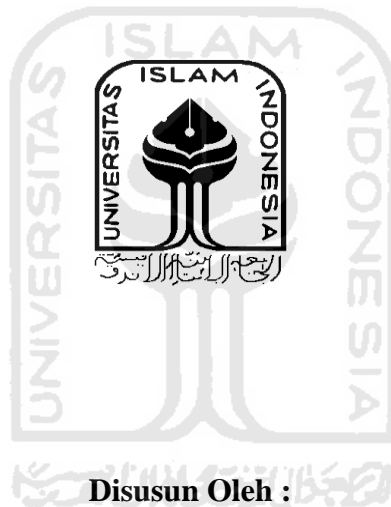


**PEMODELAN DAN PEMBUATAN PROTOTIPE SISTEM
KENDALI POSISI *ROTARY INVERTED PENDULUM***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**



Disusun Oleh :

Nama : HARDIKA RAHMADANI SUTEJO
No. Mahasiswa : 16525005
NIRM : 2016010501

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2020

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupakan karya sendiri bukan hasil plagiarisme dari karya tulis yang dibuat oleh orang lain. Semua referensi dan kutipan yang saya tulis pada karya tulis ini saya cantumkan sitasi dan sumber pustakanya. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak kekayaan intelektual dan yang saya tulis pada karya ilmiah ini tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi dan hukuman yang berlaku.



Yogyakarta, 19 September 2020



Hardika Rahmadani Sutejo
Hardika Rahmadani Sutejo

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**PEMODELAN DAN PEMBUATAN PROTOTIPE SISTEM
KENDALI POSISI *ROTARY INVERTED PENDULUM***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : HARDIKA RAHMADANI SUTEJO

No. Mahasiswa : 16525005

NIRM : 2016010501



Yogyakarta, 4 Agustus 2020

Pembimbing I,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Purtojo'.

Purtojo, S.T., M.Sc.

Pembimbing II,

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Agung Nugroho Adi'.

Agung Nugroho Adi, S.T., M.T.

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**PEMODELAN DAN PEMBUATAN PROTOTIPE SISTEM
KENDALI POSISI *ROTARY INVERTED PENDULUM***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : HARDIKA RAHMADANI SUTEJO


No. Mahasiswa : 16525005

NIRM : 2016010501

Tim Penguji


Purojo, S.T., M.Sc.

Ketua


Tanggal : 18/09/2020


Mohammad Faizun, S.T., M.Eng., Ph.D

Anggota I


Tanggal : 10/09/2020

Donny Suryawan, S.T., M.Eng

Anggota II


Tanggal : 14/09/2020

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Eng. Risdiyono, S.T., M.Eng.

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari sesuatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain).

Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap”

(QS. Al-Insyirah: 6-8)

Saya ucapkan terimakasih kepada :

Bapak dan ibu tercinta

Bambang Sutejo dan Ir. Haryati Wijaya

Sebagai tanda bukti untukku dalam menjalankan amanahmu di jenjang pendidikan. Terimakasih telah berusaha semaksimal mungkin untuk menghantarkanku mencapai gelar sarjana. Semoga gelar yang ku peroleh bisa menjadi bekalmu diakhirat kelak.

Aamiin yaRabbal’alamiin

Masku, **Arif Rahman Sutejo, S.T** dan istri

Terimakasih atas segala petuah yang engkau haturkan untukku. Doakan aku bisa menjadi apa yang engkau harapkan. Jangan lelah untuk terus memberi nasehat kepadaku.

Teruntuk adikku, **Aisyah Wijayanti**

Tetaplah menjadi adik yang aku banggakan. Mari berjuang bersama dalam hal membanggakan ibu dan bapak.

HALAMAN MOTTO

Seseorang yang bertindak tanpa ilmu ibarat bepergian tanpa petunjuk

(Hasan Al-Basri)

Saat anak Adam meninggal, terputus semua amalannya kecuali 3 perkara.

Sedekah jariyyah, anak yang sholeh dan ilmu yang bermanfaat

(Hadits Riwayat Muslim)

Everybody is genius. But, if you judge a fish by its ability to climb a tree, it will

live its whole life believing that it is stupid

(Albert Einstein)

Win without bragging and lose without complaining

(Anonym)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH



Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirabbil'alamiin, dengan segala bentuk kebaikan dan izin Allah SWT sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pemodelan dan Pembuatan Prototipe Sistem Kendali Posisi Rotary Inverted Pendulum”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat bagi mahasiswa untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin (S.T) pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri di Universitas Islam Indonesia. Saya haturkan terimakasih banyak kepada pihak yang telah bersedia memberi bantuan dan saran sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

1. Purtojo S.T., M.Sc sebagai dosen pembimbing pertama yang telah meluangkan waktu dan berjasa dalam memberikan ilmu, membimbing, mengarahkan, mendukung, dan memberikan kemudahan kepada saya selama proses penyusunan skripsi ini. Semoga Allah memberikan ridho-Nya, aamiin.
2. Agung Nugroho Adi, S.T., M.T sebagai dosen pembimbing kedua yang telah meluangkan waktu dan berjasa dalam memberikan ilmu, membimbing, mengarahkan, mendukung, dan memberikan kemudahan kepada saya selama proses penyusunan skripsi ini. Semoga Allah memberikan ridho-Nya, aamiin.
3. Mohammad Faizun, S.T., M.Eng., Ph.D yang telah bersedia memberikan waktunya untuk menguji dan memberikan arahan pada saya dalam penyusunan skripsi ini.
4. Donny Suryawan, S.T., M.Eng yang telah bersedia memberikan waktunya untuk menguji dan memberikan arahan pada saya dalam penyusunan skripsi ini.
5. Vicky Indra Pratama, terimakasih atas segala kebaikan dan kesabaran selama penelitian.

6. Teman seperjuangan angkatan Teknik Mesin 2016, semoga kita dipertemukan kembali dalam kondisi yang jauh lebih baik dan tetap membanggakan almamater UII.
7. Nur Atsil, S.Farm, terimakasih telah hadir untuk memberikan semangat. Semoga Allah SWT selalu memberikan kemudahan atas segala urusan kita. Aamiin
8. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu persatu, terimakasih telah membentukku.

Saya berharap kepada semua pihak yang membaca naskah skripsi ini untuk bisa memberikan kritik dan saran sebagai perbaikan dikemudian hari. Semoga Allah SWT memberikan ridho-Nya dan semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 29 Juli 2020

Penulis,



Hardika Rahmadani Sutejo

PEMODELAN DAN PEMBUATAN PROTOTIPE SISTEM KENDALI POSISI *ROTARY INVERTED PENDULUM*

Hardika Rahmadani Sutejo

ABSTRAK

Berkembangnya industri 4.0 menjadikan semua teknologi sensor, interkoneksi, dan analisis data saling terintegrasi dalam berbagai bidang industri. Hal ini menimbulkan banyaknya kebutuhan dalam mengendalikan objek kendali terutama dibidang akademisi dan industri melalui penelitian. Salah satu objek kendali yang memiliki beberapa permasalahan yaitu rotary inverted pendulum. Permasalahan utama rotary inverted pendulum adalah mengendalikan pendulum dengan posisi tegak dan terbalik. Pengendalian rotary inverted pendulum menggunakan metode konvensional yaitu membuat model matematis, hal ini dikarenakan model matematis sebagai langkah awal pengendalian objek kendali. Tujuan penelitian ini adalah membuat prototipe rotary inverted pendulum dan merancang model matematis sesuai dengan parameter pendukung yang ada. Batasan penelitian ini adalah mensimulasikan model matematis dan mengintegrasikan prototipe rotary inverted pendulum dengan perangkat lunak arduino IDE dan scilab x-cos. Simulasi yang dilakukan adalah sistem non linier dan sistem fungsi transfer. Implementasi pada hardware yaitu pemeriksaan kinerja encoder, motor DC dan pemeriksaan kinerja prototipe secara keseluruhan yang diintegrasikan menjadi satu. Kesimpulan penelitian ini adalah penulis mendapatkan prototipe rotary inverted pendulum yang sudah terintegrasi dengan perangkat lunak dan model matematis berupa fungsi transfer dan state space, serta mengetahui respon karakteristik rotary inverted pendulum sebelum dikendalikan menggunakan scilab x-cos.

Kata kunci : rotary inverted pendulum, prototipe, fungsi transfer, state space

MODELLING AND PROTOTYPE OF ROTARY INVERTED PENDULUM POSITION CONTROL SYSTEM

Hardika Rahmadani Sutejo

ABSTRACT

The development of the industry 4.0 makes all sensor technology, interconnection, and data analysis mutually integrated in various industrial sector. This leads to a large number of needs in controlling control objects, especially in academia and industry through research. One of the control objects that have some problems is rotary inverted pendulum. The main problem of rotary inverted pendulum is controlling the pendulum in the upright and inverted position. Rotary Inverted pendulum control using conventional method is to create a mathematical model, due to the mathematical model as a first step control object control. The purpose of this research is to create a rotary inverted pendulum prototype and design a mathematical model in accordance with existing supporting parameters. The limitation of this study is simulating a mathematical model and integrating the pendulum rotary inverted prototype with the Arduino IDE software and the Scilab x-Cos. The simulation which carried out is a non linear system and a transfer function system. The implementation of hardware is an encoder performance check , DC Motor and overall prototype performance inspection integrated into one. The conclusion of this research is that the researcher get a rotary inverted pendulum prototype that has been integrated with software and mathematical models in the form of transfer and state spacefunctions, as well as know the response of the rotary inverted pendulum characteristics before being controlled using the Scilab x-Cos.

Keywords: *rotary inverted pendulum, prototype, transfer function, state space*

DAFTAR ISI

Pernyataan Keaslian	ii
Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing	iii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji	iv
Halaman Persembahan	v
Halaman Motto	vi
Kata Pengantar atau Ucapan Terima Kasih	vii
Abstrak	ix
<i>Abstract</i>	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel	xiii
Daftar Gambar	xiv
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan	3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	5
2.1 Kajian Pustaka	5
2.2 <i>Rotary Inverted Pendulum</i>	6
2.2.1 <i>Inverted Pendulum</i>	6
2.2.2 <i>Rotary Arm</i>	7
2.2.3 Motor DC	8
2.2.4 <i>Encoder</i>	8
2.2.5 <i>Driver Motor</i>	9
2.2.6 Arduino	9
2.3 Pemodelan Objek Kendali	11

2.4	Spesifikasi Parameter Respon Sistem.....	11
2.5	Model Matematis	11
Bab 3	Metode Penelitian	18
3.1	Alur Penelitian	18
3.2	Peralatan dan Bahan.....	19
3.2.1	Perangkat Keras	19
3.2.2	Perangkat Lunak.....	24
3.3	Perancangan	24
3.3.1	Perancangan Perangkat Keras	24
3.3.2	Perancangan Perangkat Lunak.....	30
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	36
4.1	Hasil Perhitungan Model Matematis	36
4.2	Simulasi Sistem Non Linier.....	40
4.3	Simulasi Sistem Fungsi Transfer	42
4.4	Implementasi Pada <i>Hardware</i>	44
Bab 5	Penutup.....	46
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Saran atau Penelitian Selanjutnya.....	47
Daftar Pustaka	48



DAFTAR TABEL

Table 2-1 Data spesifikasi board arduino mega 2560	10
Table 3-1 Tabel perbandingan prototipe <i>rotary inverted pendulum</i> dengan referensi	29
Table 4-1 Tabel <i>problem data rotary inverted pendulum</i>	36



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Perbedaan <i>rotary inverted pendulum</i> dan <i>linear inverted pendulum</i> .	7
Gambar 2-2 <i>Rotary arm</i>	7
Gambar 2-3 Motor DC	8
Gambar 2-4 <i>Rotary encoder</i>	9
Gambar 2-5 IC <i>driver</i> L298.....	9
Gambar 2-6 Arduino mega 2560	10
Gambar 2-7 Batas sudut dan mekanisme gerak <i>rotary inverted pendulum</i>	12
Gambar 2-8 <i>Free body diagram</i> lengan <i>pendulum</i> dan <i>pendulum</i>	13
Gambar 3-1 Diagram alir penelitian.....	18
Gambar 3-2 Maxon motor DC 2322.....	19
Gambar 3-3 <i>Rotary encoder</i>	20
Gambar 3-4 <i>Coupling</i>	20
Gambar 3-5 <i>Pulley</i> dan <i>timing belt</i>	20
Gambar 3-6 Lengan <i>pendulum</i>	21
Gambar 3-7 <i>Pendulum</i>	21
Gambar 3-8 Shaft support	21
Gambar 3-9 Poros	22
Gambar 3-10 <i>Base rotary inverted pendulum</i>	22
Gambar 3-11 Arduino mega 2560	22
Gambar 3-12 IC L298	23
Gambar 3-13 <i>Power supply</i>	23
Gambar 3-14 Kabel <i>jumper</i>	23
Gambar 3-15 <i>Breadboard</i>	24
Gambar 3-16 <i>Rotary inverted pendulum</i> versi Quanser	24
Gambar 3-17 Desain <i>rotary inverted pendulum</i>	26
Gambar 3-18 Rangkaian elektrik <i>rotary inverted pendulum</i>	28
Gambar 3-19 Prototipe <i>rotary inverted pendulum</i>	29
Gambar 3-20 Blok diagram pemeriksaan kinerja <i>rotary inverted pendulum</i>	31
Gambar 3-21 Mengatur blok diagram <i>encoder pendulum</i>	31
Gambar 3-22 Respon pemeriksaan pulsa <i>rotary encoder pendulum</i>	32

Gambar 3-23 Mengatur blok diagram <i>encoder</i> motor DC	32
Gambar 3-24 Respon pemeriksaan pulsa <i>rotary encoder</i> motor DC	33
Gambar 3-25 Blok diagram pemeriksaan kinerja motor DC.....	34
Gambar 3-26 Respon pemeriksaan kinerja motor DC dengan input posisi	34
Gambar 4-1 Program non linier <i>rotary inverted pendulum</i>	40
Gambar 4-2 Program non linier <i>rotary inverted pendulum</i>	41
Gambar 4-3 Respon simulasi non linier <i>rotary inverted pendulum</i>	41
Gambar 4-4 Desain blok diagram simulasi fungsi transfer <i>rotary inverted pendulum</i>	42
Gambar 4-5 Pengaturan input blok GENSIN_f.....	43
Gambar 4-6 Respon simulasi fungsi transfer <i>rotary inverted pendulum</i>	43
Gambar 4-7 Blok diagram Scilab x-cos implementasi pada <i>hardware</i>	44
Gambar 4-8 Blok step function/input implementasi pada <i>hardware</i>	44
Gambar 4-9 Respon implementasi pada <i>hardware</i>	45



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berkembangnya industri 4.0 menjadikan semua teknologi sensor, interkoneksi, dan analisis data saling terintegrasi dalam berbagai bidang industri (Prasetyo & Sutopo, 2018). Peran manusia dalam industri 4.0 sangat sedikit dalam pengendalian dan pengoperasian mesin. Sistem kendali dalam perkembangan industri 4.0 sangat berperan dan pasti digunakan dalam mengendalikan mesin otomatis. Banyaknya tuntutan atau kebutuhan dalam mengendalikan objek kendali mendorong banyaknya penelitian mengenai perancangan sistem kendali.

Penelitian mengenai sistem kendali dalam beberapa dekade terakhir banyak dilakukan, salah satu contohnya adalah sistem kendali *pendulum* terbalik. Hal ini dikarenakan *pendulum* terbalik memiliki sejumlah permasalahan yang cukup kompleks. Permasalahan utama *pendulum* terbalik adalah menegakkan *pendulum* secara terbalik dengan kondisi stabil dan tegak lurus. Jenis *pendulum* terbalik yang digunakan adalah *rotary inverted pendulum*. Mekanisme *rotary inverted pendulum* adalah *rotary arm* akan bergerak sesuai dengan lintasan yang melingkar untuk mempertahankan posisi tegak *pendulum* terbalik. Tujuan lintasan yang melingkar adalah memberikan ruang untuk mengendalikan *pendulum* terbalik dengan stabil tanpa ada batasan lintasan (Anyakrawati, 2015).

Perancangan *rotary inverted pendulum* meliputi berbagai macam tahapan agar respon objek kendali sesuai yang diinginkan. Tahapan yang pertama adalah membuat model matematis *rotary inverted pendulum*. Selanjutnya, memproses model matematis dan menyambungkan objek kendali dengan perangkat lunak. Grafik respon objek kendali dapat mewakili permasalahan yang harus dikendalikan melalui sebuah kontroler. Tahapan ketiga adalah melakukan perancangan kontroler yang dibutuhkan sesuai permasalahan berdasarkan grafik respon objek kendali. Proses terakhir adalah mengendalikan *rotary inverted pendulum* dengan kontroler yang sudah dirancang menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan adalah Scilab x-cos. Alasan memilih menggunakan perangkat lunak

Scilab x-cos dikarenakan *open-source application*. Sehingga perangkat lunak ini mudah diakses oleh semua kalangan termasuk kalangan mahasiswa. Penggunaan Scilab diberbagai bidang antara lain yaitu pengendalian stabilitas, uji kestabilan sayap pesawat, dan optimalisasi penyusunan algoritma (Alamsyah, 2018).

