikasi Desain	14
3.3. Karakterisasi Motor DC	14
3.4. Karakterisasi Driver Motor	16
3.5. Karakterisasi Sensor Kecepatan (<i>Rotary Encoder</i>)	18
3.6. Penentuan Fungsi Alih Motor DC	20
3.7. Penentuan Parameter Kontroler PI dengan Metode <i>Root Locus</i>	25
3.8. Pembuatan Perangkat Keras	33
3.9. Perancangan Algoritma Sistem.....	36
3.10. Perancangan Pengujian Sistem	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39

4.1.	Pengujian Sensor Posisi (<i>Rotary Encoder</i>).....	39
4.2.	Pengujian Sistem Tanpa Beban	41
4.3.	Pengujian Sistem Berbeban.....	50
4.4.	Pengujian Sistem dengan Variasi Beban	58
4.5.	Pengujian Sifat Reversibel Sistem.....	61
BAB V KESIMPULAN.....		63
DAFTAR PUSTAKA		65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor DC.....	3
Gambar 2.2 Rotary encoder.....	4
Gambar 2.3 Sinyal keluaran rotary encoder	5
Gambar 2.4 Driver motor VNH2SP30	5
Gambar 2.5 Konfigurasi H-Bridge	5
Gambar 2.6 Mikrokontroler STM32F407	7
Gambar 2.7 Duty cycle pada sinyal PWM	8
Gambar 2.8 Blok diagram kontroler proporsional (P).....	9
Gambar 2.9 Blok diagram kontroler integral (I).....	10
Gambar 2.10 Blok diagram kontroler proporsional integral (PI)	10
Gambar 2.11 Sistem kendali loop tertutup	11
Gambar 2.12 Tampilan software STM Studio.....	12
Gambar 3.1 Blok diagram sistem	13
Gambar 3.2 Grafik pengujian motor DC	16
Gambar 3.3 Grafik pengujian driver motor	18
Gambar 3.4 Grafik pengujian sensor kecepatan rotary encoder.....	20
Gambar 3.5 Sinyal masukan PRBS dan keluaran motor DC	21
Gambar 3.6 System identification toolbox	21
Gambar 3.7 Hasil estimasi model.....	22
Gambar 3.8 Model continuous fungsi alih motor DC	23
Gambar 3.9 Validasi fungsi alih motor DC.....	24
Gambar 3.10 Letak pole pada diagram root locus.....	26
Gambar 3.11 Respon sistem dengan nilai K_p 1,7911 dan K_i 5	27
Gambar 3.12 Respon sistem dengan nilai K_p 1,8774 dan K_i 5,5	28
Gambar 3.13 Respon sistem dengan nilai K_p 1,9638 dan K_i 6	28
Gambar 3.14 Respon sistem dengan nilai K_p 2,0501 dan K_i 6,5	29
Gambar 3.15 Respon sistem dengan nilai K_p 2,1365 dan K_i 7	29
Gambar 3.16 Respon sistem dengan nilai K_p 2,2228 dan K_i 7,5	30
Gambar 3.17 Respon sistem dengan nilai K_p 2,3092 dan K_i 8	30
Gambar 3.18 Respon sistem dengan nilai K_p 2,3956 dan K_i 8,5	31
Gambar 3.19 Respon sistem dengan nilai K_p 2,4819 dan K_i 9	31
Gambar 3.20 Respon sistem dengan nilai K_p 2,5683 dan K_i 9,5	32

Gambar 3.21 Skema pembuatan perangkat keras	33
Gambar 3.22 Baterai LiPo 3S	33
Gambar 3.23 Mikrokontroler STM32F407	34
Gambar 3.24 Sensor rotary encoder	34
Gambar 3.25 Driver motor VNH2SP30	34
Gambar 3.26 Motor DC planetary gearbox	34
Gambar 3.27 PC atau komputer	35
Gambar 3.28 Foto alat tampak atas	35
Gambar 3.29 Foto alat tampak samping	36
Gambar 3.30 Flowchart algoritma program	37
Gambar 4.4 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 15 cm	44
Gambar 4.5 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 20 cm	45
Gambar 4.6 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 25 cm	46
Gambar 4.7 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 30 cm	47
Gambar 4.8 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 35 cm	48
Gambar 4.9 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 40 cm	49
Gambar 4.10 Respon sistem berbeban dengan setpoint 5 cm	50
Gambar 4.11 Respon sistem berbeban dengan setpoint 10 cm	51
Gambar 4.12 Respon sistem berbeban dengan setpoint 15 cm	52
Gambar 4.13 Respon sistem berbeban dengan setpoint 20 cm	53
Gambar 4.14 Respon sistem berbeban dengan setpoint 25 cm	54
Gambar 4.15 Respon sistem berbeban dengan setpoint 30 cm	55
Gambar 4.16 Respon sistem berbeban dengan setpoint 35 cm	56
Gambar 4.17 Respon sistem berbeban dengan setpoint 40 cm	57
Gambar 4.18 Respon sistem dengan beban 1000 gr	59
Gambar 4.19 Respon sistem dengan beban 1500 gr	60
Gambar 4.20 Respon pada pengujian sifat reversibel sistem	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Logika Arah Putaran Motor.....	6
Tabel 3.1 Data Pengujian Kecepatan Motor DC	15
Tabel 3.2 Data Pengujian Tegangan Keluaran pada Driver Motor	17
Tabel 3.3 Data Pengujian Sensor Kecepatan Rotary Encoder.....	19
Tabel 3.4 Nilai Parameter K_p dan K_i	27
Tabel 3.5 Data Pengujian Parameter Kontroler.....	32
Tabel 4.1 Data Pengujian Sensor Posisi (Rotary Encoder)	40
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Sistem Tanpa Beban dan Berbeban	58
Tabel 4.3 Data Pengujian Sistem dengan Variasi Beban	61



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kontes Robot Indonesia (KRI) adalah kontes robot yang rutin diselenggarakan oleh DIKTI setiap tahunnya yang dapat diikuti oleh tim mahasiswa dari perguruan tinggi di Indonesia. Pada ajang KRI terdapat lima kategori robot yang diperlombakan yaitu Kontes Robot Seni Tari Indonesia (KRSTI), Kontes Robot Sepak Bola Indonesia (KRSBI) humanoid dan beroda, Kontes Robot Pemadam Api Indonesia (KRPAI) dan Kontes Robot ABU Indonesia (KRAI).

Kontes Robot ABU Indonesia mengacu pada ABU Asia-Pacific Robot Contest. Pemenang pada KRAI akan mewakili Indonesia dalam ABU (Asia-Pacific Broadcasting Union) *Robocon*. Tema dan aturan pada KRAI setiap tahunnya selalu berubah tergantung dengan negara tuan rumah ABU *Robocon*. Tema untuk KRAI tahun 2018 adalah “Lempar Bola Berkah” yang disesuaikan dengan tema yang telah ditentukan oleh ABU Robocon 2018 yaitu ““NÉM CÒN” *The Festival Wishing Happiness and Prosperity*”.

Aturan pada KRAI, dimensi dari robot dibatasi dan selama game robot diperbolehkan untuk merentangkan atau memanjang selama dimensinya masih dalam batas dimensi yang diperbolehkan. Oleh karena itu diperlukan sebuah mekanisme untuk melakukan perpanjangan tersebut sehingga robot dapat melakukan tugasnya secara efisien. Salah satu mekanisme yang sering digunakan adalah dengan *linear slide* aktuator. *Linear* aktuator adalah sebuah mekanisme yang menghasilkan gerakan dengan garis lurus pada suatu bidang. Aktuator tersebut umumnya digerakkan oleh sebuah motor DC. Untuk mengontrol posisi dari motor DC tersebut diperlukan sebuah kontroler.

Terdapat beberapa macam tipe kontroler seperti kontroler proporsional (P), proporsional integral (PI), proporsional diferensial (PD) dan proporsional integral diferensial (PID). Pada skripsi ini digunakan kontroler proporsional integral (PI) untuk mengontrol posisi dari motor DC tersebut. Dengan digunakannya kontroler proporsional integral (PI) pada kontrol posisi motor DC, diharapkan mendapatkan respon sistem yang sesuai dengan yang spesifikasi desain yang telah ditentukan.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang kontroler PI untuk kontrol posisi motor DC pada linear slide actuator robot divisi KRAI.
2. Bagaimana respon sistem setelah diberikan nilai setpoint saat keadaan tanpa beban dan saat diberi beban.

1.3. Batasan Masalah

Karena luasnya objek pengkajian sehingga perlu adanya pembatasan masalah agar pembahasan lebih terfokus pada rumusan masalah. Dalam perancangan skripsi ini permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Tegangan yang digunakan pada motor DC adalah 12V
2. Motor DC yang digunakan adalah motor DC dengan gearbox
3. Kecepatan maksimal motor DC adalah 280 RPM
4. Perpanjangan maksimal adalah 40 cm
5. Beban yang digunakan seberat 500gr, 1000gr dan 1500gr
6. Tegangan mikrokontroler adalah 5V
7. Metode penentuan parameter kontroler yang digunakan adalah dengan metode *Root Locus*

1.4. Tujuan

Mampu merancang kontroler PI untuk pengontrolan posisi motor DC pada *linear slide actuator* robot KRAI.

1.5. Manfaat

1. Bagi Peneliti

Sebagai sarana belajar dan mengimplementasikan ilmu pengetahuan yang didapat selama perkuliahan serta memberikan pengalaman lebih kepada peneliti sebagai bekal dalam dunia kerja.

2. Bagi Tim Robotika

Sebagai referensi dalam penggunaan motor DC untuk mengatur posisi linear slide actuator pada robot KRAI

3. Bagi Calon Peneliti

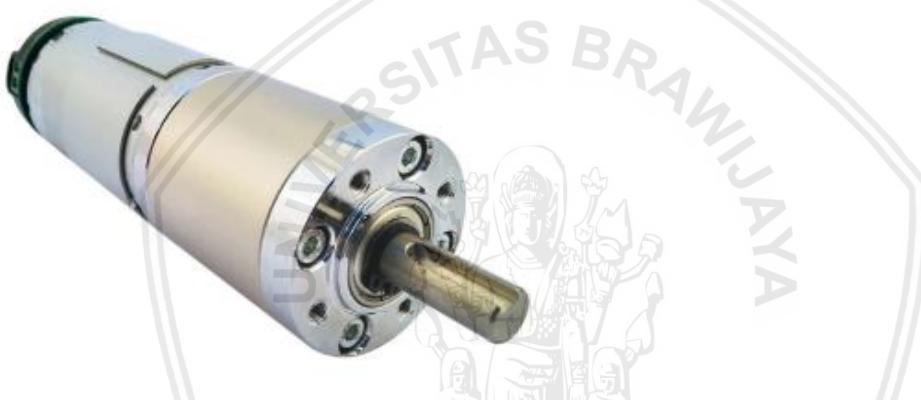
Sebagai sumber referensi dan informasi bagi calon peneliti untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor DC

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Motor DC tersusun dari dua bagian yaitu bagian dian (*stator*) dan bagian bergerak (*rotor*). *Stator* motor arus searah adalah badan motor atau kutub magnet (sikat-sikat), sedangkan yang termasuk *rotor* adalah lilitan jangkarnya. Gambar 2.1 adalah bentuk fisik dari motor DC.



Gambar 2.1 Motor DC

2.1.1. Prinsip Kerja Motor DC

Keuntungan utama motor DC adalah sebagai pengendali kecepatan, yang tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya. Motor ini dapat dikendalikan dengan megatur.

- Tegangan rotor → meningkatkan tegangan pada rotor akan meningkatkan kecepatan.
- Arus medan → menurunkan arus medan akan meningkatkan kecepatan.

Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum :

- Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya.
- Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah loop, maka kedua sisi loop yaitu pada sudut kanan medan magnet akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
- Pasangan gaya mengasilkan tenaga putar/torsi untuk memutar kumparan

- Motor-motor memiliki beberapa loop untuk memberikan tenaga putar yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

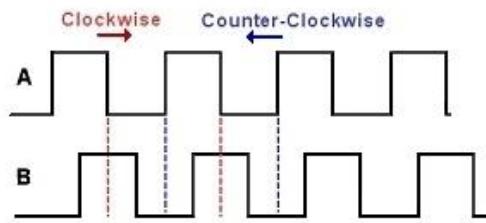
2.2. *Rotary Encoder*

Rotary encoder adalah perangkat elektromekanik yang dapat memonitor gerakan dan posisi. *Rotary encoder* umumnya menggunakan sensor optik untuk menghasilkan serial pulsa yang dapat diartikan menjadi gerakan, posisi, dan arah. Sehingga posisi sudut suatu poros benda berputar dapat diolah menjadi informasi berupa kode digital oleh *rotary encoder* untuk diteruskan oleh rangkaian kendali. *Rotary encoder* umumnya digunakan pada pengendalian robot, motor *drive*, dsb. Bentuk dari sensor *rotary encoder* ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Rotary encoder*

Rotary encoder tersusun dari suatu piringan tipis yang memiliki lubang-lubang pada bagian lingkaran piringan. LED ditempatkan pada salah satu sisi piringan sehingga cahaya akan menuju ke piringan. Di sisi yang lain suatu photo-transistor diletakkan sehingga photo-transistor ini dapat mendeteksi cahaya dari LED yang berseberangan. Piringan tipis tadi dikoppel dengan poros motor, atau perangkat berputar lainnya yang ingin kita ketahui posisinya, sehingga ketika motor berputar piringan juga akan ikut berputar. Apabila posisi piringan mengakibatkan cahaya dari LED dapat mencapai photo-transistor melalui lubang-lubang yang ada, maka photo-transistor akan mengalami saturasi dan akan menghasilkan suatu pulsa gelombang persegi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sinyal keluaran *rotary encoder*

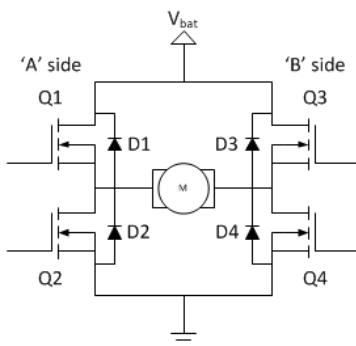
2.3. Driver Motor H-Bridge

Driver motor berfungsi untuk mengubah sinyal PWM dari mikrokontroler menjadi tegangan. Dalam aplikasinya, *driver* motor biasanya terdiri dari rangkaian transistor-transistor yang tersusun sedemikian rupa sehingga mampu mengendalikan arah putar dan kecepatan motor berdasarkan arah *loop* dan tegangan kutub motor. *Driver* motor yang digunakan pada perancangan ini adalah *driver* motor VNH2SP30 dengan mode *H-Bridge*. Gambar 2.4 adalah bentuk dari *driver* motor VNH2SP30.



Gambar 2.4 *Driver* motor VNH2SP30

H-Bridge adalah sebuah perangkat keras berupa rangkaian yang berfungsi untuk mengatur arah dari pergerakan motor. Rangkaian ini diberi nama *H-Bridge* karena bentuk dari rangkaian ini menyerupai huruf H seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Konfigurasi *H-Bridge*

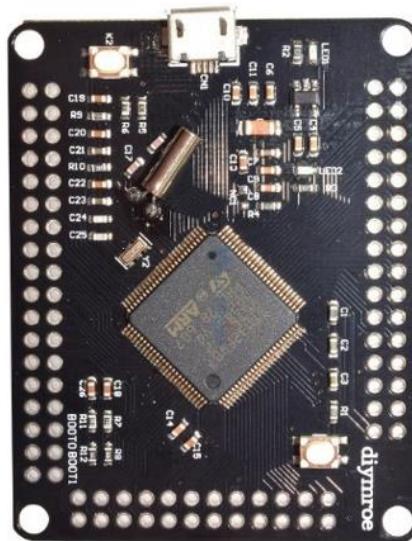
Rangkaian ini terdiri dari dua buah MOSFET kanal P dan dua buah MOSFET kanal N. Prinsip kerja dari rangkaian ini adalah dengan mengatur mati dan hidupnya ke empat MOSFET tersebut. Huruf M pada gambar 2.5 adalah motor DC yang akan dikontrol. Bagian atas rangkaian akan dihubungkan dengan sumber daya positif sedangkan bagian bawah rangkaian akan dihubungkan dengan sumber daya negatif. Pada saat Q1 dan Q4 *on* sedangkan Q2 dan Q3 *off*, maka sisi sebelah kanan motor akan terhubung dengan sumber positif sedangkan pada sisi sebelah kanan motor akan terhubung dengan sumber negatif sehingga motor akan bergerak searah jarum jam. Tabel 2.1 adalah logika arah putaran motor.

Tabel 2.1
Logika Arah Putaran Motor

Q1	Q2	Q3	Q4	Arah Putaran
<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>CW</i>
<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>CCW</i>
<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>Brake to VCC</i>
<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>Brake to GND</i>
<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>Open</i>

2.4. Mikrokontroler STM32F407

STM32F407 didasarkan pada kinerja tinggi ARM®Cortex®-M4 32-bit RISC yang beroperasi pada frekuensi hingga 168 MHz. Inti Cortex-M4 dilengkapi dengan presisi Floating point unit (FPU) tunggal yang mendukung semua instruksi pemrosesan data dan tipe data presisi tunggal ARM. Ini juga mengimplementasikan satu set lengkap instruksi DSP dan unit perlindungan memori (MPU) yang meningkatkan keamanan aplikasi. Bentuk dari mikrokontroler STM32F407 ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Mikrokontroler STM32F407

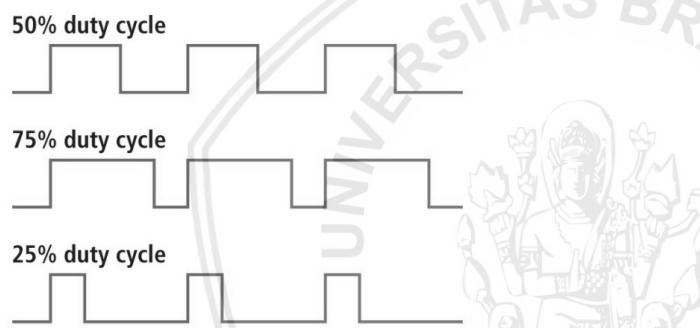
STM32F407 menggabungkan memori tertanam berkecepatan tinggi (memori *Flash* hingga 1 Mbyte, hingga 192 Kbytes SRAM), hingga 4 Kbytes SRAM cadangan, dan rentang luas I / Os yang disempurnakan dan peripheral yang terhubung ke dua APB bus, tiga bus AHB dan matriks bus multi-AHB 32-bit. Berikut ini adalah spesifikasi dari mikrokontroler STM32F407.

- *Core* : Cortex-M4F
- *Memory* : 1MB *Flash*
- RAM : 192KB SRAM
- *Debug Mode* : *Serial Wire Debug (SWD) & JTAG Interface*
- *Package* : LQFP100
- I/O Pins : 82
- Timers (16-bit) : 12
- Advanced Control Timers : 2
- General Purpose Timers : 10
- Basic Timers : 2
- PWM Channels : 6
- ADC (12-bit) : 3 (*16 Channel*)
- I2C (TWI) : 3
- USART : 4
- SPI : 3 *Full Duplex*

- DMA : 2 (*8 Channel*)
- USB : 1 (*2.0 Full Speed*)
- CAN : 2 (*2.0 Active*)
- *Supply Voltage* : 1.8 – 3.6 V

2.5. PWM (*Pulse Width Modulation*)

PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah sebuah teknik modulasi dengan cara memanipulasi lebar pulsa dengan frekuensi dan amplitudo yang sama untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Sinyal PWM memiliki amplitudo dan frekuensi yang tetap namun memiliki lebar pulsa / *duty cycle* yang bervariasi antara 0% hingga 100%. *Duty cycle* merupakan perbandingan antara pulsa positif terhadap total pulsa yang dinyatakan dalam persen seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Duty cycle pada sinyal PWM

2.6. Kontroler

Kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku dari sebuah sistem. Hal itu disebabkan oleh tidak dapat diubahnya komponen penyusun dari sistem tersebut. Artinya karakteristik plant harus diterima sebagaimana adanya, perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan kontroler.

Salah satu fungsi kontroler adalah mengurangi sinyal error yaitu perbedaan antara nilai setpoint dengan nilai keluaran plant. Setpoint adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan sedangkan keluaran plant adalah nilai aktual yang terukur pada keluaran plant. Semakin kecil nilai error maka akan semakin baik kinerja dari suatu sistem kontrol.

Prinsip kerja kontroler adalah dengan membandingkan nilai yang sebenarnya dari keluaran plant dengan nilai yang diinginkan, menentukan error, dan menghasilkan suatu

sinyal kontrol yang akan memperkecil error sampai nol atau sampai suatu nilai yang kecil (Ogata K, 1995).

Cara bagaimana suatu kontroler otomatis menghasilkan sinyal kontrol disebut dengan aksi kontrol. Aksi kontrol dasar yang sering digunakan pada kontroler adalah.

1. Kontroler Proporsional (P)
2. Kontroler Integral (I)
3. Kontroler Proporsional Integral (PI)

2.6.1. Kontroler Proporsional (P)

Kontroler proporsional adalah sebuah kontroler yang memiliki karakteristik mempercepat output. Kontroler proporsional memiliki keluaran yang besarnya sebanding dengan besarnya nilai error. Keluaran kontroler merupakan perkalian antara pengukuran proporsional dengan nilai error ditunjukkan dalam persamaan (2-1).

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2 - 1)$$

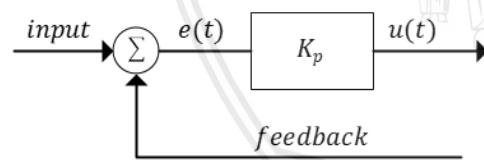
Dimana:

K_p = gain proporsional

$e(t)$ = sinyal error

$u(t)$ = keluaran kontroler

Diagram blok dari kontroler proporsional ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Blok diagram kontroler proporsional (P)

2.6.2. Kontroler Integral (I)

Kontroler integral (I) adalah sebuah kontroler yang memiliki karakteristik untuk menghilangkan sinyal error pada keadaan steady state. Output kontroler merupakan penjumlahan secara terus-menerus dari perubahan sinyal error. Persamaan kontroler integral (I) ditunjukkan oleh persamaan (2-2).

$$u(t) = Ki \int e(t) dt \quad (2 - 2)$$

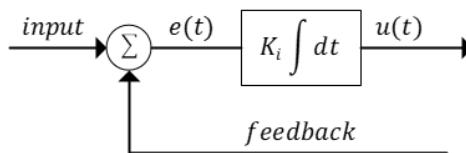
dimana

Ki = gain integral

$e(t)$ = sinyal error

$u(t)$ = keluaran kontroler

Diagram blok dari kontroler integral ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Blok diagram kontroler integral (I)

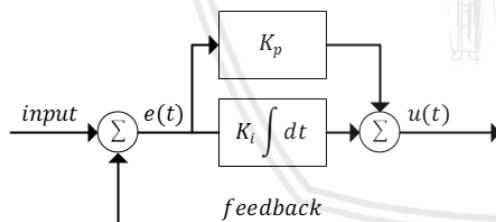
2.6.3. Kontroler Proporsional Integral (PI)

Kontroler proporsional integral (PI) memiliki kemampuan untuk mempercepat respon dan mengurangi error pada keadaan steady state. Persamaan kontroler proporsional integral (PI) ditunjukkan pada persamaan (2-3).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2-3)$$

Dengan K_p adalah penguatan proporsional dan T_i adalah waktu integral yang keduanya dapat ditentukan. Waktu integral mengatur aksi kontrol internal sedangkan perubahan nilai K_p berakibat pada bagian aksi kontrol proporsional maupun integral.

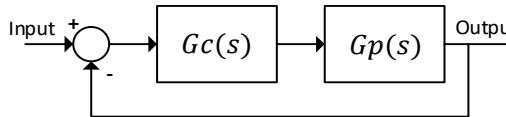
Diagram blok dari kontroler proporsional integral ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Blok diagram kontroler proporsional integral (PI)

2.7. Root Locus

Rancangan sistem kendali loop tertutup menggunakan *Root Locus* memungkinkan untuk mengatur sekurang-kurangnya beberapa letak *pole* sistem *loop* tertutup sehingga dapat mengatur tanggapan transien pada tingkat tertentu dan pengaruhnya terhadap tanggapan keadaan mantap (Philips, 1996). Prosedur analitis perancangan kontroler PID menggunakan metode *Root Locus* yang dijelaskan dalam *Feedback Control System* oleh Charles L. Philips dan Royce D. Harbour dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Sistem kendali *loop* tertutup

Untuk sistem tersebut, persamaan karakteristik diberikan pada persamaan (2-4).

$$1 + G_c(s)G_p(s) = 0 \quad (2-4)$$

Misalkan diinginkan root locus melalui $s = s_1$, maka hasil dari persamaan ditunjukkan pada persamaan (2-5)

$$G_c(s_1)G_p(s_1) = -1$$

$$G_c(s_1)|G_p(s_1)|e^{j\psi} = 1e^{j\Pi} \quad (2-5)$$

Fungsi alih kontroler PID setelah ditransformasi laplace dinyatakan oleh persamaan (2-6).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2-6)$$

Perhitungan dari persamaan (2-6) ditunjukkan pada persamaan (2-7).

$$G_c(s_1) = \frac{1}{|G_p(s_1)|} e^{j(\Pi-\psi)} \quad (2-7)$$

Substitusi persamaan (2-7) kedalam persamaan (2-6) dipatkan persamaan (2-8).

$$K_d(s_1)^2 + K_p(s_1) + K_i = \frac{e^{j(\Pi-\psi)}}{|G_p(s_1)|} \quad (2-8)$$

Dengan

$$s_1 = |s_1|e^{j\beta} \quad (2-9)$$

Hasil dari substusi persamaan (2-9) ke persamaan (2-8) akan didapatkan persamaan (2-10).

$$K_d|s_1|^2(\cos 2\beta + j \sin 2\beta) + K_p|s_1|(\cos \beta + j \sin \beta) + K_i = \frac{|s_1|}{|G_p(s_1)|} [\cos(\beta + \Pi - \psi) + j \sin(\beta + \Pi - \psi)] \quad (2-10)$$

Menyamakan real dengan real dan imajiner dengan imajiner, didapatkan hasil pada persamaan (2-11).

$$\begin{bmatrix} |s_1|^2 \cos 2\beta & |s_1| \cos \beta \\ |s_1|^2 \sin 2\beta & |s_1| \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_d \\ K_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{|s_1|}{|G_p(s_1)|} \cos(\beta + \Pi + \psi) - K_i \\ \frac{|s_1|}{|G_p(s_1)|} \sin(\beta + \Pi + \psi) \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

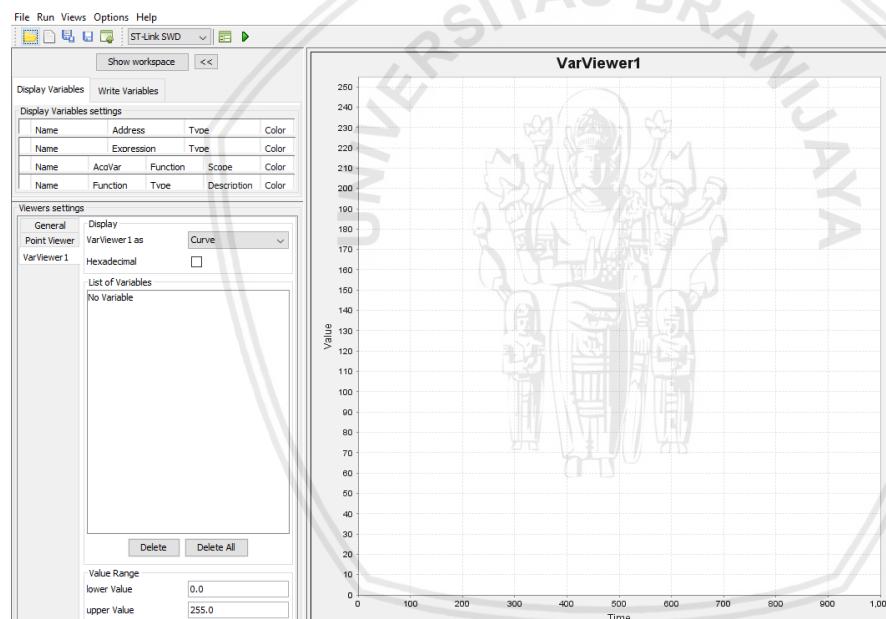
Atau dapat ditunjukkan pada persamaan (2-12).

$$\begin{bmatrix} |s_1|^2 \cos 2\beta & |s_1| \cos \beta \\ |s_1|^2 \sin 2\beta & |s_1| \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Kd \\ Kp \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{|s_1|}{Gp(s_1)} \cos(\psi - \beta) - Ki \\ \frac{|s_1|}{Gp(s_1)} \sin(\psi - \beta) \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

Dari persamaan tersebut dilihat bahwa untuk perancangan kontroler PID, satu dari tiga penguatan Kp, Ki dan Kd harus ditentukan terlebih dahulu. Sedangkan untuk perancangan kontroler PI maka Kd dibuat sama dengan nol.

2.8. Software STM Studio

STM Studio adalah *software* yang dibuat oleh STMicroelectronics yang digunakan untuk membantu mendiagnosa STM32 ketika berjalan dengan membaca dan menampilkan suatu variabel secara *real-time*. Tampilan dari software STM Studio dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Tampilan *software* STM Studio

BAB III

METODE PENELITIAN

Dalam menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan yang terdapat pada bab pendahuluan penelitian ini maka diperlukan langkah-langkah atau metode untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode penelitian pada skripsi ini meliputi:

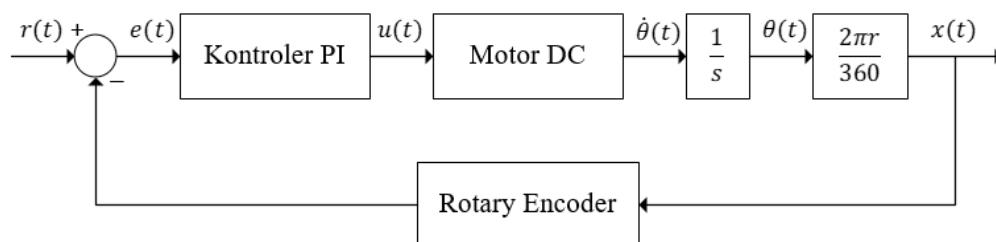
1. Perancangan blok diagram sistem.
2. Spesifikasi desain.
3. Karakterisasi setiap blok diagram sistem.

Untuk mempermudah analisis sistem, karakterisasi dibagi menjadi beberapa bagian, meliputi:

- a. Karakterisasi Motor DC.
 - b. Karakterisasi driver motor.
 - c. Karakterisasi sensor kecepatan (*Rotary Encoder*).
 - d. Penentuan fungsi alih Motor DC.
 - e. Validasi fungsi alih Motor DC.
4. Penentuan parameter kontroler PI
 5. Pembuatan perangkat keras.
 6. Perancangan algoritma sistem.
 7. Perancangan pengujian sistem

3.1. Perancangan Blok Diagram Sistem

Perancangan blok diagram sistem diperlukan untuk mengetahui apakah masing-masing blok dapat sesuai dengan yang diharapkan. Blok diagram sistem pengontrolan posisi motor dc pada linear slide aktuator dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Blok diagram sistem

Keterangan:

$r(t)$: Setpoint atau posisi yang diinginkan

$e(t)$: Selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai yang sebenarnya

$u(t)$: Sinyal terkontrol atau nilai keluaran kontroler PI

$\dot{\theta}(t)$: Keluaran motor DC berupa kecepatan sudut

$\theta(t)$: Keluaran motor DC berupa sudut

$x(t)$: Keluaran motor DC berupa posisi

3.2. Spesifikasi Desain

Respon sistem yang diinginkan pada pengontrolan posisi motor DC pada penelitian ini memiliki spesifikasi desain sebagai berikut:

1. *Error steady state* (e_{ss}) kurang dari 2%

Karena sistem yang baik memiliki *error steady state* kurang dari 5%

2. Settling time kurang dari 2 detik

Karena dibutuhkan respon sistem yang cepat

3. *Overshoot* kurang dari 5%

Sistem memiliki maximum *overshoot* sebesar 5%

3.3. Karakterisasi Motor DC

- a. Tujuan

Mengetahui karakteristik motor DC dengan perubahan tegangan masukan yang diberikan terhadap kecepatan putar motor DC.

