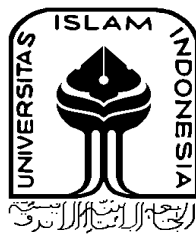


**Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis
Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step**

TUGAS AKHIR

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



Disusun Oleh :

Nama : Rizky Sadewa Sakti
No. Mahasiswa : 18525065
NIRM : 1805090021

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

Pernyataan Keaslian

“Dengan ini saya menyatakan bahwa karya tulis ilmiah yang saya buat merupakan karya sendiri dan bukan hasil plagiasi dari karya tulis orang lain. Semua referensi dan kutipan yang terdapat pada karya tulis ini telah saya cantumkan sitasi dan sumber pustakanya mengikuti tata cara pengutipan karya ilmiah yang benar. Apabila dikemudian hari saya dianggap melakukan pelanggaran hak kekayaan intelektual dan terbukti melanggar hak tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.”

Yogyakarta, 29 Juli 2025



Rizky Sadewa Sakti

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Rizky Sadewa Sakti

No. Mahasiswa : 18525065

NIRM : 1805090021

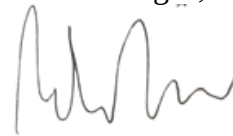
Yogyakarta, 15 Juli 2025

Pembimbing I,



Purtojo, S.T., M.Sc.

Pembimbing II,



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

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Rizky Sadewa Sakti
No. Mahasiswa : 18525065
NIRM : 1805090021

Tim Penguji

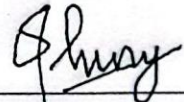
Purtojo, S.T., M.Sc.

Ketua


Tanggal : 24 07 2025

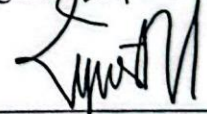
Finny Pratama Putera, S.T., M.Eng.

Anggota I


Tanggal : 24 07 2025

Yustiasih Purwaningrum, S.T., M.T.

Anggota II


Tanggal : 29 Juli 25

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan segala rasa syukur kepada Allah SWT, tugas akhir ini kupersembahkan untuk orang-orang tercinta yang selalu hadir dalam setiap langkah perjalanan ini.

Untuk Bapak, terima kasih atas doa yang tak pernah putus, dukungan yang tak pernah hilang, dan cinta yang tak pernah berkurang sedikit pun.

Untuk saudara-saudaraku, yang selalu memberi semangat lewat canda dan perhatian sederhana—kalian lebih berarti dari yang kalian kira. Untuk teman-teman seperjuangan, terima kasih telah menjadi tempat berbagi lelah, tawa, dan cerita selama masa-masa sulit yang akhirnya bisa dilalui juga.

Tak lupa untuk dosen pembimbing yang telah sabar membimbing dan membagikan ilmunya, serta semua pihak yang pernah membantu, langsung maupun tidak langsung, dalam proses penyusunan skripsi ini.

Dan terakhir, untuk diriku sendiri—terima kasih karena sudah bertahan. Semoga langkah ini menjadi awal dari perjalanan yang lebih baik ke depan.

HALAMAN MOTTO

"Jangan pernah lelah untuk belajar, karena ilmu adalah cahaya, dan Allah tidak akan memberi cahaya kepada hati yang gelap."

(Imam Malik)

"Kesuksesan bukanlah milik orang yang tidak pernah gagal, tetapi milik orang yang tidak pernah menyerah."

(B.J. Habibie)

"Ketika kamu merasa lelah, ingatlah bahwa Allah melihat perjuanganmu. Tak ada usaha yang sia-sia jika diniatkan karena-Nya."

(Anonym)

"Setiap proses punya cerita, setiap perjuangan punya arti. Teruslah berjalan, walau pelan, asal jangan berhenti."