Penelitian ini memodelkan *rotary inverted pendulum* dengan cara menerapkan persamaan *Euler-Lagrange*. Persamaan *Euler-Lagrange* dalam bentuk persamaan differensial bertujuan memahami kondisi fisis yang mendekati dengan kondisi riilnya, hal ini dapat dilakukan dengan metode numerik (Aminuddin, Effendi, Nurhayati, Widiyani, & Sunardi, 2019). Penerapan persamaan *Euler-Lagrange* dilakukan setelah mendapatkan diagram benda bebas *rotary inverted pendulum*, komponen yang ada pada diagram benda bebas adalah lengan *pendulum* dan *pendulum*. Berdasarkan diagram benda bebas tersebut, *pendulum* dapat dimodelkan sesuai dengan karakteristik pergerakannya. Alasan menggunakan persamaan *Euler-Lagrange* dikarenakan karakteristik *pendulum* yang memiliki pergerakan yang bebas dapat disesuaikan dengan parameter yang ada yaitu kecepatan dan posisi. Ketika karakteristik *pendulum* disesuaikan dengan parameter tersebut maka *pendulum* akan lebih mudah dikendalikan dengan kriteria yang diinginkan.

Pembuatan prototipe ditujukan untuk penerapan pembelajaran sistem pengendalian posisi. Penulis melakukan penelitian bersama dengan rekan satu tim Vicky Indra Pratama dengan judul tugas akhir pemodelan dan pembuatan prototipe sistem kendali posisi dan kecepatan. Penerapan yang sama yaitu sistem pengendalian posisi umpan balik *close-loop*. Perbedaan yang mendasar dari kedua penelitian tersebut adalah penerapan alat yang berbeda, penerapan alat penulis pengendalian posisi sedangkan rekan penulis pengendalian posisi dan kecepatan.. Aplikasi perancangan *rotary inverted pendulum* pada kehidupan sehari-hari adalah *segway*. Prinsip kerja *segway* adalah ketika alat diberi beban manusia, maka roda di sisi kanan dan kiri akan berputar berlawanan untuk menyeimbangkan posisi badan manusia.

Tujuan penelitian ini adalah membuat prototipe *rotary inverted pendulum* dan merancang model matematis objek kendali sesuai dengan parameter pendukung yang ada. Model matematis atau fungsi transfer yang telah dirancang

akan dilakukan simulasi menggunakan Scilab x-cos, respon simulasi fungsi transfer harus sesuai dengan karakteristik *pendulum* yaitu osilasi. *Rotary Inverted Pendulum* yang telah dirancang kemudian diintegrasikan dengan perangkat lunak Arduino IDE dan Scilab x-cos.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang mengenai *rotary inverted pendulum*, maka dapat dirumuskan permasalahan yaitu bagaimana cara merancang prototipe dan mekanisme *rotary inverted pendulum* sesuai *datasheet* yang diperlukan ?. Setelah mendapatkan *datasheet* yang diperoleh dari website resmi pembuat motor DC yaitu maxon, maka *datasheet* tersebut digunakan untuk merancang model matematis *rotary inverted pendulum*. Bagaimana cara merancang model matematis *rotary inverted pendulum* sesuai dengan objek kendali riilnya ?.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan sesuai batasan-batasan permasalahan sebagai berikut :

1. Perancangan *rotary inverted pendulum* sampai pembuatan prototipe.
2. Perancangan sistem kendali sampai membuat model matematis tanpa melakukan pengendalian.
3. *Driver actuator* yang digunakan L298.
4. *Actuator* menggunakan motor DC dengan kecepatan 508,84 rpm yang disambungkan *encoder* menggunakan belt.
5. Jenis *encoder* yang digunakan adalah *rotary encoder* dengan kapasitas 400 pulsa per putaran.
6. Prototipe menggunakan material baja, *stainless steel* dan akrilik.
7. Simulasi menggunakan *software* Scilab x-cos.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan penelitian yang disusun sebagai berikut :

1. Merancang prototipe dan mekanisme *rotary inverted pendulum* sesuai dengan *datasheet* yang diperlukan.

2. Mendapatkan model matematis *rotary inverted pendulum* yang sesuai dengan objek kendali riilnya.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk melanjutkan tahapan pengendalian *rotary inverted pendulum* sesuai posisi dan stabilitas yang diinginkan. Model matematis yang telah didapatkan, bisa diketahui sesuai atau tidaknya dengan objek kendali riilnya dengan proses simulasi menggunakan *software* Scilab x-cos.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terdiri dari beberapa bab sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini meliputi dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan. Bab ini berisi penjelasan mengapa penelitian ini dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini meliputi dari kajian pustaka, dasar teori, dan persamaan yang digunakan sebagai acuan penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Bagian ini meliputi dari alur penelitian, peralatan dan bahan, perancangan perangkat keras, serta perancangan perangkat lunak.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil penelitian dan perancangan alat yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bagian ini meliputi pembahasan mengenai kesimpulan penelitian dan saran.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian tentang *rotary inverted pendulum* yang lebih spesifik membuat prototipe dan model matematis belum banyak dilakukan. Namun penelitian pengendalian *rotary inverted pendulum* sudah banyak dilakukan. Penelitian tersebut rata-rata memiliki *output* perancangan sistem kendali *rotary inverted pendulum* dengan berbagai metode pengendalian.

Referensi penulis dalam melakukan pemodelan *rotary inverted pendulum* berdasarkan tiga penelitian yang memiliki alur pemodelan sama. Alur pemodelan *rotary inverted pendulum* itu adalah sebagai berikut

1. Membuat skema pergerakan dan diagram benda bebas *rotary inverted pendulum*.
2. Membuat persamaan berdasarkan diagram benda bebas *rotary inverted pendulum* menggunakan persamaan *Euler-Lagrange*.
3. Mendapatkan persamaan non linier *rotary inverted pendulum* dan melinierisasikan dengan asumsi sistem berada pada keadaan *equilibrium*.
4. Mendapatkan persamaan fungsi transfer berdasarkan persamaan yang telah dilinierisasikan.

Penelitian yang telah dilakukan oleh (Muntari & Nurhadi, 2013) membahas tentang desain sistem kendali *rotary pendulum* dengan *sliding*-PID. Alur pemodelan *rotary pendulum* pada penelitian tersebut memiliki kesamaan dengan alur pemodelan di atas, *output* pemodelan adalah fungsi transfer. Perancangan tentang *rotary inverted pendulum* menggunakan control PID dilakukan oleh (Nusantoro, M, Purwanto, & C, 2012) memiliki alur pemodelan *rotary inverted pendulum* yang sama. Pemodelan *rotary inverted pendulum* pada penelitian tersebut menggunakan *output state space*. Penelitian tentang implementasi *model reference adaptive systems* (MRAS) untuk kestabilan pada *rotary inverted pendulum* dilakukan oleh (Anyakrawati, 2015). Alur penelitian tersebut memiliki

kesamaan dengan alur pemodelan di atas, *output* pemodelan yang digunakan adalah *state space*.

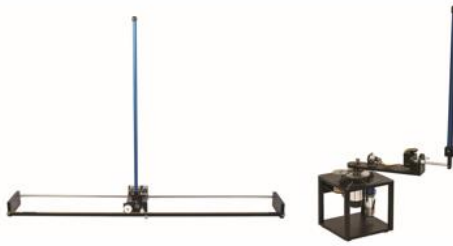
Berdasarkan tiga penelitian tersebut, secara garis besar memiliki kesamaan alur pemodelan *rotary inverted pendulum*, namun *output* pemodelannya berbeda-beda. Pembahasan pada tiga penelitian di atas lebih cenderung pada pengendalian dengan metode kontroler yang berbeda-beda, untuk prototipe tidak dibahas secara rinci. Mengacu pada tiga penelitian tersebut maka penelitian tentang *rotary inverted pendulum* yang penulis lakukan lebih spesifik pada pembuatan prototipe dan pemodelan dengan referensi alur di atas. Keluaran pemodelan *rotary inverted pendulum* penulis lakukan adalah fungsi transfer dan *state space*. Tahap verifikasi prototipe dilakukan simulasi dan pemeriksaan kinerja prototipe.

2.2 Rotary Inverted Pendulum

Sistem *pendulum* terbalik memiliki titik berat yang berada di atas titik tumpuannya (Sukontanakarn, 2009). *Pendulum* pada dasarnya memiliki karakteristik tidak stabil dan non linier sehingga harus melalui tahap linierisasi (Indra, 2011). Tipe *pendulum* terbalik yang digunakan adalah *Rotary inverted pendulum* yang menggunakan lintasan berbentuk lingkaran. Lintasan berbentuk lingkaran bertujuan agar objek kendali tidak memiliki batasan lintasan, sehingga *pendulum* dapat dikendalikan dengan leluasa (Stephani, 2010). *Rotary inverted pendulum* memiliki beberapa komponen penting yaitu pada sub point selanjutnya.

2.2.1 Inverted Pendulum

Pendulum pada dasarnya adalah suatu benda yang diikatkan seutas tali dan beban yang ditempatkan diujung tali. Secara umum ada dua jenis *pendulum* yaitu *pendulum* biasa (*direct pendulum*) dan *pendulum* terbalik (*inverted pendulum*) (Edisusanto, 2008). *Inverted pendulum* juga memiliki dua jenis pergerakan dalam pengendaliannya, yaitu *rotary inverted pendulum* dan *linear inverted pendulum*. Perbedaan *linear inverted pendulum* dan *rotary inverted pendulum* dapat dilihat dari gambar 2-1.

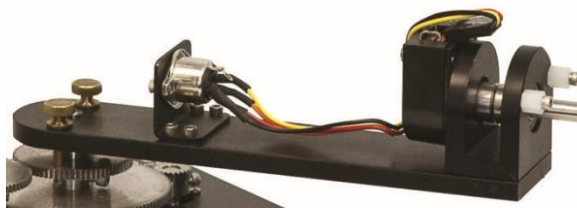


Gambar 2-1 Perbedaan *rotary inverted pendulum* dan *linear inverted pendulum*

Perbedaan *rotary inverted pendulum* dan *linear inverted pendulum* seperti pada gambar 2-1 di atas adalah pergerakan dalam pengendalian pendulum. *Rotary inverted pendulum* pergerakannya rotasi atau melingkar. *Linear inverted pendulum* pergerakannya *linear* atau lurus. Perbedaan pergerakan juga berkaitan pemilihan *encoder*, untuk *rotary inverted pendulum* menggunakan *rotary encoder* dan *linear inverted pendulum* menggunakan *linear encoder*. Masing-masing jenis *inverted pendulum* tersebut memiliki kelebihan dan kelemahan tersendiri, penulis memilih *rotary inverted pendulum* karena tidak ada batasan dalam pengendalian *inverted pendulum*.

2.2.2 Rotary Arm

Rotary arm adalah lengan penggerak dari *rotary inverted pendulum*. *Pendulum* pada dasarnya tidak stabil secara alamiah, agar *inverted pendulum* tetap tegak dan stabil maka harus secara aktif diseimbangkan. Cara untuk menyeimbangkan *inverted pendulum* adalah memberi gaya pada lengan *pendulum* secara rotasional dengan menggunakan sistem kendali umpan balik (Stephani, 2010). Gambar 2-2 merupakan *rotary arm* yang terhubung dengan *pendulum*.



Gambar 2-2 *Rotary arm*

2.2.3 Motor DC

Penggerak *rotary inverted pendulum* dapat menggunakan beberapa jenis motor. Jenis motor ada tiga macam yaitu motor DC, motor servo dan motor stepper. Penulis menentukan untuk menggunakan motor DC, hal ini dikarenakan motor dc memiliki akselerasi yang tinggi. Akselerasi tinggi sangat diperlukan untuk mencegah jatuhnya *pendulum*. Tegangan yang searah pada kumparan medan diubah menjadi energi mekanik merupakan kebutuhan suplai motor DC. Motor DC memiliki dua kumparan yaitu kumparan medan magnet yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik (ggl E). Arus dalam kumparan jangkar berinteraksi dengan medan magnet, hasilnya timbul torsi yang memutar motor (Gottlieb, 1997). Gambaran bentuk motor DC seperti pada gambar 2-3.



Gambar 2-3 Motor DC

2.2.4 Encoder

Encoder secara umum ada dua jenis yaitu *linear encoder* dan *rotary encoder*. Masing-masing memiliki perbedaan pada arah pembacaan sensor, *linear encoder* membaca garis lurus, dan *rotary encoder* membaca gerak rotasi. Sesuai dengan pergerakan *rotary inverted pendulum* yaitu rotasi maka penulis menggunakan *rotary encoder*. *Rotary encoder* merupakan perangkat elektromekanika yang dapat memonitor gerakan dan posisi. Prinsip kerja *rotary encoder* menggunakan sensor optik untuk menghasilkan *serial* pulsa yang dapat diartikan sebagai gerakan, posisi, dan arah. Sehingga posisi sudut suatu poros benda berputar dapat diproses berupa kode digital oleh *rotary encoder* untuk

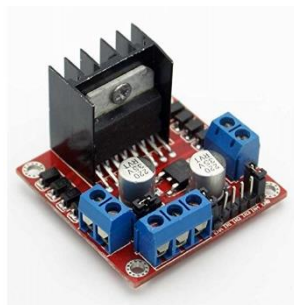
diteruskan oleh rangkaian kendali (Wahyudi, 2015). Gambaran *rotary encoder* seperti pada gambar 2-4 berikut ini.



Gambar 2-4 *Rotary encoder*

2.2.5 *Driver Motor*

Driver motor yang digunakan oleh penulis adalah IC *driver* L298. Mengontrol arah putaran motor DC merupakan fungsi dari IC *driver* L298. Satu buah L298 dapat digunakan untuk mengontrol arah putaran dua buah motor DC. IC *driver* L298 mempunyai kemampuan menggerakkan motor DC sampai arus 2A dan tegangan maksimum 40 volt DC untuk satu kanalnya. Mengendalikan jalan atau kecepatan motor diperuntungkan untuk pin *enable* A dan B. Pin input 1 sampai 4 digunakan untuk mengendalikan arah putaran, sedangkan pin output 13 dihubungkan ke motor DC yang sebelumnya melalui diode yang disusun secara *H-bridge* (Adriansyah & Hidayatama, 2013). Bentuk IC *driver* L298 seperti pada gambar 2-5 dibawah ini.



Gambar 2-5 IC *driver* L298

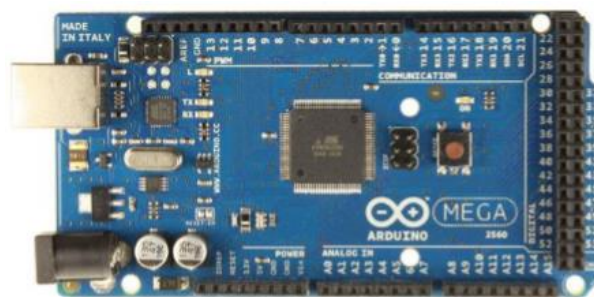
2.2.6 *Arduino*

Arduino merupakan sebuah mikokontroller yang dijadikan platform pembuatan prototipe mekatronika dan sistem kendali. Mikrokontroller ini bersifat

open-source hardware berdasarkan perangkat keras dan lunak yang mudah digunakan. Komponen utama didalam papan Arduino adalah sebuah mikrokontroller resolusi 10 bit dengan merk ATmega yang dibuat oleh *Atmel Corporation*. Beberapa jenis papan Arduino menggunakan tipe ATmega yang berbeda-beda sesuai dengan spesifikasinya. Salah satunya adalah Arduino mega 2560 menggunakan ATmega 2560, yang membedakan antara beberapa jenis Arduino adalah kapasitas jumlah pin dan memori (Arifin, Zulita, & Hermawansyah, 2016). Spesifikasi Arduino mega 2560 dapat dilihat pada tabel 2-1 dan bentuk Arduino mega 2560 dapat dilihat pada gambar 2-6 seperti dibawah ini.