- b. Peralatan yang Digunakan

- Motor DC
- Driver motor VNH2SP30
- *Power Supply* 12V
- Tachometer Digital
- Mikrokontroler STM32F407
- PC
- *Software* STM Studio

- c. Prosedur Pengujian

1. Pin IN1, IN2 dan PWM pada driver motor dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407

2. Power pada driver motor dihubungkan dengan *power supply* 12V

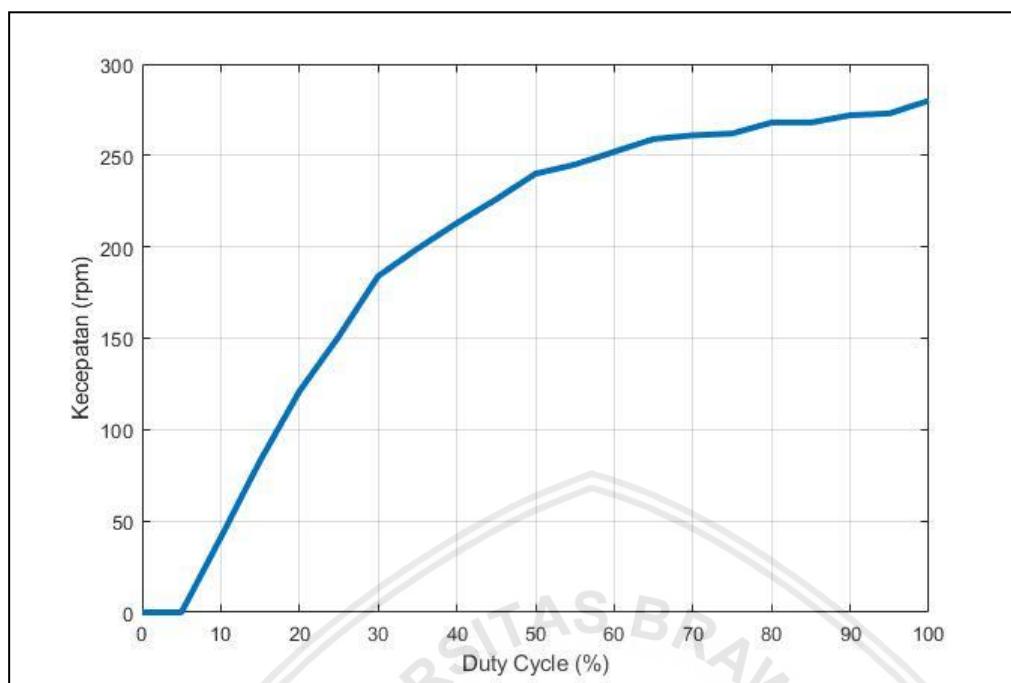
3. OUTA dan OUTB pada driver motor dihubungkan dengan motor DC
4. Nilai PWM diubah pada software STM Studio sesuai dengan nilai pada Tabel 3.1
5. Kecepatan motor DC diukur menggunakan tachometer digital
6. Hasil kecepatan motor DC dicatat pada Tabel 3.1

Setelah melakukan prosedur pengujian diatas, didapatkan nilai kecepatan motor DC seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1
Data Pengujian Kecepatan Motor DC

Duty Cycle (%)	Nilai PWM	Tegangan (V)	Kecepatan Motor dengan Tachometer (rpm)
0	0	2,36	0
5	13	3,12	0
10	25	3,58	41
15	38	4,02	83
20	51	4,46	121
25	64	4,90	151
30	77	5,33	184
35	90	5,75	199
40	102	6,18	213
45	115	6,60	226
50	127	7,02	240
55	140	7,43	245
60	153	7,84	252
65	166	8,25	259
70	178	8,65	261
75	191	9,05	262
80	204	9,45	268
85	217	9,84	268
90	229	10,23	272
95	242	10,60	273
100	255	10,73	280

Grafik pengujian motor DC ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik pengujian motor DC

3.4. Karakterisasi Driver Motor

a. Tujuan

Mengetahui karakteristik tegangan keluaran efektif *driver* motor VNH2SP30 terhadap masukan berupa *duty cycle* sinyal PWM yang dibangkitkan oleh mikrokontroler STM32F407.

b. Peralatan yang Digunakan

- *Driver* motor VNH2SP30
- *Power Supply* 12V
- Mikrokontroler STM32F407
- Voltmeter Digital
- PC
- *Software* STMStudio

c. Prosedur Pengujian

1. Pin IN1, IN2 dan PWM pada *driver* motor dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407
2. Power pada *driver* motor dihubungkan dengan *power supply* 12V
3. Nilai PWM diubah pada *software* STM Studio sesuai dengan nilai pada Tabel 3.2

4. Tegangan keluaran pada pin OUTA dan OUTB *driver* motor diukur sesuai dengan nilai PWM yang diberikan dengan voltmeter digital
5. Tegangan keluaran *driver* motor dicatat pada Tabel 3.2

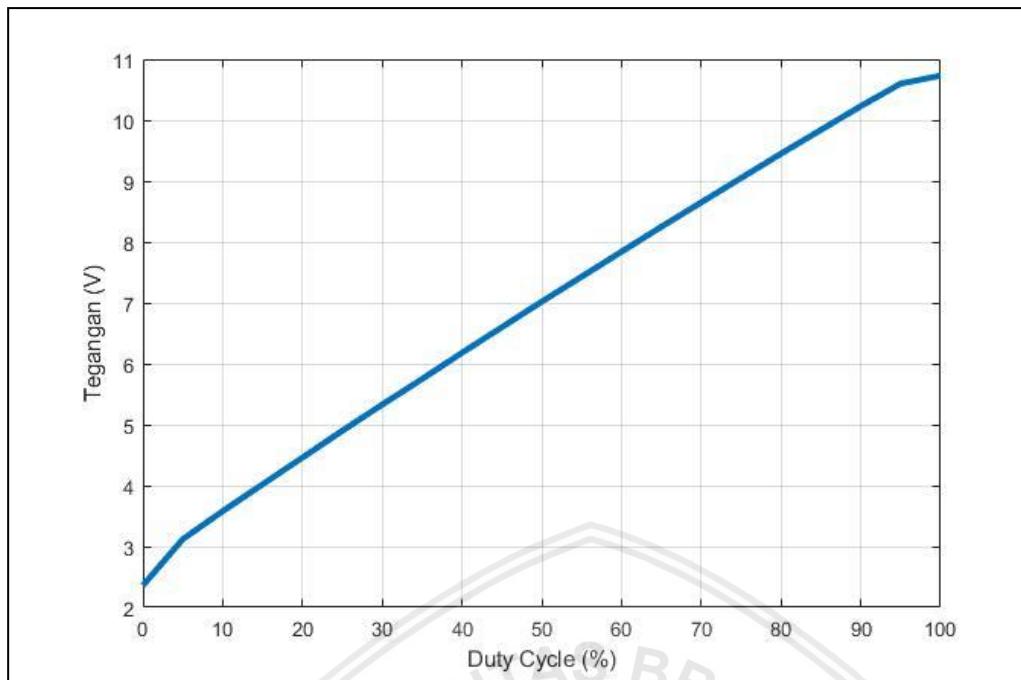
Setelah melakukan perosedur pengujian diatas, didapatkan nilai tegangan keluaran driver motor yang ditunjukkan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2

Data Pengujian Tegangan Keluaran pada Driver Motor

Duty Cycle (%)	Nilai PWM	Tegangan Keluaran Driver Motor (V)
0	0	2,36
5	13	3,12
10	25	3,58
15	38	4,02
20	51	4,46
25	64	4,90
30	77	5,33
35	90	5,75
40	102	6,18
45	115	6,60
50	127	7,02
55	140	7,43
60	153	7,84
65	166	8,25
70	178	8,65
75	191	9,05
80	204	9,45
85	217	9,84
90	229	10,23
95	242	10,60
100	255	10,73

Grafik pengujian driver motor ditunjukkan pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Grafik pengujian *driver* motor

3.5. Karakterisasi Sensor Kecepatan (*Rotary Encoder*)

a. Tujuan

Mengetahui karakteristik pembacaan kecepatan motor DC dengan *rotary encoder* terhadap pembacaan dengan tachometer digital.

b. Peralatan yang Digunakan

- Rotary encoder
- Driver motor VNH2SP30
- Mikrokontroller STM32F407
- PC
- Software STMStudio
- Tachometer digital
- Power supply 12V

c. Prosedur Pengujian

1. Pin IN1, IN2 dan PWM pada driver motor dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407
2. Power pada driver motor dihubungkan dengan power supply 12V
3. OUTA dan OUTB pada driver motor dihubungkan dengan motor DC
4. Kabel OutA, OutB, 5V dan GND *rotary encoder* dihubungkan ke mikrokontroler STM32F407

5. Nilai PWM diubah pada software STM Studio sesuai dengan nilai pada Tabel 3.3
6. Hasil pembacaan kecepatan motor DC dengan *rotary encoder* dicatat pada Tabel 3.1.

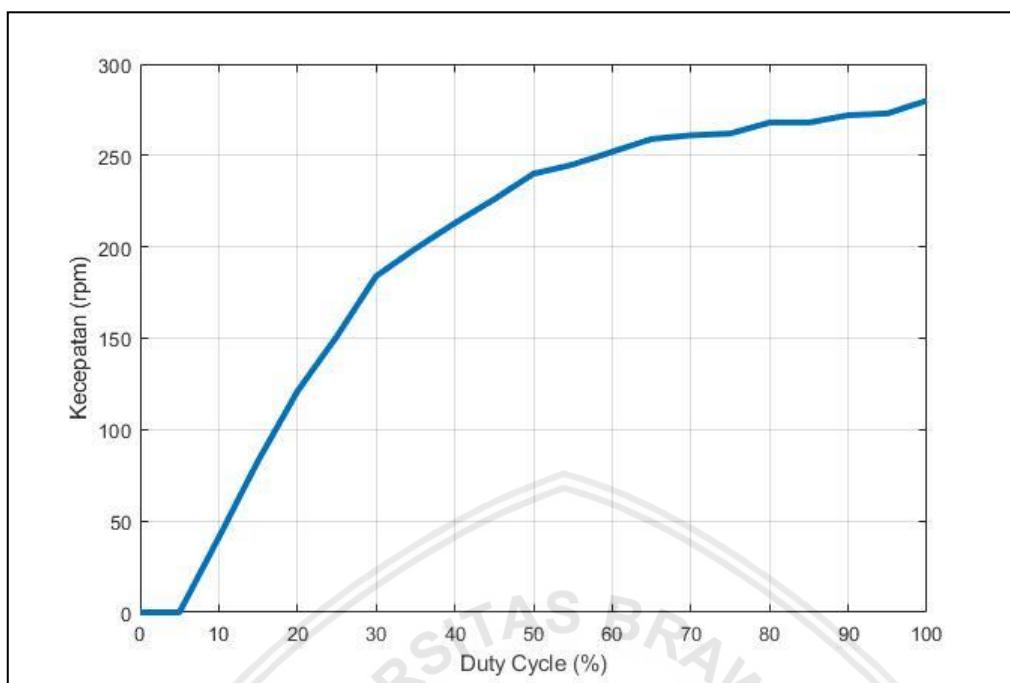
Setelah melakukan prosedur pengujian diatas, didapatkan hasil pembacaan kecepatan motor DC dengan rotary encoder yang ditunjukkan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3.3

Data Pengujian Sensor Kecepatan *Rotary Encoder*

Duty Cycle (%)	Nilai PWM	Kecepatan Motor dengan <i>Rotary Encoder</i> (rpm)	Kecepatan Motor dengan <i>Tachometer</i> (rpm)
0	0	0	0
5	13	0	0
10	25	40	41
15	38	84	83
20	51	120	121
25	64	153	151
30	77	182	184
35	90	199	199
40	102	213	213
45	115	225	226
50	127	240	240
55	140	244	245
60	153	252	252
65	166	259	259
70	178	261	261
75	191	261	262
80	204	268	268
85	217	268	268
90	229	273	272
95	242	273	273
100	255	280	280

Grafik pengujian rotary encoder ditunjukkan pada gambar 3.4

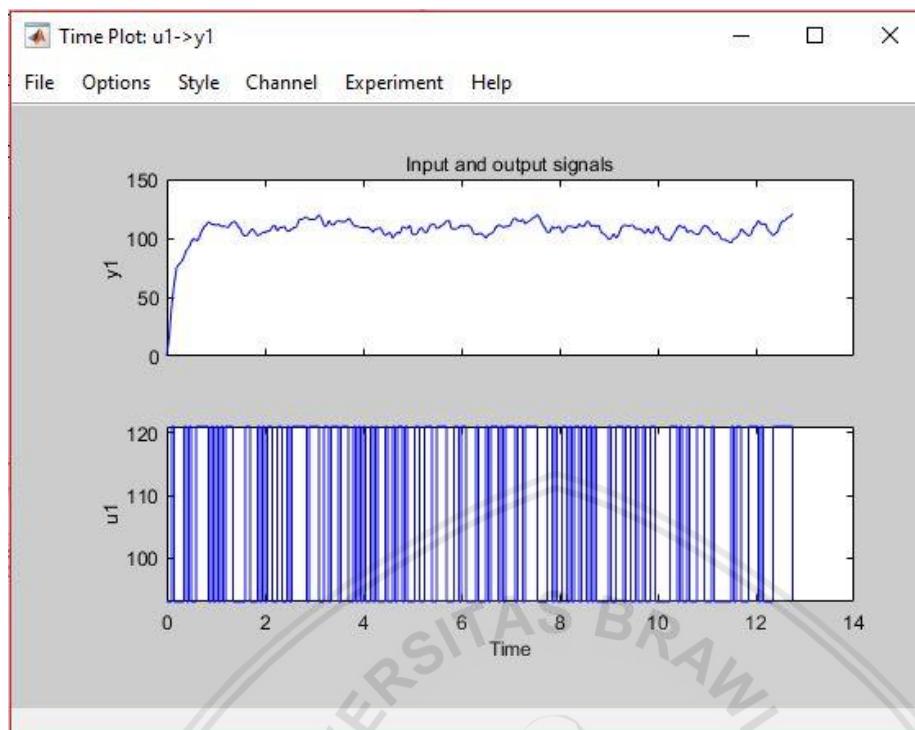


Gambar 3.4 Grafik pengujian sensor kecepatan *rotary encoder*

3.6. Penentuan Fungsi Alih Motor DC

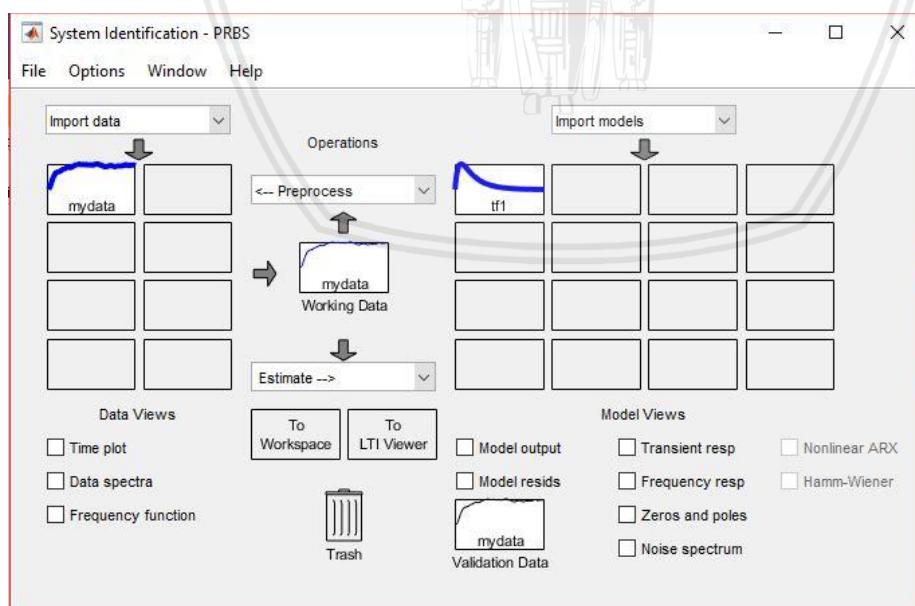
Pada pengontrolan posisi motor DC dibutuhkan kontroler yang mampu mengatur motor DC agar dapat sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan. Motor DC yang digunakan pada penelitian ini belum diketahui fungsi alihnya. Fungsi alih tersebut digunakan untuk menentukan parameter dari kontroler PI pada kontrol posisi motor DC sehingga perlu dicari fungsi alih dari motor DC. Karakteristik dari motor DC didapatkan dengan cara memberikan masukan unit step. Fungsi alih motor DC didapatkan dari pemodelan dengan cara membangkitkan sinyal PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*). Langkah-langkah yang dilakukan untuk menentukan fungsi alih dengan membangkitkan sinyal PRBS adalah sebagai berikut:

1. Mencari nilai yang linier dari hasil kecepatan motor terhadap duty cycle PWM.
2. Memasukkan nilai batas atas dan batas bawah berdasarkan nilai yang linier untuk membangkitkan sinyal PRBS.
3. Sinyal PRBS yang telah dibangkitkan kemudian digunakan sebagai masukan motor DC.
4. Setelah didapatkan data sinyal PRBS dan data kecepatan motor DC, selanjutnya adalah melakukan identifikasi dengan menggunakan software matlab seperti pada gambar 3.5.



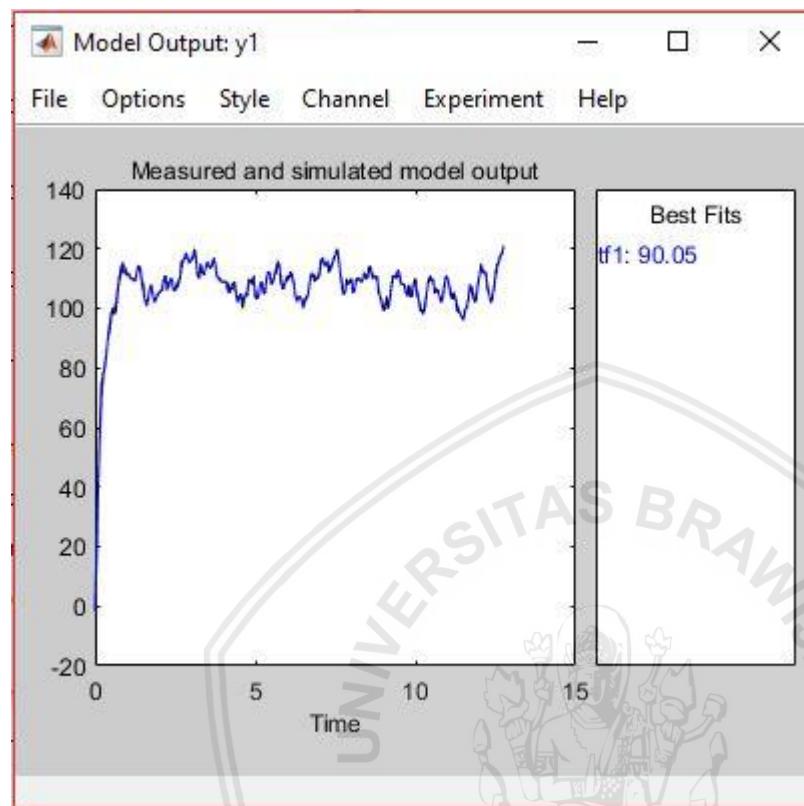
Gambar 3.5 Sinyal masukan PRBS dan keluaran motor DC

- Dengan menggunakan *syntax* ident pada *command window* matlab, data sinyal PRBS dan data kecepatan motor DC yang telah disimpan kemudian di-*import* pada block *System Identification Toolbox* seperti pada gambar 3.6.

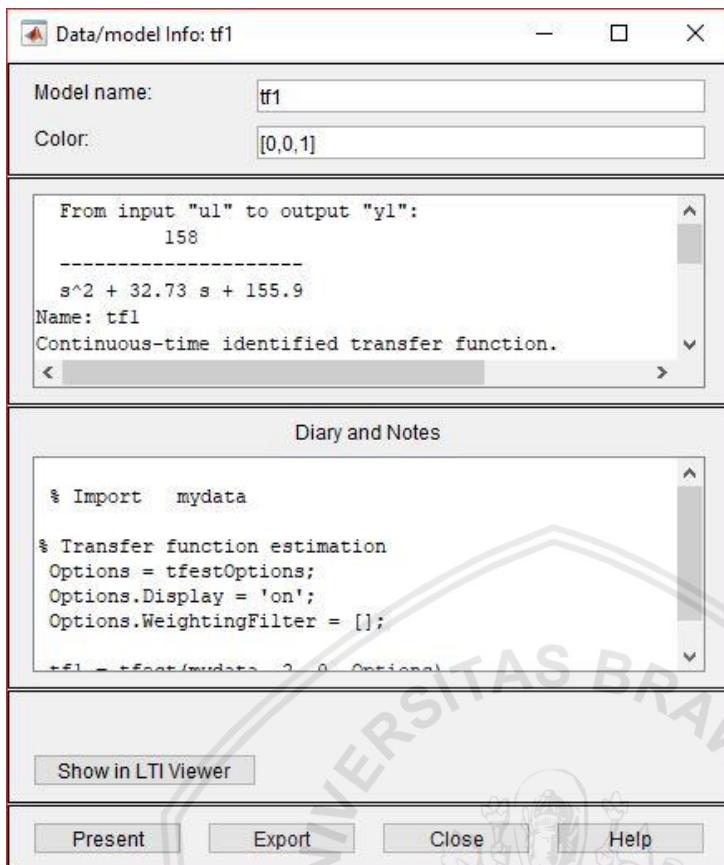


Gambar 3.6 System identification toolbox

6. Setelah melakukan beberapa estimasi model berdasarkan data yang telah di-*import*, didapatkan fungsi alih dari motor DC dengan *best fits* sebesar 90.05% seperti pada gambar 3.7 dan gambar 3.8.



Gambar 3.7 Hasil estimasi model

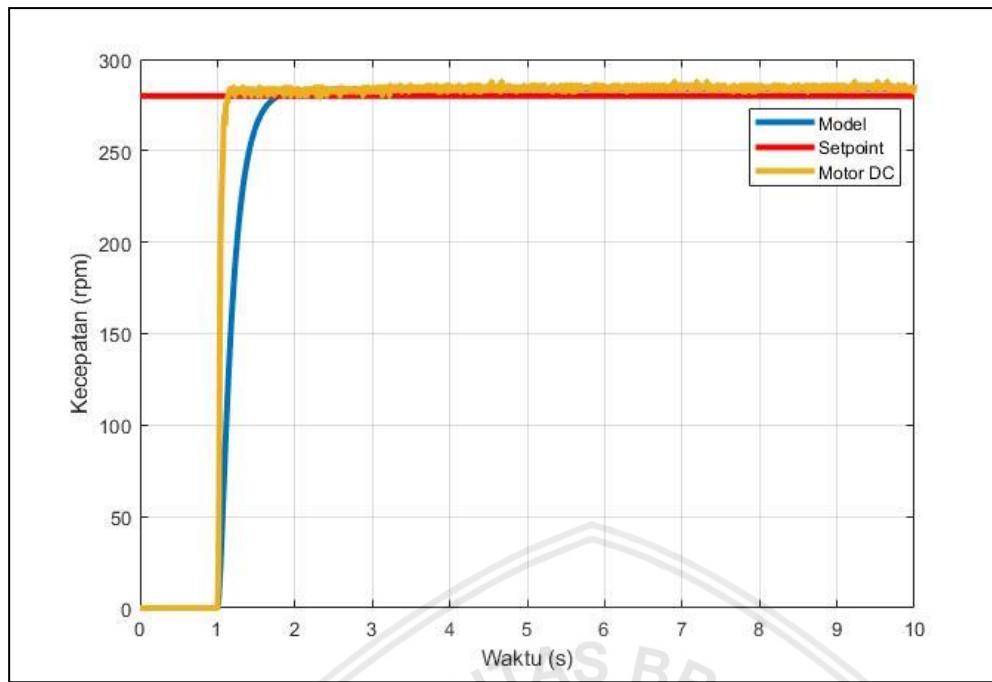


Gambar 3.8 Model *continuous* fungsi alih motor DC

7. Dari hasil identifikasi, fungsi alih motor DC yang didapat adalah:

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{U(s)} = \frac{158}{s^2 + 32.73 s + 155.9} \quad (3-1)$$

Setelah didapatkan fungsi alih maka fungsi alih harus divalidasi karena suatu fungsi alih dapat dikatakan mewakili *plant* apabila *output* fungsi alih yang diperoleh dari proses identifikasi hamper menyerupai *output* dari *plant*. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan nilai *output* fungsi alih dan nilai dari kecepatan motor DC dari pembacaan sensor kecepatan yaitu *rotary encoder* sebagai proses validasi. Proses ini dilakukan dengan memberikan masukkan *unit step* pwm 100% yaitu kecepatan sebesar 280 rpm. Grafik dari *output* motor DC ditunjukkan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Validasi fungsi alih motor DC

Fungsi alih motor DC yang didapatkan masih berupa kecepatan motor, dalam penelitian ini pengontrolan sistem secara keseluruhan adalah pengontrolan posisi dari putaran motor DC sehingga fungsi alih yang sudah didapatkan perlu dikalikan dengan integrator dengan gain sama dengan 1 sehingga didapatkan fungsi sebagai berikut.

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{U(s)} = \frac{158}{s^2 + 32.73 s + 155.9} \times \frac{1}{s}$$

Atau sama dengan

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{158}{s^3 + 32.73 s^2 + 155.9 s} \quad (3-2)$$

Namun fungsi alih diatas masih belum bisa digunakan karena keluaran plant masih berupa posisi motor DC dalam bentuk sudut sedangkan pada penelitian ini posisi yang diharapkan adalah dalam cm. Untuk mengkonversi gerak rotasi kedalam gerak translasi maka fungsi alih yang didapatkan sebelumnya harus dikali dengan $\frac{2\pi r}{360}$.

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{158}{s^3 + 32.73 s^2 + 155.9 s} \times \frac{2\pi r}{360}$$

Dengan nilai r (*jari-jari*) sama dengan 1.05 cm.

Sehingga fungsi alih yang didapatkan adalah:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{2.9855}{s^3 + 32.73 s^2 + 155.9 s} \quad (3-3)$$

3.7. Penentuan Parameter Kontroler PI dengan Metode *Root Locus*

Metode *root locus* atau letak kedudukan akar digunakan untuk meneliti perilaku sistem dengan parameter sistem berubah pada lingkup tertentu. Rancangan dimaksudkan agar letak pole dan zero dari fungsi alih loop tertutup terletak pada daerah yang ditentukan. Agar sistem stabil maka pole dan zero harus terletak pada bidang s di sebelah kiri sumbu imajiner. Untuk memenuhi tujuan performansi sistem yang diinginkan, maka perlu ditambahkan kontroler pada sistem tersebut. Kontroler yang digunakan adalah kontroler proporsional integral (PI).

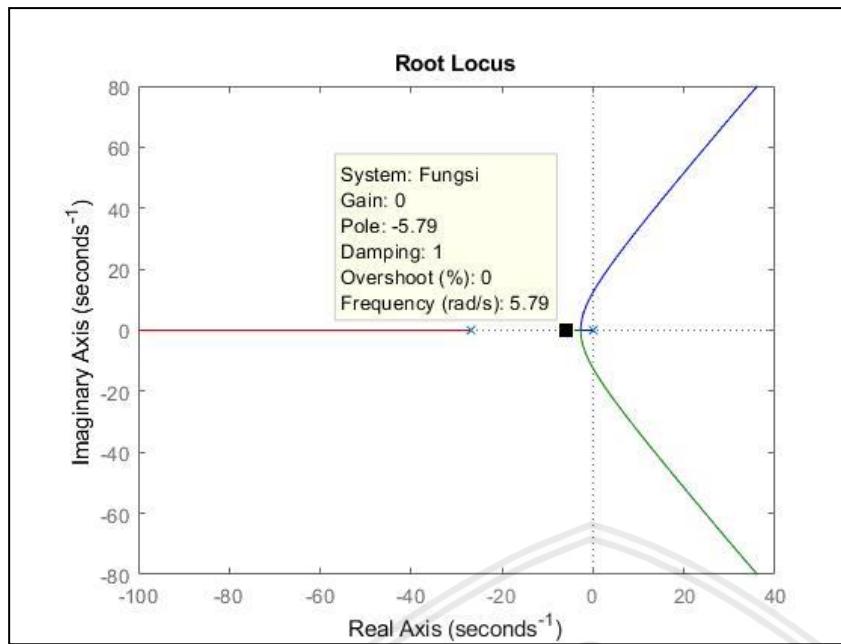
Langkah-langkah dalam penentuan parameter kontroler dengan metoder root locus adalah sebagai berikut:

1. Mencari fungsi alih sistem, pada penelitian ini digunakan identifikasi dengan membangkitkan sinyal PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*).
2. Setelah didapatkan fungsi alih, maka diperiksa kestabilannya dengan Root Locus yang ada pada Matlab. Fungsi alih yang stabil adalah fungsi alih yang nilai akar s nya terdapat pada sebelah kiri sumbu imajiner.
3. Menentukan letak pole s_1 sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan sebelumnya.
4. Setelah itu mencari nilai parameter K_p dan K_i pada Matlab dengan mensubtitusi nilai s_1 dan nilai fungsi alih sistem dalam persamaan (3-3).
5. Untuk mendapatkan nilai parameter K_p dan K_i , maka variasikan terlebih dahulu nilai parameter K_i kemudian akan didapatkan nilai dari parameter K_p yang dilakukan pada program matlab.

Setelah didapatkan fungsi alih sistem yaitu:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{2.9855}{s^3 + 32.73 s^2 + 155.9 s}$$

Maka selanjutnya adalah mentukan letak pole loop tertutup. Penentuan letak pole pada Root Locus harus sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan. Pada penelitian ini spesifikasi desain yang ditentukan adalah *settling time* kurang dari 2 detik, *overshoot* kurang dari 5% serta rasio redaman sama dengan 1. Pada penelitian ini digunakan nilai $s_1 = -5.79$. Penentuan letak pole Root Locus dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Letak pole pada diagram root locus

Setelah ditentukan letak pole yang diinginkan maka selanjutnya mensubstitusi nilai pole s_1 dan nilai fungsi alih sistem pada persamaan (3-1) dan memvariasikan nilai K_i , maka akan didapatkan nilai dari parameter PI pada Tabel 3.4. Pencarian parameter K_p dan K_i dengan menggunakan Matlab ditunjukkan pada listing program bertikut.

```

clc
s1 = -5.79;
KI = [5 5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5];
plant_num = [0 0 0 2.9855];
plant_den = [1 32.73 155.9 0];
s1mag = abs(s1);
beta = angle(s1);
plant_a1 = polyval(plant_num,s1)/polyval(plant_den,s1);
plants1mag = abs(plant_a1);
psi = angle(plant_a1);
t = 0:1:20:300;
for k = 1:10
    KP(k) = -s1mag/(plants1mag*cos(beta))-KI(k)*cos(beta)/s1mag;
    Nilai_KI = KI(k);
    Gcnum = [KP KI(k)];
    Gcden = [0 1];
    hold on
end
hold off

```

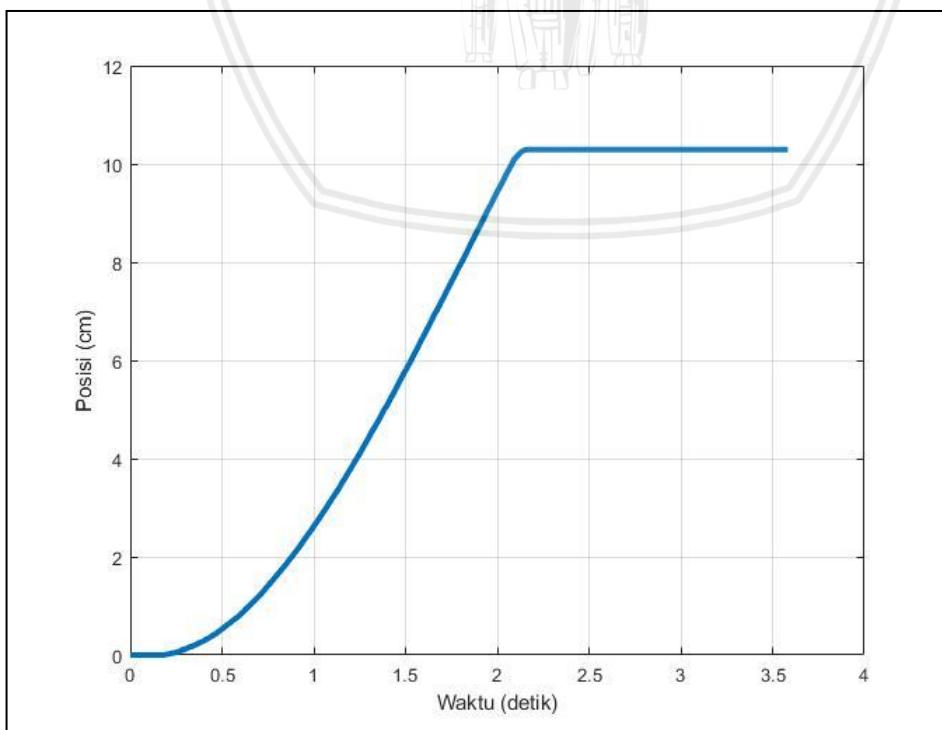
Hasil pencarian parameter K_p dan K_i dari perhitungan pada program diatas ditunjukkan dalam Tabel 3.4.

Tabel 3.4

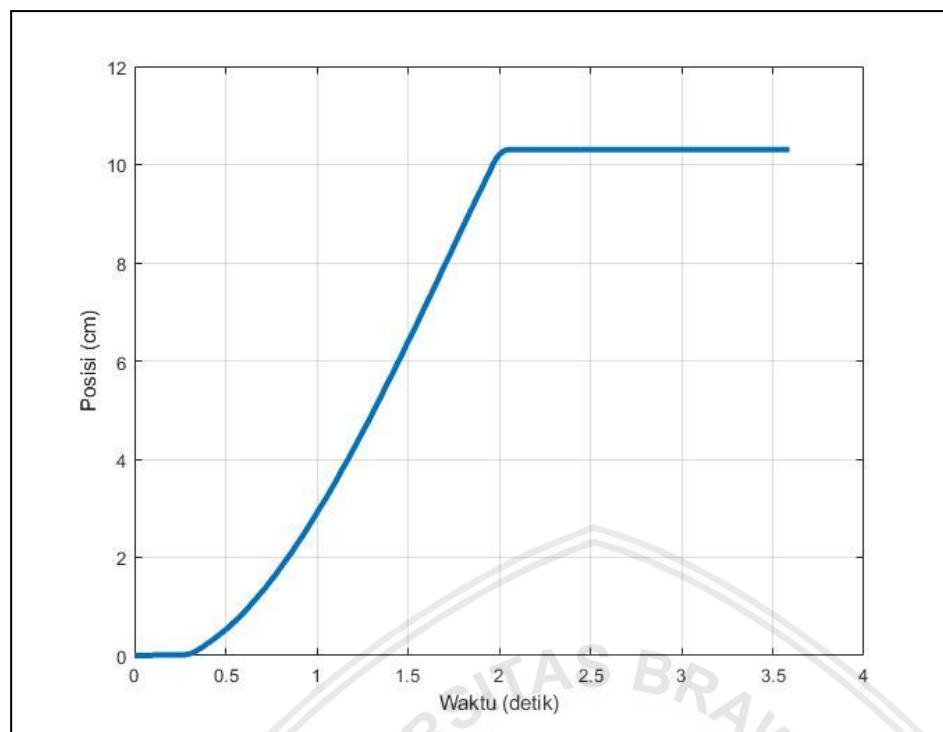
Nilai Parameter K_p dan K_i

K_p	K_i
1,7911	5
1,8774	5,5
1,9638	6
2,0501	6,5
2,1365	7
2,2228	7,5
2,3092	8
2,3956	8,5
2,4819	9
2,5683	9,5

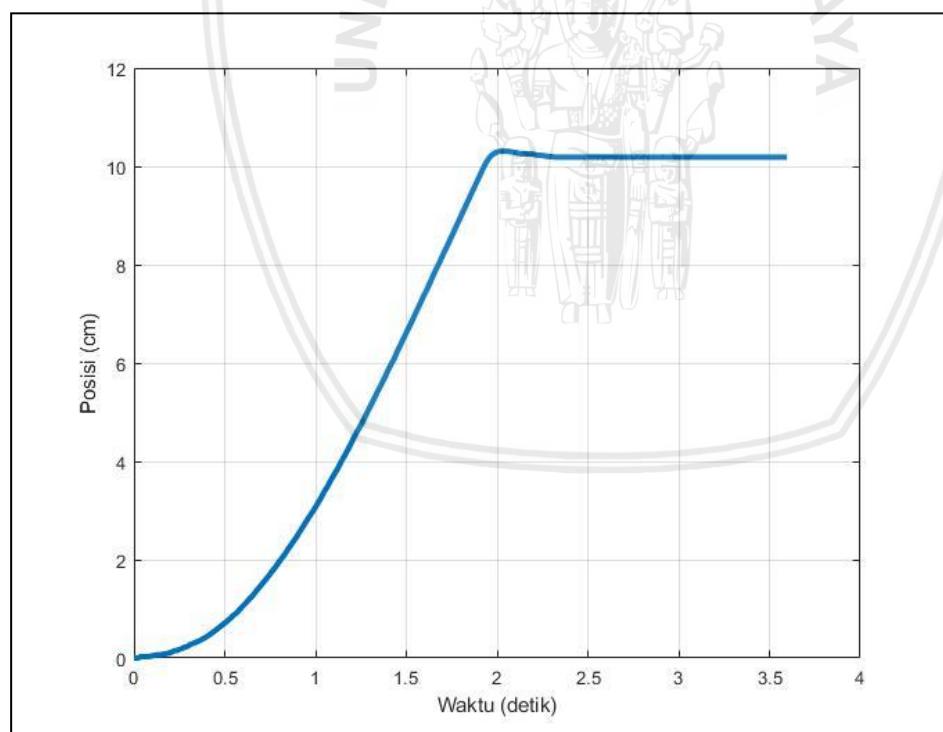
Setelah didapatkan nilai parameter K_p dan K_i dari hasil perhitungan kemudian dilakukan pengujian terhadap sistem untuk mencari nilai parameter yang sesuai dengan sistem. Gambar 3.11 s.d. Gambar 3.20 adalah respon sistem dengan nilai parameter K_p dan K_i pada Tabel 3.4.



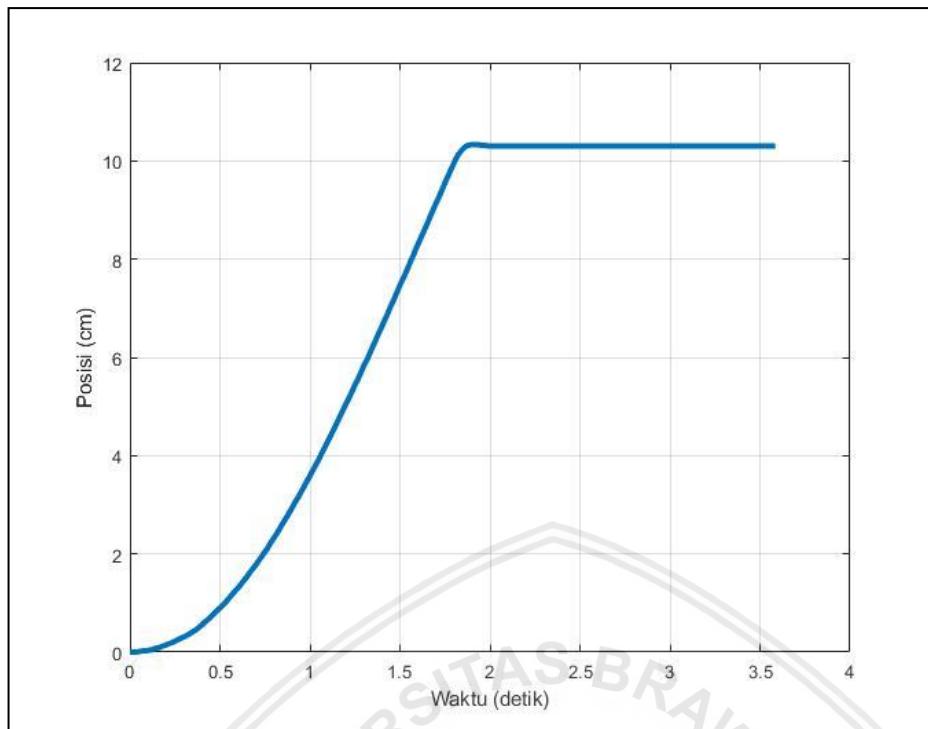
Gambar 3.11 Respon sistem dengan nilai K_p 1,7911 dan K_i 5



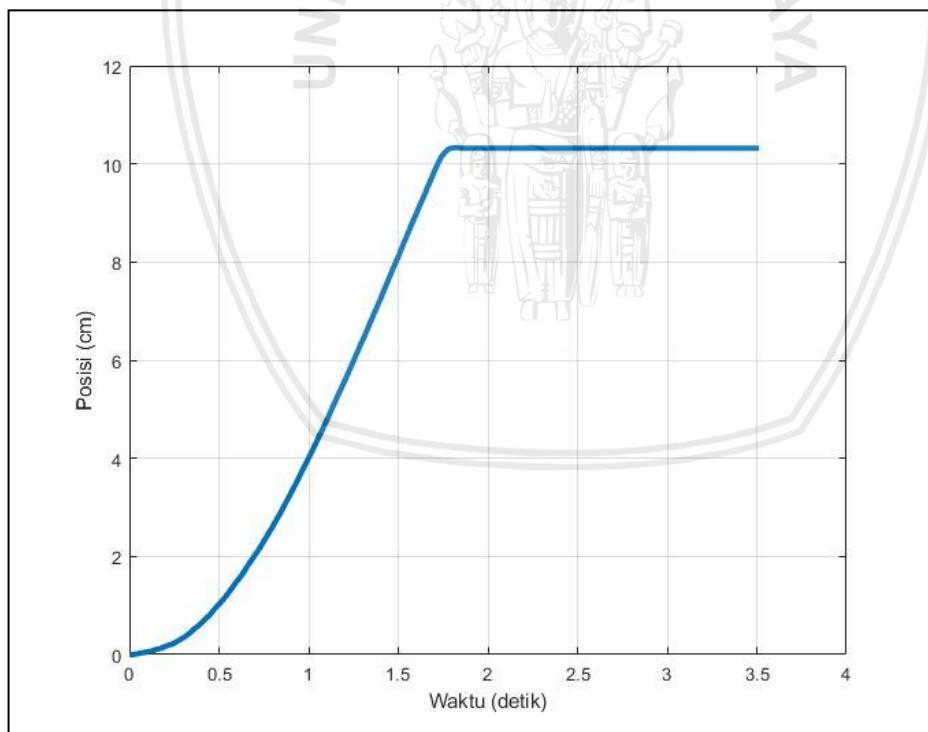
Gambar 3.12 Respon sistem dengan nilai K_p 1,8774 dan K_i 5,5



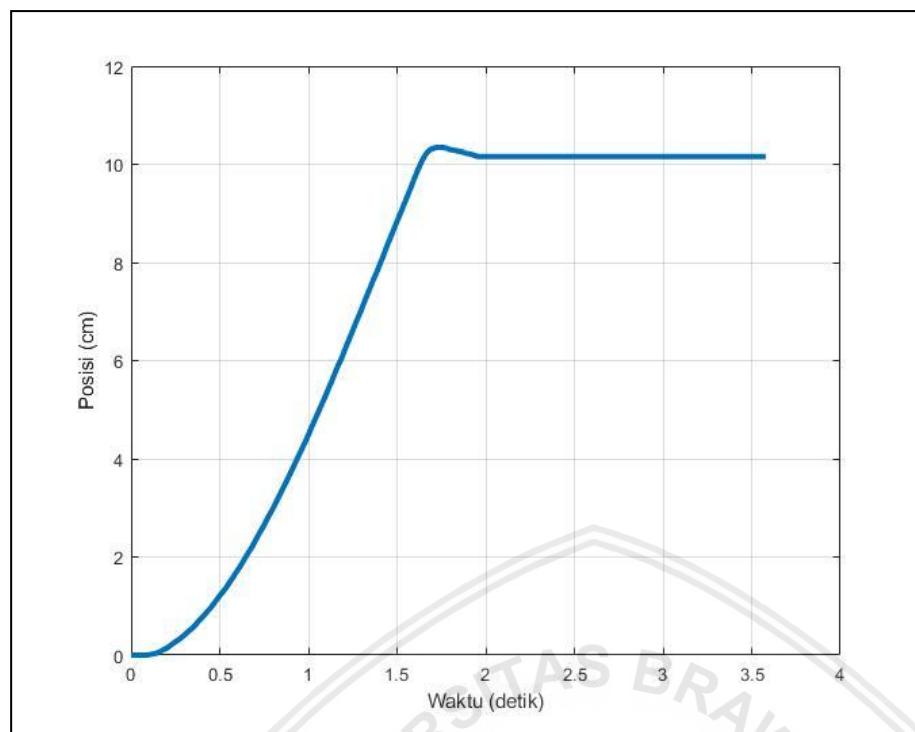
Gambar 3.13 Respon sistem dengan nilai K_p 1,9638 dan K_i 6



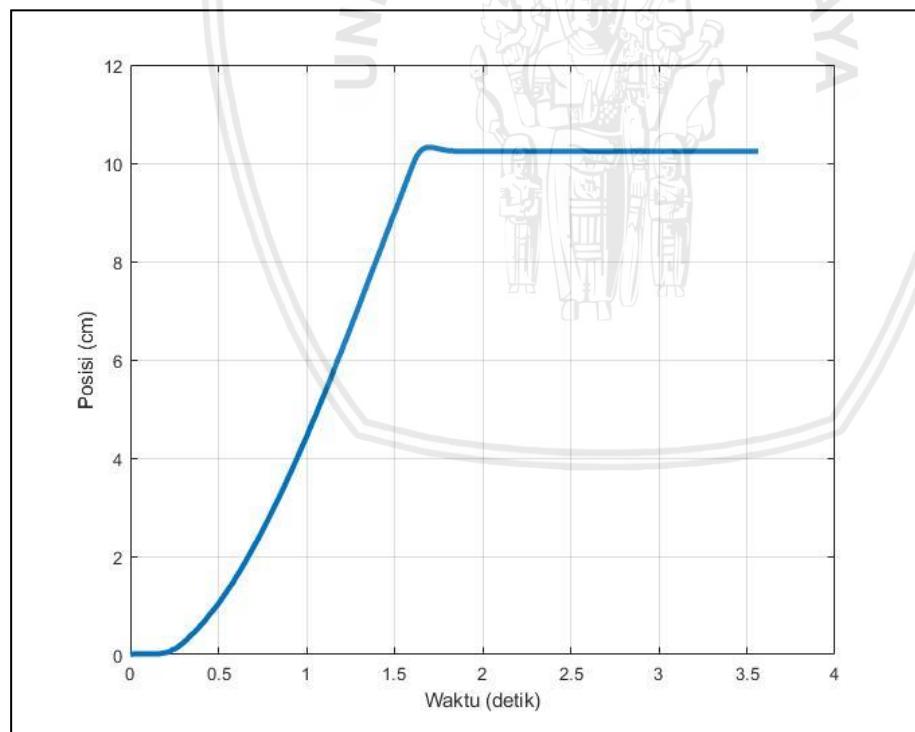
Gambar 3.14 Respon sistem dengan nilai K_p 2,0501 dan K_i 6,5



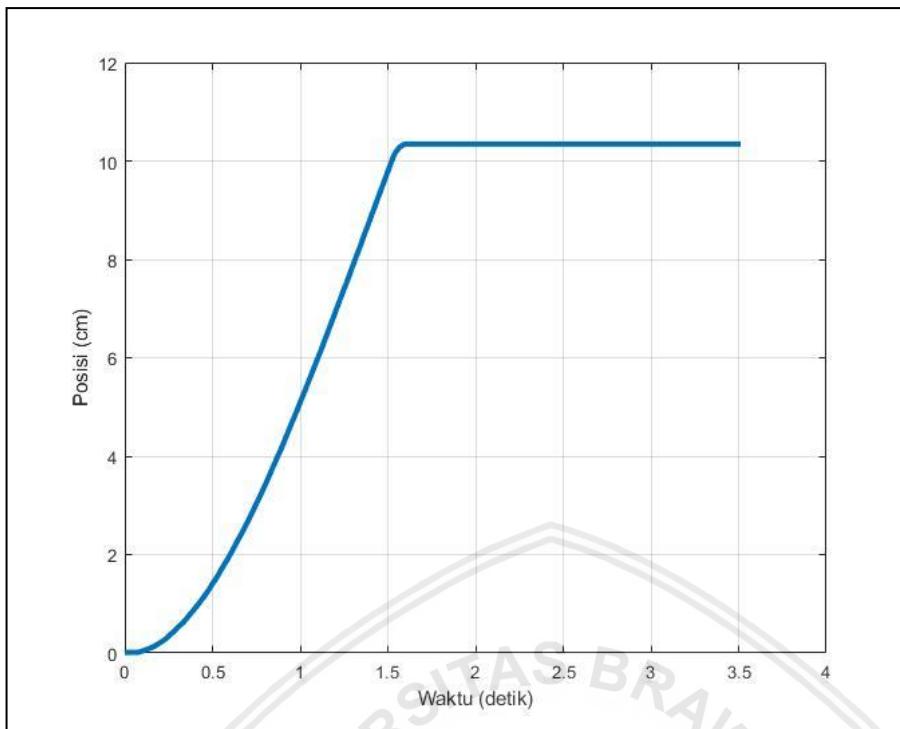
Gambar 3.15 Respon sistem dengan nilai K_p 2,1365 dan K_i 7



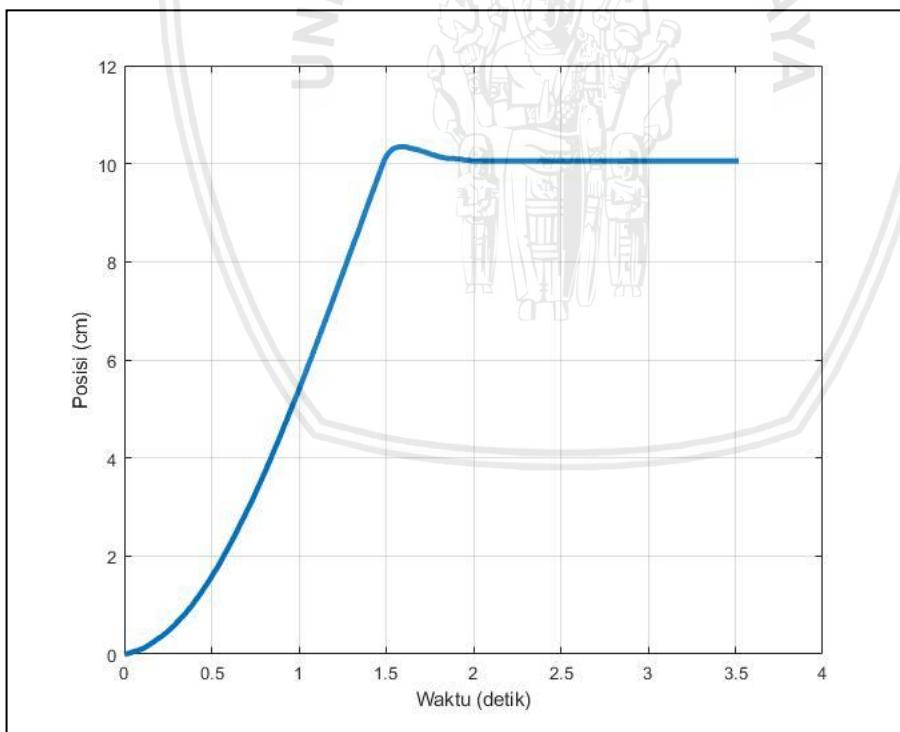
Gambar 3.16 Respon sistem dengan nilai K_p 2,2228 dan K_i 7,5



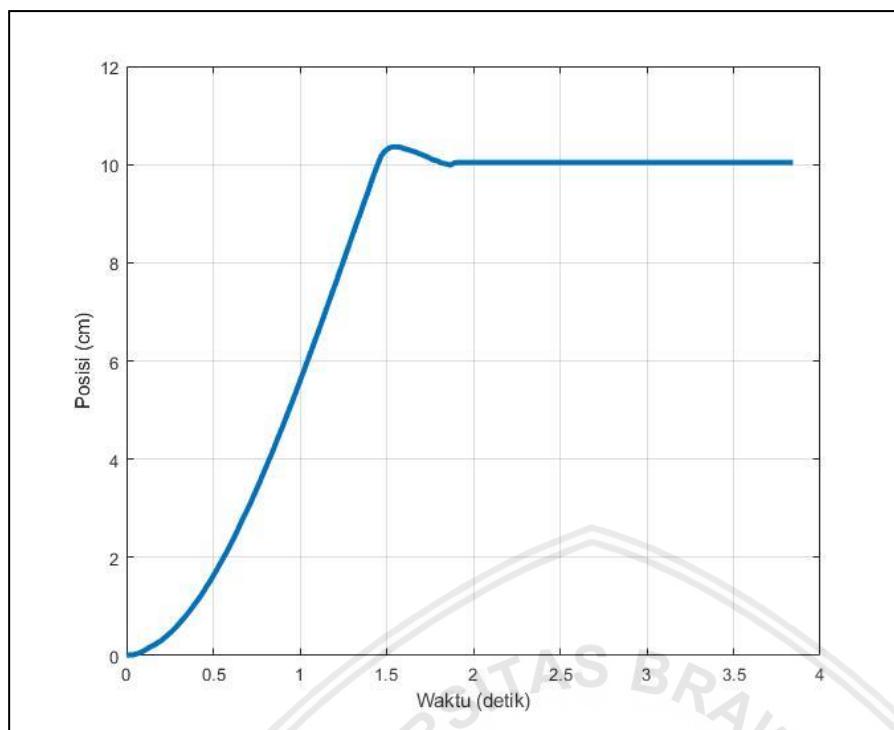
Gambar 3.17 Respon sistem dengan nilai K_p 2,3092 dan K_i 8



Gambar 3.18 Respon sistem dengan nilai K_p 2,3956 dan K_i 8,5



Gambar 3.19 Respon sistem dengan nilai K_p 2,4819 dan K_i 9



Gambar 3.20 Respon sistem dengan nilai K_p 2,5683 dan K_i 9,5

Data pengujian parameter kontroler ditunjukkan pada dalam Tabel 3.5.

Tabel 3.5

Data Pengujian Parameter Kontroler

K_p	K_i	t_s (detik)	e_{ss} (%)	overshoot (%)
1,7911	5	2,026	2,91	0
1,8774	5,5	1,916	3,05	0
1,9638	6	1,872	1,86	1,17
2,0501	6,5	1,764	3,05	0,29
2,1365	7	1,670	3,18	0,19
2,2228	7,5	1,591	1,59	1,87
2,3092	8	1,538	2,39	0,78
2,3956	8,5	1,522	3,44	0
2,4819	9	1,486	0,41	3,05
2,5683	9,5	1,450	0,54	2,88

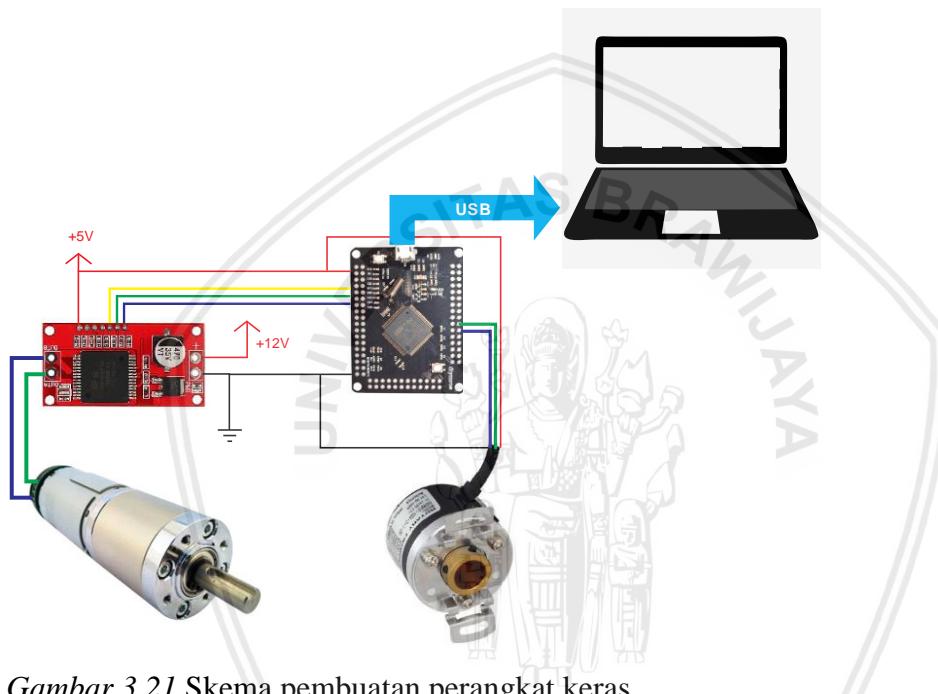
Berdasarkan data pengujian nilai parameter kontroler pada Tabel 3.5 maka digunakan nilai K_p 2,4819 dan K_i 9 karena memiliki respon terbaik dan memiliki nilai error steady state (e_{ss}) yang paling kecil.

3.8. Pembuatan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu sistem beserta pemrogramannya. Hal ini dimaksudkan agar sistem pengontrolan posisi motor DC pada linear slide actuator robot divisi KRAI dengan menggunakan kontroler PI dapat bekerja sesuai dengan deskripsi awal yang telah direncanakan.

Pembuatan perangkat keras yang dilakukan pada penelitian ini meliputi:

- Skema pembuatan perangkat keras seperti pada gambar 3.21



Gambar 3.21 Skema pembuatan perangkat keras

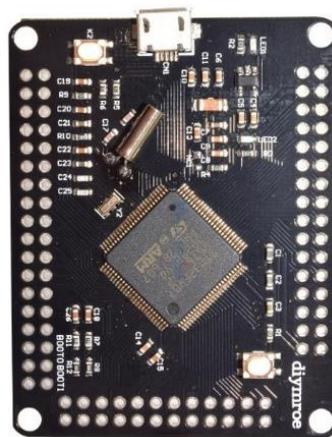
- Penentuan modul elektronik yang digunakan

1. Baterai LiPo 3S digunakan sebagai catu daya driver motor



Gambar 3.22 Baterai LiPo 3S

2. Mikrokontroler STM32F407 sebagai perangkat kontroler



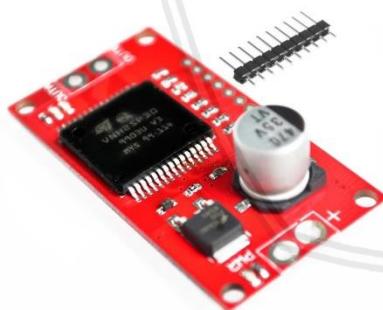
Gambar 3.23 Mikrokontroler STM32F407

3. Sensor *rotary encoder* sebagai pembaca posisi



Gambar 3.24 Sensor *rotary encoder*

4. Driver motor VNH2SP30 untuk menggerakkan motor



Gambar 3.25 Driver motor VNH2SP30

5. Motor DC planetary gearbox



Gambar 3.26 Motor DC planetary gearbox

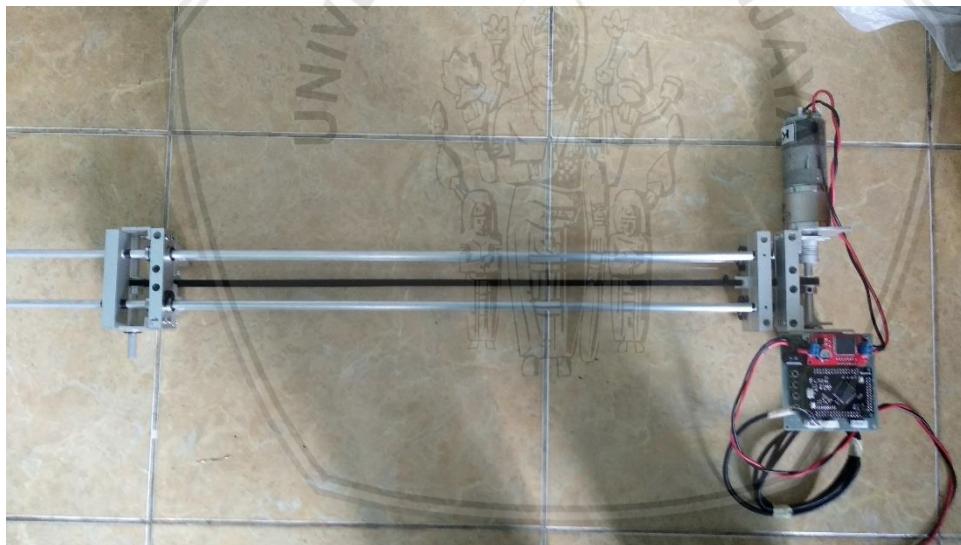
6. PC atau komputer yang sudah terinstall CoIDE, STMStudio dan Matlab



Gambar 3.27 PC atau komputer

3.8.1. Foto Alat

Bentuk fisik dari alat yang dibuat seperti ditunjukkan pada gambar 3.28 dan gambar 3.29.



Gambar 3.28 Foto alat tampak atas



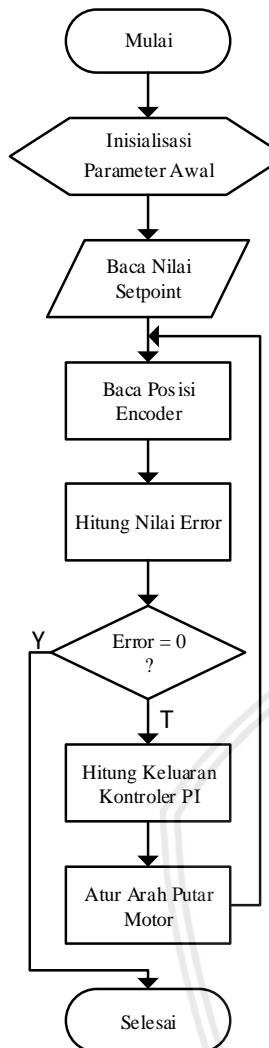
Gambar 3.29 Foto alat tampak samping

3.8.2. Prinsip Kerja Sistem

1. LiPo 3S sebagai catu daya driver motor DC dengan tegangan 12V
2. Catu daya mikrokontroler STM32F407 diambil dari PC dengan menghubungkan pada port USB
3. Pada shaft motor DC dan shaft depan diberi pulley dengan diameter 2,1 cm sebagai tempat belt bergerak.
4. Perpanjangan digerakkan oleh belt yang dikopel dengan motor DC
5. Pembacaan posisi menggunakan rotary encoder yang dikopel dengan shaft pada motor DC
6. Motor DC akan bergerak sesuai dengan posisi atau nilai setpoint yang diberikan
7. Keluaran kontroler PI pada mikrokontroler berupa sinyal PWM yang dihubungkan dengan driver motor
8. Hasil keluaran sinyal PWM dari mikrokontroler digunakan untuk menggerakan motor DC
9. Jika posisi motor DC kurang dari setpoint yang diberikan maka motor DC akan berputar searah dengan jarum jam dan sebaliknya

3.9. Perancangan Algoritma Sistem

Perancangan algoritma sistem berkaitan dengan *flowchart* program yang akan diimplementasikan ke *microcontroller* STM32F407. Gambar 3.30 adalah *flowchart* sistem secara keseluruhan.



Gambar 3.30 Flowchart algoritma program

3.10. Perancangan Pengujian Sistem

Perancangan pengujian pada penelitian ini meliputi:

a. Pengujian Sensor Posisi (*Rotary Encoder*)

Prosedur pengujian sensor posisi (*rotary encoder*) adalah sebagai berikut:

1. Alat dirangkai seperti pada gambar 3.21
2. Perpanjangan diukur menggunakan penggaris
3. Hasil dari pembacaan sensor dilihat pada *software STMStudio*
4. Hasil pengukuran sebenarnya dengan pembacaan sensor dicatat pada Tabel 4.1

b. Pengujian Sistem Tanpa Beban

Prosedur pengujian sistem tanpa beban adalah sebagai berikut:

1. Alat dirangkai seperti pada gambar 3.21
2. Nilai parameter kontroler diatur $K_p = 2,4819$ dan $K_i = 9$

3. Setpoint yang digunakan adalah 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm dan 40 cm
 4. Nilai *settling time* (t_s), *error steady state* (e_{ss}) dan *overshoot* dari data log *software STMStudio* dihitung
 5. Hasil perhitungan dicatat pada Tabel 4.2
- c. Pengujian Sistem Berbeban
- Prosedur pengujian sistem berbeban adalah sebagai berikut:
1. Alat dirangkai seperti pada gambar 3.21
 2. Nilai parameter kontroler diatur $K_p = 2,4819$ dan $K_i = 9$
 3. Pada ujung dari alat diberi beban sebesar 500 gr
 4. Setpoint yang digunakan adalah 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm dan 40 cm
 5. Nilai *settling time* (t_s), *error steady state* (e_{ss}) dan *overshoot* dari data log *software STMStudio* dihitung
 6. Hasil perhitungan dicatat pada Tabel 4.2
- d. Pengujian Sistem dengan Variasi Beban
1. Alat dirangkai seperti pada gambar 3.21
 2. Nilai parameter kontroler diatur $K_p = 2,4819$ dan $K_i = 9$
 3. Pada ujung dari alat diberi beban sebesar 1000 gr dan 1500 gr
 4. Setpoint yang digunakan adalah 20 cm
 5. Nilai *settling time* (t_s), *error steady state* (e_{ss}) dan *overshoot* dari data log *software STMStudio* dihitung
 6. Hasil perhitungan dicatat pada Tabel 4.3
- e. Pengujian Sifat Reversibel Sistem

Prosedur pengujian sifat reversibel sistem adalah sebagai berikut:

1. Alat dirangkai seperti pada gambar 3.21
2. Nilai parameter kontroler diatur $K_p = 2,4819$ dan $K_i = 9$
3. Sistem diberi nilai setpoint 20 cm dan ketika respon sudah dalam keadaan *steady state*, sistem diberikan nilai setpoint 0 cm.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dilakukan pengujian dan analisis sistem setiap blok maupun secara keseluruhan. Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan perancangan yang telah ditentukan. Pengujian setiap blok dilakukan untuk menemukan letak kesalahan dan untuk mempermudah dalam melakukan analisis pada sistem apabila tidak bekerja sesuai dengan perancangan. Pengujian pada sistem dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Pengujian sensor posisi (*rotary encoder*)
2. Pengujian sistem tanpa beban
3. Pengujian sistem berbeban
4. Pengujian sistem dengan variasi beban
5. Pengujian sifat reversibel sistem

4.1. Pengujian Sensor Posisi (*Rotary Encoder*)

Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan pengukuran sebenarnya terhadap pembacaan sensor posisi (*rotary encoder*). Prosedur pada pengujian ini terdapat pada bab 3.10.

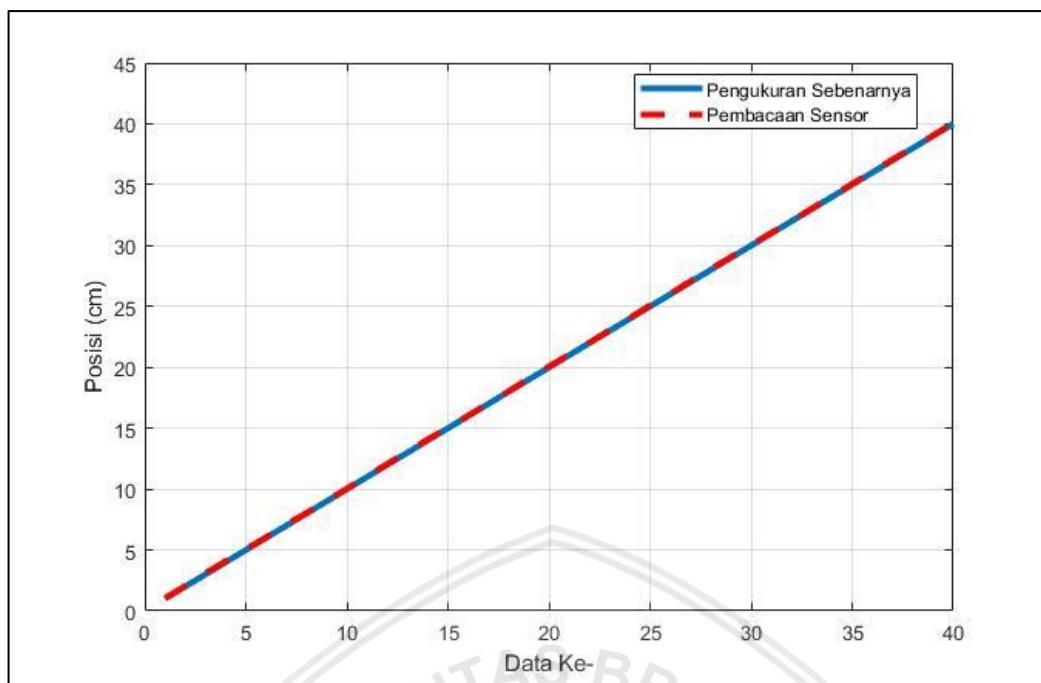
Setelah dilakukan pengujian terhadap sensor posisi (*rotary encoder*), didapatkan hasil seperti dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1
Data Pengujian Sensor Posisi (*Rotary Encoder*)

Jarak Sebenarnya (cm)	Pembacaan Sensor (Pulsa)	Konversi (cm)	Jarak Sebenarnya (cm)	Pembacaan Sensor (Pulsa)	Konversi (cm)
1	79	1,042	21	1594	21,033
2	155	2,045	22	1670	22,035
3	234	3,087	23	1747	23,029
4	309	4,077	24	1821	24,027
5	384	5,066	25	1901	25,083
6	458	6,043	26	1974	26,045
7	537	7,085	27	2051	27,062
8	608	8,022	28	2126	28,052
9	686	9,051	29	2202	29,055
10	760	10,027	30	2279	30,071
11	836	11,030	31	2352	31,040
12	915	12,073	32	2427	32,024
13	989	13,049	33	2505	33,053
14	1067	14,078	34	2580	34,042
15	1141	15,055	35	2657	35,058
16	1215	16,031	36	2733	36,061
17	1291	17,034	37	2809	37,063
18	1366	18,023	38	2883	38,041
19	1445	19,066	39	2958	39,030
20	1521	20,069	40	3038	40,086

Grafik pengujian sensor posisi (*rotary encoder*) ditunjukkan pada gambar

4.1.