Table 2-1 Data spesifikasi board arduino mega 2560

Digital I/O Pins	54 (of Which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3 V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz



Gambar 2-6 Arduino mega 2560

2.3 Pemodelan Objek Kendali

Pemodelan objek kendali merupakan langkah awal dalam melakukan perancangan sistem kendali. Tahap pemodelan objek kendali termasuk metode konvensional dalam proses merancang sistem kendali. Model merupakan representasi dari sistem yang akan dirancang, dalam konteks ini adalah sistem kendali. Fungsi transfer dan *state space* merupakan beberapa jenis dari model matematis. Perbedaan antara fungsi transfer dan *state space* adalah input dan outputnya. *State space* memiliki input lebih dari satu sedangkan fungsi transfer terbatas inputnya. Fungsi yang menghubungkan antara output sistem dengan input sistem merupakan fungsi transfer (Edisusanto, 2008). Pemodelan matematika *rotary inverted pendulum* akan dibagi menjadi dua tahap yaitu menurunkan persamaan dinamika sistem dan model kendali motor DC (Choiri Ahmadi, Susanto, & Pangaribuan, 2018).

2.4 Spesifikasi Parameter Respon Sistem

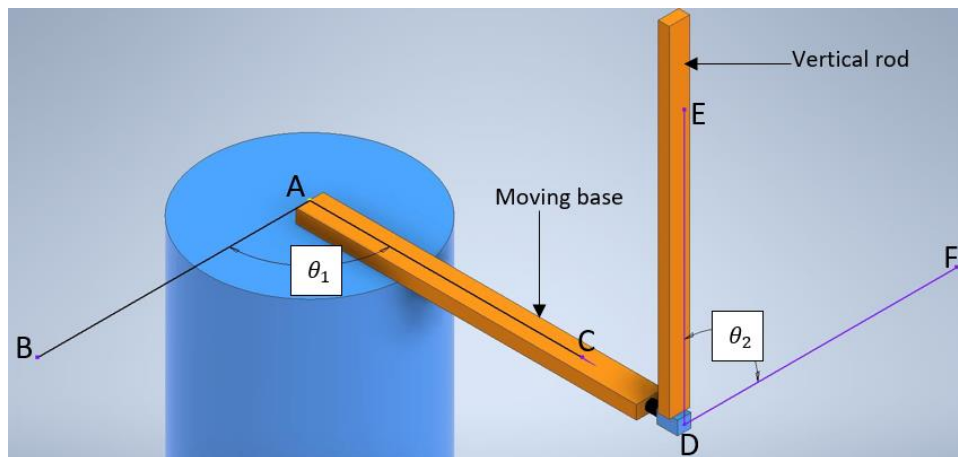
Respon sistem kendali memiliki beberapa parameter yang dijadikan acuan dalam menilai dan mengukur sesuai atau tidaknya respon sistem kendali. Parameter tersebut adalah sebagai berikut :

1. *Rise time* (T_r), waktu yang diperlukan respon sistem pada posisi awal 0,1 sampai 0,9.
2. *Peak time* (T_p), waktu yang diacapai respon pertama, maksimum, dan puncak.
3. *Percent overshoot* (%OS), amplitudo pertama dengan nilai maksimum pada respon sistem sebelum keadaan *steady state* dalam bentuk presentase.
4. *Settling time*, (T_s), waktu yang diperlukan respon dalam meredam osilasi sampai kondisi *steady state* dengan nilai toleransi $\pm 2\%$ (Nise, 2015).

2.5 Model Matematis

Langkah awal dalam merancang sebuah model matematis dari sebuah objek kendali adalah membuat mekanisme kemungkinan pergerakan objek kendali. Hal ini tentu juga diikuti dengan asumsi-asumsi yang berhubungan pada

saat perancangan mekanisme objek kendali. Batas sudut dan mekanisme gerak *rotary inverted pendulum* seperti pada gambar 2-7 dibawah ini.



Gambar 2-7 Batas sudut dan mekanisme gerak *rotary inverted pendulum*

Berdasarkan gambar 2-7 sisi kanan terdapat dua komponen yaitu *pendulum* dan lengan *pendulum*. *Pendulum* atau *vertical rod* memiliki panjang dan massa yang dilambangkan l_2 dan M_2 . Lengan *pendulum* atau *moving base* memiliki panjang dan massa yang dilambangkan l_1 dan M_1 . *Rotary inverted pendulum* memiliki dua parameter yang penting dalam pengendalian, yaitu θ_1 sebagai sudut putar lengan *pendulum* dan θ_2 sebagai sudut putar *pendulum*. Sudut putar lengan *pendulum* θ_1 adalah satu-satunya parameter yang dapat menjadi pengendali *rotary inverted pendulum*, karena θ_1 merupakan penggerak yang digerakkan oleh motor DC. Sehingga pengendalian ada di komponen motor DC.

Problem measure variables dalam sistem *rotary inverted pendulum* dapat dideskripsikan seperti berikut :

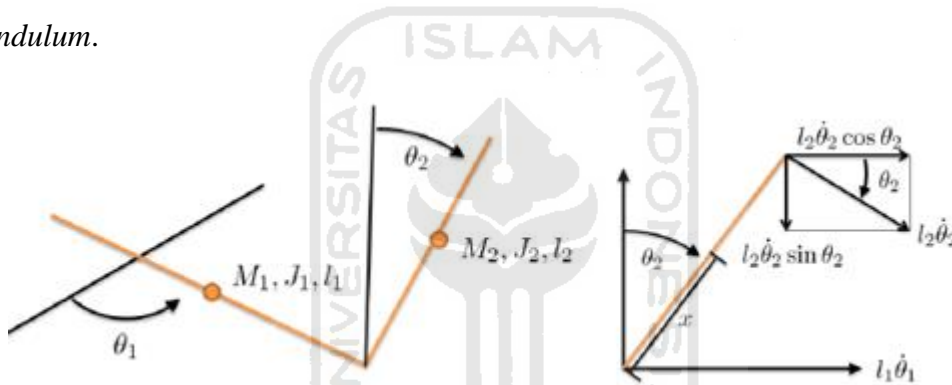
1. Posisi sudut lengan *pendulum* θ_1 (rad).
2. Kecepatan sudut lengan *pendulum* $\dot{\theta}_1$ (rad/s).
3. Posisi sudut *pendulum* θ_2 (rad).
4. Kecepatan sudut *pendulum* $\dot{\theta}_2$ (rad/s).
5. *Voltage control* V_t (v).

Problem data dalam sistem *rotary inverted pendulum* terdiri dari beberapa data, yaitu antara lain :

1. Momen inersia lengan *pendulum* J_1 (Kgm^2).
2. Panjang lengan *pendulum* l_1 (m).

3. Massa *pendulum* M_2 (Kg).
4. Panjang *pendulum* l_2 (m).
5. Momen inersia *pendulum* J_2 (Kgm^2).
6. Torsi motor DC K_ϕ .
7. Rasio gear N.
8. Hambatan resistor R (ohm).

Data tersebut merupakan data yang berpengaruh terhadap persamaan sistem yang disusun. Persamaan sistem *rotary inverted pendulum* menggunakan pendekatan persamaan *Euler-Lagrange*, karena *rotary inverted pendulum* memiliki energi kinetik dan energi potensial yang ada pada persamaan *Euler-Lagrange*. Gambar 2-8 menggambarkan *free body diagram* pergerakan lengan *pendulum* dan *pendulum*.



Gambar 2-8 *Free body diagram* lengan *pendulum* dan *pendulum*

Berdasarkan skema FBD lengan *pendulum* dan *pendulum* pada gambar 2-8 dapat dijadikan persamaan seperti berikut.

Lengan *pendulum* :

- a. Energi potensial :

$$U_1 = 0 \tag{2.1}$$

- b. Energi kinetik :

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 \tag{2.2}$$

Pendulum :

- a. Energi potensial :

$$U_2 = M_2 g \cdot \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \quad (2.3)$$

b. Energi Kinetik :

$$T_2 = \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 (l_2 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \quad (2.4)$$

Berdasarkan uraian persamaan (2.1), (2.2), (2.3) dan (2.4) dapat dimasukkan ke sistem *Lagrangian* seperti berikut.

$$L = T - U = (T_1 + T_2) - (U_1 + U_2)$$

$$L = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 (l_2 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 - M_2 g \cdot \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \quad (2.5)$$

Berdasarkan karakteristik sistem *rotary inverted pendulum* yaitu bentuk non konservatif, bentuk non konservatif adalah bentuk yang memiliki gaya eksternal dan menyebabkan terjadinya perubahan energi selama benda berpindah. Persamaan *Euler-Lagrange rotary inverted pendulum* berdasarkan bentuk non konservatif menjadi persamaan (2.6) (Aminuddin, Effendi, Nurhayati, Widiyani, & Sunardi, 2019).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq} \right) - \frac{dL}{dq} = Q \quad (2.6)$$

Keterangan :

q : vektor posisi (rad)

\dot{q} : vector kecepatan sudut (rad/s)

Q : gaya eksternal (N)

L : persamaan langrange

Berdasarkan keterangan persamaan *Euler-Lagrange rotary inverted pendulum* dan dilihat dari *problem measure variabel* sistem *rotary inverted pendulum* memiliki variabel θ_1 , θ_2 , $\dot{\theta}_1$, dan $\dot{\theta}_2$. Maka dapat dipisahkan berdasarkan variabelnya menjadi persamaan (2.7).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_1} \right) - \frac{dL}{d\theta_1} = \tau$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{\theta}_2} \right) - \frac{dL}{d\theta_2} = 0 \quad (2.7)$$

Proses turunan di atas didapatkan hasil persamaan non linier seperti persamaan (2.8) dibawah ini.

$$\begin{cases} J_1 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 = \tau \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - \frac{1}{2} M_2 g l_2 \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Dimana :

τ : torsi pada motor DC yang terhubung pada lengan *pendulum*

Pengendalian dalam *rotary inverted pendulum* dilakukan oleh motor DC yang terhubung pada lengan *pendulum*. Torsi pada motor DC (τ) memiliki peran penting dalam membuat model matematis *rotary inverted pendulum*. Persamaan torsi motor DC sesuai dengan persamaan (2.9) dibawah ini.

$$\tau(t) = NK_\phi I(t) = NK_\phi (V(t) - K_\phi \dot{\theta}_1) \frac{1}{R} = NK_\phi \frac{V(t)}{R} - \frac{N^2 K_\phi^2}{R} \dot{\theta}_1 \quad (2.9)$$

Dimana :

$I(t)$: tegangan motor

$K_\phi \dot{\theta}_1$: gaya gerak berlawanan

Untuk memudahkan dalam menyederhanakan persamaan (2.8), terdapat beberapa lambang yang mewakili data dalam persamaan tersebut. Lambang tersebut terdapat pada uraian dibawah ini :

$$a = J_{\text{lengan pendulum}} + M_{\text{pendulum}} \times l_{\text{lengan pendulum}}$$

$$b = \frac{1}{2} M_{\text{pendulum}} \cdot l_{\text{lengan pendulum}} \cdot l_{\text{pendulum}}$$

$$c = J_2 = J_{\text{pendulum}}$$

$$d = \frac{1}{2} M_{\text{pendulum}} \cdot g \cdot l_{\text{pendulum}}$$

$$e = \frac{N \cdot K_\phi}{R}$$

$$f = \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{R}$$

$$\delta = ac - b^2$$

Berdasarkan persamaan (2.8) dan (2.9) dapat digabungkan dan disederhanakan dengan menggunakan lambang diatas menjadi seperti berikut.

$$\begin{cases} a \cdot \ddot{\theta}_1 + b \cdot \ddot{\theta}_2 \cos \theta_2 - b \cdot \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 = e \cdot V(t) - f \cdot \dot{\theta}_1 \\ c \cdot \ddot{\theta}_2 + b \cdot \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - d \cdot \sin \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.10) merupakan persamaan non linear *rotary inverted pendulum* yang kemudian dilinerisasikan dengan asumsi sebagai berikut.

$$\theta_1 = \theta_2 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$$

$$\sin \theta \approx \theta \text{ dan } \cos \theta \approx 1$$

Linierisasi membuat sistem *rotary inverted pendulum* pada keadaan di titik *equilibrium* atau keadaan *steady*. Ketika pada keadaan *steady* sistem *rotary inverted pendulum* akan mudah dikendalikan karena memiliki batasan-batasan yang jelas. Selanjutnya berdasarkan proses perhitungan pada persamaan (2.11) maka diperoleh matriks *state space* pada persamaan (2.12).

$$\begin{bmatrix} J_1 & \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 \\ \frac{1}{2} M_2 l_1 l_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} M_2 g l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{bd}{\delta} & -c \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} & 0 \\ 0 & \frac{ad}{\delta} & b \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{c \cdot N \cdot K_\phi}{\delta R} \\ -\frac{b \cdot N \cdot K_\phi}{\delta R} \end{bmatrix} \cdot V(t)$$

(2.12)

Mengaplikasikan transformasi *laplace* dari persamaan non linier maka didapatkan persamaan (2.13). Mendapatkan persamaan fungsi transfer *rotary inverted pendulum* dapat menghubungkan antara persamaan (2.14) dengan persamaan (2.13).

$$\omega_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} \text{ dan } \omega_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)}$$

(2.13)

$$\begin{aligned}
 a. s^2\theta_1(s) + b. s^2\theta_2(s) &= \tau(s) \\
 b. s^2\theta_1(s) + c. s^2\theta_2(s) - d. \theta_2(s) &= 0
 \end{aligned}$$

(2.14)

$$\begin{aligned}
 \omega_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} &= \frac{cs^2 - d}{as^2 \left[\left(c - \frac{b^2}{a} \right) s^2 - d \right]} = \frac{-\frac{d}{\delta} + \frac{c}{\delta} s^2}{-\frac{ad}{\delta} s^2 + s^4} \\
 \omega_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} &= \frac{-\frac{b}{a}}{\left(c - \frac{b^2}{a} \right) s^2 - d} = \frac{-\frac{b}{\delta}}{-\frac{da}{\delta} + s^2}
 \end{aligned}$$

(2.15)

Perbedaan persamaan fungsi transfer penulis dengan jurnal (Muntari & Nurhadi, 2013) sebagai berikut :

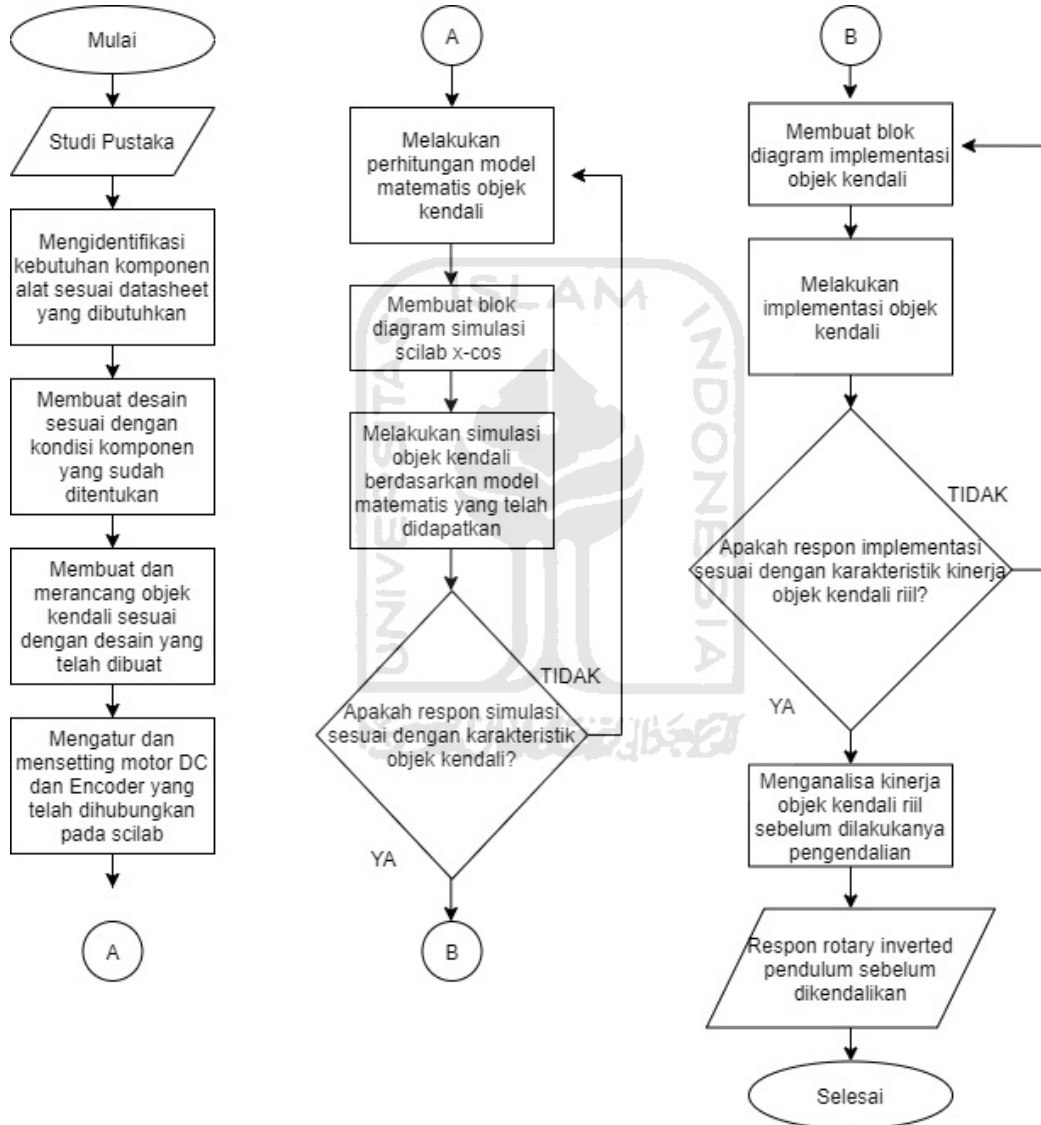
1. Asumsi *free body diagram* berbeda
2. Analisis dan persamaan gerak dari *free body diagram* (Muntari & Nurhadi, 2013) menggunakan pendekatan hukum Newton. Sedangkan analisis dan persamaan gerak dari *free body diagram* penulis menggunakan pendekatan persamaan *Euler-Lagrange*, dimana *Euler-Lagrange* merupakan pengembangan dari hukum Newton yang dapat mencakup semua koordinat.
3. Penyelesaian yang dilakukan oleh (Muntari & Nurhadi, 2013) tidak menggunakan persamaan umum *Euler-Lagrange* tapi menggunakan persamaan *Euler*, sehingga proses selanjutnya berbeda dengan penulis.