Gambar 4.1 Grafik pengujian sensor posisi (*rotary encoder*)

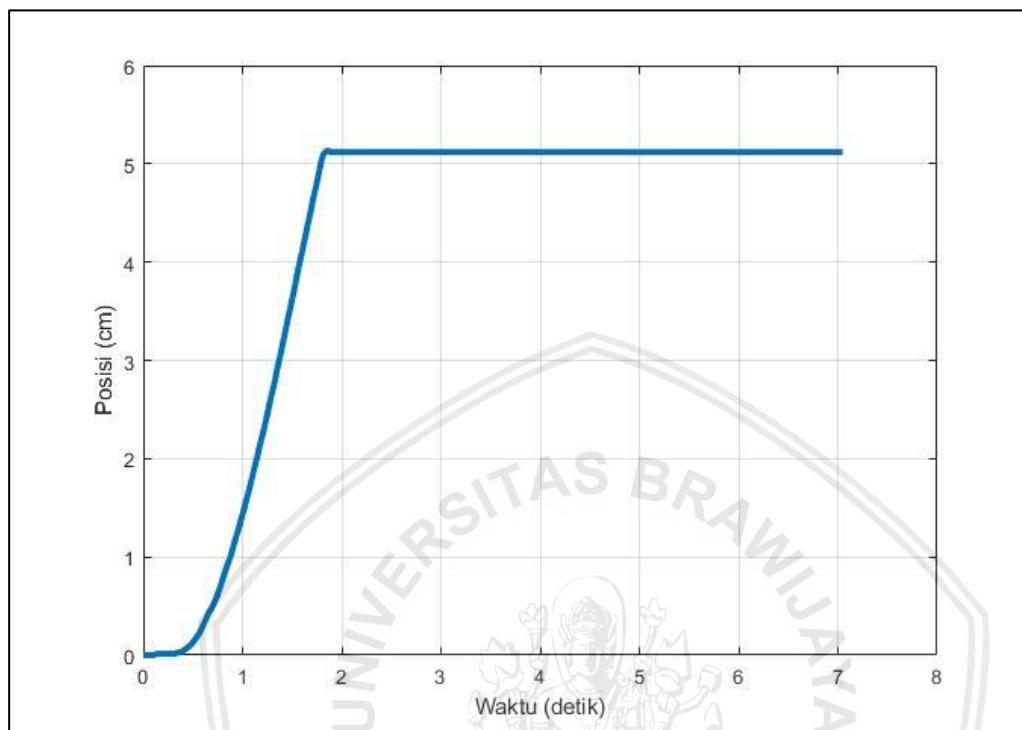
Berdasarkan data hasil pengujian pada sensor posisi (*rotary encoder*) didapatkan selisih antara pembacaan sensor dengan pengukuran sebenarnya sebesar kurang dari 0.1 cm. Dapat dikatakan bahwa pembacaan sensor hampir menyerupai hasil pengukuran sebenarnya.

4.2. Pengujian Sistem Tanpa Beban

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performansi sistem ketika tidak diberi beban. Prosedur pada pengujian ini terdapat pada bab 3.10.

4.2.1. Pengujian Dengan *Setpoint* 5 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 5 cm ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 5 cm

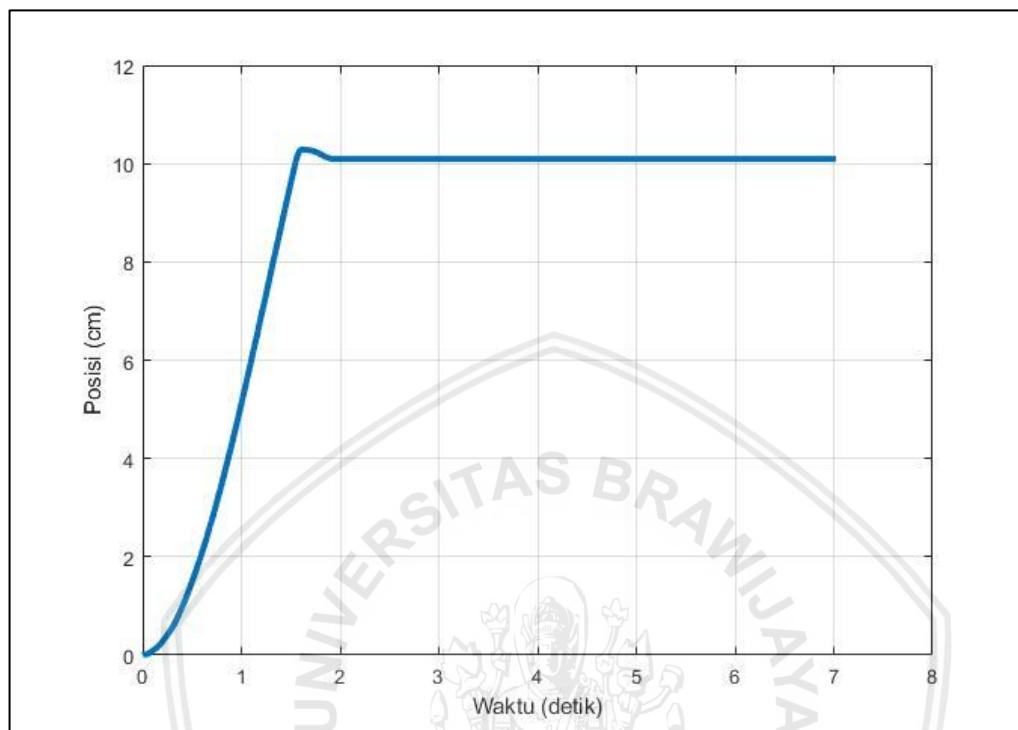
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.2 didapatkan nilai settling time sebesar 1,854 detik, *overshoot* 0,39% dan *error steady state* 2,2%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|5,11 - 5|}{5} \times 100 \% \\ = 2,2 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{5,13 - 5,11}{5,11} \times 100 \% \\ = 0,39 \%$$

4.2.2. Pengujian dengan Setpoint 10 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 10 cm ditunjukkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 10 cm

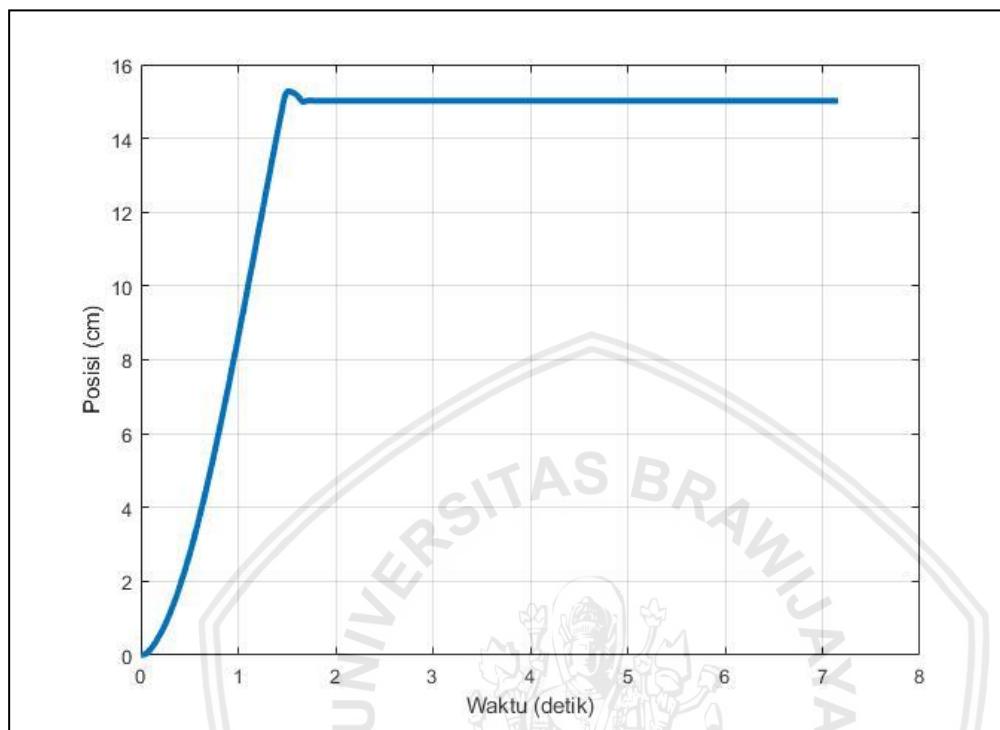
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.3 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,68 detik, *overshoot* 1,9 % dan *error steady state* 0,9 %.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|10,09 - 10|}{10} \times 100 \% \\ = 0,9 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{10,29 - 10,09}{10,09} \times 100 \% \\ = 1,9 \%$$

4.2.3. Pengujian dengan Setpoint 15 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 15 cm ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.1 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 15 cm

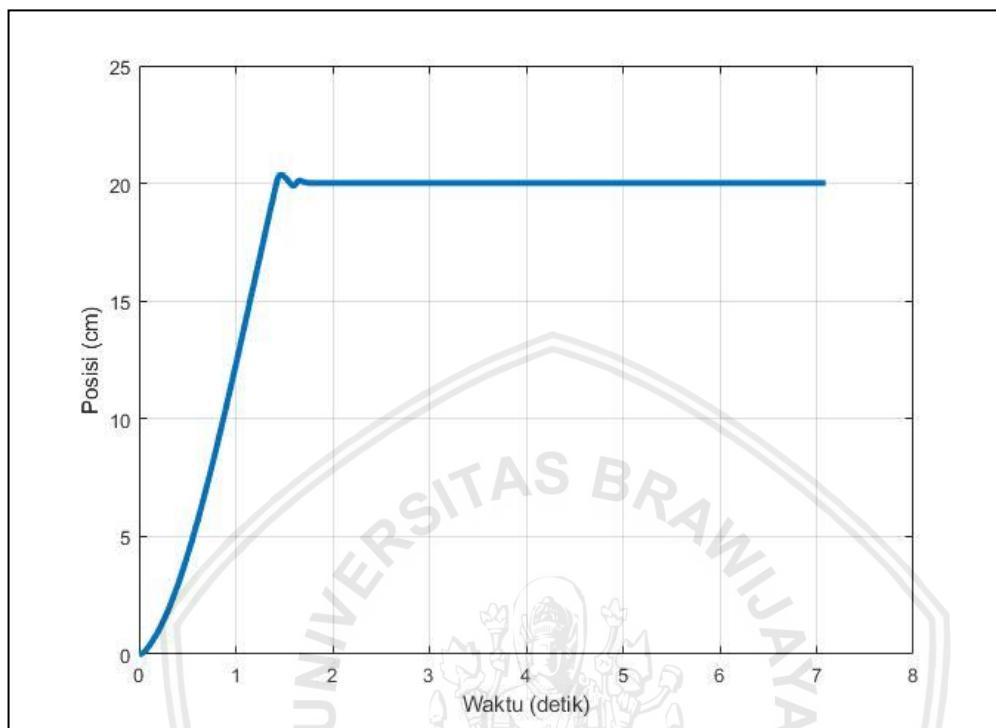
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.4 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,669 detik, *error steady state* 0,66% dan *overshoot* 1,73%.

$$\text{ess (\%)} = \frac{|15,01 - 15|}{15} \times 100 \% \\ = 0,66 \%$$

$$\text{overshoot (\%)} = \frac{15,27 - 15,01}{15,01} \times 100 \% \\ = 1,73 \%$$

4.2.4. Pengujian dengan Setpoint 20 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 20 cm ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.2 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 20 cm

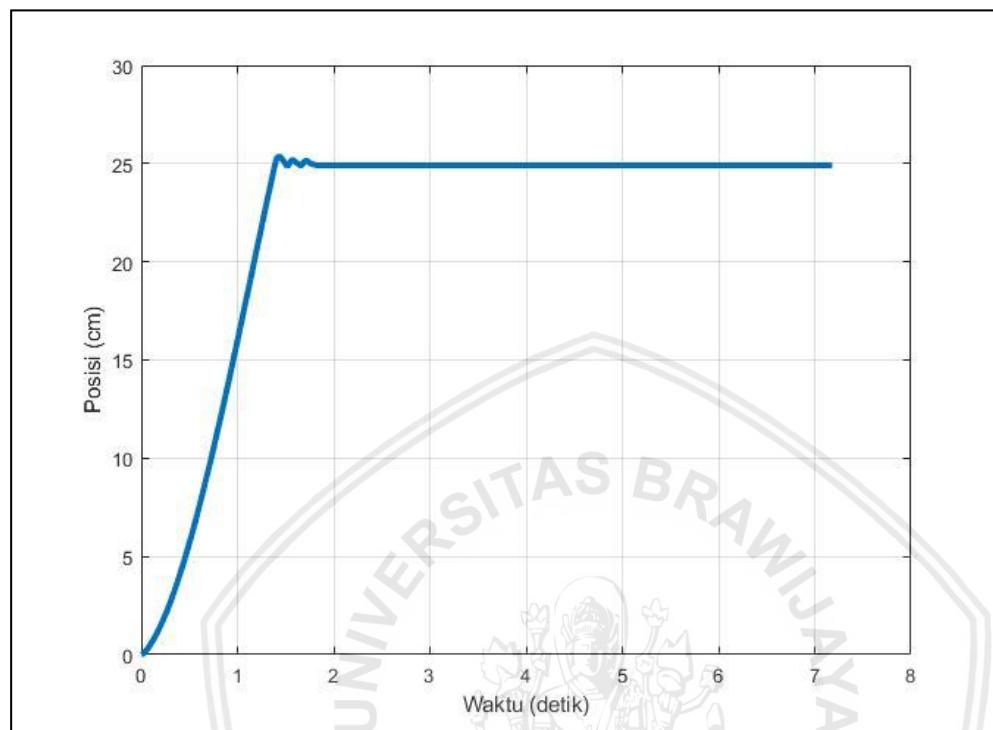
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.5 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,651 detik, *error steady state* 0,05% dan *overshoot* 1,79%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|20,01 - 20|}{20} \times 100 \% \\ = 0,05 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{20,37 - 20,01}{20,01} \times 100 \% \\ = 1,79 \%$$

4.2.5. Pengujian dengan Setpoint 25 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 25 cm ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.3 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 25 cm

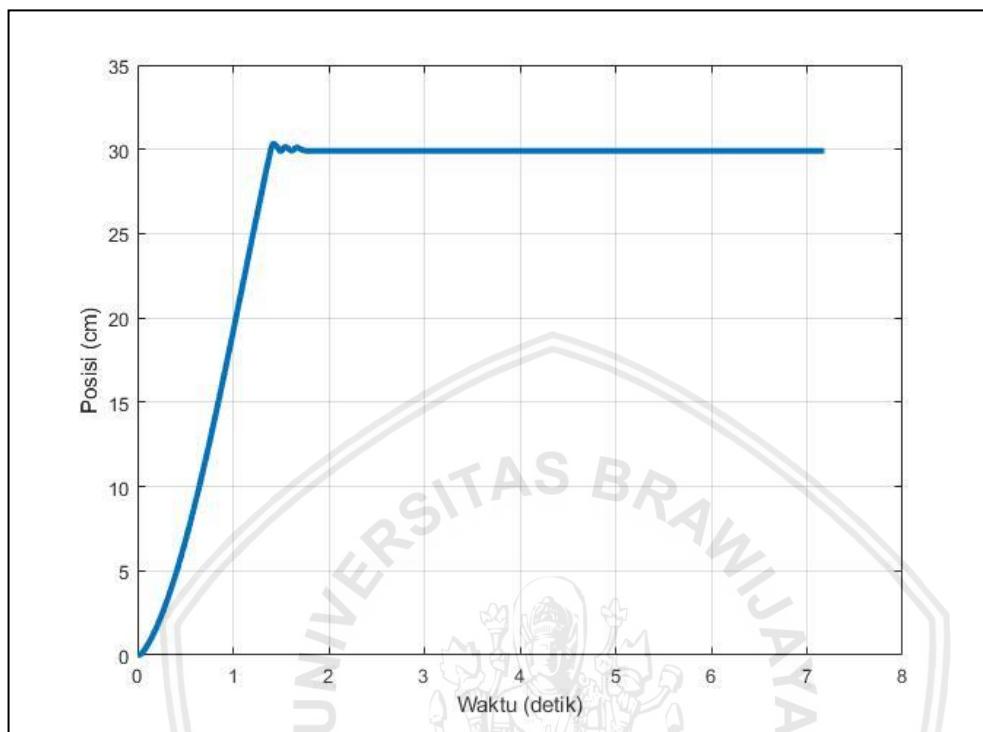
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.6 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,646 detik, *error steady state* 0,26% dan *overshoot* 1,8%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|24,91 - 25|}{25} \times 100 \% \\ = 0,26 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{25,36 - 24,91}{24,91} \times 100 \% \\ = 1,8 \%$$

4.2.6. Pengujian dengan Setpoint 30 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 30 cm ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.4 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 30 cm

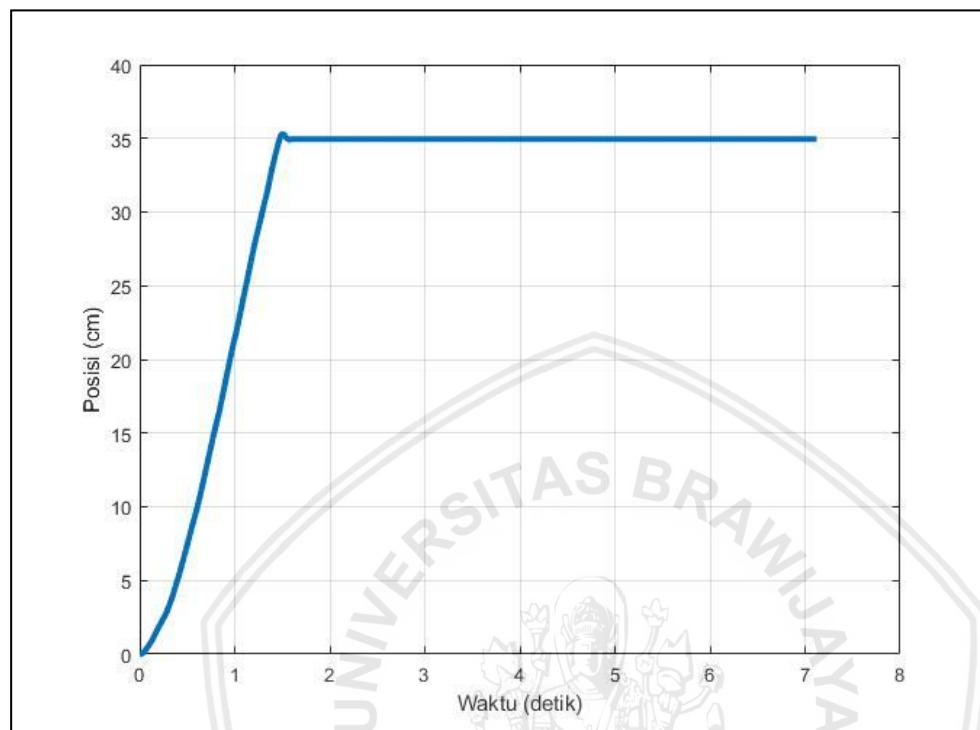
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.7 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,695 detik, *error steady state* 0,3% dan *overshoot* 1,4%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|29,91 - 30|}{30} \times 100 \% \\ = 0,3 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{30,33 - 29,91}{29,91} \times 100 \% \\ = 1,4 \%$$

4.2.7. Pengujian dengan Setpoint 35 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 35 cm ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.5 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 35 cm

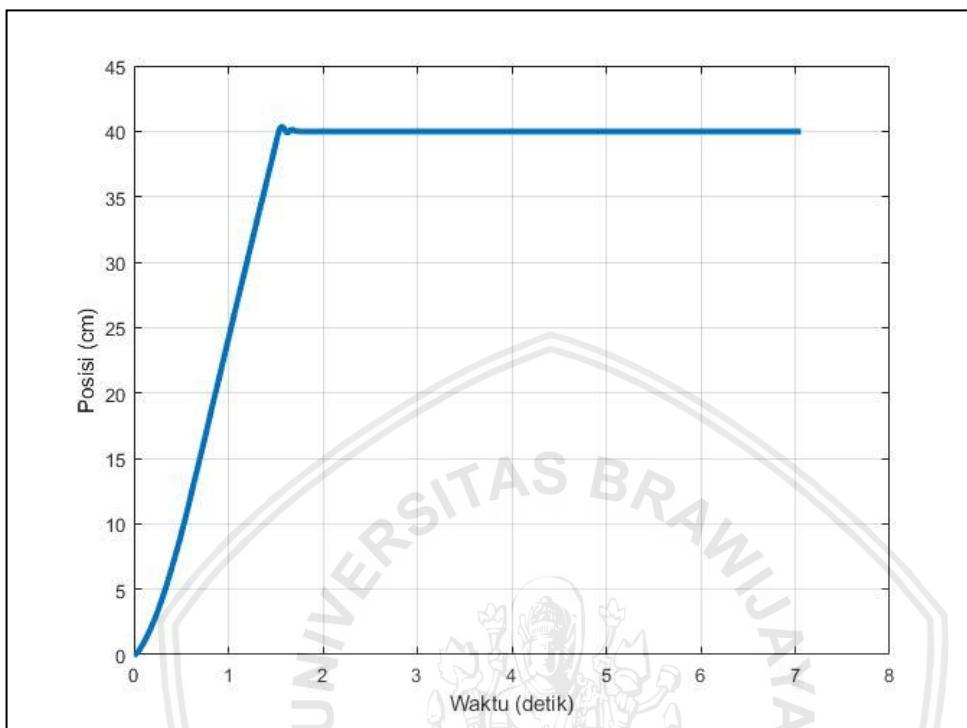
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.8 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,630 detik, *error steady state* 0,14% dan *overshoot* 1,05%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|34,95 - 35|}{35} \times 100 \% \\ = 0,14\%$$

$$overshoot (\%) = \frac{35,32 - 34,95}{34,95} \times 100 \% \\ = 1,05 \%$$

4.2.8. Pengujian dengan Setpoint 40 cm

Respon sistem pada pengujian sistem tanpa beban dengan setpoint 40 cm ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4.6 Respon sistem tanpa beban dengan setpoint 40 cm

Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.9 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,654 detik, *error steady state* 0,075% dan *overshoot* 0,9%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|39,97 - 40|}{40} \times 100 \% \\ = 0,075 \%$$

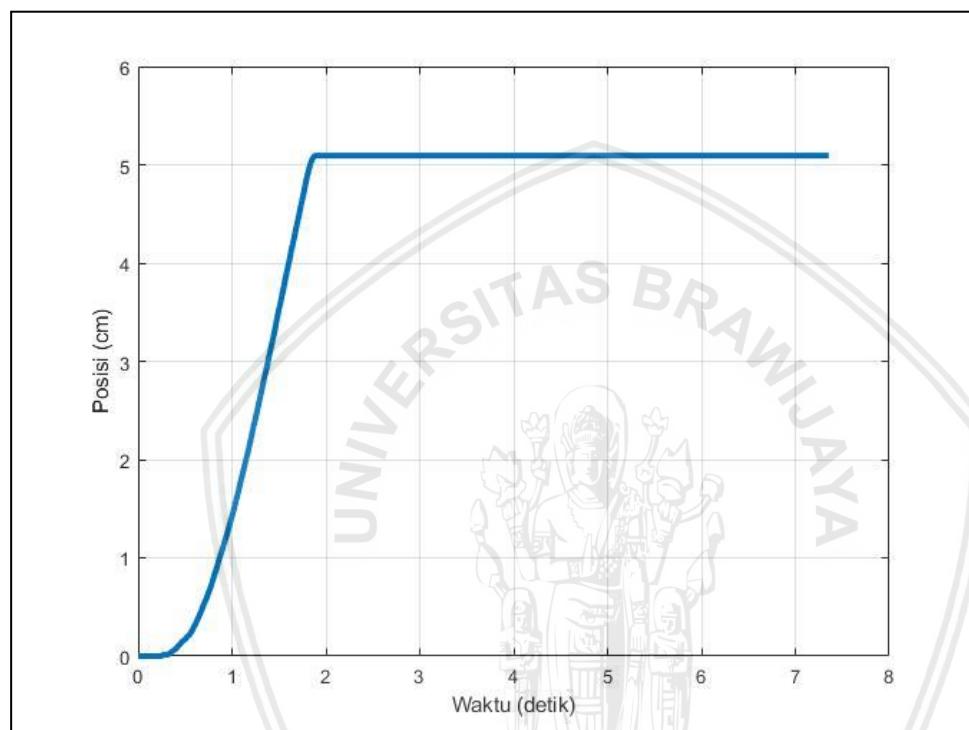
$$overshoot (\%) = \frac{40,33 - 39,97}{39,97} \times 100 \% \\ = 0,9 \%$$

4.3. Pengujian Sistem Berbeban

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui performansi sistem ketika diberikan beban. Prosedur pada pengujian ini terdapat pada bab 3.10.

4.3.1. Pengujian dengan Setpoint 5 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 5 cm ditunjukkan pada gambar 4.10.



Gambar 4.7 Respon sistem berbeban dengan setpoint 5 cm

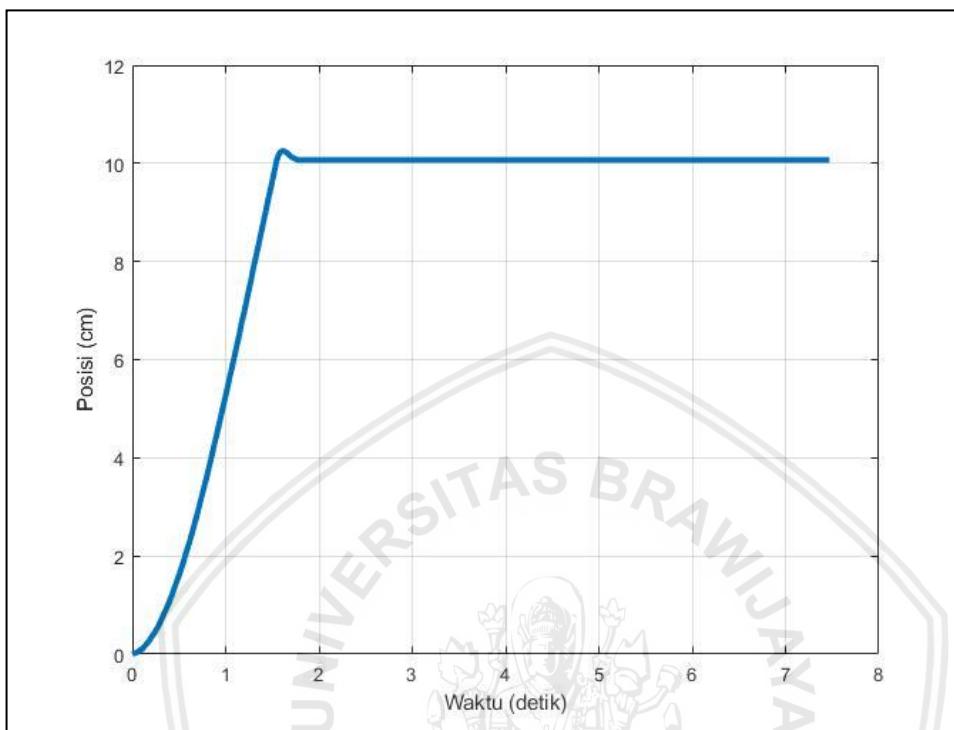
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.10 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,901 detik, *error steady state*. 1,8% dan *overshoot* 0%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|5,09 - 5|}{5} \times 100 \% \\ = 1,8 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{5,09 - 5,09}{5,09} \times 100 \% \\ = 0 \%$$

4.3.2. Pengujian dengan Setpoint 10 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 10 cm ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.8 Respon sistem berbeban dengan setpoint 10 cm

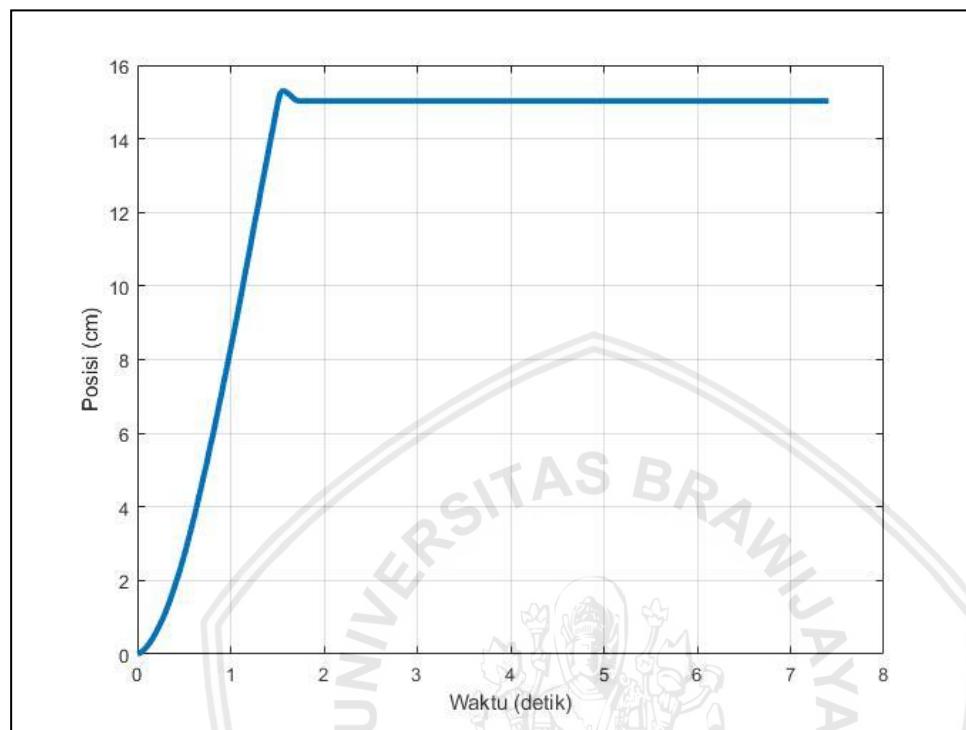
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.11 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,847 detik, *error steady state* 0,6% dan *overshoot* 1,80%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|10,06 - 10|}{10} \times 100 \% \\ = 0,6 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{10,25 - 10,06}{10,06} \times 100 \% \\ = 1,80 \%$$

4.3.3. Pengujian dengan Setpoint 15 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 15 cm ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.9 Respon sistem berbeban dengan setpoint 15 cm

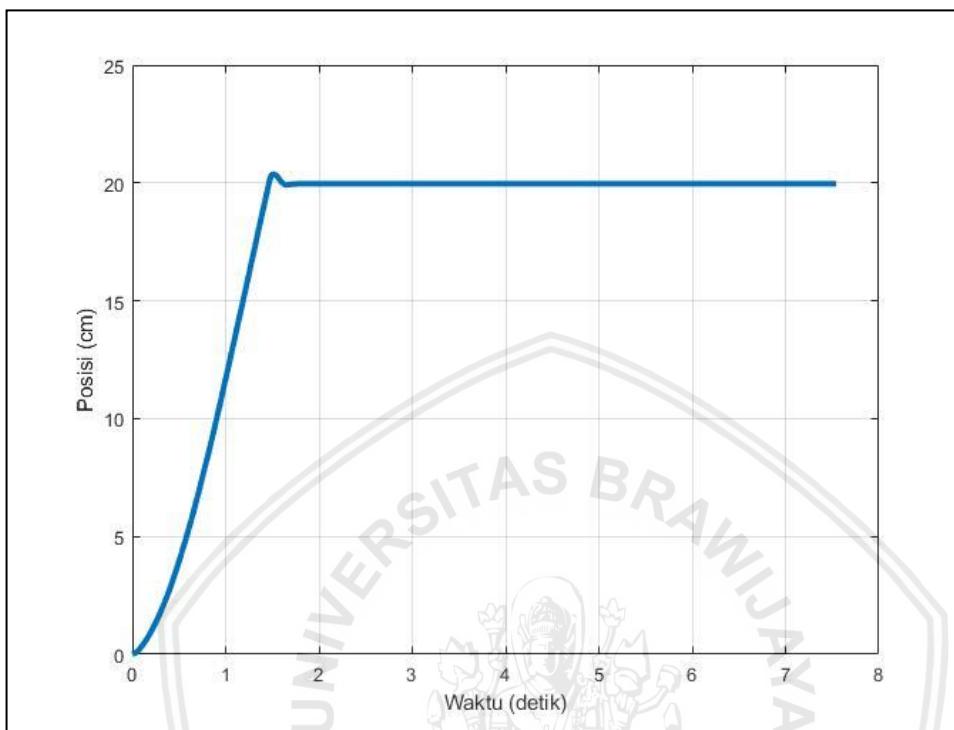
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.12 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,802 detik, *error steady state* 0,13% dan *overshoot* 1,86%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|15,02 - 15|}{15} \times 100 \% \\ = 0,13 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{15,30 - 15,02}{15,02} \times 100 \% \\ = 1,86 \%$$

4.3.4. Pengujian dengan Setpoint 20 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 20 cm ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4.10 Respon sistem berbeban dengan setpoint 20 cm

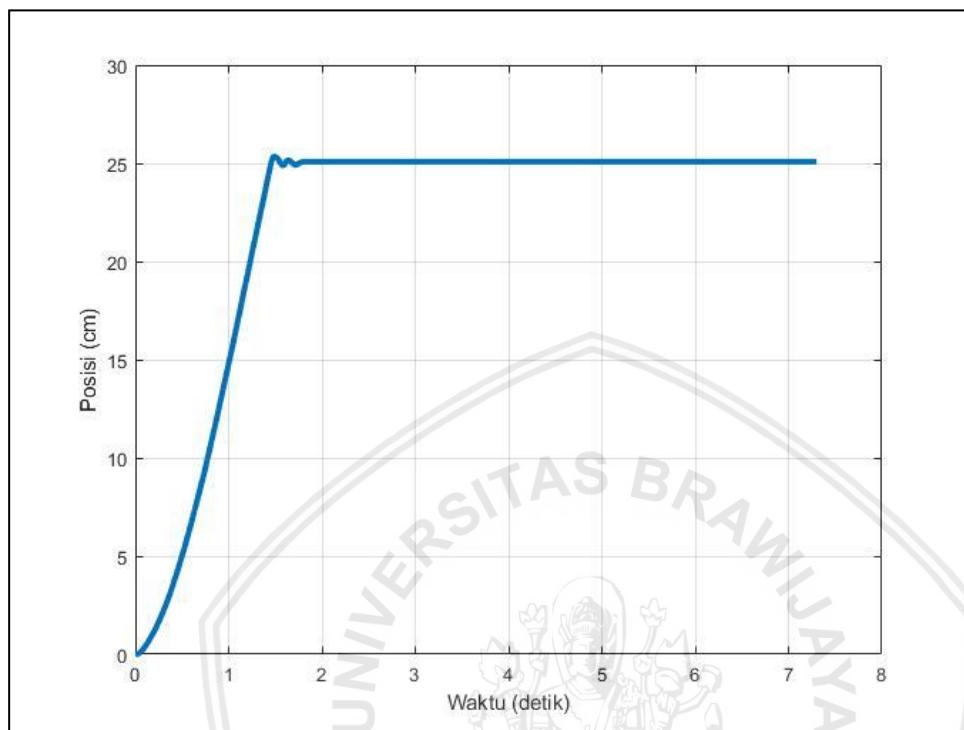
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.13 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,797 detik, *error steady state* 0,2% dan *overshoot* 2,05%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{19,96 - 20}{20} \times 100 \% \\ = 0,2 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{20,37 - 19,96}{19,96} \times 100 \% \\ = 2,05 \%$$

4.3.5. Pengujian dengan Setpoint 25 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 25 cm ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.11 Respon sistem berbeban dengan setpoint 25 cm

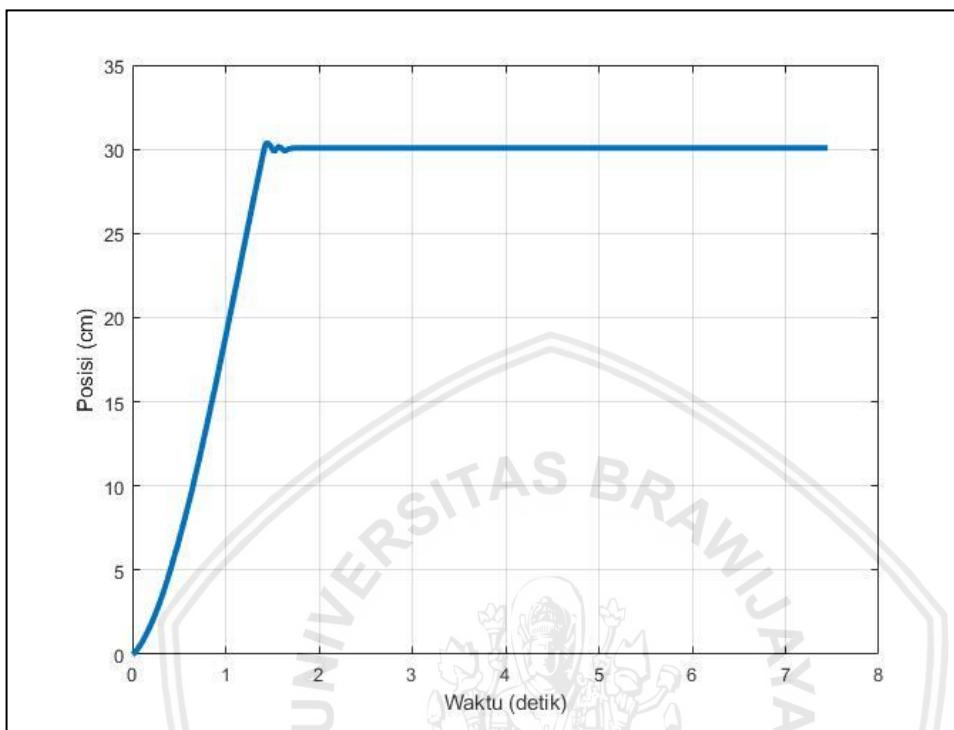
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.14 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,810 detik, *error steady state* 0,32% dan *overshoot* 1,11%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|25,08 - 25|}{25} \times 100 \% \\ = 0,32 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{25,36 - 25,08}{25,08} \times 100 \% \\ = 1,11 \%$$

4.3.6. Pengujian dengan Setpoint 30 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 30 cm ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4.12 Respon sistem berbeban dengan setpoint 30 cm

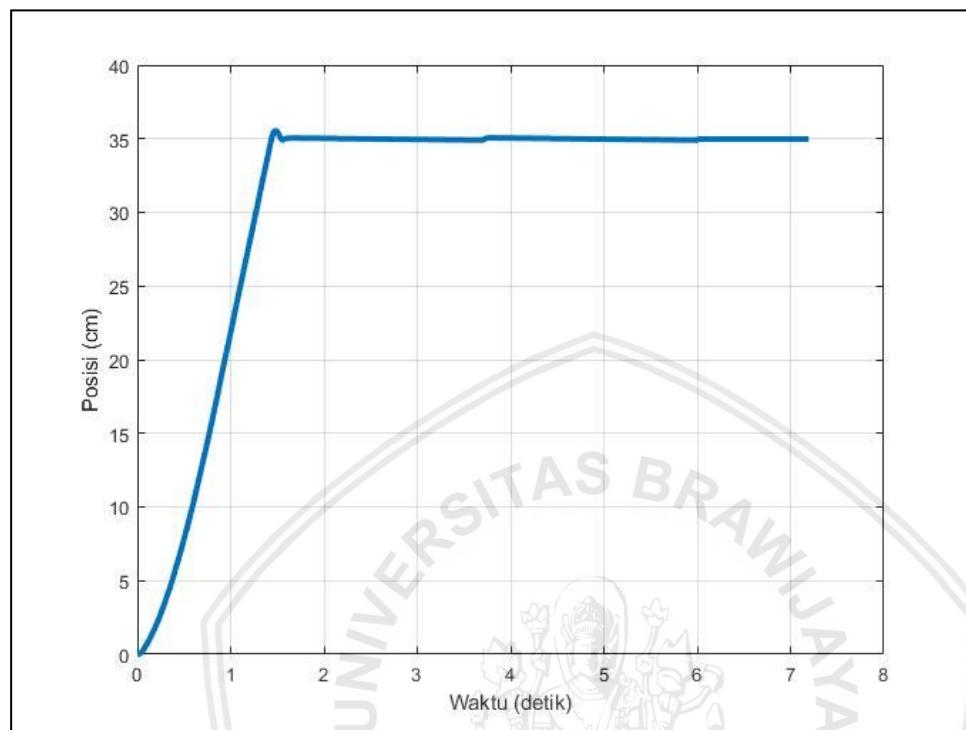
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.15 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,827 detik, *error steady state* 0,23% dan *overshoot* 1,03%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|30,07 - 30|}{30} \times 100 \% \\ = 0,23 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{30,38 - 30,07}{30,07} \times 100 \% \\ = 1,03 \%$$

4.3.7. Pengujian dengan Setpoint 35 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 35 cm ditunjukkan pada gambar 4.16.



Gambar 4.13 Respon sistem berbeban dengan setpoint 35 cm

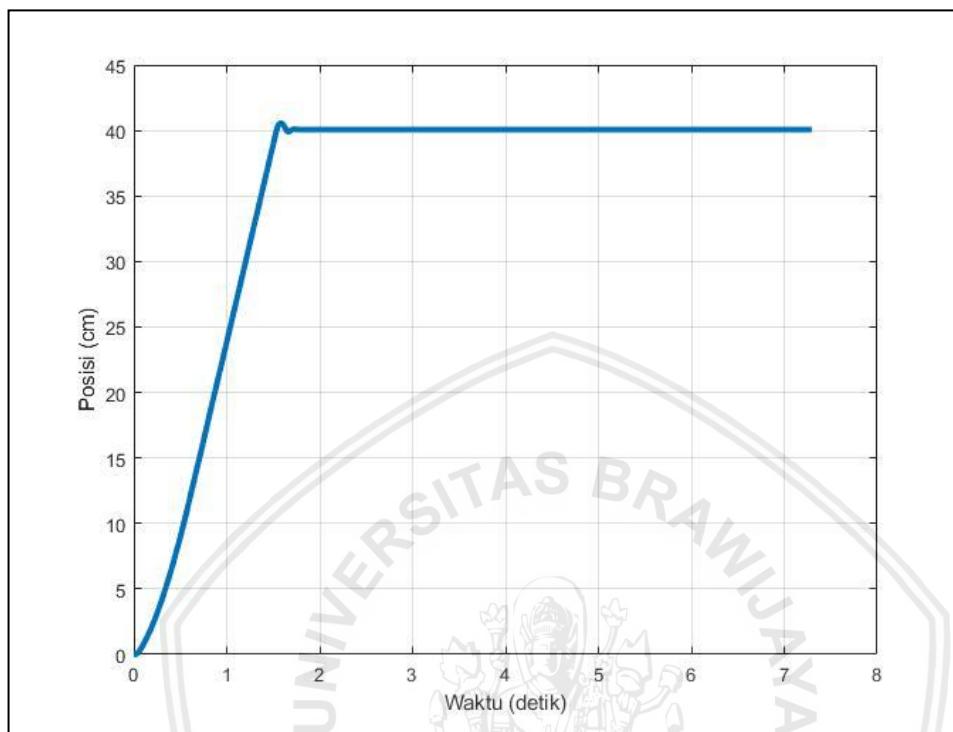
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.16 didapatkan nilai settling time sebesar 1,797 detik, error steady state 0,1% dan overshoot 1,48%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|35,03 - 35|}{35} \times 100 \% \\ = 0,1 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{35,55 - 35,03}{35,03} \times 100 \% \\ = 1,48 \%$$

4.3.8. Pengujian dengan Setpoint 40 cm

Respon sistem pada pengujian sistem berbeban dengan setpoint 40 cm ditunjukkan pada gambar 4.17.



Gambar 4.14 Respon sistem berbeban dengan setpoint 40 cm

Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.17 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,801 detik, *error steady state* 0,17% dan *overshoot* 1,24%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|40,07 - 40|}{40} \times 100 \% \\ = 0,17 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{40,57 - 40,07}{40,07} \times 100 \% \\ = 1,24 \%$$

Data hasil pengujian sistem tanpa beban dan berbeban ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2

Data Hasil Pengujian Sistem Tanpa Beban dan Berbeban

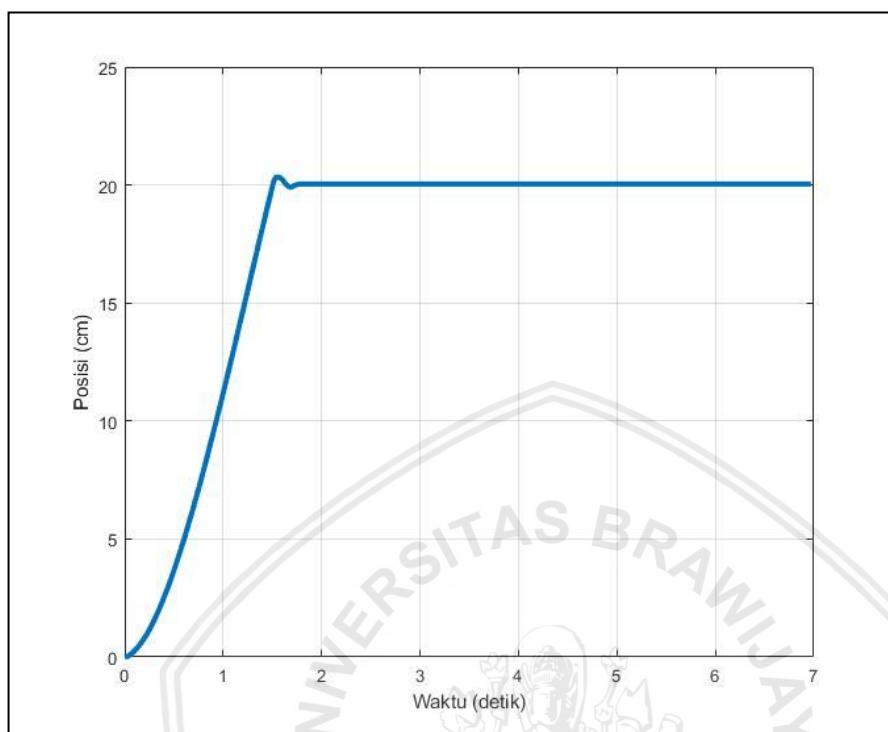
<i>Setpoint</i> (cm)	<i>Settling Time</i> (s)		<i>e_{ss}</i> (%)		<i>Overshoot</i> (%)	
	Tanpa Beban	Berbeban	Tanpa Beban	Berbeban	Tanpa Beban	Berbeban
5	1,854	1,901	2,2	1,8	0,39	0
10	1,683	1,847	0,9	0,6	1,9	1,80
15	1,669	1,802	0,66	0,13	1,73	1,86
20	1,651	1,797	0,05	0,2	1,79	2,05
25	1,646	1,810	0,26	0,3	1,8	1,11
30	1,695	1,827	0,3	0,23	1,4	1,03
35	1,630	1,797	0,14	0,10	1,05	1,48
40	1,654	1,801	0,075	0,17	0,9	1,24

4.4. Pengujian Sistem dengan Variasi Beban

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi beban terhadap performansi sistem. Prosedur pengujian ini terdapat pada bab 3.10.

4.4.1. Pengujian dengan Beban 1000 gr

Respon sistem pada pengujian variasi beban dengan beban 1000 gr ditunjukkan pada gambar 4.18.



Gambar 4.15 Respon sistem dengan beban 1000 gr

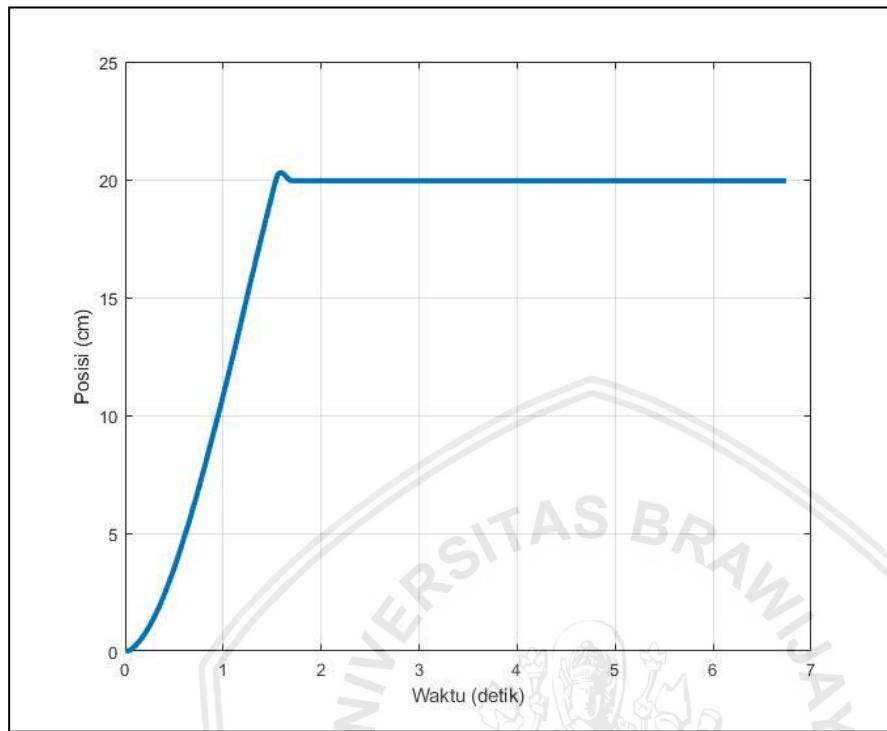
Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.18 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1,799 detik, *error steady state* 0,2% dan *overshoot* 1,49%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|20,04 - 20|}{20} \times 100 \% \\ = 0,2 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{20,34 - 20,04}{20,04} \times 100 \% \\ = 1,49 \%$$

4.4.2. Pengujian dengan Beban 1500 gr

Respon sistem pada pengujian variasi beban dengan beban 1500 gr ditunjukkan pada gambar 4.19.



Gambar 4.16 Respon sistem dengan beban 1500 gr

Berdasarkan respon sistem pada gambar 4.19 didapatkan nilai *settling time* sebesar 1.786 detik, *error steady state* 0.25% dan *overshoot* 1.70%.

$$e_{ss} (\%) = \frac{|19.95 - 20|}{20} \times 100 \% \\ = 0.25 \%$$

$$overshoot (\%) = \frac{20.29 - 19.95}{19.95} \times 100 \% \\ = 1.70 \%$$

Data hasil pengujian sistem dengan variasi beban ditunjukkan dalam Tabel 4.3

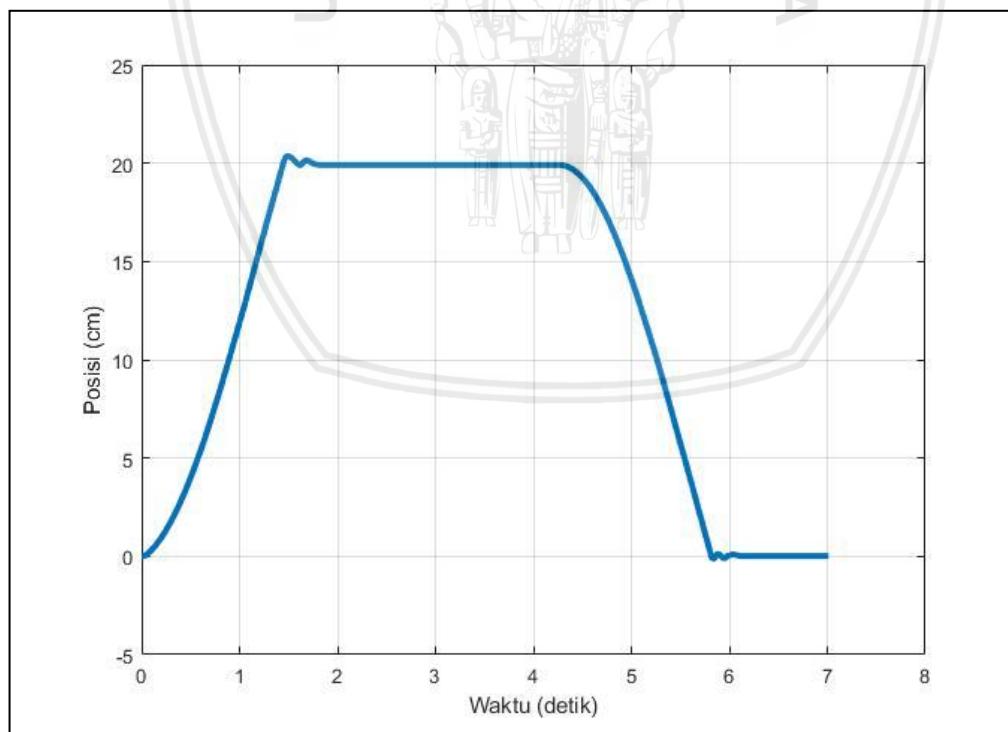
Tabel 4.3
Data Pengujian Sistem dengan Variasi Beban

Setpoint (cm)	Berat Beban (gr)	Settling Time (s)	e_{ss} (%)	Overshoot (%)
20	500	1,797	0,2	2,05
	1000	1,799	0,2	1,49
	1500	1,786	0,25	1,70

Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa ketika sistem diberikan beban 500gr, 1000gr dan 1500gr memiliki nilai *settling time* yang relatif sama.

4.5. Pengujian Sifat Reversibel Sistem

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sistem bersifat reversibel. Prosedur pengujian ini terdapat pada bab 3.10. Respon sistem ditunjukkan pada gambar 4.20.



Gambar 4.17 Respon pada pengujian sifat reversibel sistem

Berdasarkan Respon pada gambar 4.20. sistem dapat diketahui bahwa ketika sistem sudah mencapai setpoint 20 cm dan kemudian sistem diberikan setpoint 0 cm, sistem dapat kembali menuju setpoint yang telah diberikan.



BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Fungsi alih sistem keseluruhan adalah $\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{2.9855}{s^3+32.73s^2+155.9s}$
2. Nilai parameter kontroler PI yang didapatkan menggunakan metode *root locus* dengan nilai pole $s_1 = -5.79$ adalah $K_p = 2.4$ dan $K_i = 9$
3. Pada pengujian sistem tanpa beban didapatkan nilai *settling time* (t_s) rata-rata sebesar 1.685 detik
4. Pada pengujian sistem berbeban didapatkan nilai *settling time* (t_s) rata-rata sebesar 1.822 detik
5. Variasi beban yang diberikan memiliki nilai *settling time* yang relatif sama
6. Nilai setpoint tidak mempengaruhi performansi sistem
7. Nilai *overshoot* kurang dari 2.1% sehingga *overshoot* dapat diabaikan
8. Nilai e_{ss} dibawah toleransi *error steady state* 5%
9. Sistem bersifat reversible
10. Sistem bekerja cukup baik sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan



DAFTAR PUSTAKA

- Alciatore, D., & Histand, M. (2012). *Introduction to Mechatronics and Measurement System*. New York: McGraw-Hill.
- Asiswantara, U. (2017). *Penentuan Gain Kontroler PI Digital Sebagai Kontroler Camera Stabilizer dengan Menggunakan Metode Root Locus*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Jaka W, M. (2015). *Single Axis Linear Slide Actuator (Slider) Robot Menggunakan Stepper Motor Dalam Aplikasi Kontes Robot Abu Indonesia*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.
- Landau, I. (2006). *Digital Control System: Design, Identification and Implementation*. Germany: Springer-Verlag London Limited.
- Ogata, K. (1995). *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)* (Jilid 1 ed.). (E. Leksono, Trans.) Jakarta: Erlangga.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Rusli, M. (2015). *Dasar Teknik Kontrol*. Malang: UB Press.
- Yana, A. A. (2014). *Metode Root Locus Untuk Mencari Parameter PID pada Pengendalian Posisi Stamping Rod Berbasis Pneumatic Menggunakan Arduino Uno*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Malang : Universitas Brawijaya.

LAMPIRAN 1

DATA PENGUJIAN





Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 5 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.97303	1.46461	1.95773	5.119539
0.0189	0	0.99075	1.530584	1.97574	5.119539
0.03686	0	1.00768	1.596557	1.99374	5.119539
0.0548	0	1.02562	1.662531	2.01068	5.119539
0.07176	0	1.04246	1.728504	2.02957	5.119539
0.0897	0.013195	1.06037	1.807672	2.0464	5.119539
0.10755	0.013195	1.07758	1.873646	2.06429	5.119539
0.12642	0.013195	1.09563	1.952814	2.08224	5.119539
0.14444	0.013195	1.11262	2.018787	2.10723	5.119539
0.16232	0.013195	1.13282	2.11115	2.12528	5.119539
0.18023	0.013195	1.14934	2.177124	2.14325	5.119539
0.19818	0.013195	1.16735	2.243097	2.1601	5.119539
0.21512	0.013195	1.18526	2.322265	2.17795	5.119539
0.23312	0.013195	1.20319	2.401433	2.19496	5.119539
0.25004	0.013195	1.22102	2.480602	2.21409	5.119539
0.26896	0.013195	1.23992	2.572964	2.23083	5.119539
0.28691	0.013195	1.25776	2.652132	2.24878	5.119539
0.30483	0.026389	1.27764	2.731301	2.26581	5.119539
0.32274	0.026389	1.29644	2.823663	2.2836	5.119539
0.34068	0.026389	1.31536	2.916026	2.30053	5.119539
0.35886	0.039584	1.33232	2.995194	2.31844	5.119539
0.37658	0.052779	1.35116	3.074363	2.33639	5.119539
0.39438	0.065973	1.36914	3.166725	2.35426	5.119539
0.41264	0.079168	1.38815	3.259088	2.37116	5.119539
0.42955	0.092363	1.4051	3.338256	2.3891	5.119539
0.44743	0.105558	1.42289	3.430619	2.40477	5.119539
0.4644	0.131947	1.44073	3.509787	2.42306	5.119539
0.48436	0.158336	1.45965	3.60215	2.44169	5.119539
0.50127	0.184726	1.47756	3.681318	2.45876	5.119539
0.5202	0.211115	1.49646	3.773681	2.47655	5.119539
0.53721	0.237504	1.51332	3.866044	2.49344	5.119539
0.55623	0.277088	1.51659	3.879238	2.51238	5.119539
0.57416	0.316673	1.53223	3.958407	2.52925	5.119539
0.592	0.356257	1.5492	4.037575	2.54718	5.119539
0.60914	0.395841	1.56697	4.116743	2.5652	5.119539
0.62786	0.435425	1.58638	4.209105	2.58313	5.119539
0.64534	0.461814	1.60299	4.288274	2.60116	5.119539
0.66425	0.501398	1.62116	4.380637	2.619	5.119539
0.68148	0.540982	1.63902	4.459805	2.63628	5.119539
0.70002	0.580566	1.65595	4.538973	2.65507	5.119539
0.71707	0.633345	1.67393	4.631336	2.65625	5.119539
0.71825	0.633345	1.69188	4.710504	2.67314	5.119539
0.73692	0.686124	1.70979	4.789672	2.69108	5.119539
0.75478	0.738903	1.72671	4.86884	2.70802	5.119539
0.77475	0.804876	1.74453	4.961203	2.72792	5.119539
0.79152	0.857655	1.76158	5.040371	2.74472	5.119539
0.81047	0.910434	1.77948	5.09315	2.76269	5.119539
0.82846	0.963212	1.79774	5.119539	2.77967	5.119539
0.84746	1.015991	1.81538	5.132734	2.78294	5.119539
0.86546	1.081964	1.83229	5.132734	2.79853	5.119539
0.88433	1.147938	1.85024	5.119539	2.81652	5.119539
0.90226	1.213911	1.8671	5.119539	2.8345	5.119539
0.92019	1.26669	1.8861	5.119539	2.85133	5.119539
0.93718	1.332664	1.904	5.119539	2.86922	5.119539
0.955	1.398637	1.92192	5.119539	2.88615	5.119539
		1.93983	5.119539	2.90513	5.119539

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 10 cm

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	0.94088	4.367442
0.00997	0	0.96007	4.525778
0.02878	0	0.97785	4.67092
0.04572	0.013195	0.99584	4.829256
0.06347	0.013195	1.01278	4.974398
0.08046	0.026389	1.0307	5.132734
0.09835	0.039584	1.04764	5.277875
0.09949	0.039584	1.06554	5.436212
0.11525	0.065973	1.08244	5.581354
0.13427	0.092363	1.10039	5.739689
0.15126	0.118752	1.11724	5.884831
0.17122	0.145142	1.13517	6.056362
0.18812	0.184726	1.15319	6.214698
0.19516	0.19792	1.17113	6.373034
0.21389	0.237504	1.188	6.504982
0.23083	0.277088	1.20589	6.689707
0.24878	0.329867	1.22275	6.834848
0.26568	0.369451	1.22597	6.874433
0.28365	0.42223	1.24168	7.00638
0.30067	0.475009	1.25861	7.151521
0.31972	0.527788	1.27754	7.323052
0.33757	0.593761	1.29454	7.481389
0.35535	0.659734	1.31236	7.639724
0.37329	0.738903	1.33031	7.811255
0.39131	0.804876	1.34823	7.982787
0.4083	0.884044	1.3653	8.127929
0.42621	0.963212	1.38306	8.286264
0.44313	1.04238	1.39996	8.444601
0.46103	1.121549	1.41789	8.602937
0.47799	1.213911	1.43589	8.761273
0.49585	1.306274	1.45477	8.932804
0.51282	1.398637	1.47165	9.09114
0.53078	1.504194	1.48969	9.249477
0.55401	1.636141	1.50658	9.394618
0.57169	1.728504	1.52453	9.566149
0.5886	1.834062	1.54148	9.711291
0.60742	1.939619	1.56037	9.869627
0.62438	2.045177	1.57741	10.027963
0.6423	2.163929	1.59532	10.146715
0.65924	2.269486	1.61318	10.239079
0.67808	2.388239	1.63129	10.278663
0.69502	2.506991	1.64905	10.291857
0.71295	2.638938	1.6675	10.278663
0.72988	2.744495	1.68431	10.278663
0.74782	2.876442	1.70223	10.278663
0.76486	2.995194	1.7201	10.265468
0.78361	3.140336	1.73963	10.265468
0.80054	3.272283	1.75867	10.252274
0.81843	3.391035	1.77659	10.239079
0.83536	3.522982	1.79445	10.225883
0.85428	3.668123	1.81297	10.212688
0.87116	3.813265	1.83218	10.186299
0.88911	3.945212	1.852	10.173105
0.90608	4.090353	1.86989	10.146715
0.92392	4.222301	1.88879	10.133521
		1.90676	10.120326

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 15 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.97792	8.312654	1.9884	15.01556
0.0226	0.013195	0.99585	8.550159	2.00647	15.01556
0.04151	0.026389	1.01375	8.800858	2.02527	15.01556
0.05848	0.039584	1.03075	9.038362	2.04322	15.01556
0.07736	0.092363	1.05058	9.289061	2.06113	15.01556
0.09531	0.145142	1.06753	9.513371	2.07912	15.01556
0.11417	0.211115	1.08643	9.790459	2.099	15.01556
0.1324	0.277088	1.10341	10.02796	2.11601	15.01556
0.15104	0.343062	1.1213	10.27866	2.13382	15.01556
0.16811	0.42223	1.1392	10.50297	2.15073	15.01556
0.18701	0.514593	1.15817	10.76687	2.16873	15.01556
0.20508	0.593761	1.1752	11.01757	2.18568	15.01556
0.22293	0.686124	1.19309	11.26826	2.20477	15.01556
0.24092	0.778487	1.20992	11.50577	2.22146	15.01556
0.25893	0.884044	1.22877	11.75647	2.24041	15.01556
0.27685	0.989602	1.24576	11.98078	2.2584	15.01556
0.29597	1.108354	1.26368	12.23148	2.27723	15.01556
0.31305	1.227106	1.28165	12.49537	2.29418	15.01556
0.33089	1.345858	1.30049	12.75926	2.31307	15.01556
0.34892	1.46461	1.31839	12.98357	2.33008	15.01556
0.36674	1.596557	1.33822	13.27386	2.34898	15.01556
0.38369	1.728504	1.35522	13.49817	2.36694	15.01556
0.40165	1.873646	1.37437	13.76206	2.38497	15.01556
0.41847	2.018787	1.39201	14.01276	2.40298	15.01556
0.43755	2.163929	1.41092	14.25026	2.42279	15.01556
0.45544	2.322265	1.42779	14.48777	2.43979	15.01556
0.47433	2.493796	1.44594	14.72527	2.4577	15.01556
0.49134	2.638938	1.46297	14.96278	2.47467	15.01556
0.51121	2.823663	1.4809	15.1607	2.49351	15.01556
0.52811	2.982	1.49905	15.25306	2.51045	15.01556
0.5476	3.17992	1.51685	15.27945	2.52938	15.01556
0.56545	3.364646	1.53382	15.26626	2.54761	15.01556
0.58338	3.536177	1.55273	15.25306	2.5659	15.01556
0.60027	3.720902	1.5698	15.22667	2.58252	15.01556
0.6182	3.918822	1.58862	15.20028	2.60046	15.01556
0.63624	4.103548	1.60555	15.1607	2.61829	15.01556
0.65514	4.314663	1.62454	15.10792	2.63623	15.01556
0.67311	4.512583	1.64244	15.04195	2.65311	15.01556
0.69108	4.723699	1.6615	14.98917	2.67101	15.01556
0.70812	4.921619	1.6784	14.98917	2.68815	15.01556
0.72695	5.132734	1.69837	15.01556	2.70721	15.01556
0.74512	5.343849	1.71538	15.01556	2.72615	15.01556
0.76406	5.581354	1.7342	15.02875	2.74392	15.01556
0.78201	5.805663	1.75109	15.02875	2.76298	15.01556
0.79996	6.016778	1.77004	15.01556	2.77988	15.01556
0.81783	6.241087	1.78827	15.01556	2.79785	15.01556
0.82113	6.280672	1.80689	15.01556	2.81592	15.01556
0.83671	6.478592	1.8239	15.01556	2.8338	15.01556
0.85464	6.716096	1.84276	15.01556	2.85178	15.01556
0.87246	6.927212	1.86154	15.01556	2.87729	15.01556
0.88944	7.151521	1.88179	15.01556	2.8955	15.01556
0.90726	7.375831	1.89878	15.01556	2.91466	15.01556
0.92525	7.62653	1.91671	15.01556	2.93279	15.01556
0.94313	7.864035	1.9336	15.01556	2.95653	15.01556
0.96045	8.088344	1.95257	15.01556	2.9744	15.01556
		1.97053	15.01556	2.99134	15.01556

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 20 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.95873	11.558548
0.01798	0.013195	0.97563	11.862025
0.03678	0.039584	0.99455	12.191893
0.05376	0.092363	1.01234	12.521759
0.05707	0.105558	1.03133	12.864821
0.07271	0.184726	1.04912	13.207883
0.09076	0.277088	1.06809	13.537775
0.10869	0.369451	1.08595	13.867618
0.12566	0.475009	1.10476	14.237069
0.14447	0.593761	1.122	14.527351
0.16152	0.712513	1.14092	14.896804
0.17949	0.831265	1.15898	15.253059
0.19637	0.950018	1.17782	15.556538
0.21456	1.108354	1.1948	15.886405
0.23117	1.240301	1.19612	15.8996
0.24923	1.385442	1.21265	16.216272
0.26605	1.543779	1.22968	16.532944
0.28405	1.71531	1.24851	16.862812
0.30102	1.860451	1.26642	17.205873
0.31901	2.045177	1.28531	17.548935
0.33594	2.229903	1.3033	17.891998
0.3548	2.427823	1.32223	18.23506
0.37183	2.612548	1.34053	18.578121
0.39081	2.823663	1.35945	18.934378
0.40877	3.021584	1.37739	19.224661
0.42777	3.259088	1.39632	19.580917
0.4447	3.470203	1.41425	19.910786
0.46253	3.694513	1.4333	20.214264
0.48046	3.932017	1.4501	20.34621
0.49946	4.182716	1.46892	20.372599
0.51637	4.407026	1.48586	20.333015
0.53531	4.657725	1.5057	20.267042
0.55233	4.895229	1.5228	20.201069
0.5559	4.961203	1.54269	20.09551
0.57116	5.172318	1.55965	20.016344
0.58918	5.436212	1.57958	19.923979
0.60807	5.700105	1.59655	19.884396
0.62521	5.963999	1.61451	19.950369
0.64485	6.267477	1.63266	20.042732
0.6628	6.544566	1.65034	20.121899
0.68167	6.848043	1.66838	20.121899
0.69868	7.111937	1.68717	20.082317
0.71652	7.389026	1.70518	20.055925
0.7335	7.666114	1.72412	20.042732
0.75245	7.982787	1.74197	20.029537
0.77025	8.259875	1.76192	20.016344
0.7892	8.589743	1.77978	20.016344
0.80643	8.880025	1.79961	20.016344
0.82647	9.223087	1.81756	20.016344
0.84416	9.526566	1.83569	20.016344
0.86723	9.9356	1.85244	20.016344
0.88503	10.225883	1.87145	20.016344
0.90304	10.555751	1.88832	20.016344
0.92292	10.912007	1.9132	20.016344
0.94088	11.228681	1.93113	20.016344
		1.94804	20.016344