Fungsi transfer *rotary inverted pendulum* untuk mengetahui respon sistem *rotary inverted pendulum* ketika diberikan input, respon yang ada akan mempermudah mengetahui batasan-batasan respon sistem. Mekanisme gerak *rotary inverted pendulum*, perhitungan non linier, dan perhitungan fungsi transfer berdasarkan buku *controller for an inverted pendulum* (Manolo Venturin, 2012).

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Tugas akhir ini dilakukan sesuai dengan tahapan-tahapan proses seperti pada gambar 3-1 di bawah ini.



Gambar 3-1 Diagram alir penelitian

Penelitian ini secara umum memiliki dua tahapan proses, yaitu berdasarkan simulasi dan implementasi objek kendali. Simulasi dilakukan berdasarkan model matematis objek kendali dari proses perhitungan berdasarkan *datasheet*.

Implementasi objek kendali dilakukan dengan cara menghubungkan objek kendali riilnya dengan Scilab x-cos.

3.2 Peralatan dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam melakukan penelitian ini ada dua macam, yaitu peralatan perangkat keras dan perangkat lunak.

3.2.1 Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan adalah :

1. Maxon motor DC tipe 2322 Ø 22 mm sebagai *actuator rotary inverted pendulum*, dengan *datasheet* yang berada di lampiran.



Gambar 3-2 Maxon motor DC 2322

2. *Rotary encoder* tipe LPD3806-400BM-G5-24C Ø 6 mm sebagai sensor pembaca posisi motor DC dan lengan *pendulum* dengan kapasitas 400 pulsa/revolusi.



Gambar 3-3 *Rotary encoder*

3. *Coupling* sebagai sambungan antar poros diameter dalam 3x5 mm, 6x5 mm, dan 6x8 mm.



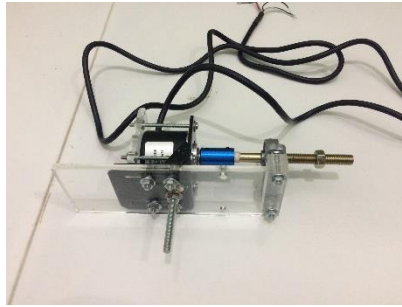
Gambar 3-4 *Coupling*

4. *Pulley* Ø 5 mm dan *timing belt* GT 2 lebar 6 mm panjang 158 mm sebagai penghubung antara motor DC dengan *rotary encoder*.



Gambar 3-5 *Pulley dan timing belt*

5. Lengan *pendulum* atau *rotary arm* dengan komposisi material akrilik, aluminium dan *steel* sebagai media penggerak antara motor DC ke *pendulum* (Dimensi pada lampiran).



Gambar 3-6 Lengan *pendulum*

6. *Pendulum* dengan material aluminium sebagai objek yang digerakkan (Dimensi pada lampiran).



Gambar 3-7 *Pendulum*

7. *Bracket motor DC* \varnothing shaft 200 mm, *bracket encoder* \varnothing shaft 22 mm dan *bracket pendulum* \varnothing shaft 8 mm.



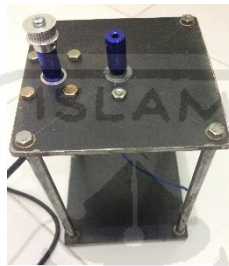
Gambar 3-8 Shaft support

8. Poros motor ke lengan *pendulum* M5 dan poros lengan *pendulum* ke *pendulum* M8.



Gambar 3-9 Poros

9. *Base rotary inverted pendulum* material besi dengan tebal 6 mm (Dimensi pada lampiran).



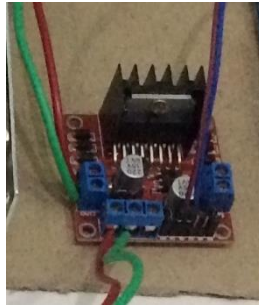
Gambar 3-10 *Base rotary inverted pendulum*

10. Arduino mega 2560 sebagai mikrokontroler.



Gambar 3-11 Arduino mega 2560

11. IC L298 sebagai *driver* motor.



Gambar 3-12 IC L298

12. *Power supply* (Input 220 VAC, Output 24 VDC) sebagai penyuplai tegangan motor dan *driver* motor.



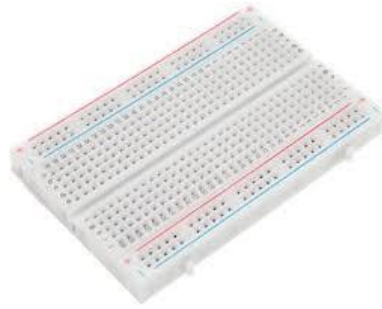
Gambar 3-13 *Power supply*

13. Kabel *jumper* sebagai penghubung.



Gambar 3-14 Kabel *jumper*

14. *Breadboard* sebagai pencabang dan penghubung antar rangkaian.



Gambar 3-15 *Breadboard*

3.2.2 Perangkat Lunak

1. *Software* Arduino IDE yang digunakan untuk meng-upload Arduino *toolbox* pada scilab x-cos.
2. Scilab 5.5.2 yang digunakan dalam pembuatan blok diagram.

3.3 Perancangan

Perancangan *rotary inverted pendulum* terbagi menjadi dua, yaitu perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Perancangan perangkat keras berkaitan dengan setup konfigurasi perangkat keras dan koneksi dengan perangkat lunak. Perancangan perangkat lunak berkaitan dengan model Scilab x-cos.

3.3.1 Perancangan Perangkat Keras

Rotary inverted pendulum memiliki perangkat keras yang dapat dibagi menjadi dua, yaitu komponen elektrik dan komponen mekanik. Konfigurasi *base rotary inverted pendulum* berdasarkan desain yang sesuai dengan referensi modul quanser seperti pada gambar 3-16 di bawah ini.

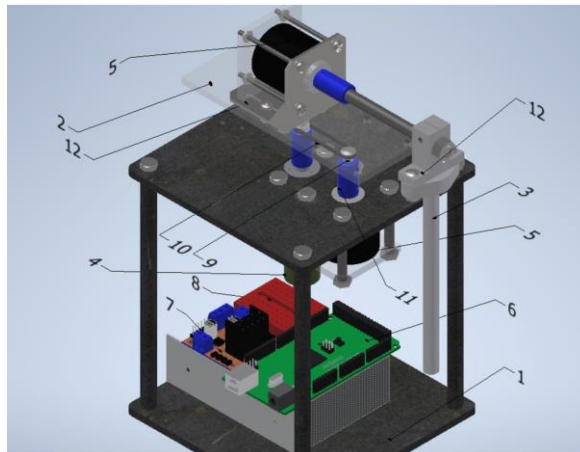


Gambar 3-16 *Rotary inverted pendulum* versi Quanser

Penulis mengambil referensi bentuk *base* dari gambar 3-16 yaitu dimensi panjang dan lebar *base* prototipe sama seperti referensi Quanser (Apkarian, Karam, & Levis, 2011). Penulis melihat bahwa komponen elektrik *rotary inverted pendulum* tidak boleh terpisah dari *base*, sehingga tinggi *base* ditinggikan melebihi referensi. Hal ini bertujuan agar prototipe mudah dijalankan, cukup dengan menghubungkan port Arduino ke laptop atau computer. Berdasarkan referensi bentuk *base rotary inverted pendulum* seperti pada gambar 3-16, kondisi komponen yang ada tidak mendukung sepenuhnya untuk konfigurasi *base rotary inverted pendulum* yang sama seperti pada gambar 3-16. Hal ini menimbulkan beberapa permasalahan dan kendala yang terjadi, permasalahan dan kendala tersebut adalah

1. Kebutuhan *encoder* dan motor DC dengan spesifikasi yang sesuai cukup susah didapatkan. Komponen dengan spesifikasi yang sesuai bisa didapatkan, namun dengan konfigurasi motor DC dan *encoder* secara terpisah. Hal ini yang menimbulkan permasalahan untuk merancang posisi konfigurasi yang sesuai.
2. Pemilihan *bracket* standar pada komponen motor DC, *encoder* motor DC, *encoder* lengan *pendulum*, dan *pendulum* hanya beberapa saja. *Bracket* standar yang tersedia untuk motor DC, *encoder* lengan *pendulum*, dan *pendulum*. Untuk *bracket encoder* motor DC perlu dilakukan modifikasi atau pemanfaatan plat akrilik yang ada.
3. Poros *encoder* dan motor DC cukup pendek sehingga ketika perlu disambungkan dengan lengan *pendulum* dan *pendulum*

Kendala dan permasalahan dalam perancangan perangkat keras di atas diselesaikan oleh penulis dengan merancang ulang dan sedikit memodifikasi konfigurasi posisi dan membuat beberapa part yang dibutuhkan. Hal ini dilakukan agar tetap mendapatkan spesifikasi *datasheet* komponen utama yang diperlukan tanpa perlu mengganti. Penulis merancang konfigurasi *base rotary inverted pendulum* seperti desain pada gambar 3-17 di bawah ini.



Gambar 3-17 Desain *rotary inverted pendulum*

Desain pada gambar 3-17 di atas menunjukkan beberapa komponen pada *rotary inverted pendulum*. Keterangan komponen prototipe *rotary inverted pendulum* pada gambar 3-17 sebagai berikut :

1. *Base rotary inverted pendulum*
2. *Lengan pendulum*
3. *Pendulum*
4. *Motor DC*
5. *Rotary encoder*
6. *Arduino mega*
7. *Driver motor L298*
8. *Bread board*
9. *Pulley*
10. *Belt*
11. *Coupling*
12. *Bracket*

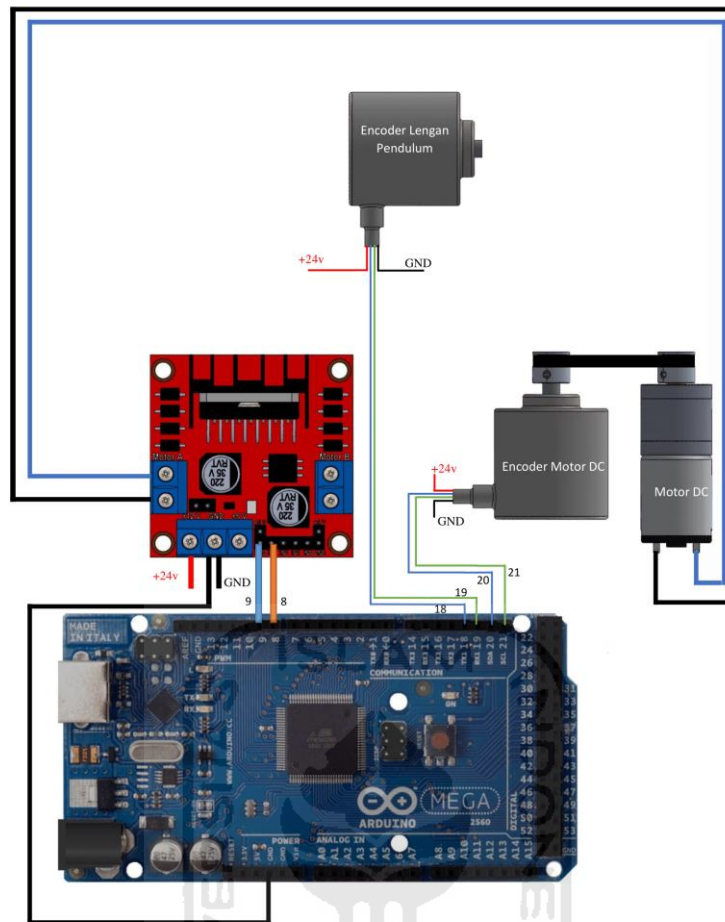
Penjelasan mengenai dimensi desain *rotary inverted pendulum* terdapat pada gambar teknik yang terlampir. Perancangan desain pada gambar 3-17 dilakukan untuk menjawab kendala yang ditemukan penulis, solusi tersebut dituangkan dalam desain yang memiliki keterangan sebagai berikut :

1. Sesuai dengan referensi bahwa motor DC sudah terhubung dalam satu poros dengan *rotary encoder*, namun komponen tersebut susah didapatkan. Komponen yang tersedia motor DC dan *rotary encoder* terpisah, tidak

terhubung dalam satu poros. Maka motor DC dan *rotary encoder* dihubungkan menggunakan *belt* yang dikaitkan antar poros menggunakan *pulley*. Pertimbangan menggunakan *belt* adalah ketika pembacaan posisi oleh *rotary encoder* motor DC hasilnya lebih akurat, dikarenakan dimensi *pulley* dan *thread belt* sudah disesuaikan. Jika dibandingkan menggunakan *gear* maka perlu diperhitungkan rasio *gear*.

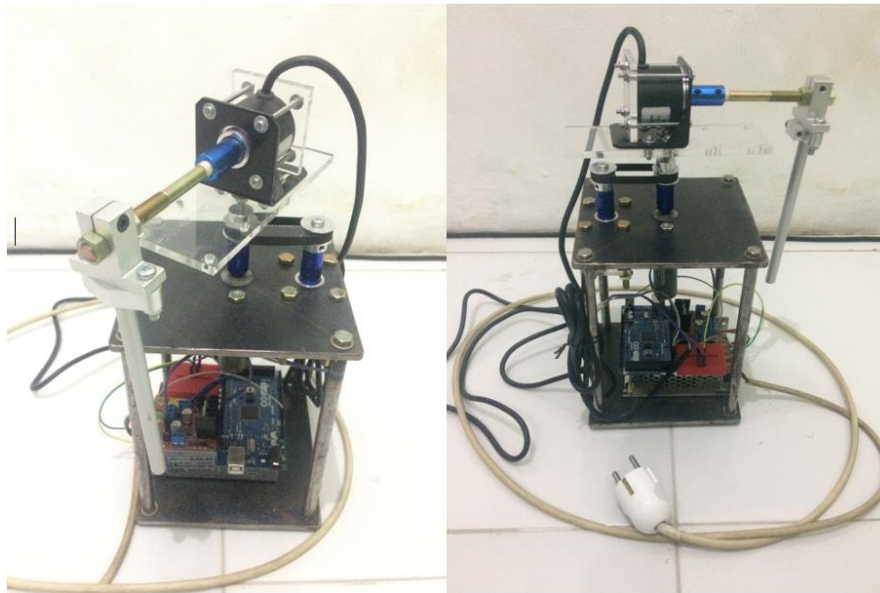
2. *Bracket encoder* motor DC perlu dibuat penahan dengan memanfaatkan plat akrilik dengan tebal 5 mm dan baut dengan panjang 60 mm M5. *Encoder* lengan *pendulum* juga perlu dibuat penahan plat akrilik tebal 5 mm dan baut dengan panjang 50 mm M3. Plat akrilik dengan tebal 5 mm cukup untuk menahan *encoder* dengan baut yang menahan.
3. Poros motor DC dan *rotary encoder* pendek sehingga tidak memungkinkan langsung disambungkan dengan *pulley*, terutama pada komponen motor DC yang diperlukan untuk disambungkan dengan lengan *pendulum*. Penghubung antar poros menggunakan *coupling* sesuai dengan diameter yang dibutuhkan.
4. Konfigurasi lengan *pendulum* tidak dibuat secara menggantung melainkan terpusat pada poros motor DC, hal ini dikarenakan *rotary encoder* pada bagian lengan *pendulum* memiliki massa yang cukup besar dan ditambah dengan *pendulum*.

Tujuan desain selain membantu melakukan perancangan ulang prototipe dari permasalahan yang ada, desain membantu penulis dalam mendapatkan momen inersia lengan *pendulum* dan *pendulum*. Momen inersia digunakan dalam pemodelan *rotary inverted pendulum* untuk mendapatkan fungsi transfer. Kemudian setelah merancang komponen mekanik selanjutnya merancang komponen elektrik. Konfigurasi komponen elektrik sesuai dengan skema *driver* motor IC L298. Skema *driver* motor IC L298 disesuaikan dengan penggunaan komponen yang digunakan seperti pada gambar 3-18 di bawah ini.



Gambar 3-18 Rangkaian elektrik *rotary inverted pendulum*

Rangkaian elektrik *rotary inverted pendulum* menggunakan skema *driver motor* IC L298 yang diterapkan pada motor DC dan dua *encoder*. Tanda 24v dan GND dalam rangkaian disambungkan pada *power supply* input 220 VAC, output 24 VDC. *Encoder* disambungkan ke Arduino pada pin 18-21, *encoder* pada motor DC pada pin 20-21 dan *encoder lengan pendulum* pada pin 18-19. Perancangan perangkat keras yang terdiri dari base dan rangkaian elektrik digabungkan menjadi satu menjadi seperti pada gambar 3-19 dibawah ini.



Gambar 3-19 Prototipe *rotary inverted pendulum*

Berdasarkan hasil perancangan perangkat keras, penulis dapat membandingkan fungsi prototipe dengan referensi yang ada. Perbandingan tersebut dijelaskan pada tabel 3-1 di bawah ini.

Table 3-1 Tabel perbandingan prototipe *rotary inverted pendulum* dengan referensi

<i>Rotary inverted pendulum</i>	Kelebihan	Kelemahan
Prototipe	Komponen mudah didapatkan	Tidak dapat ditambahkan alat ukur lain seperti <i>tachometer</i>
	Penggunaan Arduino membuat simulasi dapat menggunakan dua aplikasi yaitu Arduino IDE dan Scilab. Aplikasi yang mudah digunakan (<i>open source</i>)	Penataan kabel yang tidak teratur, sehingga menimbulkan hambatan ketika dilakukan eksperimen berulang.
Referensi (Quanser)	Penggunaan <i>gear</i> menguntungkan untuk penambahan alat ukur seperti <i>tachometer</i>	Komponen susah didapatkan

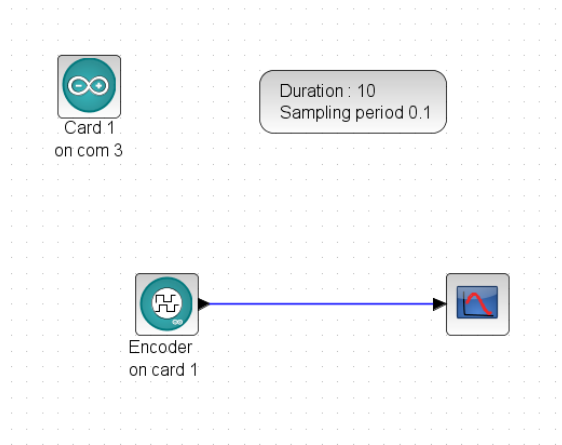
	Penataan kabel yang bagus, sehingga ketika dilakukan eksperimen secara berulang tidak ada hambatan.	Simulasi hanya bisa dilakukan pada 1 aplikasi yaitu MATLAB. Aplikasi berbayar.
--	---	--

3.3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak yang penulis gunakan adalah Scilab 5.5.2 dan *toolbox* Arduino 1.4 sebagai blok diagram Arduino pada Scilab x-cos. Perancangan perangkat lunak scilab terdiri dari pemeriksaan kinerja *rotary encoder* dan motor DC. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa komponen utama *rotary inverted pendulum* telah terhubung dengan perangkat lunak Scilab dan bekerja sesuai dengan spesifikasinya.

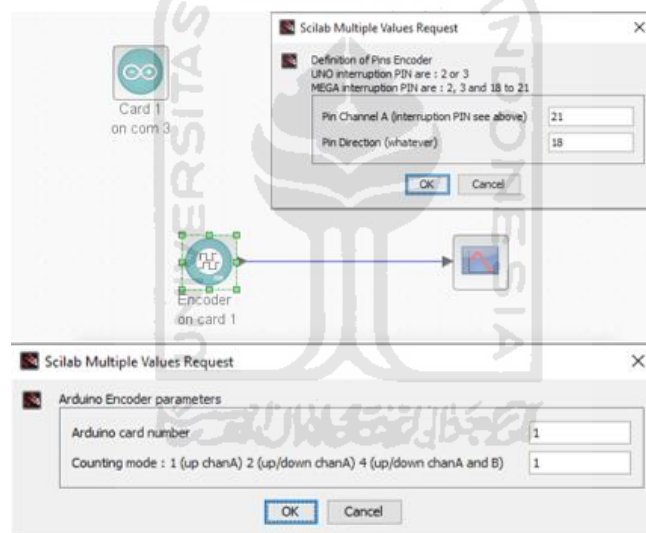
3.3.2.1 Pemeriksaan Kinerja *Rotary Encoder*

Pemeriksaan kinerja *rotary encoder* bertujuan untuk memastikan kinerja *rotary encoder* sudah sesuai dengan spesifikasi atau belum. *Rotary encoder* yang digunakan ada dua, yaitu pada *pendulum* dan yang terhubung pada motor DC. Masing – masing *rotary encoder* seperti pada gambar 3-3 memiliki kapasitas 400 pulsa per putaran. *Rotary encoder pendulum* berfungsi untuk mengetahui posisi radian atau sudut pada *pendulum* yang disambungkan pada input pin Arduino 21 dan 18. Pemeriksaan kinerja blok diagram *rotary encoder pendulum* dapat dilihat pada gambar 3-20, 3-21, dan 3-22 dibawah ini.



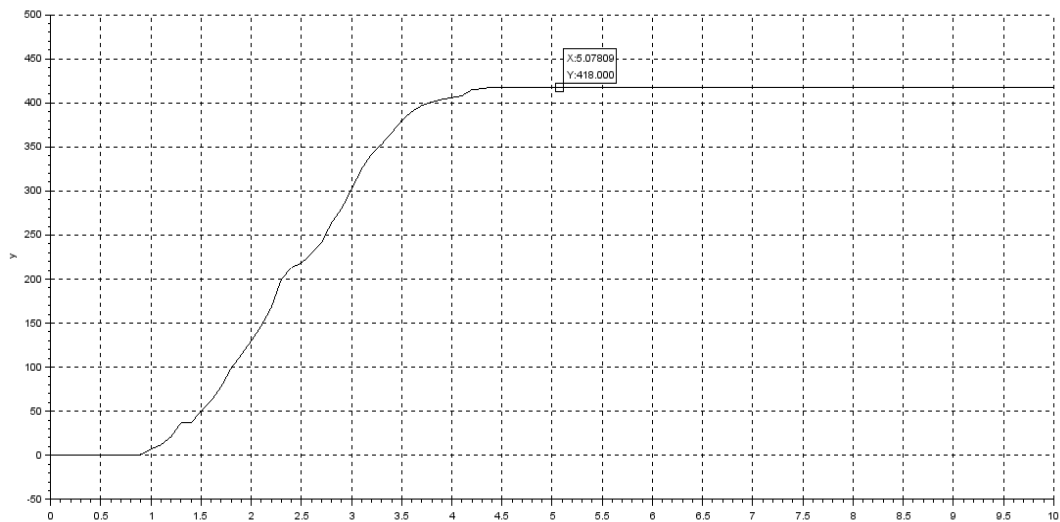
Gambar 3-20 Blok diagram pemeriksaan kinerja *rotary inverted pendulum*

Blok diagram seperti gambar 3-20 diatas didapatkan dari *toolbox* Arduino 1.4. Setelah membuat blok diagram pemeriksaan kinerja *rotary encoder* kemudian memasukkan pin yang sesuai pada Arduino seperti pada gambar 3-21 dibawah ini.



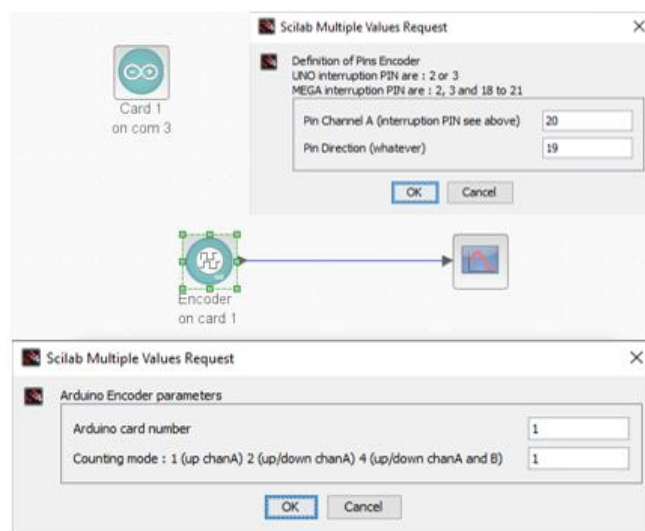
Gambar 3-21 Mengatur blok diagram *encoder pendulum*

Setelah melakukan pengaturan pada blok diagram *encoder* seperti pada gambar 3-21 kemudian melakukan eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan menyambungkan langsung *rotary encoder pendulum* ke perangkat lunak Scilab. Respon eksperimen dapat dilihat dari grafik yang menunjukkan kapasitas pulsa yang terbaca seperti gambar 3-22 dibawah ini.



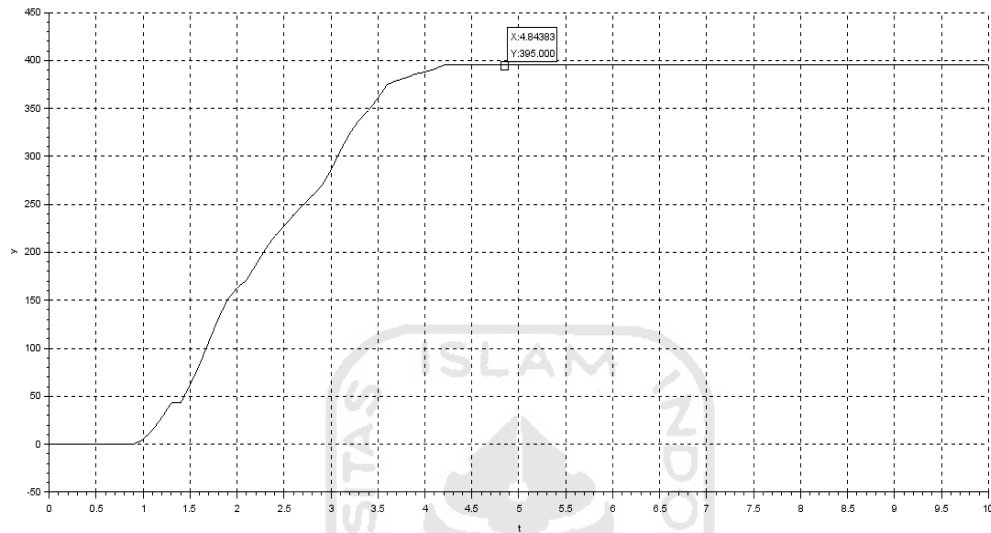
Gambar 3-22 Respon pemeriksaan pulsa *rotary encoder pendulum*

Sumbu y menunjukkan pulsa dan sumbu x menunjukkan waktu. Respon kinerja *rotary encoder pendulum* menunjukkan pulsa sebesar 418 per putaran. Hasilnya tetap menggunakan sesuai spesifikasi yaitu 400 pulsa per putaran, perbedaan dengan eksperimen adalah dikarenakan penulis tidak dapat memastikan *rotary encoder* berputar tepat satu putaran. Selanjutnya adalah pemeriksaan kinerja *rotary encoder* motor DC, *rotary encoder* motor DC berfungsi untuk mengetahui posisi putaran motor DC. Pemeriksaan *rotary encoder* motor DC menggunakan blok diagram yang sama seperti gambar 3-20, yang berbeda adalah pin pada blok diagram *encoder*. Input pin *rotary encoder* motor DC 20 dan 19 yang kemudian dimasukkan pada blok diagram seperti gambar 3-23 dibawah ini.



Gambar 3-23 Mengatur blok diagram *encoder* motor DC

Setelah melakukan pengaturan pada blok diagram *encoder* motor DC seperti gambar 3-23 kemudian melakukan eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan menyambungkan langsung *rotary encoder* motor DC ke perangkat lunak Scilab. Respon eksperimen dapat dilihat dari grafik yang menunjukkan kapasitas pulsa yang terbaca seperti gambar 3-24 dibawah ini.

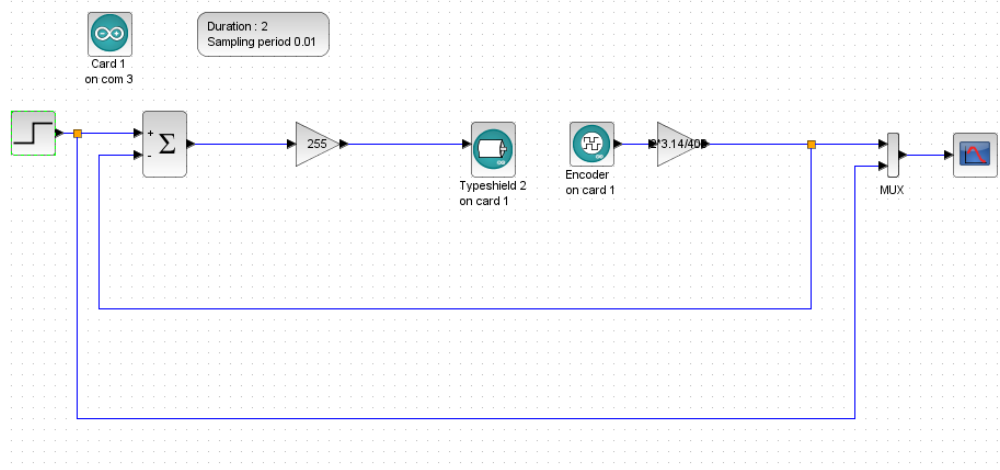


Gambar 3-24 Respon pemeriksaan pulsa *rotary encoder* motor DC

Respon kinerja *rotary encoder pendulum* menunjukkan pulsa sebesar 395 per putaran. Hasilnya tetap menggunakan sesuai spesifikasi yaitu 400 pulsa per putaran, perbedaan dengan eksperimen adalah dikarenakan penulis tidak dapat memastikan *rotary encoder* berputar tepat satu putaran.

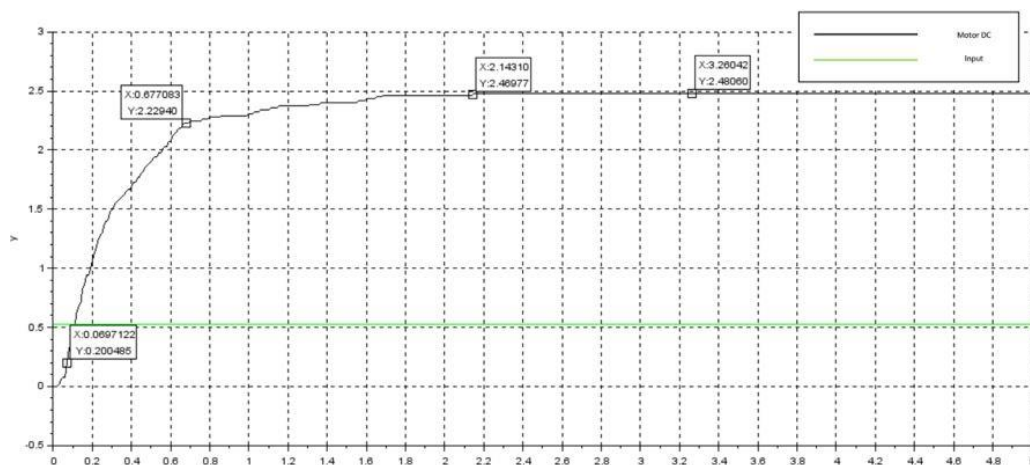
3.3.2.2 Pemeriksaan Kinerja Motor DC

Perancangan perangkat lunak menggunakan Scilab x-cos selanjutnya adalah pemeriksaan kinerja motor DC. Pemeriksaan kinerja motor DC adalah pemeriksaan respon posisi, karena parameter sistem kendali *rotary inverted pendulum* adalah posisi. Desain blok diagram Scilab x-cos pemeriksaan kinerja motor DC dapat dilihat pada gambar 3-25 dibawah ini.