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 25 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.96933	15.041945	1.97062	24.911572
0.02489	0.026389	0.98739	15.464175	1.98029	24.911572
0.04352	0.105558	1.00514	15.860016	1.99907	24.911572
0.05625	0.171531	1.0231	16.269051	2.01598	24.911572
0.07762	0.303478	1.04002	16.651697	2.03526	24.911572
0.09436	0.42223	1.05812	17.073927	2.05335	24.911572
0.11231	0.567372	1.076	17.482962	2.07019	24.911572
0.11545	0.580566	1.09489	17.931581	2.0881	24.911572
0.13232	0.725708	1.11177	18.314228	2.10665	24.911572
0.15	0.870849	1.12982	18.723263	2.12682	24.911572
0.16987	1.055575	1.14781	19.145493	2.14586	24.911572
0.18788	1.227106	1.16668	19.580917	2.16365	24.911572
0.20585	1.411832	1.18387	19.989952	2.18161	24.911572
0.22285	1.596557	1.20264	20.438572	2.19967	24.911572
0.24161	1.807672	1.22059	20.847607	2.22364	24.911572
0.25905	2.005593	1.23854	21.243448	2.24269	24.911572
0.27694	2.203513	1.2555	21.639288	2.26046	24.911572
0.29391	2.427823	1.27342	22.06152	2.27944	24.911572
0.31305	2.665327	1.29031	22.457361	2.29634	24.911572
0.33103	2.916026	1.30931	22.892784	2.3153	24.911572
0.34914	3.15353	1.32734	23.315016	2.33321	24.911572
0.36585	3.391035	1.34536	23.69766	2.35207	24.911572
0.38476	3.654929	1.3632	24.106695	2.36903	24.911572
0.40275	3.932017	1.38327	24.555315	2.38697	24.911572
0.42078	4.209105	1.40009	24.937962	2.40502	24.911572
0.4387	4.486194	1.41891	25.267828	2.42376	24.911572
0.45916	4.802866	1.43683	25.360191	2.44159	24.911572
0.47603	5.09315	1.4548	25.333801	2.45976	24.911572
0.49591	5.423017	1.47187	25.24144	2.47773	24.911572
0.51383	5.739689	1.49085	25.122688	2.49764	24.911572
0.53274	6.043167	1.50901	24.99074	2.51553	24.911572
0.54976	6.35984	1.52801	24.858793	2.53536	24.911572
0.55374	6.425813	1.54583	24.951157	2.55332	24.911572
0.56872	6.702902	1.56377	25.109491	2.57129	24.911572
0.58577	7.00638	1.5807	25.175467	2.58813	24.911572
0.60462	7.375831	1.5846	25.188662	2.60635	24.911572
0.6227	7.718893	1.59966	25.149076	2.62482	24.911572
0.6409	8.061954	1.6176	25.056715	2.64362	24.911572
0.65784	8.391822	1.63689	25.003935	2.66052	24.911572
0.67585	8.761273	1.65484	24.937962	2.67954	24.911572
0.69295	9.104335	1.67179	24.885183	2.69638	24.911572
0.71085	9.434202	1.69267	25.003935	2.71632	24.911572
0.73505	9.9356	1.7116	25.135881	2.73313	24.911572
0.75393	10.331441	1.72843	25.149076	2.75304	24.911572
0.77128	10.687697	1.74887	25.083103	2.76984	24.911572
0.78878	11.070344	1.76873	25.017113	2.78993	24.911572
0.8058	11.439795	1.78691	24.977545	2.80957	24.911572
0.82479	11.82244	1.80451	24.951157	2.82619	24.911572
0.84273	12.218281	1.8227	24.924767	2.84514	24.911572
0.86161	12.627317	1.84296	24.911572	2.86299	24.911572
0.87957	13.023158	1.8609	24.911572	2.86636	24.911572
0.89748	13.432192	1.87874	24.911572	2.88192	24.911572
0.91538	13.814839	1.89808	24.911572	2.8988	24.911572
0.93342	14.223874	1.91603	24.911572	2.91805	24.911572
0.94351	14.448185	1.93398	24.911572	2.9361	24.911572
		1.95381	24.911572	2.95391	24.911572

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 30 cm

Waktu (s)	Output (cm)
0	0
0.01885	0.013195
0.0367	0.052779
0.05911	0.19792
0.07769	0.343062
0.09471	0.501398
0.1135	0.672929
0.13149	0.870849
0.15046	1.055575
0.16733	1.26669
0.18634	1.491
0.20326	1.702115
0.22336	1.979203
0.24123	2.216708
0.26025	2.480602
0.27692	2.731301
0.29852	3.061168
0.31648	3.351451
0.3334	3.62854
0.35229	3.945212
0.36934	4.24869
0.38911	4.591752
0.40622	4.895229
0.42407	5.238291
0.44203	5.581354
0.4609	5.963999
0.47813	6.307061
0.49847	6.716096
0.51537	7.072353
0.53529	7.481389
0.55321	7.877229
0.57107	8.273069
0.58906	8.682105
0.60797	9.11753
0.62495	9.48698
0.64386	9.9356
0.66071	10.344636
0.68201	10.859229
0.69963	11.294654
0.71656	11.690495
0.73448	12.139113
0.7525	12.587733
0.77135	13.075936
0.7893	13.550945
0.8083	14.039148
0.82616	14.487767
0.84506	14.989166
0.86292	15.464175
0.88486	16.057936
0.90354	16.546139
0.92141	17.034344
0.93153	17.311432
0.94839	17.773247
0.96684	18.26145
0.98754	18.842014

1.00544	19.317024	2.01434	29.912359
1.02232	19.792032	2.03524	29.912359
1.04213	20.34621	2.05528	29.912359
1.06099	20.887192	2.07215	29.912359
1.07883	21.362202	2.09012	29.912359
1.09836	21.916378	2.10829	29.912359
1.11724	22.417776	2.126	29.912359
1.13526	22.932369	2.14397	29.912359
1.15599	23.526129	2.16239	29.912359
1.17401	24.027529	2.17929	29.912359
1.19101	24.502537	2.199	29.912359
1.21236	25.083103	2.21675	29.912359
1.23018	25.584501	2.2351	29.912359
1.2484	26.072702	2.25295	29.912359
1.2683	26.626881	2.27249	29.912359
1.28726	27.115086	2.29174	29.912359
1.30536	27.603289	2.3097	29.912359
1.32418	28.14427	2.32751	29.912359
1.34216	28.645668	2.34444	29.912359
1.36106	29.120678	2.36285	29.912359
1.37895	29.582491	2.38077	29.912359
1.39811	30.083891	2.4009	29.912359
1.41511	30.321394	2.41875	29.912359
1.41639	30.334589	2.4376	29.912359
1.43401	30.321394	2.45451	29.912359
1.45205	30.202642	2.47563	29.912359
1.47009	30.070696	2.47885	29.912359
1.48698	29.912359	2.49446	29.912359
1.50518	29.885971	2.51249	29.912359
1.52292	30.044306	2.53024	29.912359
1.54194	30.163057	2.54727	29.912359
1.5588	30.123474	2.56722	29.912359
1.57669	30.044306	2.58614	29.912359
1.59355	29.965137	2.60409	29.912359
1.61233	29.899162	2.62411	29.912359
1.62928	29.951944	2.64295	29.912359
1.64837	30.083891	2.66827	29.912359
1.67195	30.123474	2.68793	29.912359
1.69086	30.044306	2.70625	29.912359
1.70792	30.004723	2.72668	29.912359
1.72572	29.965137	2.74457	29.912359
1.74265	29.925554	2.76143	29.912359
1.76153	29.912359	2.78234	29.912359
1.77717	29.912359	2.80127	29.912359
1.79415	29.912359	2.81918	29.912359
1.81298	29.912359	2.83903	29.912359
1.82984	29.912359	2.8579	29.912359
1.84888	29.912359	2.87479	29.912359
1.8658	29.912359	2.89656	29.912359
1.88495	29.912359	2.91469	29.912359
1.90312	29.912359	2.93657	29.912359
1.92374	29.912359	2.95518	29.912359
1.94154	29.912359	2.97302	29.912359
1.96091	29.912359	2.99299	29.912359
1.97781	29.912359	2.99649	29.912359
1.99642	29.912359	3.01202	29.912359

Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 35 cm

Waktu (s)	Output (cm)	0.99144	21.230255	1.98423	34.952732
0	0	1.00996	21.678873	2.00114	34.952732
0.01893	0.013195	1.02888	22.246244	2.02016	34.952732
0.03599	0.092363	1.04575	22.760838	2.03807	34.952732
0.05468	0.211115	1.06382	23.328209	2.057	34.952732
0.0726	0.382646	1.08076	23.855997	2.07417	34.952732
0.09062	0.540982	1.09967	24.449759	2.09185	34.952732
0.10853	0.712513	1.11663	24.951157	2.10884	34.952732
0.12746	0.910434	1.13557	25.544918	2.12679	34.952732
0.14436	1.108354	1.15348	26.112289	2.14458	34.952732
0.16236	1.359053	1.17143	26.679659	2.16354	34.952732
0.17933	1.570168	1.18939	27.233837	2.18144	34.952732
0.19821	1.820867	1.19261	27.326199	2.20041	34.952732
0.22228	2.097955	1.20838	27.814404	2.22392	34.952732
0.24038	2.322265	1.22661	28.3158	2.24186	34.952732
0.25718	2.506991	1.2456	28.79081	2.25885	34.952732
0.27508	2.731301	1.2629	29.279015	2.27789	34.952732
0.29328	3.008389	1.2814	29.754025	2.29475	34.952732
0.31231	3.325061	1.29935	30.255421	2.31366	34.952732
0.33023	3.654929	1.31839	30.770014	2.33163	34.952732
0.3481	3.997991	1.33628	31.218632	2.34948	34.952732
0.36604	4.367442	1.35827	31.878366	2.36648	34.952732
0.38499	4.763283	1.37716	32.472126	2.38447	34.952732
0.40198	5.132734	1.39413	32.986721	2.40232	34.952732
0.41986	5.51538	1.41299	33.488121	2.42123	34.952732
0.43782	5.93761	1.43091	33.976322	2.43823	34.952732
0.45701	6.373034	1.44891	34.411747	2.45619	34.952732
0.47384	6.78207	1.46591	34.820786	2.47305	34.952732
0.49165	7.217494	1.48473	35.20343	2.49208	34.952732
0.50866	7.639724	1.5017	35.322182	2.51	34.952732
0.52756	8.088344	1.51966	35.243011	2.52895	34.952732
0.54546	8.536963	1.53662	35.071484	2.5459	34.952732
0.56346	8.959193	1.55457	34.965923	2.56381	34.952732
0.58147	9.368229	1.57159	34.899948	2.58175	34.952732
0.6004	9.816848	1.59149	34.939537	2.60063	34.952732
0.61742	10.278663	1.60845	34.952732	2.6186	34.952732
0.63542	10.753671	1.62725	34.952732	2.63755	34.952732
0.65268	11.25507	1.6446	34.952732	2.65442	34.952732
0.67032	11.743273	1.66267	34.952732	2.67238	34.952732
0.68822	12.27106	1.68044	34.952732	2.69029	34.952732
0.70729	12.825237	1.69838	34.952732	2.6937	34.952732
0.72526	13.353025	1.7153	34.952732	2.71023	34.952732
0.74313	13.854424	1.73426	34.952732	2.72794	34.952732
0.76006	14.369016	1.75113	34.952732	2.7469	34.952732
0.77816	14.896804	1.76915	34.952732	2.76376	34.952732
0.79511	15.332229	1.78601	34.952732	2.78173	34.952732
0.81397	15.846821	1.80498	34.952732	2.79869	34.952732
0.831	16.282246	1.82196	34.952732	2.81666	34.952732
0.8491	16.849617	1.83993	34.952732	2.83374	34.952732
0.86581	17.351015	1.85688	34.952732	2.85173	34.952732
0.88379	17.905193	1.87493	34.952732	2.86856	34.952732
0.9017	18.472563	1.89337	34.952732	2.88648	34.952732
0.91972	19.039936	1.91139	34.952732	2.90358	34.952732
0.9376	19.607307	1.9294	34.952732	2.9223	34.952732
0.95654	20.174679	1.94748	34.952732	2.93925	34.952732
0.9735	20.689272	1.96531	34.952732	2.95729	34.952732

Data Pengujian Sistem Tanpa Beban dengan Setpoint 40 cm

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	0.9743	23.328209
0.02017	0.026389	0.99314	23.908775
0.03921	0.184726	1.01002	24.410173
0.05723	0.356257	1.02886	24.99074
0.07617	0.567372	1.04702	25.544918
0.09402	0.778487	1.06512	26.099094
0.11189	1.002796	1.08372	26.679659
0.12995	1.253495	1.10262	27.207447
0.14789	1.517389	1.11973	27.735235
0.16576	1.820867	1.13848	28.276218
0.18471	2.124345	1.15633	28.8172
0.20161	2.388239	1.17519	29.358183
0.21971	2.704911	1.17643	29.424156
0.23771	3.034778	1.19213	29.872776
0.2566	3.40423	1.2111	30.453341
0.27357	3.760486	1.22906	30.994324
0.29244	4.156327	1.24793	31.5485
0.3094	4.486194	1.26579	32.089481
0.32842	4.908424	1.28367	32.590881
0.3453	5.304265	1.30169	33.145058
0.36424	5.739689	1.31952	33.672844
0.38215	6.16192	1.33744	34.200634
0.40105	6.636928	1.35539	34.67564
0.41802	7.059159	1.3723	35.163845
0.43597	7.507778	1.39019	35.704826
0.4531	7.930008	1.40814	36.259003
0.47216	8.431406	1.42708	36.826374
0.4735	8.457795	1.44495	37.340969
0.48994	8.89322	1.46384	37.90834
0.50891	9.447397	1.48174	38.449322
0.5269	9.922406	1.50069	39.029888
0.54486	10.423803	1.51892	39.570873
0.56186	10.925202	1.53766	40.085464
0.57981	11.45299	1.55465	40.336163
0.59767	11.993972	1.57286	40.336163
0.61565	12.534954	1.59137	40.204216
0.63365	13.102325	1.60932	39.966713
0.65256	13.630113	1.6263	39.874348
0.67052	14.144707	1.6452	39.993099
0.68878	14.725272	1.66318	40.09866
0.70545	15.200281	1.68249	40.111851
0.72336	15.728069	1.6994	40.045879
0.74129	16.269051	1.71837	40.006294
0.76038	16.823229	1.73592	39.993099
0.77817	17.403795	1.73915	39.993099
0.79611	17.944777	1.75491	39.979904
0.81401	18.498955	1.77285	39.979904
0.83202	19.053131	1.79174	39.979904
0.84885	19.554529	1.80971	39.979904
0.86785	20.121899	1.82861	39.979904
0.88494	20.623299	1.84655	39.979904
0.90316	21.177475	1.86449	39.979904
0.91993	21.678873	1.88243	39.979904
0.93788	22.246244	1.90125	39.979904
0.95474	22.747644	1.91837	39.979904
		1.93755	39.979904

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 5 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	1.0316	1.46461	2.09029	5.09315
0.01972	0	1.04944	1.530584	2.10735	5.09315
0.03757	0	1.06994	1.609752	2.13127	5.09315
0.05738	0	1.08781	1.675725	2.15107	5.09315
0.07524	0	1.11279	1.781283	2.16897	5.09315
0.09526	0	1.13057	1.847256	2.18776	5.09315
0.11321	0	1.14747	1.91323	2.2057	5.09315
0.13436	0	1.16988	2.005593	2.22366	5.09315
0.15405	0	1.18859	2.071566	2.24143	5.09315
0.17198	0	1.20674	2.150734	2.26282	5.09315
0.19074	0	1.22803	2.243097	2.28164	5.09315
0.20866	0	1.24781	2.33546	2.29951	5.09315
0.22748	0	1.26566	2.401433	2.32244	5.09315
0.24535	0	1.28443	2.480602	2.34227	5.09315
0.26419	0	1.30231	2.55977	2.36021	5.09315
0.28112	0.013195	1.32365	2.652132	2.3873	5.09315
0.29894	0.013195	1.34146	2.731301	2.40731	5.09315
0.31679	0.013195	1.35932	2.810469	2.42551	5.09315
0.33621	0.013195	1.38082	2.902831	2.43559	5.09315
0.35424	0.026389	1.39962	2.982	2.45222	5.09315
0.37287	0.039584	1.41743	3.061168	2.47014	5.09315
0.39078	0.052779	1.4375	3.15353	2.48017	5.09315
0.41047	0.065973	1.45731	3.232699	2.49683	5.09315
0.42848	0.079168	1.4752	3.311867	2.51476	5.09315
0.4473	0.105558	1.49794	3.430619	2.52539	5.09315
0.46519	0.118752	1.51768	3.522982	2.54208	5.09315
0.48569	0.145142	1.53558	3.588955	2.56001	5.09315
0.50357	0.158336	1.55086	3.668123	2.57082	5.09315
0.52427	0.171531	1.5696	3.747292	2.58747	5.09315
0.5431	0.19792	1.5876	3.839654	2.60546	5.09315
0.56132	0.211115	1.61441	3.958407	2.63497	5.09315
0.57987	0.237504	1.63337	4.037575	2.65469	5.09315
0.59685	0.263894	1.65119	4.129938	2.67267	5.09315
0.61668	0.303478	1.67696	4.235495	2.68334	5.09315
0.63364	0.329867	1.69684	4.327858	2.70001	5.09315
0.65577	0.382646	1.71472	4.407026	2.7179	5.09315
0.67557	0.42223	1.72974	4.473	2.72846	5.09315
0.69346	0.461814	1.74942	4.565362	2.74512	5.09315
0.71426	0.514593	1.76736	4.64453	2.76298	5.09315
0.73208	0.554177	1.78298	4.710504	2.7872	5.09315
0.75001	0.593761	1.80484	4.816061	2.80702	5.09315
0.76901	0.64654	1.82351	4.895229	2.82489	5.09315
0.78681	0.686124	1.84144	4.961203	2.85282	5.09315
0.80455	0.738903	1.85226	5.000787	2.87258	5.09315
0.82147	0.791681	1.87196	5.053566	2.89046	5.09315
0.83935	0.84446	1.88989	5.079955	2.90069	5.09315
0.85636	0.897239	1.90096	5.09315	2.91635	5.09315
0.8761	0.963212	1.92064	5.09315	2.93428	5.09315
0.89401	1.015991	1.93753	5.09315	2.96075	5.09315
0.9159	1.081964	1.94817	5.09315	2.9806	5.09315
0.93576	1.147938	1.96381	5.09315	3.00696	5.09315
0.95359	1.200717	1.98173	5.09315	3.03133	5.09315
0.97448	1.26669	2.01133	5.09315	3.05126	5.09315
0.99359	1.332664	2.03003	5.09315	3.06922	5.09315
1.01149	1.398637	2.0481	5.09315	3.07949	5.09315
		2.07152	5.09315	3.09613	5.09315

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 10 cm

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	0.99822	4.750088
0.01786	0	1.01713	4.908424
0.0415	0	1.03511	5.053566
0.06038	0	1.05524	5.225097
0.07735	0.013195	1.07408	5.383433
0.09528	0.026389	1.0922	5.528574
0.11327	0.039584	1.10254	5.634132
0.13119	0.065973	1.1192	5.766079
0.14913	0.079168	1.13611	5.91122
0.16813	0.105558	1.14715	6.003583
0.18506	0.145142	1.16585	6.16192
0.20304	0.184726	1.18375	6.320256
0.22001	0.22431	1.19382	6.399424
0.2381	0.263894	1.21045	6.544566
0.25499	0.316673	1.22834	6.729291
0.27311	0.369451	1.25608	6.940406
0.28992	0.409035	1.27498	7.111937
0.30875	0.475009	1.30369	7.375831
0.32678	0.527788	1.32362	7.547362
0.34472	0.593761	1.34154	7.705698
0.36173	0.659734	1.3523	7.82445
0.37976	0.738903	1.37001	7.969592
0.39679	0.818071	1.39333	8.167512
0.41463	0.884044	1.40219	8.24668
0.43262	0.963212	1.41747	8.378628
0.45159	1.04238	1.43311	8.523769
0.46857	1.134743	1.44873	8.655716
0.48661	1.213911	1.46454	8.800858
0.50354	1.306274	1.47997	8.932804
0.52346	1.411832	1.49369	9.051557
0.54038	1.504194	1.51151	9.223087
0.56161	1.609752	1.53363	9.407813
0.58055	1.728504	1.55346	9.579344
0.59856	1.820867	1.57142	9.73768
0.61753	1.939619	1.59038	9.909211
0.63552	2.058371	1.60829	10.067548
0.65453	2.177124	1.62711	10.173105
0.67252	2.282681	1.645	10.225883
0.6919	2.414628	1.66405	10.252274
0.70973	2.53338	1.68099	10.252274
0.72869	2.665327	1.70704	10.225883
0.7456	2.784079	1.72745	10.199494
0.7645	2.916026	1.74521	10.15991
0.78162	3.047973	1.756	10.146715
0.8005	3.193115	1.77294	10.120326
0.81858	3.325061	1.79101	10.107132
0.83646	3.457008	1.81846	10.080742
0.85356	3.575761	1.83827	10.067548
0.87141	3.720902	1.85673	10.067548
0.8887	3.866044	1.86748	10.067548
0.90762	4.011185	1.88318	10.067548
0.92496	4.156327	1.90106	10.067548
0.94406	4.314663	1.9118	10.067548
0.96109	4.44661	1.92865	10.067548
0.98001	4.604946	1.9464	10.067548
		1.97662	10.067548

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 15 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.97866	8.035565	2.01824	15.02875
0.01789	0.013195	0.99661	8.259875	2.03616	15.02875
0.03353	0.039584	1.01646	8.510573	2.05597	15.02875
0.04911	0.065973	1.03343	8.721689	2.07391	15.02875
0.06996	0.118752	1.05225	8.959193	2.0959	15.02875
0.08745	0.158336	1.0702	9.196698	2.11473	15.02875
0.10433	0.211115	1.08924	9.447397	2.13272	15.02875
0.12319	0.277088	1.10604	9.671707	2.13739	15.02875
0.14009	0.329867	1.12501	9.922406	2.15594	15.02875
0.15793	0.409035	1.14303	10.186299	2.17383	15.02875
0.17483	0.475009	1.16188	10.423803	2.19259	15.02875
0.19271	0.554177	1.17985	10.661308	2.2105	15.02875
0.21062	0.64654	1.19775	10.898813	2.23024	15.02875
0.22101	0.699318	1.21472	11.123122	2.24813	15.02875
0.23665	0.778487	1.2332	11.387016	2.27104	15.02875
0.25462	0.870849	1.25112	11.637715	2.29084	15.02875
0.27264	0.963212	1.26908	11.862025	2.30874	15.02875
0.29046	1.06877	1.2861	12.07314	2.32758	15.02875
0.30827	1.187522	1.30533	12.337033	2.34553	15.02875
0.32521	1.293079	1.32368	12.600927	2.36426	15.02875
0.34316	1.411832	1.3448	12.878016	2.3822	15.02875
0.36115	1.543779	1.36271	13.102325	2.40559	15.02875
0.37912	1.675725	1.38056	13.339829	2.42531	15.02875
0.39599	1.807672	1.39839	13.577334	2.4432	15.02875
0.41396	1.952814	1.4163	13.814839	2.46445	15.02875
0.43196	2.084761	1.4361	14.078733	2.48326	15.02875
0.44992	2.229903	1.45398	14.303042	2.50117	15.02875
0.46706	2.375044	1.47388	14.566936	2.52094	15.02875
0.48485	2.53338	1.49178	14.80444	2.53888	15.02875
0.5029	2.691716	1.51177	15.05514	2.55909	15.02875
0.52179	2.863247	1.52958	15.22667	2.57691	15.02875
0.53893	3.034778	1.55647	15.30584	2.5974	15.02875
0.55783	3.219504	1.57621	15.292645	2.61531	15.02875
0.57478	3.37784	1.59405	15.266255	2.63421	15.02875
0.59372	3.575761	1.61686	15.22667	2.65207	15.02875
0.61067	3.747292	1.63668	15.187086	2.67407	15.02875
0.62966	3.945212	1.65456	15.147502	2.6938	15.02875
0.64665	4.129938	1.67524	15.094724	2.71171	15.02875
0.67091	4.393831	1.69413	15.05514	2.73147	15.02875
0.68969	4.591752	1.71202	15.041945	2.7494	15.02875
0.70681	4.789672	1.73216	15.02875	2.76933	15.02875
0.7246	4.987592	1.74996	15.02875	2.78903	15.02875
0.74262	5.172318	1.77182	15.02875	2.80691	15.02875
0.76056	5.396627	1.79168	15.02875	2.8267	15.02875
0.77845	5.620937	1.80955	15.02875	2.84461	15.02875
0.79638	5.805663	1.82937	15.02875	2.85482	15.02875
0.81444	6.003583	1.84719	15.02875	2.87259	15.02875
0.83247	6.227893	1.86607	15.02875	2.88951	15.02875
0.85056	6.452202	1.88387	15.02875	2.91273	15.02875
0.86834	6.663318	1.88732	15.02875	2.93256	15.02875
0.8864	6.887628	1.90594	15.02875	2.95046	15.02875
0.90513	7.098742	1.9239	15.02875	2.97029	15.02875
0.92313	7.349442	1.94378	15.02875	2.98803	15.02875
0.94187	7.573751	1.96155	15.02875	3.00908	15.02875
0.95982	7.798061	1.98047	15.02875	3.02885	15.02875
		1.99844	15.02875	3.04704	15.02875

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 20 cm

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	1.06326	12.812042
0.01787	0.026389	1.08463	13.181494
0.04001	0.079168	1.10449	13.524556
0.05881	0.145142	1.12169	13.854424
0.07672	0.22431	1.13943	14.171096
0.09551	0.316673	1.15637	14.461378
0.11354	0.409035	1.17432	14.778051
0.13218	0.514593	1.19119	15.081529
0.15007	0.62015	1.21433	15.490564
0.16888	0.738903	1.23312	15.846821
0.18682	0.857655	1.25113	16.150299
0.2083	1.015991	1.27157	16.546139
0.22813	1.161133	1.29137	16.889202
0.24597	1.306274	1.30925	17.205873
0.26764	1.491	1.33054	17.58852
0.2874	1.662531	1.35023	17.971167
0.30548	1.820867	1.36713	18.26145
0.3251	2.005593	1.3924	18.723263
0.34303	2.177124	1.41119	19.039936
0.36275	2.375044	1.42901	19.369802
0.3807	2.546575	1.44776	19.686476
0.40042	2.75769	1.46568	20.016344
0.41825	2.95561	1.48445	20.29343
0.43821	3.193115	1.50234	20.372599
0.45608	3.40423	1.52425	20.359404
0.47591	3.641734	1.5433	20.31982
0.49383	3.866044	1.56198	20.227457
0.5174	4.156327	1.58084	20.121899
0.53748	4.433415	1.59893	20.029537
0.55532	4.657725	1.61928	19.963564
0.5751	4.908424	1.63809	19.923979
0.59301	5.172318	1.65597	19.910786
0.61178	5.423017	1.67572	19.923979
0.62876	5.660522	1.69358	19.937174
0.65	5.963999	1.71337	19.950369
0.66972	6.267477	1.7304	19.950369
0.68766	6.544566	1.75199	19.950369
0.70743	6.821654	1.77081	19.963564
0.72546	7.111937	1.78868	19.963564
0.74513	7.428609	1.81298	19.963564
0.76297	7.705698	1.83277	19.963564
0.78531	8.061954	1.85065	19.963564
0.80408	8.339044	1.87148	19.963564
0.82192	8.629326	1.89128	19.963564
0.84559	9.025167	1.90917	19.963564
0.86543	9.34184	1.92896	19.963564
0.88329	9.658512	1.94697	19.963564
0.90584	10.041159	1.96967	19.963564
0.92487	10.371025	1.98945	19.963564
0.94253	10.661308	2.00734	19.963564
0.96697	11.096733	2.02637	19.963564
0.98664	11.466185	2.04431	19.963564
1.00451	11.769663	2.0663	19.963564
1.02658	12.139113	2.08614	19.963564
1.04535	12.482175	2.10396	19.963564
		2.12452	19.963564

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 25 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	1.04961	15.87321	2.05239	25.083103
0.02538	0.013195	1.06757	16.282246	2.06993	25.083103
0.03972	0.039584	1.08643	16.71767	2.08881	25.083103
0.04419	0.065973	1.10347	17.100317	2.10575	25.083103
0.06215	0.145142	1.12225	17.522547	2.12367	25.083103
0.08339	0.263894	1.13982	17.931581	2.14168	25.083103
0.1032	0.382646	1.15886	18.380201	2.1606	25.083103
0.12102	0.514593	1.17595	18.762848	2.17856	25.083103
0.14105	0.659734	1.18621	18.987158	2.19749	25.083103
0.15871	0.804876	1.20185	19.317024	2.21559	25.083103
0.18058	0.989602	1.21878	19.726059	2.23345	25.083103
0.20041	1.161133	1.23869	20.187872	2.25145	25.083103
0.21832	1.332664	1.25659	20.596909	2.27033	25.083103
0.23853	1.543779	1.27447	20.966336	2.28833	25.083103
0.25543	1.702115	1.29153	21.349007	2.30619	25.083103
0.27447	1.91323	1.31127	21.797626	2.32407	25.083103
0.29238	2.111115	1.32828	22.180271	2.34306	25.083103
0.31597	2.388239	1.34805	22.628891	2.35996	25.083103
0.33571	2.625743	1.36604	23.011538	2.37798	25.083103
0.35388	2.863247	1.38513	23.446962	2.39601	25.083103
0.37747	3.166725	1.40297	23.869192	2.41383	25.083103
0.39723	3.443814	1.42084	24.265032	2.43088	25.083103
0.41507	3.720902	1.43884	24.660873	2.44873	25.083103
0.43458	3.984796	1.45681	25.069908	2.46566	25.083103
0.45243	4.261885	1.47474	25.307413	2.48459	25.083103
0.47652	4.64453	1.49372	25.360191	2.50147	25.083103
0.49538	4.948008	1.51165	25.294218	2.52047	25.083103
0.51323	5.211902	1.53056	25.21505	2.53737	25.083103
0.53404	5.541769	1.54754	25.069908	2.55637	25.083103
0.55397	5.91122	1.56641	24.937962	2.57433	25.083103
0.57167	6.201503	1.58351	24.858793	2.59223	25.083103
0.58959	6.504982	1.60232	24.96435	2.61012	25.083103
0.59092	6.518176	1.61921	25.109491	2.62921	25.083103
0.60753	6.834848	1.64069	25.175467	2.64707	25.083103
0.62732	7.2043	1.65852	25.109491	2.66604	25.083103
0.64542	7.520973	1.67645	25.043518	2.68307	25.083103
0.67034	7.982787	1.69542	24.96435	2.70195	25.083103
0.6901	8.339044	1.71236	24.911572	2.7199	25.083103
0.70798	8.682105	1.73028	24.924767	2.73795	25.083103
0.72675	9.011972	1.74824	24.977545	2.75479	25.083103
0.74465	9.368229	1.76624	25.030323	2.77367	25.083103
0.76578	9.816848	1.78333	25.056715	2.79063	25.083103
0.78548	10.212688	1.8012	25.083103	2.80857	25.083103
0.80334	10.58214	1.81823	25.083103	2.8315	25.083103
0.82371	11.00437	1.83718	25.083103	2.85464	25.083103
0.84161	11.387016	1.85408	25.083103	2.87254	25.083103
0.86321	11.835636	1.87306	25.083103	2.89049	25.083103
0.88705	12.337033	1.89105	25.083103	2.90943	25.083103
0.90392	12.71968	1.90894	25.083103	2.92735	25.083103
0.93056	13.287051	1.92683	25.083103	2.93771	25.083103
0.94947	13.696086	1.9447	25.083103	2.95563	25.083103
0.96748	14.091927	1.96169	25.083103	2.97254	25.083103
0.98712	14.514158	1.98061	25.083103	2.99039	25.083103
1.00497	14.909999	1.99771	25.083103	3.00734	25.083103
1.02982	15.424591	2.01553	25.083103	3.02517	25.083103
		2.03251	25.083103	3.04335	25.083103

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 30 cm

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	0.95833	17.76005
0.01802	0.065973	0.98242	18.40659
0.032	0.145142	1.00126	18.907988
0.05072	0.277088	1.01922	19.396191
0.06875	0.409035	1.03971	19.950369
0.08312	0.527788	1.0587	20.464962
0.10136	0.699318	1.07561	20.926777
0.12013	0.884044	1.09349	21.41498
0.14622	1.161133	1.11143	21.876793
0.16449	1.359053	1.13104	22.417776
0.17699	1.504194	1.14896	22.919174
0.19389	1.71531	1.16597	23.380989
0.21312	1.939619	1.19105	24.093502
0.23097	2.177124	1.20987	24.5949
0.25088	2.454212	1.22778	25.083103
0.26937	2.718106	1.24931	25.66367
0.27871	2.850053	1.26904	26.204651
0.29649	3.113946	1.28692	26.692856
0.31434	3.417424	1.30796	27.260225
0.32494	3.562566	1.32352	27.656067
0.34496	3.905628	1.34143	28.131075
0.36295	4.209105	1.36533	28.764421
0.37355	4.393831	1.38521	29.279015
0.39127	4.710504	1.40295	29.767216
0.40927	5.040371	1.42386	30.255421
0.42022	5.225097	1.44266	30.387367
0.43688	5.554964	1.46058	30.334589
0.45577	5.93761	1.48293	30.176252
0.4664	6.122335	1.50275	29.978333
0.48206	6.399424	1.52062	29.872776
0.50056	6.795265	1.54483	30.017918
0.51058	7.019574	1.56462	30.136669
0.52835	7.362636	1.58254	30.123474
0.54636	7.732088	1.60295	30.031111
0.56513	8.127929	1.62267	29.925554
0.58296	8.523769	1.63953	29.912359
0.60185	8.932804	1.66336	29.991528
0.61886	9.289061	1.68314	30.017918
0.63791	9.711291	1.70107	30.044306
0.65487	10.120326	1.72546	30.070696
0.67474	10.608529	1.74424	30.070696
0.69265	11.03076	1.76211	30.070696
0.71253	11.479379	1.78387	30.070696
0.72956	11.901609	1.80268	30.070696
0.75015	12.429397	1.82062	30.070696
0.76892	12.878016	1.84173	30.070696
0.78691	13.326636	1.86047	30.070696
0.80686	13.828033	1.87842	30.070696
0.82577	14.316237	1.89965	30.070696
0.84372	14.778051	1.91847	30.070696
0.86595	15.332229	1.93636	30.070696
0.88374	15.767653	1.96059	30.070696
0.90176	16.242661	1.98036	30.070696
0.92144	16.770449	1.99726	30.070696
0.94036	17.285042	2.02286	30.070696
		2.04254	30.070696