Gambar 3-25 Blok diagram pemeriksaan kinerja motor DC

Desain blok diagram pemeriksaan kinerja motor DC menggunakan input posisi 0,52 radian atau 30° pada blok *step function*. Nilai gain pwm yaitu 255 bertujuan agar mendapatkan akselerasi yang maksimal. Pengaturan blok *typeshield 2 on card 1* dengan memilih tipe *driver* motor yang digunakan yaitu L298. Kemudian memasukkan *direction* pin 8 dan *enable (speed)* pin 9, hal ini harus disesuaikan dengan rangkaian elektrik pada gambar 3-18. Blok *encoder* sama seperti pada pemeriksaan kinerja *rotary encoder* motor DC pada gambar 3-23. Nilai gain pulsa *encoder* didapatkan dari hasil perhitungan $2 \times 3,14/400$, perhitungan tersebut bertujuan untuk mengkonversi jumlah pulsa dalam satuan radian. Respon pemeriksaan kinerja motor DC dapat dilihat pada gambar 3-26 dibawah ini.



Gambar 3-26 Respon pemeriksaan kinerja motor DC dengan input posisi

Sumbu y menunjukkan posisi dalam satuan radian dan sumbu x menunjukkan waktu dalam satuan sekon. Garis hijau menunjukkan input yang diinginkan dalam satuan radian. Respon kinerja motor DC pada gambar 3-26 menunjukkan posisi 2,48 radian. Hasil ini belum sesuai dengan input yang diberikan sebesar 0,5 radian, hal ini dapat diatasi dengan melakukan pengendalian menggunakan PID pada motor DC. Respon objek kendali memiliki parameter spesifikasi respon sistem sebagai berikut :

1. *Error steady state* = 1,98 rad/s
2. *Settling time* = 2,14 s
3. *Rise time* = 0,61 s
4. *Percent overshoot* = -
5. *Peak time* = -



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perhitungan Model Matematis

Berdasarkan proses model matematis pada sub bab 2.4 penulis memasukkan variabel yang ada dan menghitung model matematis dengan *output* fungsi transfer. *Problem data rotary inverted pendulum* didapatkan berdasarkan *datasheet* motor DC, *rotary encoder*, dan hasil pengukuran langsung terhadap lengan *pendulum* dan *pendulum* seperti tabel 4.1 berikut

Table 4-1 Tabel *problem data rotary inverted pendulum*

No	<i>Problem data</i>	Nilai	Sumber data
1.	$J_{pendulum}$	$= 1365,155 \text{ Kgmm}^2$ $= 0,001365 \text{ Kgm}^2$	<i>Properties Inventor</i>
2.	$J_{Lengan pendulum}$	$= 18462,762 \text{ Kgmm}^2$ $= 0,018462 \text{ Kgm}^2$	<i>Properties Inventor</i>
3.	$M_{pendulum}$	$= 60 \text{ gr}$ $= 0,06 \text{ Kg}$	Pengukuran langsung
4.	$l_{lengan pendulum}$	$= 150 \text{ mm}$ $= 0,15 \text{ m}$	Pengukuran langsung
5.	$l_{pendulum}$	$= 180 \text{ mm}$ $= 0,18 \text{ m}$	Pengukuran langsung
6.	N	$N = \frac{\text{RPM data sheet}}{\text{RPM setelah reduksi}}$ $= \frac{7190}{504,84}$ $= 14,24$	<i>Datasheet motor DC</i>
7.	K_{ϕ}	$K_{\phi} = 30,7 \frac{\text{mNm}}{\text{A}} \times 14,24$ $= 0,3 \text{ Nm/A}$	<i>Datasheet motor DC</i>

8.	R	$= 21,6 \text{ ohm}$	<i>Datasheet</i> motor DC
----	-----	----------------------	------------------------------

Penentuan nilai momen inersia lengan *pendulum* dan *pendulum* berdasarkan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Material semirip mungkin dengan prototipe riilnya
2. Dimensi sama dengan prototipe
3. Penentuan posisi sumbu putar yang sesuai dengan prototipe

Gambaran lebih rinci mengenai asumsi-asumsi di atas terlampir pada lampiran 2. *Problem data* diatas kemudian dimasukkan pada masing-masing lambang untuk mendapatkan persamaan non linier, matriks *state space* dan fungsi transfer seperti persamaan 4.1 sampai 4.6 dibawah ini.

$$\begin{aligned}
 a &= J_{\text{lengan pendulum}} + M_{\text{pendulum}} \times l_{\text{lengan pendulum}} \\
 a &= 0,018462 + 0,06 \times 0,18 \\
 a &= 0,029262
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{1}{2} M_{\text{pendulum}} \times l_{\text{lengan pendulum}} \times l_{\text{pendulum}} \\
 b &= \frac{1}{2} 0,06 \times 0,15 \times 0,18 \\
 b &= 0,00081
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

$$\begin{aligned}
 c &= J_{\text{pendulum}} \\
 c &= 0,001365 \text{ Kgm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{1}{2} M_{\text{pendulum}} \times g \times l_{\text{pendulum}} \\
 d &= \frac{1}{2} 0,06 \times 9,81 \times 0,18 \\
 d &= 0,052974
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

$$e = \frac{N \times K_{\phi}}{R}$$

$$e = \frac{14,24 \times 0,43}{21,6}$$

$$e = 0,28$$
(4.4)

$$f = \frac{N^2 \times K_\phi^2}{R}$$

$$f = \frac{14,24^2 \times 0,43^2}{21,6}$$

$$f = 1,73$$
(4.5)

$$\delta = ac - b^2$$

$$\delta = 0,029262 \times 0,001365 - 0,00081^2$$

$$\delta = 0,00003928653$$
(4.6)

Hasil perhitungan dari masing-masing lambang di atas kemudian dimasukkan kedalam persamaan fungsi transfer 4.7 dan 4.8 seperti di bawah ini.

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{-\frac{d}{\delta} + \frac{c}{\delta}s^2}{-\frac{ad}{\delta}s^2 + s^4}$$

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{-\frac{0,052974}{0,00003928653} + \frac{0,001365}{0,0000425}s^2}{-\frac{0,029262 \times 0,052974}{0,00003928653}s^2 + s^4}$$

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{-1348,40 + 32,11s^2}{-39,45s^2 + s^4}$$

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{32,11s^2 - 1348,40}{s^4 - 39,45s^2}$$
(4.7)

$$W_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} = \frac{-\frac{b}{\delta}}{-\frac{da}{\delta} + s^2}$$

$$W_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} = \frac{-\frac{0,00081}{0,00003928653}}{-\frac{0,029262 \times 0,052974}{0,00003928653} + s^2}$$

$$W_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} = \frac{-20,61}{s^2 - 38,16} \quad (4.8)$$

Nilai variabel pada sistem positif, sehingga pembilang dan penyebut persamaan fungsi transfer bernilai positif. Persamaan fungsi transfer *rotary inverted pendulum* menjadi seperti persamaan 4.9 dan 4.10 di bawah ini.

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{1348,40 + 32,11s^2}{39,45 s^2 + s^4} \quad (4.9)$$

$$W_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} = \frac{20,61}{38,16+s^2} \quad (4.10)$$

Model matematis dalam bentuk matriks *state space* sesuai dengan persamaan (2.11) dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{bd}{\delta} & -c \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} & 0 \\ 0 & \frac{ad}{\delta} & b \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{c \cdot N \cdot K_\phi}{\delta R} \\ -\frac{b \cdot N \cdot K_\phi}{\delta R} \end{bmatrix} \cdot V(t)$$

$$\frac{bd}{\delta} = \frac{0,00081 \times 0,052974}{0,00003928653} = 1,092204885491287 \quad (4.11)$$

$$\frac{ad}{\delta} = \frac{0,029262 \times 0,052974}{0,00003928653} = 39,45691278919263 \quad (4.12)$$

$$-c \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} = -0,001365 \frac{14,24^2 \times 0,43^2}{0,0000425 \times 21,6} = -55,13 \quad (4.13)$$

$$b \frac{N^2 \cdot K_\phi^2}{\delta R} = 0,00081 \frac{14,24^2 \cdot 0,43^2}{0,0000425 \times 21,6} = 33,08 \quad (4.14)$$

$$\frac{c \cdot N \cdot K_\phi}{\delta R} V = \frac{0,001365 \times 14,24 \times 0,43}{0,0000425 \times 21,6} 24 = 218,51$$

(4.15)

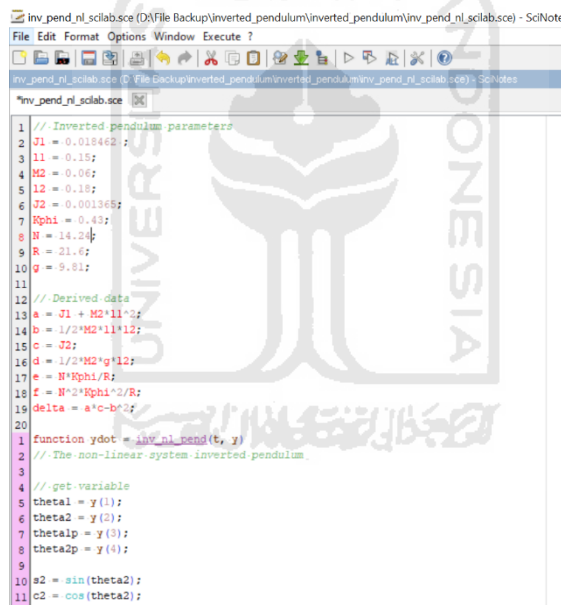
$$-\frac{b \cdot N \cdot K_{\phi}}{\delta R} V(t) = \frac{-0,001393 \times 14,24 \times 0,43}{0,0000425 \times 21,6} 24 = -129,66$$

(4.16)

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1,09 & -55,13 & 0 \\ 0 & 39,45 & 33,08 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 218,51 \\ -129,66 \end{bmatrix}$$

4.2 Simulasi Sistem Non Linier

Simulasi *rotary inverted pendulum* dengan kondisi non linier menggunakan Scilab 5.5.2 *console* yang menggunakan program seperti gambar 4-1 dan 4-2 di bawah ini.



```

inv_pend_nl_sclab.sce (D:\File Backup\inverted_pendulum\inverted_pendulum\inv_pend_nl_sclab.sce) - SciNotes
File Edit Format Options Window Execute ?
inv_pend_nl_sclab.sce (D:\File Backup\inverted_pendulum\inverted_pendulum\inv_pend_nl_sclab.sce) - SciNotes
*inv_pend_nl_sclab.sce
1 // Inverted pendulum parameters
2 J1 = 0.018462;
3 l1 = 0.15;
4 M2 = 0.06;
5 l2 = 0.18;
6 J2 = 0.001365;
7 Kphi = 0.43;
8 N = 14.24;
9 R = 21.6;
10 g = 9.81;
11
12 // Derived data
13 a = J1 + M2*l1^2;
14 b = 1/2*M2*l1*l2;
15 c = J2;
16 d = 1/2*M2*g*l2;
17 e = N*Kphi/R;
18 f = N^2*Kphi^2/R;
19 delta = a*c-b^2;
20
21 function ydot = inv_nl_pend(t, y)
22 // The non-linear system inverted pendulum
23
24 // get-variable
25 theta1 = y(1);
26 theta2 = y(2);
27 theta1p = y(3);
28 theta2p = y(4);
29
30 s2 = sin(theta2);
31 c2 = cos(theta2);

```

Gambar 4-1 Program non linier *rotary inverted pendulum*

```

Inv_pend_nl_sclab.sce (D:\File Backup\inverted_pendulum\inverted_pendulum\inv_pend_nl_sclab.sce) - SciNotes
File Edit Format Options Window Execute ?
Inv_pend_nl_sclab.sce (D:\File Backup\inverted_pendulum\inverted_pendulum\inv_pend_nl_sclab.sce) - SciNotes
Inv_pend_nl_sclab.sce
11 c2 = cos(theta2);
12 den = b^2*c2^2 - a*c;
13
14 Vt = 0;
15
16 ydot = zeros(4,1);
17
18 ydot(1) = theta1p;
19 ydot(2) = theta2p;
20 ydot(3) = -(c^2*Vt + b^2*c^2*theta2p^2 - b^2*d^2*s2 - c^2*f*theta1p)/den;
21 ydot(4) = (b^2*c^2*Vt + b^2*c^2*s2^2*theta2p^2 - a^2*d^2 - b^2*f*theta1p*c2)/den;
22 endfunction
43
44 //Initial condition
45 y0 = [0;90*pi/180;0;0];
46 t = linspace(0,5000,2001)/1000;
47 t0 = 0;
48
49 //Solving the system
50 sol = ode(y0, t0, t, inv_nl_pend);
51
52
53 //Plotting of model data
54 plot(sol.2, sol.10*180/pi);
55 p = get("hdl");
56 p.children.mark_mode = "on";
57 p.children.thickness = 3;
58 //set(gca),'grid','[1:1]');
59 xlabel("t [s]");
60 ylabel("");
61 legend(["\theta_1"; "\theta_2"]);

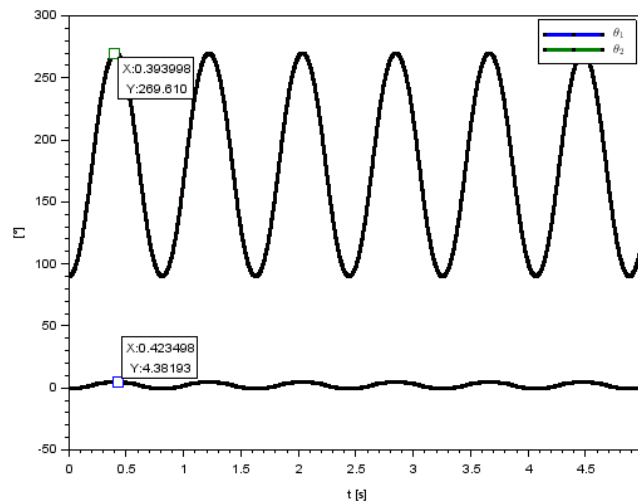
```

Gambar 4-2 Program non linier *rotary inverted pendulum*

Program non linier *rotary inverted pendulum* pada gambar 4-1 dan 4-2 telah sesuai dengan variabel yang ada dengan asumsi seperti berikut :

1. $\dot{\theta}_1 = 0$
2. $\theta_1 = 0$
3. $\dot{\theta}_2 = 0$
4. $\theta_2 = 90^\circ$
5. $v(t) = 0$

Respon yang dihasilkan seperti pada gambar 4-3 di bawah ini.

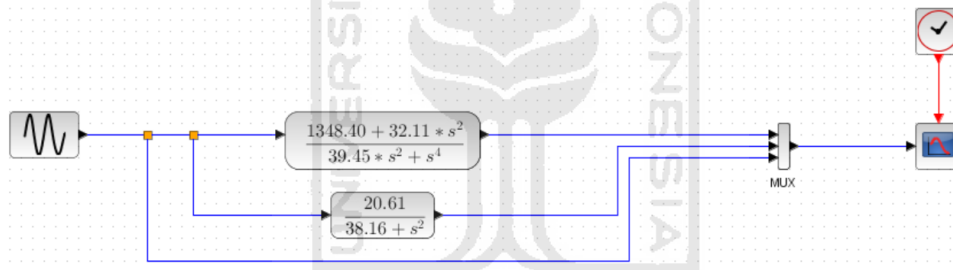


Gambar 4-3 Respon simulasi non linier *rotary inverted pendulum*

Respon simulasi non linier *rotary inverted pendulum* pada gambar 4-3 menunjukkan bahwa karakteristik *pendulum* benar non linierr. Grafik dengan magnitudo yang besar adalah pergerakan dari parameter θ_2 dan θ_1 adalah grafik yang memiliki magnitudo kecil. *Rotary inverted pendulum* dapat dikendalikan sesuai dengan yang diinginkan ketika karakteristik *rotary inverted pendulum* dilinierisasikan.

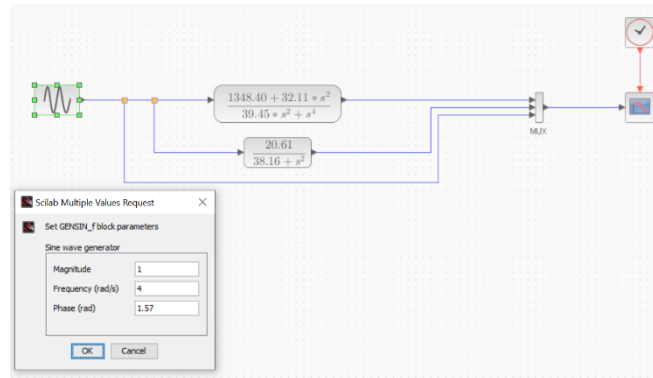
4.3 Simulasi Sistem Fungsi Transfer

Persamaan fungsi transfer *rotary inverted pendulum* didapatkan setelah proses linierisasi. Linierisasi berfungsi menjadikan karakter *rotary inverted pendulum* dapat dikendalikan sesuai yang diinginkan. Simulasi fungsi transfer bertujuan untuk mengetahui respon dan output sistem ketika diberikan input, simulasi menggunakan Scilab x-cos dengan blok diagram seperti pada gambar 4-4 di bawah ini.



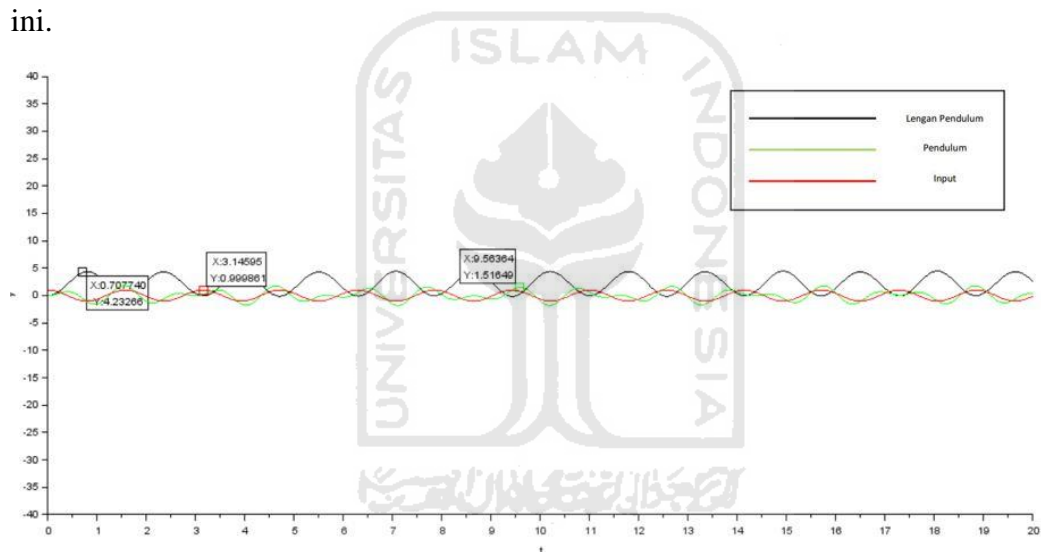
Gambar 4-4 Desain blok diagram simulasi fungsi transfer *rotary inverted pendulum*

Input pada sistem fungsi transfer sesuai dengan hasil proses perhitungan yaitu torsi motor, sedangkan outputnya posisi. Jika dilihat pada persamaan (2.9) yaitu persamaan torsi motor, dimana pada persamaan tersebut terdapat tegangan yang tetap berperan dalam sistem fungsi transfer. Kondisi input dan output dalam hal ini sebelum pengendalian dan bertujuan untuk mengetahui karakteristik sistem fungsi transfer *rotary inverted pendulum* sebelum dikendalikan. Jika akan diaplikasikan dalam pengendalian maka input torsi motor diubah menjadi tegangan, dalam hal ini akan dilakukan pada proses selanjutnya yaitu pengendalian. Pengaturan input blok GENSIN_f pada rangkaian blok diagram simulasi fungsi transfer *rotary inverted pendulum* seperti pada gambar 4-5 di bawah ini.



Gambar 4-5 Pengaturan input blok GENSIN_f

Pengaturan berdasarkan gambar 4-5 input blok GENSIN_f memiliki magnitudo 1, dengan frekuensi 4 rad/s dan posisi awal atau *phase* 1,57 rad = $\frac{1}{2} \pi = 90^\circ$. Respon yang diberikan simulasi fungsi transfer sistem seperti pada gambar 4-6 di bawah ini.

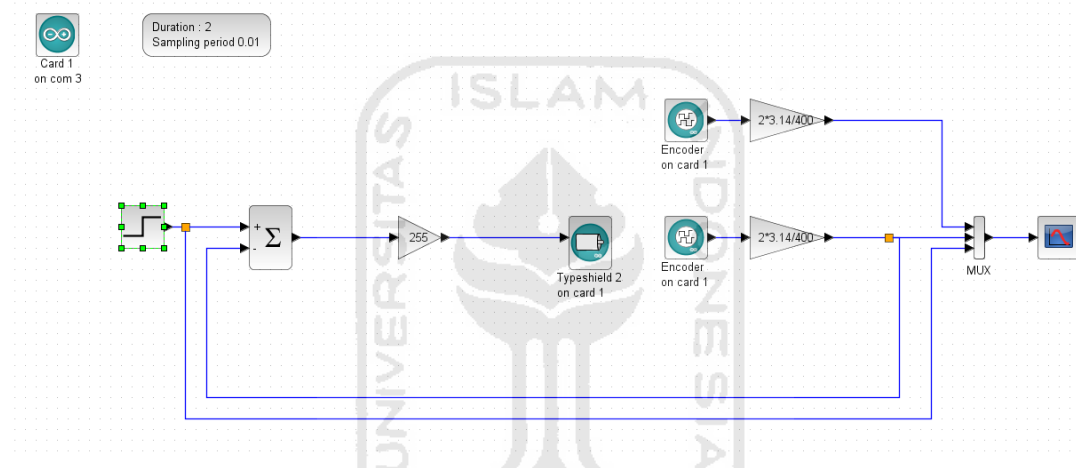


Gambar 4-6 Respon simulasi fungsi transfer *rotary inverted pendulum*

Respon simulasi fungsi transfer mempunyai karakter cenderung osilasi antara parameter θ_1 dan θ_2 . Hal ini sudah sesuai dengan proses linierisasi dari karakteristik sistem non linier yang sebelumnya grafik tidak osilasi. Respon simulasi fungsi transfer menghasilkan magnitudo θ_1 (grafik warna hitam) 4,23 rad dan θ_2 (grafik warna hijau) 1,51 rad dengan input (grafik warna merah). Hasil simulais belum sesuai dengan input yang diberikan, untuk parameter θ_2 sudah mendekati dengan input yang diberikan.

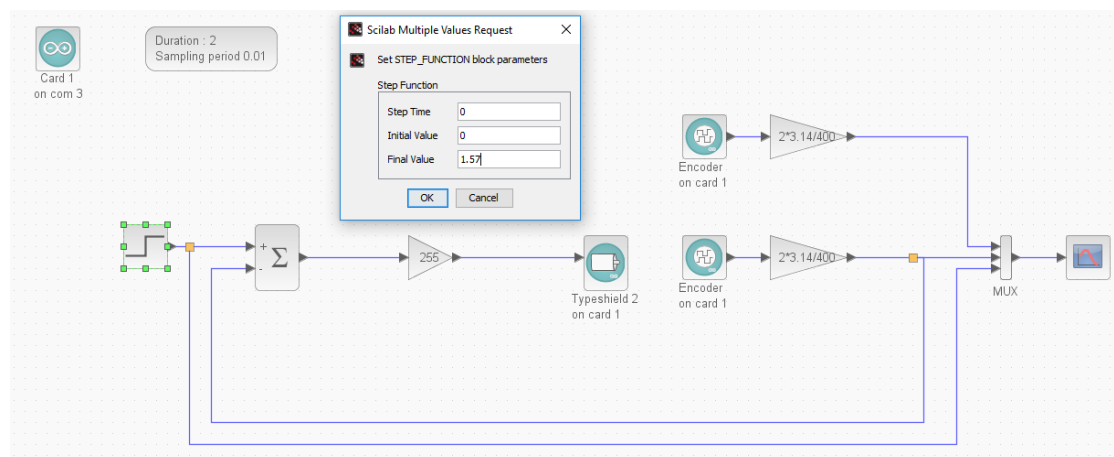
4.4 Implementasi Pada *Hardware*

Implementasi pada *hardware* menggunakan skema sistem kendali *close-loop feedback*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah kinerja *rotary inverted pendulum* sesuai dengan respon sebelum dikendalikan. Skema blok diagram Scilab x-cos implementasi pada *hardware* menggabungkan blok *encoder pendulum* dan blok *encoder motor DC*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui respon dua *encoder* dan dua parameter yang dijadikan satu sistem kendali *close-loop feedback*. Parameter tersebut adalah θ_1 dengan arah pergerakan lengan *pendulum* dan θ_2 dengan arah pergerakan *pendulum*. Skema blok diagram Scilab x-cos implementasi pada *hardware* dapat dilihat pada gambar 4-7 di bawah ini.



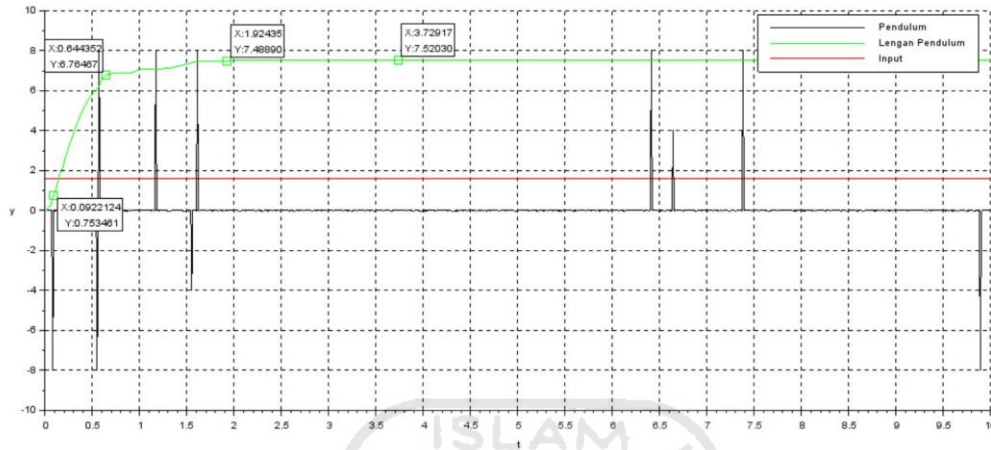
Gambar 4-7 Blok diagram Scilab x-cos implementasi pada *hardware*

Blok diagram di atas menggunakan input 1,57 radian atau 90° seperti pada gambar 4-8 di bawah ini.



Gambar 4-8 Blok step function/input implementasi pada *hardware*

Input yang diberikan akan menghasilkan respon objek kendali yang di dalamnya terdapat tiga sinyal yang diberikan oleh input, *encoder* motor DC, dan *encoder pendulum*. Respon implementasi pada *hardware* dapat dilihat pada gambar 4-9 dibawah ini.



Gambar 4-9 Respon implementasi pada *hardware*

Sumbu y menunjukkan posisi dalam satuan radian dan sumbu x menunjukkan waktu dalam satuan sekon. Garis merah menunjukkan input yang diinginkan dalam satuan radian. Gambar 4-9 menunjukkan posisi lengan *pendulum* (grafik warna hijau) 7,52 radian dengan input awal 1,57 rad. Hasil ini belum sesuai dengan input yang diberikan sebesar 1,57 radian, hal ini dapat diatasi dengan melakukan pengendalian menggunakan PID pada motor DC. Respon objek kendali memiliki parameter spesifikasi respon sistem sebagai berikut :

1. *Error steady state* = 5,95 rad/s
2. *Settling time* = 1,92 s
3. *Rise time* = 0,6 s
4. *Percent overshoot* = -
5. *Peak time* = -

Respon implementasi pada *hardware* sudah ada kecenderungan osilasi pada grafik pendulum warna hitam, namun sinyal yang terbaca masih belum jelas.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Penulis telah berhasil merancang *prototipe rotary inverted pendulum* dengan komponen yang mudah didapatkan dan spesifikasi *datasheet* sesuai yang diinginkan. *Prototipe rotary inverted pendulum* sudah terhubung dan terintegrasi dengan software Scilab x-cos, sehingga untuk kedepannya dapat dimanfaatkan sebagai penelitian pengendalian *rotary inverted pendulum*.
2. Model matematis yang didapatkan ada dua yaitu fungsi transfer dan matriks *state space*. Fungsi transfer dan matriks *state space* yang didapatkan adalah

$$W_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau(s)} = \frac{1348,40 + 32,11s^2}{39,45 s^2 + s^4}$$

$$W_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau(s)} = \frac{20,61}{38,16 + s^2}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1,09 & -55,13 & 0 \\ 0 & 39,45 & 33,08 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 218,51 \\ -129,66 \end{bmatrix}$$

3. Respon simulasi non linier mendapatkan gambaran grafik yang tidak saling berpotongan, hal ini dikarenakan simulasi tersebut menunjukkan karakteristik *pendulum* sebenarnya. Selanjutnya respon simulasi fungsi transfer yang telah melalui proses linierisasi mendapatkan gambaran grafik yang berpotongan antara parameter 1 dan 2. Respon simulasi fungsi transfer menghasilkan magnitudo θ_1 4,23 rad dan θ_2 1,51 rad.
4. Respon implementasi pada *hardware* menghasilkan parameter spesifikasi respon sistem *error steady state* 5,95 rad/s, *settling time* 1,92 s dan *rise time* 0,6 s. *Error steady state* memiliki nilai yang cukup besar, hal ini dapat

diminimalisir dengan menambahkan kontroler atau masuk pada tahap pengendalian *rotary inverted pendulum*.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

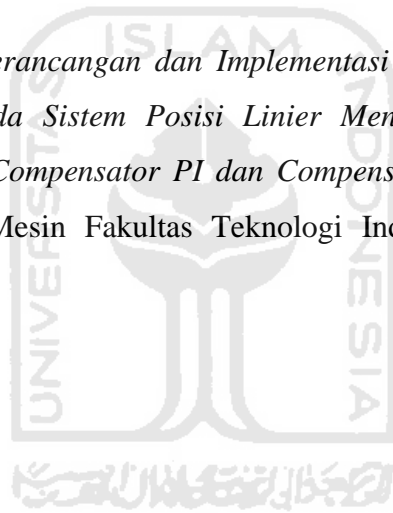
1. Penelitian selanjutnya dapat melanjutkan pada tahap pengendalian dengan menggunakan kontroler yang sesuai.
2. Penyusunan prototipe dapat ditingkatkan lagi dengan mengatur kabel *encoder pendulum* yang sering terlilit ketika *rotary inverted pendulum* bergerak. Sehingga pada saat melakukan percobaan tidak selalu meluruskan kabel yang terlilit.



DAFTAR PUSTAKA

- Adriansyah, A., & Hidayatama, O. (2013). Rancang Bangun Prototipe Elevator Menggunakan Microcontroller Arduino ATMEGA 328P. *Jurnal Teknologi Elektro, Universitas Mercu*, 100-112.
- Alamsyah, F. A. (2018). Penggunaan Xcos Sebagai Alternatif Perangkat Lunak Berbayar Untuk Simulasi Sistem Massa-Pegas-Peredam. *JURNAL REKAYASA MESIN*, 95-100.
- Aminuddin, J., Effendi, M., Nurhayati, Widiyani, A., & Sunardi. (2019). Penerapan Formalisme Euler-Langrange dan Solusi persamaan Geraknya dalam Perancangan Pompa Air dengan Kincir Tenaga Penggerak. *Jurnal Teras Fisika*, 9-12.
- Anyakrawati, A. (2015). IMPLEMENTASI MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEMS. *Jurnal Seminar Hasil Aretasiwi Anyakrawati*, 1-6.
- Arifin, J., Zulita, L. N., & Hermawansyah. (2016). Perancangan Murottal Otomatis Menggunakan Mikrokontroller Arduino Mega 2560. *Jurnal Media Infotama*, 89-98.
- Edisusanto, B. (2008). *Pemodelan Sistem Terbalik Dengan Lintasan Miring dan Karakteristik Parameter Pada Masalah Tracking Error Optimal*. Bogor: Sekolah Pascasajarna Institut Pertanian Bogor.
- Gottlieb, I. (1997). *Practical Electric Motor Handbook*. Great Britain: Biddles Ltd.
- Indra, R. (2011). *Perancangan Dan Pembuatan Rotary Inverted Pendulum Dengan Menggunakan Kontroller PID*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Manolo Venturin, S. P. (2012). *Controller For An Inverted Pendulum*. Trento: Openeering.
- Muntari, & Nurhadi, H. (2013). Desain Sistem Kendali Rotary Inverted Pendulum Dengan Sliding-PID. *JURNAL TEKNIK POMTIS*, 243-249.
- Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering*. Hoboken, Nueva Jersey, Estados Unidos: Wiley.
- Nusantoro, G. D., M, M. A., Purwanto, & C, I. R. (2012). Rancang Bangun Rotary Inverted Pendulum dengan Menggunakan Kontrol PID. *Jurnal EECCIS*, 161-170.