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 35 cm

Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)	Waktu (s)	Output (cm)
0	0	0.96118	20.702467	1.95969	35.018703
0.02164	0.026389	0.97986	21.243448	1.97753	35.018703
0.02949	0.039584	0.99812	21.797626	1.99552	35.018703
0.04042	0.105558	1.01699	22.351803	2.01352	35.018703
0.05737	0.237504	1.03394	22.879591	2.03146	35.018703
0.07531	0.42223	1.05187	23.433767	2.04941	35.018703
0.09217	0.593761	1.06877	23.948359	2.06738	35.018703
0.11015	0.791681	1.08678	24.502537	2.08546	35.018703
0.12718	0.976407	1.10368	24.99074	2.10337	35.018703
0.14922	1.26669	1.12153	25.531721	2.12138	35.018703
0.16713	1.504194	1.13856	26.046316	2.13925	35.018703
0.1841	1.741699	1.15891	26.640078	2.15789	35.005508
0.20193	1.992398	1.17694	27.194252	2.17669	35.005508
0.21886	2.243097	1.19377	27.695652	2.19368	35.005508
0.23788	2.53338	1.21184	28.236635	2.2126	35.005508
0.25485	2.810469	1.23045	28.764421	2.22964	35.005508
0.27278	3.113946	1.25011	29.384571	2.24852	35.005508
0.28981	3.417424	1.268	29.925554	2.26551	35.005508
0.30793	3.760486	1.28493	30.413759	2.28444	35.005508
0.32665	4.116743	1.30279	30.967934	2.30138	35.005508
0.34458	4.433415	1.31979	31.482527	2.32121	35.005508
0.36158	4.789672	1.33873	32.063095	2.34453	34.992313
0.37956	5.145928	1.35563	32.564491	2.3625	34.992313
0.39656	5.502185	1.37353	33.079082	2.37941	34.992313
0.41459	5.91122	1.39045	33.580482	2.39839	34.992313
0.43157	6.267477	1.40941	34.161049	2.4163	34.992313
0.44944	6.650123	1.42645	34.662445	2.43523	34.992313
0.46641	7.032769	1.44424	35.163845	2.45222	34.992313
0.48429	7.441804	1.4612	35.454128	2.47017	34.992313
0.50143	7.85084	1.48006	35.559685	2.48817	34.992313
0.51918	8.273069	1.49699	35.49371	2.50718	34.992313
0.5364	8.682105	1.51489	35.308987	2.52409	34.992313
0.55513	9.143919	1.53176	35.084679	2.54295	34.979118
0.57226	9.579344	1.5507	34.913143	2.56035	34.979118
0.59026	10.014769	1.56629	34.926342	2.5788	34.979118
0.60726	10.463388	1.58429	35.005508	2.5969	34.979118
0.6261	10.977981	1.60224	35.031898	2.61478	34.979118
0.64309	11.45299	1.61917	35.031898	2.63178	34.979118
0.66097	11.927999	1.6381	35.031898	2.65072	34.979118
0.67805	12.403007	1.65606	35.045094	2.66858	34.979118
0.69593	12.878016	1.67395	35.045094	2.68745	34.979118
0.71295	13.353025	1.69181	35.045094	2.70441	34.979118
0.731	13.854424	1.71086	35.045094	2.72336	34.965923
0.748	14.342627	1.72794	35.045094	2.74139	34.965923
0.76685	14.883608	1.74631	35.045094	2.76054	34.965923
0.7838	15.371813	1.76319	35.031898	2.77836	34.965923
0.80272	15.912794	1.7819	35.031898	2.79712	34.965923
0.81972	16.427387	1.79887	35.031898	2.81409	34.965923
0.83867	17.007954	1.8178	35.031898	2.83308	34.965923
0.85597	17.522547	1.83474	35.031898	2.8501	34.965923
0.87361	18.063528	1.8527	35.031898	2.86906	34.965923
0.89139	18.617706	1.86958	35.031898	2.8861	34.965923
0.90932	19.145493	1.88847	35.031898	2.90505	34.965923
0.92628	19.660086	1.90539	35.031898	2.92212	34.952732
0.94433	20.214264	1.92431	35.031898	2.94106	34.952732
		1.94129	35.031898	2.95814	34.952732

Data Pengujian Sistem Berbeban dengan Setpoint 40 cm

Waktu (s)	Output (cm)
0	0
0.01867	0.013195
0.03651	0.052779
0.06512	0.316673
0.0849	0.540982
0.10177	0.752097
0.1236	1.04238
0.1434	1.332664
0.16119	1.609752
0.1819	1.926425
0.20183	2.256292
0.21956	2.572964
0.23838	2.902831
0.25522	3.232699
0.27997	3.734097
0.29778	4.077159
0.31569	4.473
0.33446	4.895229
0.35231	5.29107
0.3725	5.766079
0.39028	6.175114
0.40748	6.584149
0.42611	7.045963
0.443	7.481389
0.46317	8.009176
0.482	8.457795
0.49994	8.945999
0.51871	9.473786
0.53656	9.988379
0.55644	10.529362
0.57421	11.057149
0.59398	11.664104
0.61112	12.191893
0.63119	12.785653
0.64899	13.287051
0.6688	13.907202
0.68669	14.448185
0.70652	15.002361
0.72452	15.516953
0.74429	16.137104
0.76117	16.66489
0.78091	17.258652
0.79874	17.812828
0.81942	18.446175
0.83908	19.039936
0.85693	19.580917
0.87567	20.121899
0.89353	20.662882
0.91453	21.296228
0.93329	21.850405
0.95138	22.378191
0.97264	23.037926
0.99245	23.605299
1.01028	24.172668
1.03185	24.806013

1.0515	25.41297
1.06941	25.967148
1.08916	26.547712
1.10708	27.088696
1.12589	27.656067
1.14387	28.197048
1.16518	28.830397
1.18413	29.410961
1.20288	29.965137
1.22273	30.585289
1.23972	31.09988
1.2577	31.654058
1.27495	32.168652
1.29301	32.709633
1.31095	33.250618
1.33078	33.817986
1.3477	34.332581
1.36564	34.873562
1.38359	35.414543
1.407	36.127056
1.42262	36.615261
1.43436	36.958321
1.45221	37.499306
1.47088	38.079872
1.48885	38.594463
1.50782	39.17503
1.52586	39.716011
1.54465	40.230606
1.56254	40.494499
1.58033	40.573666
1.59726	40.520889
1.61534	40.375744
1.63314	40.125046
1.65106	39.913933
1.6689	39.887543
1.6868	40.006294
1.70376	40.072269
1.72351	40.111851
1.74046	40.085464
1.75841	40.072269
1.77643	40.072269
1.7963	40.072269
1.81428	40.072269
1.83231	40.072269
1.84933	40.072269
1.87256	40.072269
1.89036	40.072269
1.90837	40.072269
1.92728	40.072269
1.94425	40.072269
1.96316	40.072269
1.98103	40.072269
1.99913	40.072269
2.01721	40.072269
2.03611	40.072269
2.05326	40.072269
2.07196	40.072269
2.08984	40.072269
2.10875	40.072269
2.12678	40.072269
2.14573	40.072269
2.16271	40.072269
2.18072	40.072269
2.19768	40.072269
2.21662	40.072269
2.2336	40.072269
2.25158	40.072269
2.26969	40.072269
2.28745	40.072269
2.30446	40.072269
2.32237	40.072269
2.33929	40.072269
2.35714	40.072269
2.37424	40.072269
2.39314	40.072269
2.41112	40.072269
2.43003	40.072269
2.4481	40.072269
2.46714	40.072269
2.484	40.072269
2.50191	40.072269
2.51995	40.072269
2.53887	40.072269
2.55587	40.072269
2.57486	40.072269
2.59178	40.072269
2.60974	40.072269
2.62663	40.072269
2.64561	40.072269
2.66268	40.072269
2.68149	40.072269
2.69876	40.072269
2.71766	40.072269
2.73467	40.072269
2.75362	40.072269
2.77061	40.072269
2.7905	40.072269
2.80781	40.072269
2.82673	40.072269
2.84376	40.072269
2.86267	40.072269
2.88076	40.072269
2.89955	40.072269
2.91749	40.072269
2.9364	40.072269
2.95433	40.072269
2.97234	40.072269
2.99024	40.072269
3.00825	40.072269
3.02609	40.072269
3.04408	40.072269
3.06116	40.072269

Data Pengujian Variasi Beban dengan Beban 1000 gr

Waktu (ms)	Output (cm)	Waktu (ms)	Output (cm)	Waktu (ms)	Output (cm)
0	0	0.95792	10.463388	1.92568	20.042732
0.02165	0.013195	0.97492	10.753671	1.94332	20.042732
0.04052	0.052779	0.99279	11.057149	1.96039	20.042732
0.05855	0.105558	1.00975	11.347432	1.97832	20.042732
0.07655	0.158336	1.02861	11.664104	1.99542	20.042732
0.09366	0.237504	1.04656	11.980778	2.01333	20.042732
0.09691	0.250699	1.06442	12.284255	2.03033	20.042732
0.11235	0.316673	1.08169	12.587733	2.0482	20.042732
0.1293	0.395841	1.10021	12.904405	2.06528	20.042732
0.14731	0.488203	1.11717	13.194689	2.08319	20.042732
0.16424	0.580566	1.13624	13.53775	2.10109	20.042732
0.18237	0.686124	1.1532	13.841228	2.11883	20.042732
0.19928	0.791681	1.17114	14.1579	2.13583	20.042732
0.21722	0.910434	1.18812	14.461378	2.15367	20.042732
0.23423	1.029186	1.20616	14.751661	2.1707	20.042732
0.25313	1.174327	1.22317	15.081529	2.18853	20.042732
0.27019	1.319469	1.24101	15.385007	2.20562	20.042732
0.28823	1.46461	1.25797	15.688485	2.20691	20.042732
0.3051	1.609752	1.27592	16.018353	2.22347	20.042732
0.32302	1.768088	1.29319	16.321831	2.2405	20.042732
0.33999	1.926425	1.31182	16.638502	2.25848	20.042732
0.35796	2.11115	1.32876	16.94198	2.27656	20.042732
0.37491	2.269486	1.34665	17.258652	2.2945	20.042732
0.39382	2.467407	1.36357	17.575325	2.31167	20.042732
0.41183	2.665327	1.3814	17.878801	2.33045	20.042732
0.42974	2.850053	1.39833	18.169086	2.34753	20.042732
0.44676	3.034778	1.41732	18.498955	2.3654	20.042732
0.46469	3.245893	1.44092	18.921185	2.38337	20.042732
0.48193	3.443814	1.45969	19.224661	2.40166	20.042732
0.49969	3.668123	1.47666	19.514944	2.41854	20.042732
0.51667	3.879238	1.49558	19.858006	2.43644	20.042732
0.53484	4.103548	1.51239	20.121899	2.45343	20.042732
0.55178	4.327858	1.53035	20.306625	2.4714	20.042732
0.56974	4.552167	1.54732	20.34621	2.48842	20.042732
0.5877	4.789672	1.56525	20.31982	2.50659	20.042732
0.60562	5.027176	1.58218	20.29343	2.52323	20.042732
0.62258	5.264681	1.6013	20.227457	2.54118	20.042732
0.64055	5.528574	1.61951	20.121899	2.55811	20.042732
0.65756	5.766079	1.63742	20.029537	2.58304	20.042732
0.67574	6.016778	1.65451	19.963564	2.60186	20.042732
0.69252	6.254282	1.67334	19.923979	2.61894	20.042732
0.71052	6.544566	1.69131	19.897591	2.63783	20.042732
0.72753	6.78207	1.71014	19.950369	2.65484	20.042732
0.74547	7.059159	1.72727	19.976759	2.67376	20.042732
0.76233	7.309857	1.74655	20.016344	2.69175	20.042732
0.78136	7.600141	1.76464	20.029537	2.71128	20.042732
0.79831	7.864035	1.78268	20.042732	2.72927	20.042732
0.81728	8.167512	1.78599	20.042732	2.74611	20.042732
0.83422	8.431406	1.80171	20.042732	2.76407	20.042732
0.85206	8.721689	1.81972	20.042732	2.78148	20.042732
0.86901	9.011972	1.83762	20.042732	2.80067	20.042732
0.88719	9.302255	1.85468	20.042732	2.81971	20.042732
0.90493	9.592539	1.87261	20.042732	2.83775	20.042732
0.92295	9.882821	1.88952	20.042732	2.85564	20.042732
0.93988	10.173105	1.90753	20.042732	2.8726	20.042732
		1.92448	20.042732	2.89057	20.042732

Data Pengujian Variasi Beban dengan Beban 1500 gr

Waktu (s)	Output (cm)		
0	0	0.99266	10.727282
0.02014	0.013195	1.0096	11.00437
0.03901	0.013195	1.02755	11.294654
0.05699	0.052779	1.04443	11.571742
0.07481	0.118752	1.06452	11.927999
0.09202	0.184726	1.08239	12.231477
0.10974	0.250699	1.09929	12.508565
0.12812	0.343062	1.11749	12.812042
0.14564	0.42223	1.13418	13.102325
0.17471	0.580566	1.15219	13.418999
0.19265	0.686124	1.16939	13.709281
0.20961	0.791681	1.18814	14.052344
0.22846	0.923628	1.20519	14.355821
0.24555	1.04238	1.22321	14.672494
0.2645	1.187522	1.24112	14.975972
0.28156	1.319469	1.25901	15.30584
0.29959	1.46461	1.276	15.609316
0.31659	1.609752	1.29391	15.912794
0.33457	1.768088	1.31093	16.189884
0.35148	1.926425	1.32882	16.493361
0.37057	2.111115	1.33007	16.559336
0.38841	2.282681	1.34575	16.783644
0.40635	2.480602	1.36391	17.100317
0.42326	2.652132	1.38058	17.390598
0.44317	2.876442	1.39863	17.694077
0.46019	3.061168	1.41566	17.971167
0.47813	3.272283	1.43365	18.287838
0.49509	3.457008	1.45056	18.538536
0.51298	3.681318	1.46943	18.868404
0.53002	3.892433	1.4875	19.158688
0.54803	4.116743	1.50534	19.475361
0.56485	4.327858	1.52241	19.752449
0.58284	4.565362	1.54036	20.016344
0.59965	4.789672	1.55721	20.214264
0.6231	5.106344	1.57532	20.280237
0.64092	5.330654	1.59214	20.29343
0.65793	5.568159	1.60992	20.253847
0.67578	5.832052	1.61226	20.253847
0.69282	6.082752	1.62794	20.187872
0.71166	6.33345	1.64593	20.108706
0.72862	6.570955	1.66277	20.029537
0.74651	6.848043	1.68068	19.976759
0.76381	7.111937	1.69769	19.950369
0.78243	7.40222	1.71576	19.950369
0.79938	7.65292	1.73262	19.950369
0.81738	7.916813	1.75062	19.950369
0.83522	8.207096	1.75194	19.950369
0.85305	8.497379	1.76771	19.950369
0.87013	8.761273	1.78547	19.950369
0.88796	9.051557	1.80341	19.950369
0.90515	9.315451	1.82134	19.950369
0.92297	9.592539	1.83836	19.950369
0.93995	9.869627	1.85622	19.950369
0.95785	10.146715	1.87326	19.950369
0.97474	10.410609	1.89113	19.950369
		1.90821	19.950369
		1.92598	19.950369
		1.94305	19.950369
		1.961	19.950369
		1.97856	19.950369
		1.99573	19.950369
		2.01276	19.950369
		2.0306	19.950369
		2.04767	19.950369
		2.04882	19.950369
		2.06553	19.950369
		2.08359	19.950369
		2.10145	19.950369
		2.11939	19.950369
		2.1373	19.950369
		2.15529	19.950369
		2.17333	19.950369
		2.19024	19.950369
		2.20806	19.950369
		2.22604	19.950369
		2.24409	19.950369
		2.26099	19.950369
		2.27905	19.950369
		2.2959	19.950369
		2.2981	19.950369
		2.31381	19.950369
		2.33081	19.950369
		2.34887	19.950369
		2.3644	19.950369
		2.38182	19.950369
		2.40016	19.950369
		2.41713	19.950369
		2.43492	19.950369
		2.45184	19.950369
		2.46971	19.950369
		2.48675	19.950369
		2.50652	19.950369
		2.52345	19.950369
		2.54139	19.950369
		2.55834	19.950369
		2.57721	19.950369
		2.59428	19.950369
		2.60065	19.950369
		2.61829	19.950369
		2.6352	19.950369
		2.65322	19.950369
		2.67011	19.950369
		2.68931	19.950369
		2.70721	19.950369
		2.72426	19.950369
		2.74312	19.950369
		2.76012	19.950369
		2.77805	19.950369
		2.79522	19.950369
		2.79819	19.950369
		2.814	19.950369
		2.83092	19.950369

LAMPIRAN 2

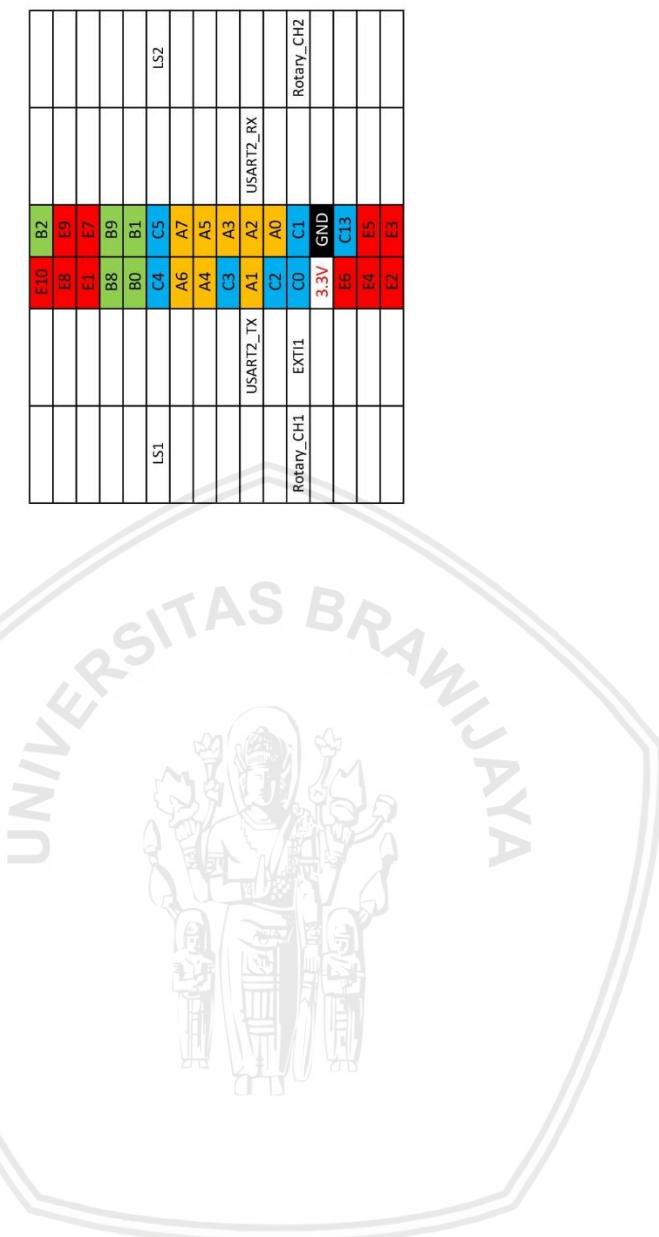
KONFIGURASI PIN DAN SKEMATIK





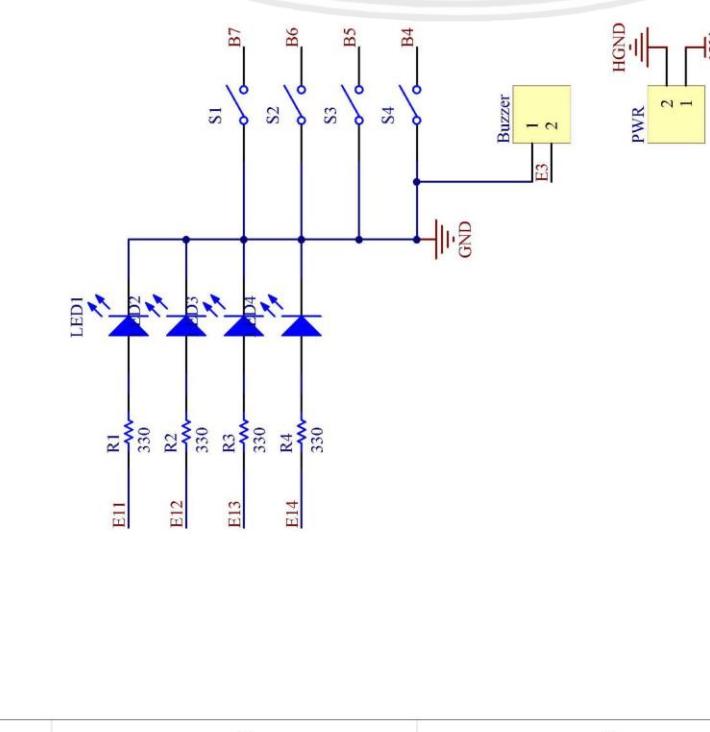
DIR2	PWM								LED1
	TIM3_CH1								
C8	C6	D14	D12	D10	D8	B11	E15	E13	E11
C7	D15	D13	D11	D9	B15	B12	GND	E14	E12
					B13	3.3V			
DIR1								LED4	LED2

	GND	VCC							
	A8	C9							
	A10	A9							
	A12	A11							
SWCLK	A14	A13	SWDIO						
	C10	A15							
	C12	C11							
	D1	D0							
	D3	D2							
	D5	D4							
	D7	D6							
PB4	B4	B3		PB3					
PB2	B6	B5		PB1					
	E0	B7							
	GND	3.3V							
	GND	5V							

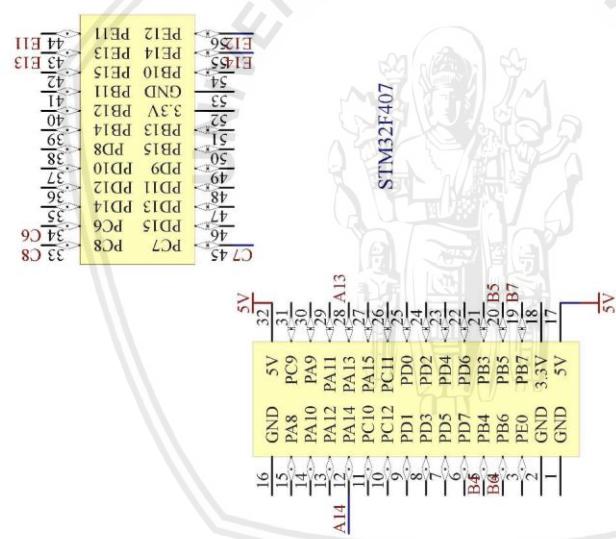




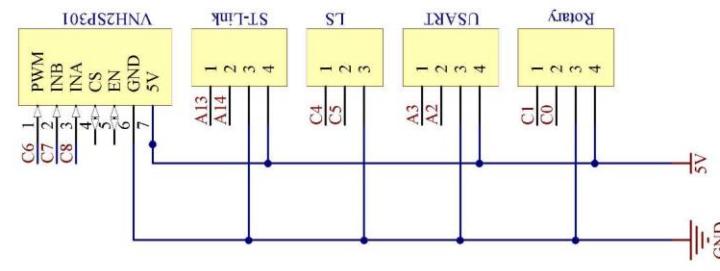
A



B



C



D

Title	Altium Limited		
Date:	5/14/2019 Time: 11:10:54 AM Sheet 1 of 1		
File:	D:\Kuliah\SKRIPSI\PCB\Project\Project SchDoc	Revision:	3
Page:	4		



A

B

C

D

A

B

C

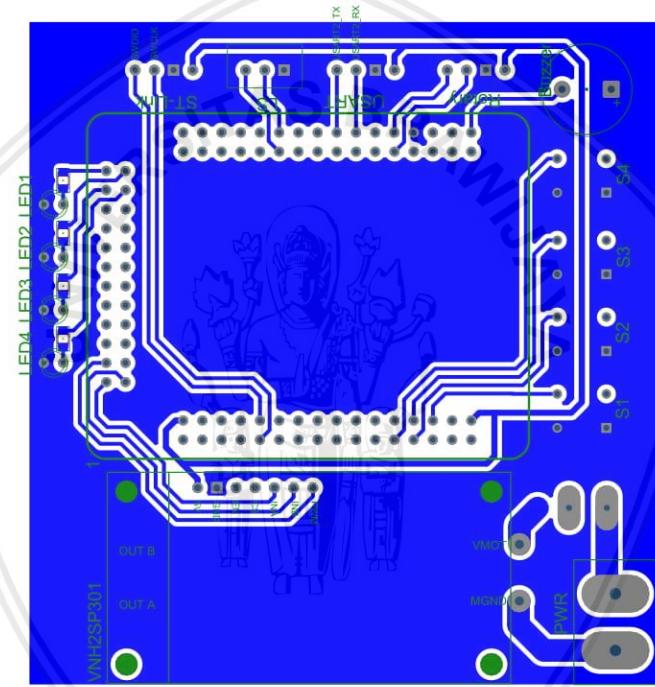
D

4

3

2

1



Allium Making Electronics Design Easier	ENGINEER: PCB DESIGNER: TITLE:	PART NO.: REV:
Altium Limited 12a Rodborough Rd Frenchs Forest NSW 2086	DATE: 5/14/2019	FILE NAME: Project.PcbDoc DWG NO.: SCALE:

4

3

2

1



LAMPIRAN 3

LISTING PROGRAM UTAMA





```

#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_exti.h"
#include "stm32f4xx_syscfg.h"
#include "stm32f4xx_tim.h"
#include "misc.h"
#include "math.h"
#include "stdlib.h"

typedef struct{
    int Setpoint;
    int Setpoint_1;
    float Kp;
    float Ki;
    float uk;
    float uk_1;
    float ek;
    float ek_1;
    int Action;
}Parameter1;

Parameter1 Kontroler;
Parameter1 Kontroler={0,0,2.4819,9,0,0,0,0,0};

typedef struct{
    int Pulsa;
    float Posisi;
    float D;
    int PPR;
}Parameter2;

Parameter2 Encoder;
Parameter2 Encoder={0,0,2.1,500};

void Rotary_Pin(){
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE);
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_SYSCFG, ENABLE);

    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN;
    GPIO_InitStruct.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_DOWN;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(&GPIO_InitStruct, GPIOC);

    SYSCFG_EXTILineConfig(EXTI_PortSourceGPIOC, EXTI_PinSource0);

    EXTI_InitTypeDef EXTI_InitStruct;
    EXTI_InitStruct EXTI_Mode = EXTI_Mode_Interrupt;
    EXTI_InitStruct EXTI_Trigger = EXTI_Trigger_Falling;
    EXTI_InitStruct EXTI_Line = EXTI_Line0;
    EXTI_InitStruct EXTI_LineCmd = ENABLE;
    EXTI_Init(&EXTI_InitStruct);

    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStruct;
    NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannel = EXTI0_IRQn;
    NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannelPreemptionPriority = 0;
    NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannelSubPriority = 0;
    NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStruct);
}

```

```

}

void Motor_Pin() {
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3, ENABLE);

    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;
    GPIO_InitStruct.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Pin = GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);
    GPIO_InitStruct.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Pin = GPIO_Pin_6;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);

    GPIO_PinAFConfig(GPIOC, GPIO_PinSource6, GPIO_AF_TIM3);

    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_BaseStruct;
    TIM_BaseStruct.TIM_Prescaler = 83;
    TIM_BaseStruct.TIM_Period = 255;
    TIM_BaseStruct.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
    TIM_BaseStruct.TIM_ClockDivision = TIM_CKD_DIV1;
    TIM_TimeBaseInit(TIM3, &TIM_BaseStruct);
    TIM_Cmd(TIM3, ENABLE);

    TIM_OCInitTypeDef TIM_OCStruct;
    TIM_OCStruct.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM2;
    TIM_OCStruct.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_Low;
    TIM_OCStruct.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;

    TIM_OC1Init(TIM3, &TIM_OCStruct);
    TIM_OC1PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
}

void LED_Pin() {
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOE, ENABLE);

    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT;
    GPIO_InitStruct.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStruct.GPIO_Speed = GPIO_Speed_2MHz;
    GPIO_Init(GPIOE, &GPIO_InitStruct);
}

void TIM4_Init() {
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM4, ENABLE);

    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_BaseStruct;
    TIM_BaseStruct.TIM_Prescaler = 839;
    TIM_BaseStruct.TIM_Period = 99; //1000Hz
    TIM_BaseStruct.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
    TIM_BaseStruct.TIM_ClockDivision = TIM_CKD_DIV1;
    TIM_TimeBaseInit(TIM4, &TIM_BaseStruct);
    TIM_ITConfig(TIM4, TIM_IT_Update, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM4, ENABLE);

    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStruct;
    NVIC_InitStruct.NVIC_IRQChannel = TIM4_IRQn;
    NVIC_InitStruct.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
}

```

```

NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannelSubPriority = 1;
NVIC_InitStruct.NVIC IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_InitStruct);
}

void EXTI0_IRQHandler() {
    if(EXTI_GetITStatus(EXTI_Line0)) {
        if(GPIO_ReadInputDataBit(GPIOC, GPIO_Pin_1)==SET) {
            Encoder.Pulsa--;
        }
        else{
            Encoder.Pulsa++;
        }
        Encoder.Posisi = Encoder.Pulsa*Encoder.D*M_PI/Encoder.PPR;
        EXTI_ClearITPendingBit(EXTI_Line0);
    }
}

void TIM4_IRQHandler() {
    if(TIM_GetITStatus(TIM4, TIM_IT_Update)) {

        Kontroler.ek = Kontroler.Setpoint - Encoder.Posisi;

        if(fabs(Kontroler.ek) <= 0.01) {
            Kontroler.ek = 0;
        }

        if(Kontroler.Setpoint != Kontroler.Setpoint_1) {
            Kontroler.uk_1 = 0;
        }

        Kontroler.uk = Kontroler.Kp*Kontroler.ek -
        Kontroler.Kp*Kontroler.ek_1 + Kontroler.Ki*Kontroler.ek*0.001 +
        Kontroler.uk_1;
        Kontroler.uk_1 = Kontroler.uk;
        Kontroler.ek_1 = Kontroler.ek;

        if(Kontroler.ek>0) {
            GPIO_SetBits(GPIOC, GPIO_Pin_8);
            GPIO_ResetBits(GPIOC, GPIO_Pin_7);
        }
        else if(Kontroler.ek<0) {
            GPIO_SetBits(GPIOC, GPIO_Pin_7);
            GPIO_ResetBits(GPIOC, GPIO_Pin_8);
        }
        else if(Kontroler.ek == 0) {
            GPIO_ResetBits(GPIOC, GPIO_Pin_7);
            GPIO_ResetBits(GPIOC, GPIO_Pin_8);
        }

        if(Kontroler.uk>255) {
            Kontroler.uk = 255;
        }
        else if(Kontroler.uk<-255) {
            Kontroler.uk = -255;
        }

        Kontroler.Action = abs(Kontroler.uk);
        TIM3->CCR1=Kontroler.Action;

        GPIO_ToggleBits(GPIOE, GPIO_Pin_0);
    }
}

```

```
        TIM_ClearITPendingBit(TIM4,TIM_IT_Update);
    }
}

int main(void)
{
    SystemInit();
    Motor_Pin();
    Rotary_Pin();
    LED_Pin();
    TIM4_Init();
    while(1)
    {
    }
}
```



LAMPIRAN 4

DATASHEET



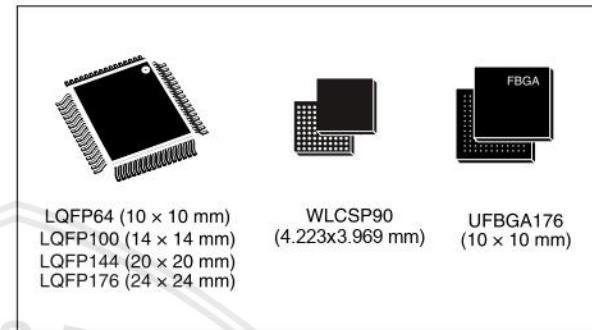


ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 210DMIPS, up to 1MB Flash/192+4KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces & camera

Datasheet - production data

Features

- Core: ARM® 32-bit Cortex®-M4 CPU with FPU, Adaptive real-time accelerator (ART Accelerator™) allowing 0-wait state execution from Flash memory, frequency up to 168 MHz, memory protection unit, 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1), and DSP instructions
- Memories
 - Up to 1 Mbyte of Flash memory
 - Up to 192+4 Kbytes of SRAM including 64-Kbyte of CCM (core coupled memory) data RAM
- Flexible static memory controller supporting Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR and NAND memories
- LCD parallel interface, 8080/6800 modes
- Clock, reset and supply management
 - 1.8 V to 3.6 V application supply and I/Os
 - POR, PDR, PVD and BOR
 - 4-to-26 MHz crystal oscillator
 - Internal 16 MHz factory-trimmed RC (1% accuracy)
 - 32 kHz oscillator for RTC with calibration
 - Internal 32 kHz RC with calibration
- Low-power operation
 - Sleep, Stop and Standby modes
 - V_{BAT} supply for RTC, 20×32 bit backup registers + optional 4 KB backup SRAM
- 3×12-bit, 2.4 MSPS A/D converters: up to 24 channels and 7.2 MSPS in triple interleaved mode
- 2×12-bit D/A converters
- General-purpose DMA: 16-stream DMA controller with FIFOs and burst support



- Up to 17 timers: up to twelve 16-bit and two 32-bit timers up to 168 MHz, each with up to 4 IC/OC/PWM or pulse counter and quadrature (incremental) encoder input
- Debug mode
 - Serial wire debug (SWD) & JTAG interfaces
 - Cortex-M4 Embedded Trace Macrocell™
- Up to 140 I/O ports with interrupt capability
 - Up to 136 fast I/Os up to 84 MHz
 - Up to 138 5 V-tolerant I/Os
- Up to 15 communication interfaces
 - Up to 3 × I²C interfaces (SMBus/PMBus)
 - Up to 4 USARTs/2 UARTs (10.5 Mbit/s, ISO 7816 interface, LIN, IrDA, modem control)
 - Up to 3 SPIs (42 Mbit/s), 2 with muxed full-duplex I²S to achieve audio class accuracy via internal audio PLL or external clock
 - 2 × CAN interfaces (2.0B Active)
 - SDIO interface
- Advanced connectivity
 - USB 2.0 full-speed device/host/OTG controller with on-chip PHY
 - USB 2.0 high-speed/full-speed device/host/OTG controller with dedicated DMA, on-chip full-speed PHY and ULP
 - 10/100 Ethernet MAC with dedicated DMA: supports IEEE 1588v2 hardware, MII/RMII