- Prasetyo, H., & Sutopo, W. (2018). INDUSTRI 4.0: TELAAH KLASIFIKASI ASPEK DAN ARAH PERKEMBANGAN RISET. *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 17-25.
- Stephani, H. (2010). *Pengendalian Optimal Furuta Pendulum*. Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sukontanakarn, V. (2009). *Real Time Optimal Control for rotary Inverted Pendulum*. Thailand: Asian Institute of Technology Parthumtani.
- Wahyudi, A. E. (2015). *Perancangan Dan Pembuatan Alat Ukur Jarak Digital Berbasis Arduino Menggunakan Sensor Rotary Encoder*. Surakarta: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Wijaya, S. K. (2017). *Perancangan dan Implementasi Controller NCTF untuk Operasi PTP pada Sistem Posisi Linier Menggunakan Ball-Screw : Analisis Kinerja Compensator PI dan Compensator Fuzzy*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.



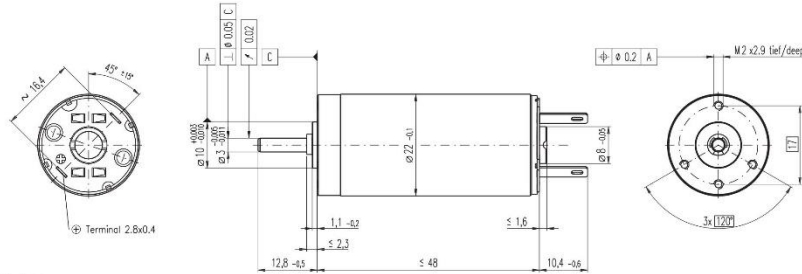
LAMPIRAN 1

DATASHEET MOTOR DC MAXON S2322

maxon special program

S 2322 Ø22 mm, Graphite Brushes, 6 Watt

NRND (See page 13, Not recommended for New Design)



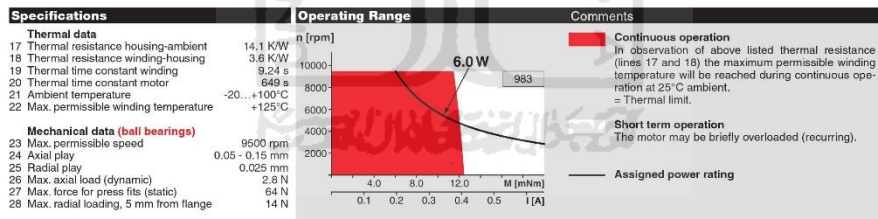
M 1:1

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

2322	...	-11,225-200	(insert winding number)
980	981	990	982 983 985 987

Winding number	980	981	990	982	983	985	987	
Motor Data								
Values at nominal voltage								
1 Nominal voltage	V	12	15	18	18	24	36	48
2 No load speed	rpm	7010	7000	7530	6690	7190	7240	6370
3 No load current	mA	42.2	33.3	30.6	25.8	21.3	14.3	8.88
4 Nominal speed	rpm	4300	4310	4840	3970	4490	4500	3580
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	11.8	12.2	12.2	12.3	12.4	12.3	12.4
6 Nominal current (max. continuous current)	A	0.807	0.654	0.583	0.520	0.420	0.279	0.184
7 Stall torque	mNm	32.9	33.5	35.9	31.4	34.1	33.4	28.8
8 Starting current	A	2.14	1.72	1.64	1.28	1.11	0.724	0.411
9 Max. efficiency	%	70	71	72	71	73	73	73
Characteristics								
10 Terminal resistance	Ω	5.61	8.71	10.9	14.1	21.6	49.7	117
11 Terminal inductance	mH	0.492	0.790	0.995	1.26	1.97	4.43	10.2
12 Torque constant	mNm/A	15.4	19.4	21.8	24.6	30.7	46.1	69.9
13 Speed constant	rpm/V	622	491	437	389	311	207	137
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	227	220	219	223	219	224	228
15 Mechanical time constant	ms	13.9	13.5	13.3	13.3	13.0	12.9	12.8
16 Rotor inertia	gcm ²	5.84	5.86	5.79	5.70	5.68	5.50	5.37

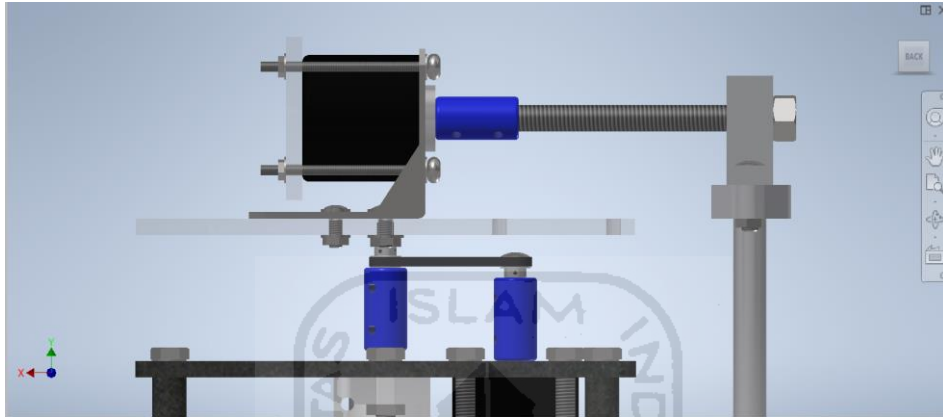


Other specifications	maxon Modular System	Overview on page 20 - 25
29 Number of pole pairs	1	
30 Number of commutator segments	7	
31 Weight of motor	92 g	
Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 71.		
Option Sleeve bearings in place of ball bearings		
	<p>Planetary Gearhead Ø22 mm 0.5 - 1.0 Nm Page 250</p> <p>Planetary Gearhead Ø22 mm 0.5 - 2.0 Nm Page 251</p> <p>Planetary Gearhead Ø26 mm 0.5 - 2.0 Nm Page 382</p>	

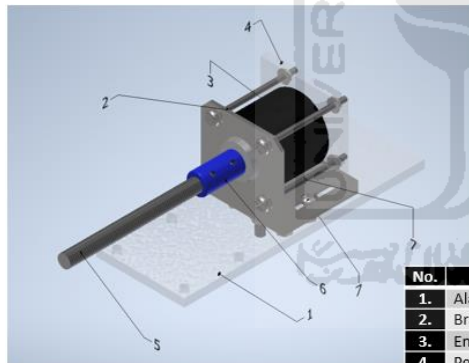
LAMPIRAN 2

MOMEN INERSIA LENGAN *PENDULUM* DAN *PENDULUM* BERDASARKAN INVENTOR

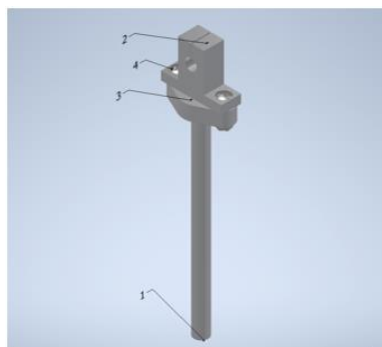
1. Posisi Sumbu Putar Prototipe



2. Asumsi Material Lengan *Pendulum* dan *Pendulum*

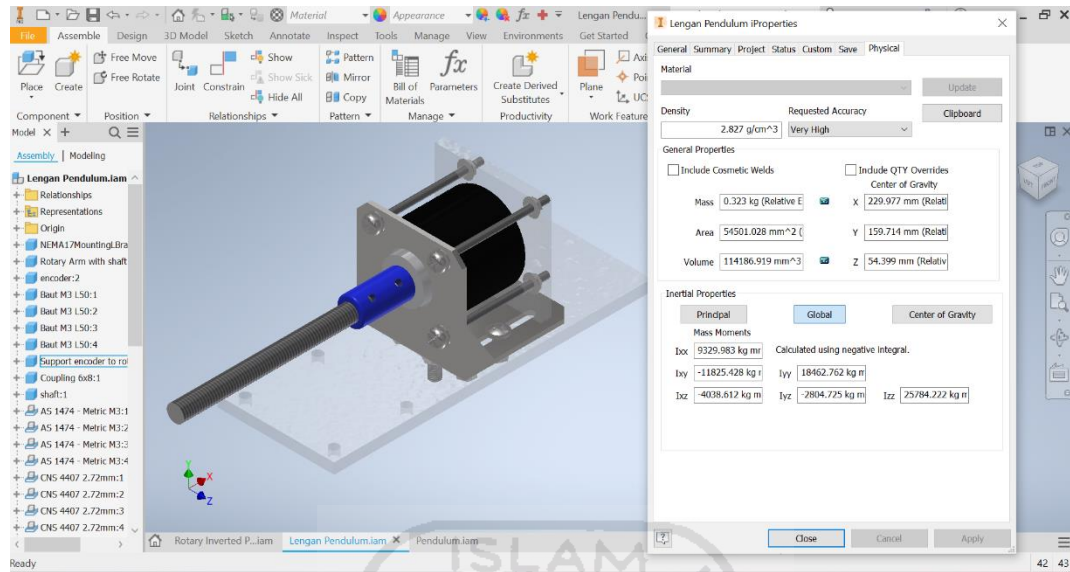


No.	Sub Komponen	Asumsi Material	Komponen
1.	Alas lengan pendulum	Akrilik tebal = 5 mm	Lengan Pendulum
2.	Bracket encoder pendulum	Steel	
3.	Encoder pendulum	Aluminium	
4.	Penahan encoder pendulum	Akrilik tebal = 5 mm	
5.	Poros lengan pendulum	Steel	
6.	Coupling	Aluminium	
7.	Bolt dan nut	Steel mild	

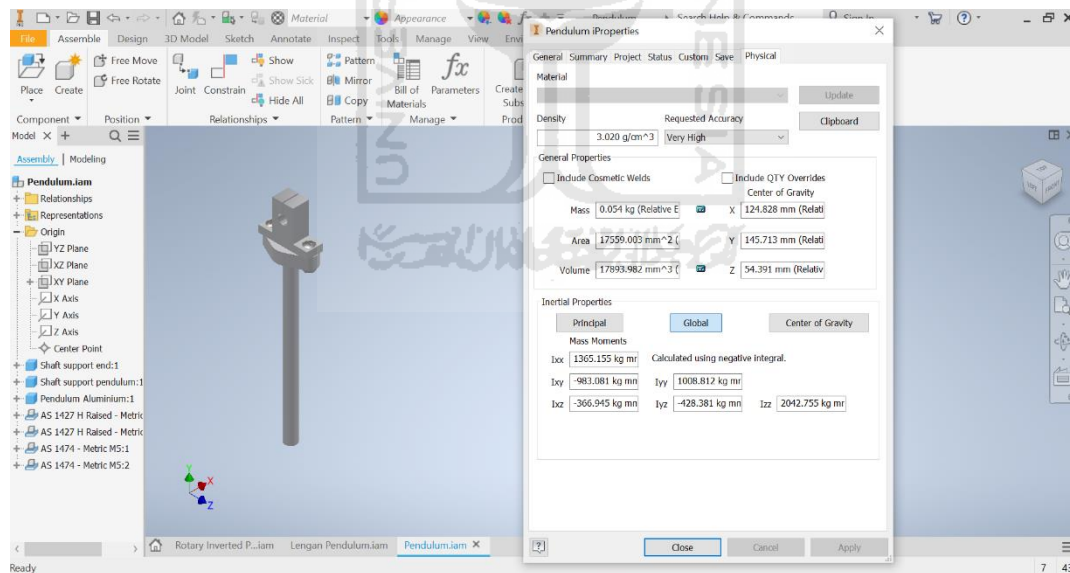


No.	Sub Komponen	Asumsi Material	Komponen
1.	Pendulum	Aluminium	Pendulum
2.	Bracket pendulum 1	Aluminium	
3.	Bracket pendulum 2	Aluminium	
4.	Bolt dan nut	Steel mild	

3. Momen Inersia Lengan *Pendulum* = $18462,762 \text{ Kgmm}^2 = 0,018462 \text{ Kgm}^2$



4. Momen Inersia *Pendulum* = $1365,155 \text{ Kgmm}^2 = 0,001365 \text{ Kgm}^2$

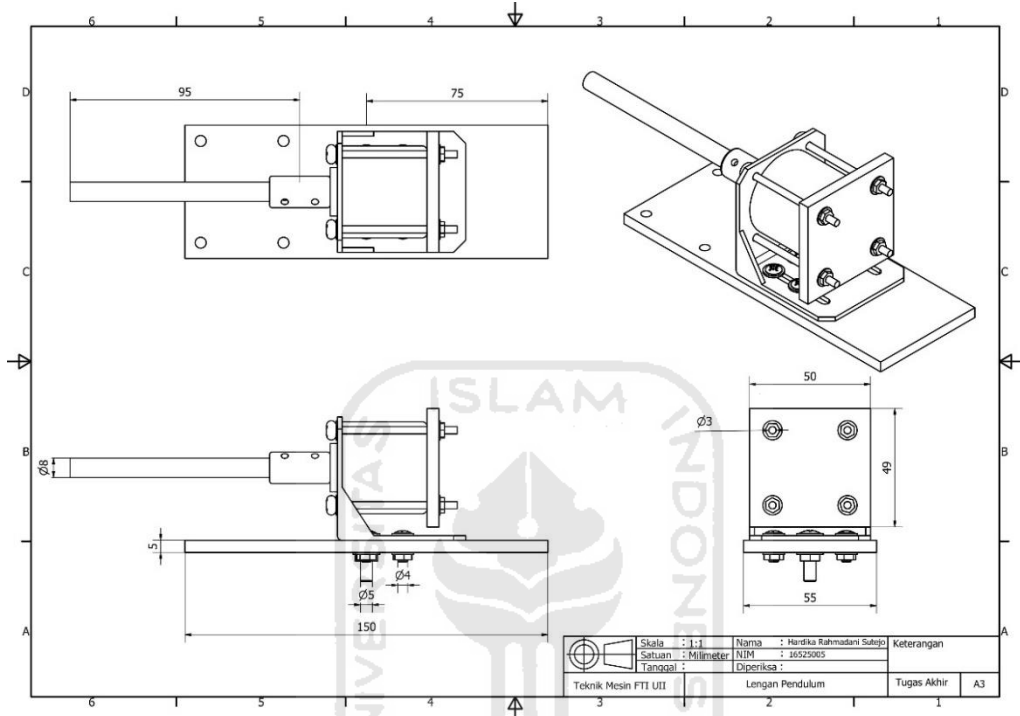


LAMPIRAN 3

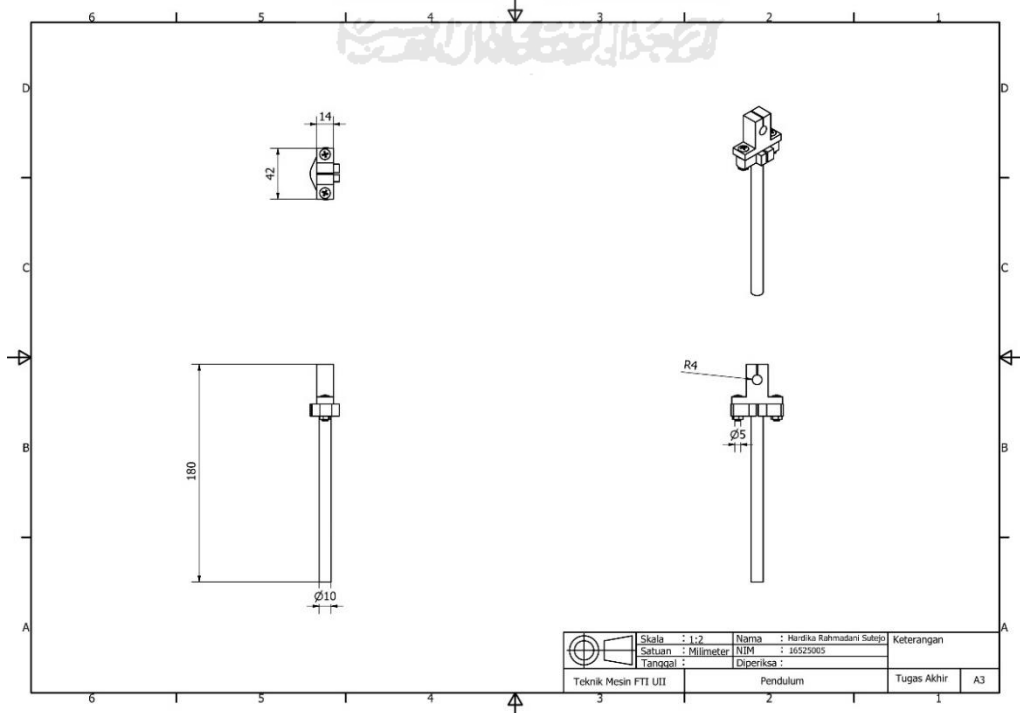
GAMBAR TEKNIK KOMPONEN UTAMA *ROTARY*

INVERTED PENDULUM

1. Gambar Teknik Lengan *Pendulum* (Skala gambar 1:1)



2. Gambar Teknik *Pendulum* (Skala gambar 1:2)



3. Gambar Teknik Base Rotary Inverted Pendulum (Skala gambar 1:2)