- 8- to 14-bit parallel camera interface up to 54 Mbytes/s
- True random number generator
- CRC calculation unit
- 96-bit unique ID
- RTC: subsecond accuracy, hardware calendar

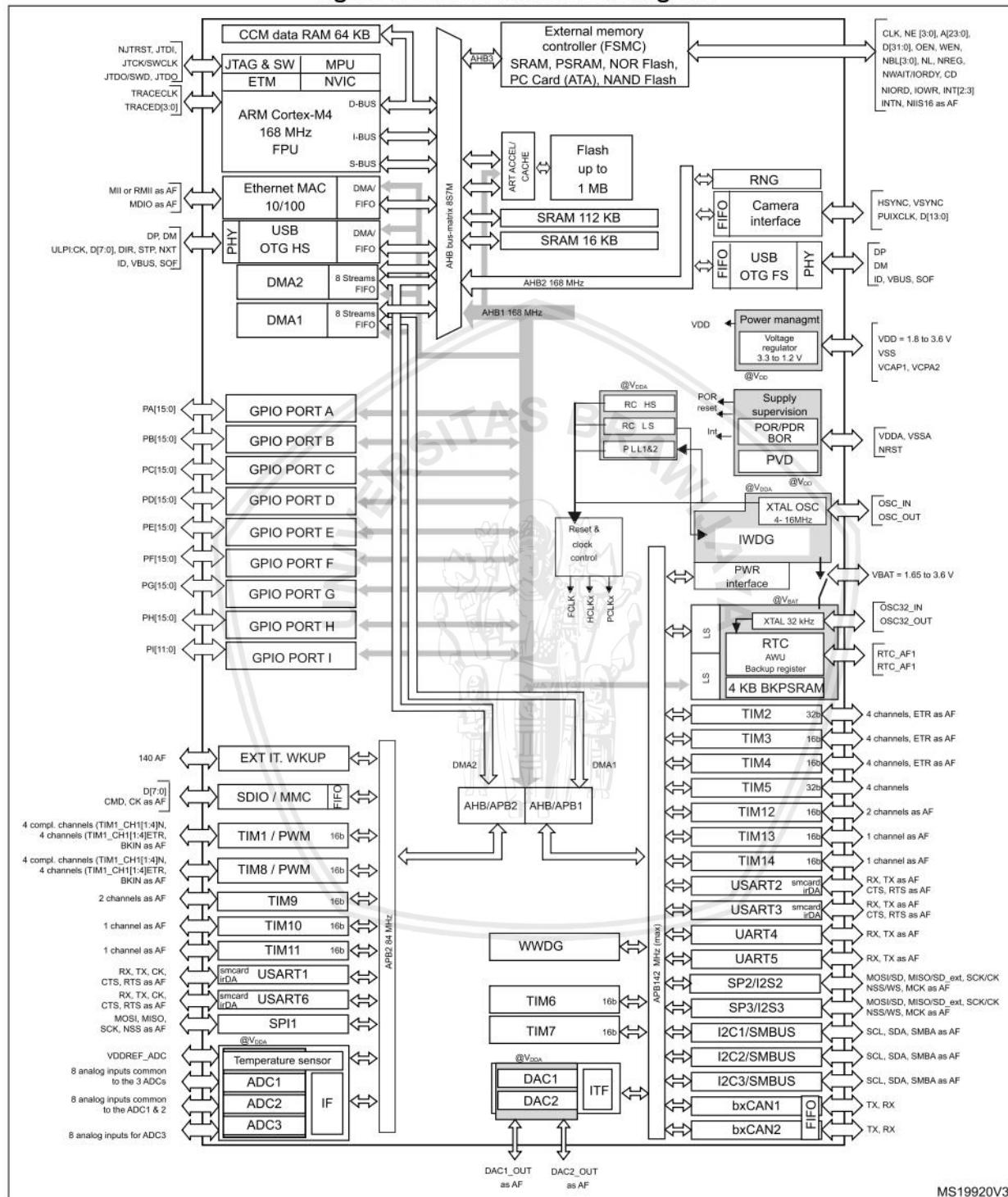
Table 1. Device summary

Reference	Part number
STM32F405xx	STM32F405RG, STM32F405VG, STM32F405ZG, STM32F405OG, STM32F405OE
STM32F407xx	STM32F407VG, STM32F407IG, STM32F407ZG, STM32F407VE, STM32F407ZE, STM32F407IE



2.2 Device overview

Figure 5. STM32F40xxx block diagram



1. The camera interface and ethernet are available only on STM32F407xx devices.

MS19920V3



E40 Series

Diameter ø40mm Shaft type/Hollow type/Built-in type Incremental Rotary Encoder

■ Features

- 12-24VDC power supply of line driver output(Line-up)
- Easy installation at narrow space
- Small moment of inertia
- Power supply : 5VDC, 12-24VDC ±5%
- Various output types

⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



■ Ordering information

E40	H	8	—	5000	—	3	—	N	—	24	—	
Series	Shaft type	Hollow type	Pulse/1Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable					
S: Shaft type	External	Inner		2: A, B	T: Totem pole output	5 : 5VDC ±5%	No mark: Cable type					
H: Hollow type		6: ø6mm	Series	3: A, B, Z	N: NPN open collector output	24: 12-24VDC ±5%						
HB: Hollow built-in type		8: ø8mm		4: A, \bar{A} , B, \bar{B}	V: Voltage output							
		10: ø10mm		6: A, \bar{A} , B, Z, Z	L: Line driver output							
		12: ø12mm					C: Connector cable type(※)					

※Standard: E40S6-[PULSE]-3-N-24, E40H8-[PULSE]-3-N-24
E40HB8-[PULSE]-3-N-24

※Cable length : 250mm

■ Specifications

Item	Diameter ø40mm shaft/hollow shaft/hollow built-in type of incremental rotary encoder											
Resolution(P/R) ^{※1}	*1, *2, *5, 10, *12, 15, 20, 23, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 75, 100, 120, 150, 192, 200, 240, 250, 256, 300, 360, 400, 500, 512, 600, 800, 1000, 1024, 1200, 1500, 1800, 2000, 2048, 2500, 3000, 3600, 5000 (Not indicated resolution is customizable.)											
Output phase	A, B, Z phase(Line driver A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z} phase)											
Phase difference of output	Phase difference between A and B : $\frac{\pi}{4} \pm \frac{\pi}{8}$ (T=1cycle of A phase)											
Control output	<table border="0"> <tr> <td>Totem pole output</td> <td>• Low - Load current:Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC</td> </tr> <tr> <td>NPN open collector output</td> <td>• High - Load current:Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC):Min. (Power voltage-3.0)VDC</td> </tr> <tr> <td>Voltage output</td> <td>Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC</td> </tr> <tr> <td>Line driver output</td> <td>• Low - Load current : Max. 20mA, Residual voltage : Max. 0.5VDC • High - Load current : -20mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. 2.5VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC): Min. (Power voltage-3.0)VDC</td> </tr> </table>			Totem pole output	• Low - Load current:Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC	NPN open collector output	• High - Load current:Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC):Min. (Power voltage-3.0)VDC	Voltage output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC	Line driver output	• Low - Load current : Max. 20mA, Residual voltage : Max. 0.5VDC • High - Load current : -20mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. 2.5VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC): Min. (Power voltage-3.0)VDC	
Totem pole output	• Low - Load current:Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC											
NPN open collector output	• High - Load current:Max. 10mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. (Power voltage-2.0)VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC):Min. (Power voltage-3.0)VDC											
Voltage output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC											
Line driver output	• Low - Load current : Max. 20mA, Residual voltage : Max. 0.5VDC • High - Load current : -20mA, Output voltage(Power voltage 5VDC): Min. 2.5VDC, Output voltage(Power voltage 12-24VDC): Min. (Power voltage-3.0)VDC											
Electrical specification	Response time (Rise/Fall)	<table border="0"> <tr> <td>Totem pole output</td> <td>Max. 1μs</td> </tr> <tr> <td>NPN open collector output</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Voltage output</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Line driver output</td> <td>Max. 0.5μs</td> </tr> </table>		Totem pole output	Max. 1μs	NPN open collector output		Voltage output		Line driver output	Max. 0.5μs	• Measuring condition - Cable length : 2m, I sink = 20mA
Totem pole output	Max. 1μs											
NPN open collector output												
Voltage output												
Line driver output	Max. 0.5μs											
	Max. Response frequency	300kHz										
	Power supply	• 5VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%) • 12-24VDC ±5%(Ripple P-P : Max. 5%)										
	Current consumption	Max. 80mA(disconnection of the load), Line driver output : Max. 50mA(disconnection of the load)										
	Insulation resistance	Min. 100MΩ(at 500VDC megger between all terminals and case)										
	Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute(Between all terminals and case)										
	Connection	Cable type, 250mm connector cable type										
Mechanical specification	Starting torque	Shaft type : Max. 40gf·cm(0.004N·m), Hole type : Max. 50gf·cm(0.005N·m)										
	Moment of inertia	Max. 40g·cm ² (4×10 ⁻⁶ kg·m ²)										
	Shaft loading	Radial : Max. 2kgf, Thrust : Max. 1kgf										
	Max. allowable revolution ^{※2}	5000rpm										
	Vibration	1.5mm amplitude or 300m/s ² at frequency of 10 to 55Hz(for 1 min.) in each of X, Y, Z directions for 2 hours										
	Shock	Approx. Max. 50G										
Environment	Ambient temperature	-10 to 70°C, storage : -25 to 85°C										
	Ambient humidity	35 to 85%RH, storage : 35 to 90%RH										
Protection	IP50(IEC standard) ※Option type is available for IP64 (IEC standard).											
Cable	$\phi 5$, 5-wire, Length : 2m, Shield cable(Line driver output : $\phi 5$, 8-wire)(AWG24, Core diameter: 0.08, Number of cores: 40, Insulator out diameter: $\phi 1$)											
Accessory	• Shaft type:ø6mm coupling standard, ø8mm coupling(Sold separately) • Hole type : Bracket											
Approval	CE (Except line driver output)											
Unit weight	Approx. 160g											

※1: * pulse is only for A, B phase(Line Driver output is for A, \bar{A} , B, \bar{B} phase)

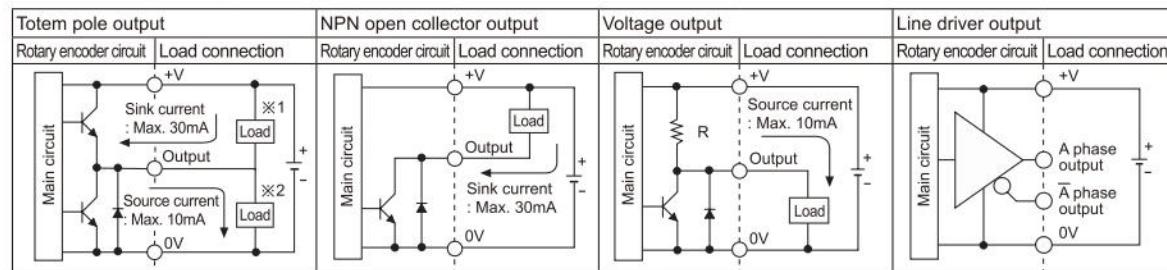
※2: Make sure that. Max response revolution should be lower than or equal to max. allowable revolution when selecting the resolution.

$$[\text{Max. response revolution(rpm)}] = \frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60 \text{ sec}$$

※Environment resistance is rated at no freezing or condensation.

Incremental ø40mm Shaft/Hollow Shaft/Built-in type

Control output diagram

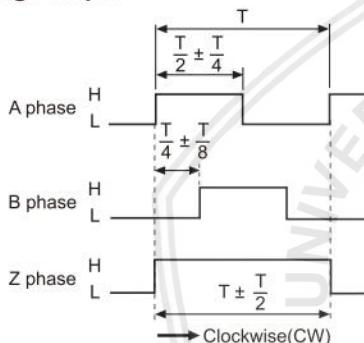


- Totem pole output type can be used for NPN open collector output type(※1) or Voltage output type(※2).
- All output circuits of A, B, Z phase are the same. (Line driver output is A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z})

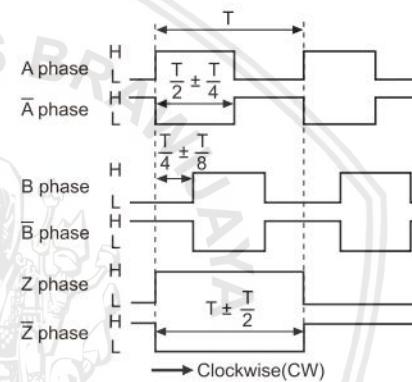
(A)	Photo electric sensor
(B)	Fiber optic sensor
(C)	Door/Area sensor
(D)	Proximity sensor
(E)	Pressure sensor
(F)	Rotary encoder
(G)	Connector/Socket
(H)	Temp. controller
(I)	SSR/Power controller
(J)	Counter
(K)	Timer
(L)	Panel meter
(M)	Tacho/Speed/Pulse meter
(N)	Display unit
(O)	Sensor controller
(P)	Switching mode power supply
(Q)	Stepper motor&Driver&Controller
(R)	Graphic/Logic panel
(S)	Field network device
(T)	Software
(U)	Other

Output waveform

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



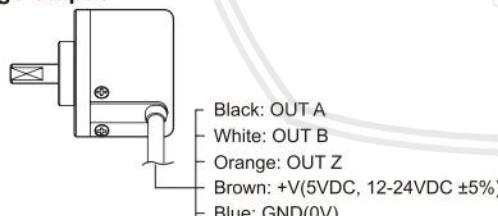
- Line driver output



Connections

◎ Cable type

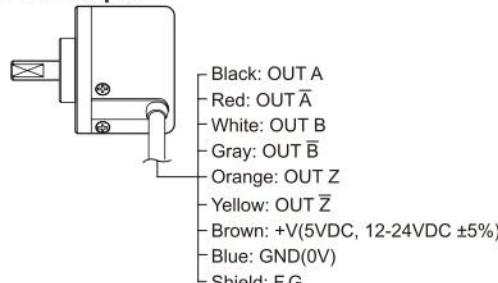
- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



※Unused wires must be insulated.

※The metal case and shield wire of encoder should be grounded(F.G.).

• Line driver output



◎ Connector cable type

- Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output

- Line driver output



Totem pole output/ NPN open collector output/ Voltage output			Line driver output		
Pin No	Function	Cable color	Pin No	Function	Cable color
①	OUT A	Black	①	OUT A	Black
②	OUT B	White	②	OUT \bar{A}	Red
③	OUT Z	Orange	③	+V	Brown
④	+V	Brown	④	GND	Blue
⑤	GND	Blue	⑤	OUT B	White
⑥	F.G.	Shield	⑥	OUT \bar{B}	Gray
			⑦	OUT Z	Orange
			⑧	OUT \bar{Z}	Yellow
			⑨	F.G.	Shield

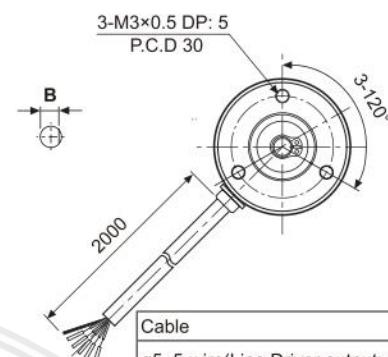
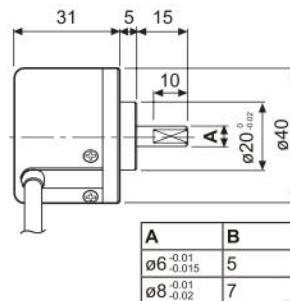
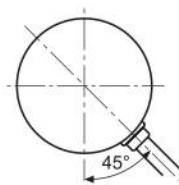
※F.G.(Field Ground): It should be grounded separately.

E40 Series

■ Dimensions

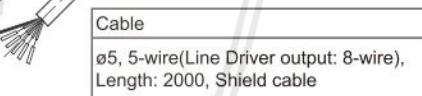
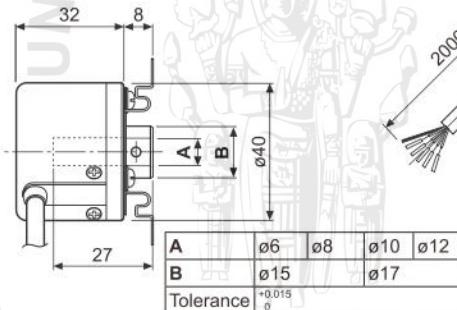
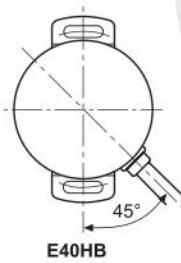
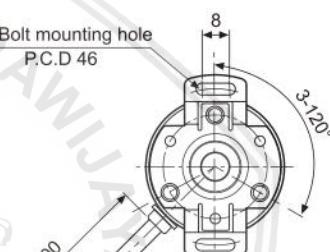
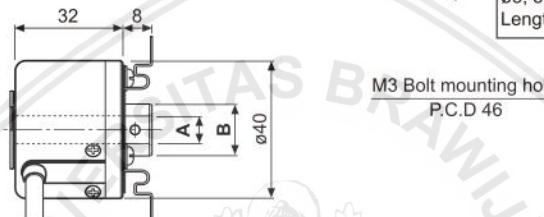
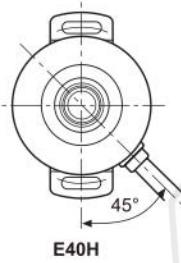
◎ Cable type

• Shaft type

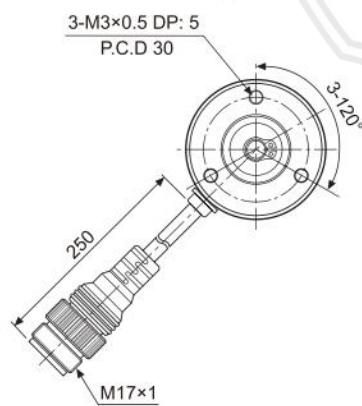


(unit: mm)

• Hollow shaft / Hollow shaft built-in type

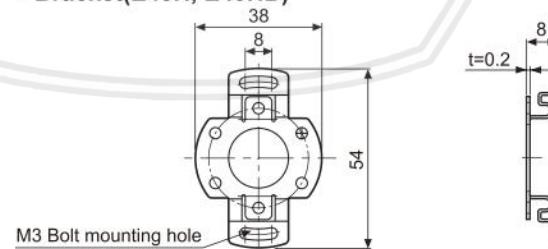


◎ Connector cable type



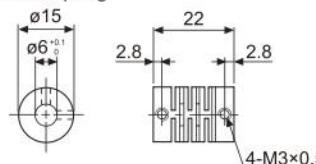
※Connector cable is customizable and refer to the G-10 for specifications.

• Bracket(E40H, E40HB)



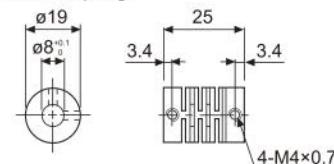
• Coupling(E40S)

• Ø6 Coupling



- Parallel misalignment : Max. 0.25mm
- Angular misalignment: Max. 5°
- End-play: Max. 0.2mm

• Ø8 Coupling



- ※For parallel misalignment, angular misalignment, end-play terms, refer to the F-78 page.
※For flexible coupling(ERB Series) information, refer to the F-71 page.



Automotive fully integrated H-bridge motor driver**Datasheet - production data****Features**

Type	R _{DS(on)}	I _{out}	V _{ccmax}
VNH2SP30-E	19 mΩ max (per leg)	30 A	41 V

- AEC-Q100 qualified
- 5 V logic level compatible inputs
- Undervoltage and overvoltage shutdown
- Overvoltage clamp
- Thermal shutdown
- Cross-conduction protection
- Linear current limiter
- Very low standby power consumption
- PWM operation up to 20 kHz
- Protection against loss of ground and loss of V_{CC}
- Current sense output proportional to motor current
- Package: ECOPACK®

**Description**

The VNH2SP30-E is a full bridge motor driver intended for a wide range of automotive applications. The device incorporates a dual monolithic high side driver and two low side switches. The high side driver switch is designed

using STMicroelectronics well known and proven proprietary VIPower™ M0 technology which permits efficient integration on the same die of a true power MOSFET with intelligent signal/protection circuitry.

The low side switches are vertical MOSFETs manufactured using STMicroelectronics proprietary EHD (STripFET™) process. The three die are assembled in a MultiPowerSO-30 package on electrically isolated leadframes. This package, specifically designed for the harsh automotive environments, offers improved thermal performance thanks to exposed die pads. Moreover, its fully symmetrical mechanical design allows superior manufacturability at board level. The input signals IN_A and IN_B can directly interface with the microcontroller to select the motor direction and brake condition. The DIAG_A/EN_A or DIAG_B/EN_B, when connected to an external pull-up resistor, enable one leg of the bridge. They also provide a feedback digital diagnostic signal. The normal operating condition is explained in the truth table. The motor current can be monitored with the CS pin by delivering a current proportional to its value. The speed of the motor can be controlled in all possible conditions by the PWM up to 20 kHz. In all cases, a low level state on the PWM pin will turn off both the LS_A and LS_B switches. When PWM rises to a high level, LS_A or LS_B turn on again depending on the input pin state.

Table 1. Device summary

Package	Order code
Tape and reel	
MultiPowerSO-30	VNH2SP30TR-E

1 Block diagram and pin description

Figure 1. Block diagram

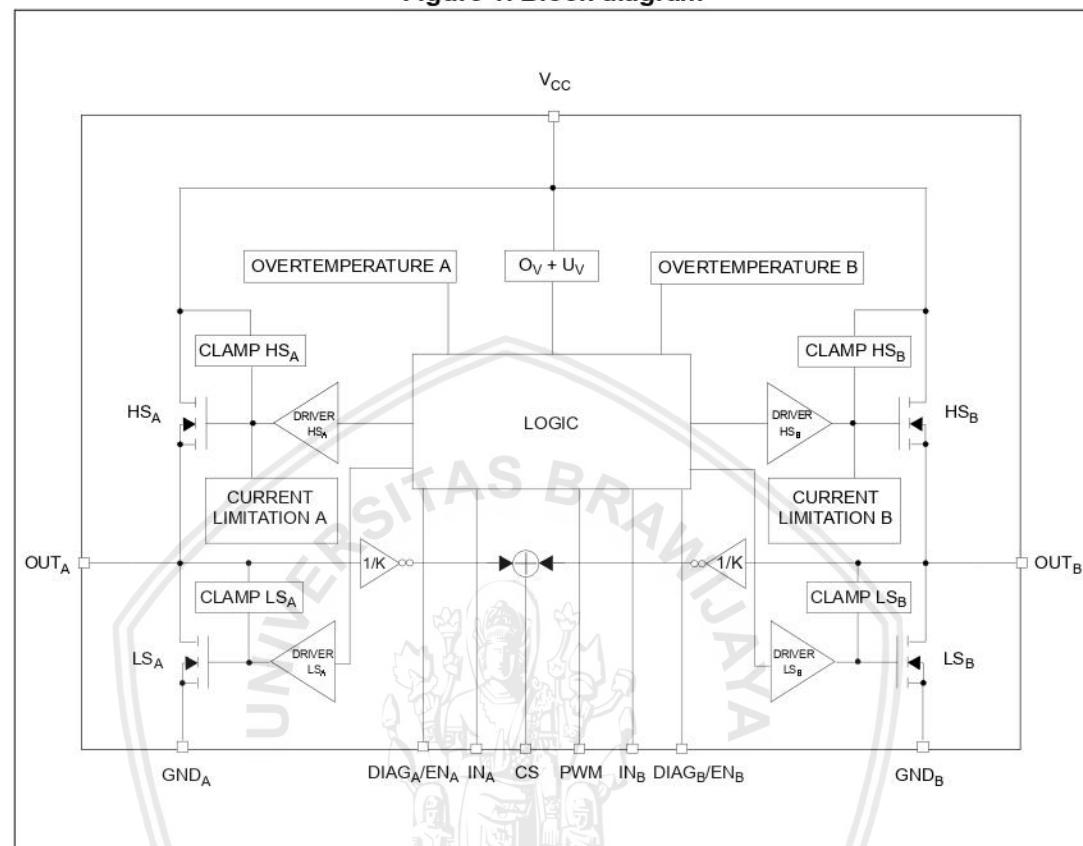
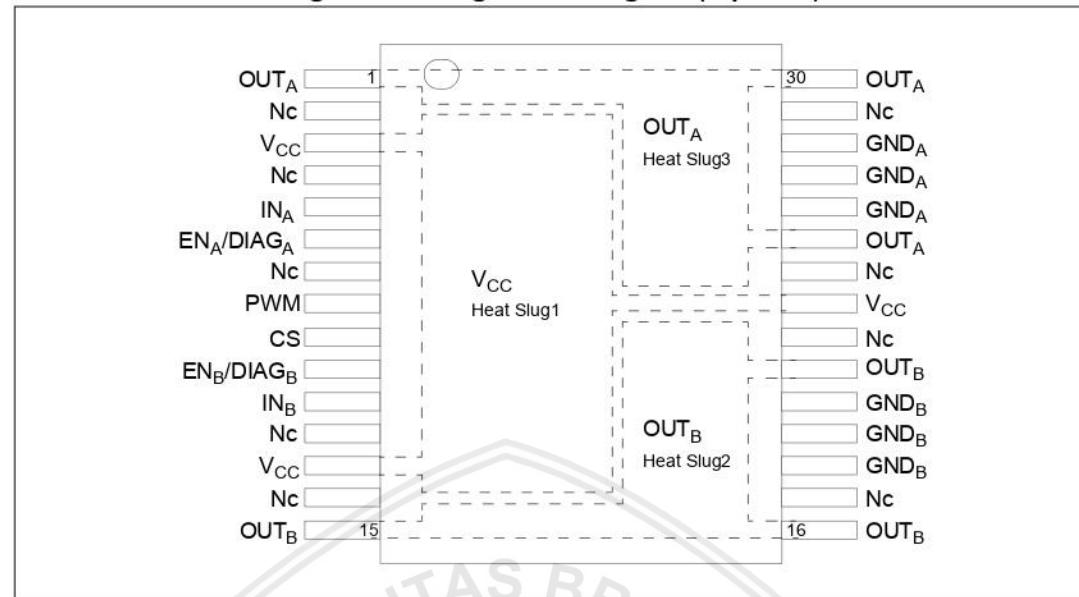


Table 2. Block description

Name	Description
Logic control	Allows the turn-on and the turn-off of the high side and the low side switches according to the truth table
Overvoltage + undervoltage	Shuts down the device outside the range [5.5V..16V] for the battery voltage
High side and low side clamp voltage	Protects the high side and the low side switches from the high voltage on the battery line in all configurations for the motor
High side and low side driver	Drives the gate of the concerned switch to allow a proper R _{DS(on)} for the leg of the bridge
Linear current limiter	Limits the motor current by reducing the high side switch gate-source voltage when short-circuit to ground occurs
Overtemperature protection	In case of short-circuit with the increase of the junction's temperature, shuts down the concerned high side to prevent its degradation and to protect the die
Fault detection	Signals an abnormal behavior of the switches in the half-bridge A or B by pulling low the concerned EN _x /DIAG _x pin

Figure 2. Configuration diagram (top view)**Table 3. Pin definitions and functions**

Pin no.	Symbol	Function
1, 25, 30	OUT _A , Heat Slug3	Source of high side switch A / Drain of low side switch A
2, 4, 7, 12, 14, 17, 22, 24, 29	NC	Not connected
3, 13, 23	V _{CC} , Heat Slug1	Drain of high side switches and power supply voltage
6	EN _A /DIAG _A	Status of high side and low side switches A; open drain output
5	IN _A	Clockwise input
8	PWM	PWM input
9	CS	Output of current sense
11	IN _B	Counter clockwise input
10	EN _B /DIAG _B	Status of high side and low side switches B; open drain output
15, 16, 21	OUT _B , Heat Slug2	Source of high side switch B / Drain of low side switch B
26, 27, 28	GND _A	Source of low side switch A ⁽¹⁾
18, 19, 20	GND _B	Source of low side switch B ⁽¹⁾

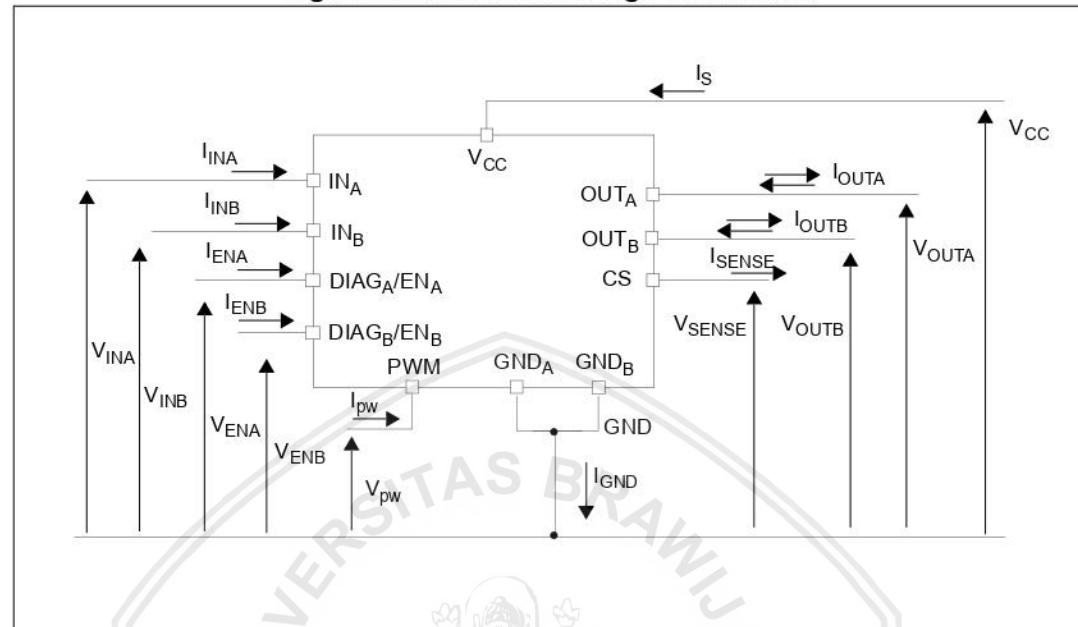
1. GND_A and GND_B must be externally connected together.

Table 4. Pin functions description

Name	Description
V_{CC}	Battery connection
GND_A , GND_B	Power grounds; must always be externally connected together
OUT_A , OUT_B	Power connections to the motor
IN_A , IN_B	Voltage controlled input pins with hysteresis, CMOS compatible. These two pins control the state of the bridge in normal operation according to the truth table (brake to V_{CC} , brake to GND, clockwise and counterclockwise).
PWM	Voltage controlled input pin with hysteresis, CMOS compatible. Gates of low side FETs are modulated by the PWM signal during their ON phase allowing speed control of the motor.
$EN_A/DIAG_A$, $EN_B/DIAG_B$	Open drain bidirectional logic pins. These pins must be connected to an external pull up resistor. When externally pulled low, they disable half-bridge A or B. In case of fault detection (thermal shutdown of a high side FET or excessive ON state voltage drop across a low side FET), these pins are pulled low by the device (see truth table in fault condition).
CS	Analog current sense output. This output sources a current proportional to the motor current. The information can be read back as an analog voltage across an external resistor.

2 Electrical specifications

Figure 3. Current and voltage conventions



2.1 Absolute maximum ratings

Table 5. Absolute maximum ratings

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_{CC}	Supply voltage	+41	V
I_{max}	Maximum output current (continuous)	30	A
I_R	Reverse output current (continuous)	-30	
I_{IN}	Input current (IN _A and IN _B pins)	± 10	mA
I_{EN}	Enable input current (DIAG _A /EN _A and DIAG _B /EN _B pins)	± 10	
I_{pw}	PWM input current	± 10	
V_{CS}	Current sense maximum voltage	-3/+15	V
V_{ESD}	Electrostatic discharge (R = 1.5kΩ, C = 100pF) – CS pin	2	kV
	– logic pins	4	kV
	– output pins: OUT _A , OUT _B , V _{CC}	5	kV
T_j	Junction operating temperature	Internally limited	°C
T_c	Case operating temperature	-40 to 150	
T_{STG}	Storage temperature	-55 to 150	

2.2 Electrical characteristics

V_{CC} = 9V up to 16 V; $-40^{\circ}C < T_j < 150^{\circ}C$, unless otherwise specified.

Table 6. Power section

Symbol	Parameter	Test conditions	Min	Typ	Max	Unit
V_{CC}	Operating supply voltage		5.5		16	V
I_S	Supply current	Off state with all Fault Cleared & $EN_x=0$ $IN_A = IN_B = PWM = 0$; $T_j = 25^{\circ}C$; $V_{CC} = 13V$ $IN_A = IN_B = PWM = 0$ Off state: $IN_A = IN_B = PWM = 0$		12	30	μA
		On state: IN_A or $IN_B = 5V$, no PWM		2	60	μA
R_{ONHS}	Static high side resistance	$I_{OUT} = 15A$; $T_j = 25^{\circ}C$			14	$m\Omega$
		$I_{OUT} = 15A$; $T_j = -40$ to $150^{\circ}C$			28	
R_{ONLS}	Static low side resistance	$I_{OUT} = 15A$; $T_j = 25^{\circ}C$			5	$m\Omega$
		$I_{OUT} = 15A$; $T_j = -40$ to $150^{\circ}C$			10	
V_f	High side free-wheeling diode forward voltage	$I_f = 15A$		0.8	1.1	V
$I_{L(off)}$	High side off state output current (per channel)	$T_j = 25^{\circ}C$; $V_{OUTX} = EN_X = 0V$; $V_{CC} = 13V$			3	μA
		$T_j = 125^{\circ}C$; $V_{OUTX} = EN_X = 0V$; $V_{CC} = 13V$			5	
I_{RM}	Dynamic cross-conduction current	$I_{OUT} = 15A$ (see Figure 7)		0.7		A

Table 7. Logic inputs (IN_A , IN_B , EN_A , EN_B)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min	Typ	Max	Unit
V_{IL}	Input low level voltage	Normal operation ($DIAG_X/EN_X$ pin acts as an input pin)			1.25	V
V_{IH}	Input high level voltage		3.25			
V_{IHYST}	Input hysteresis voltage		0.5			
V_{ICL}	Input clamp voltage	$I_{IN} = 1mA$	5.5	6.3	7.5	
		$I_{IN} = -1mA$	-1.0	-0.7	-0.3	
I_{INL}	Input low current	$V_{IN} = 1.25V$	1			μA
I_{INH}	Input high current	$V_{IN} = 3.25V$			10	
V_{DIAG}	Enable output low level voltage	Fault operation ($DIAG_X/EN_X$ pin acts as an output pin); $I_{EN} = 1mA$			0.4	V