(Anonym)

KATA PENGANTAR ATAU UCAPAN TERIMA KASIH

Assalamu'alaikum warrahmatullahi wabarakatuh,

Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, yang dengan rahmat dan hidayah-Nya, saya dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **"Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step"**. Tidak lupa shalawat serta salam dipanjatkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad saw. Saya menyadari bahwa perjalanan ini tak akan berjalan lancar tanpa dukungan dari banyak pihak, terutama keluarga tercinta.

Pertama-tama, terima kasih saya ucapkan kepada Bapak Sukmo Arum , yang selalu menjadi sumber kekuatan dan doa. Terima kasih telah sabar dan selalu mendukung saya dengan segala cara, bahkan ketika saya hampir menyerah.

Kepada saudara-saudari saya, yang selalu memberikan semangat dan tawa di tengah proses yang panjang ini, terima kasih sudah menjadi bagian penting dalam hidup saya. Kalian adalah tempat saya berbagi cerita dan mengurangi beban.

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada dosen pembimbing, Bapak Purtojo, S.T., M.Sc. sebagai dosen pembimbing pertama dan Bapak AgungNugroho Adi, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing kedua yang dengan sabar memberikan bimbingan, masukan dan koreksi yang sangat membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Tidak lupa, terima kasih saya sampaikan kepada teman-teman seperjuangan, yang selalu ada di saat saya membutuhkan dukungan dan semangat. Kalian membuat perjalanan ini terasa lebih ringan dan penuh warna.

Dan terima kasih juga untuk diriku sendiri, yang tidak menyerah meski banyak tantangan yang datang. Terima kasih sudah bertahan, belajar, dan terus berusaha hingga akhirnya bisa menyelesaikan tugas ini.

Semoga tugas akhir ini dapat memberi manfaat dan menjadi langkah awal menuju hal-hal yang lebih baik di masa depan.

Wassalamualaikum warrahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta 15 Juli 2024

Penulis,

A handwritten signature in black ink, featuring a stylized, cursive script that appears to read 'Rizky Sadewa Sakti'.

RIZKY SADEWA SAKTI

Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step

Rizky Sadewa Sakti

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada identifikasi dan pemodelan sistem kendali linear dua aksis menggunakan data respon *trajectory* terhadap *input step*. Sistem kendali dua aksis, seperti meja X-Y, sangat penting di banyak aplikasi yang butuh ketepatan tinggi. Untuk membuat kendali sistem ini efektif, perlu model yang akurat tentang bagaimana mereka bergerak. Metode yang digunakan melibatkan pemberian *input step* ke setiap aksis, lalu merekam seluruh lintasan pergerakan (*trajectory*) yang dihasilkan, dengan tujuan untuk menerapkan *Nominal Characteristic Trajectory Following* (NCTF). Dari data lintasan ini, kemudian mengidentifikasi dan membuat model matematis linear untuk setiap aksis. Model ini berupa fungsi transfer, dan juga mempertimbangkan bagaimana satu aksis mungkin memengaruhi yang lain (kopling). Keuntungan utama dari pendekatan ini adalah bisa mendapatkan model dinamika sistem tanpa perlu tahu detail fisik internalnya, cukup dari data eksperimen. Analisa dilakukan pada objek kendali untuk eksperimen *open-loop* dan eksperimen *close-loop* kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi fungsi transfer. Pada penelitian ini terdapat nilai *error* yang terjadi pada perbandingan simulasi dengan eksperimen *open-loop* dan eksperimen *close-loop*. Model yang dihasilkan ini akan menjadi dasar yang kuat untuk merancang sistem kendali yang sangat presisi, memastikan sistem dua aksis dapat bekerja secara optimal dalam hal ketepatan posisi, kecepatan respons, dan stabilitas melalui implementasi NCTF.

Kata kunci: pemodelan sistem, kendali linear, *Nominal Characteristic Trajectory* (NCT)

Identification and Modeling of Two-Axis Linear Control Systems

Based on Trajectory Response to Step Input

Rizky Sadewa Sakti

ABSTRAK

This research focuses on identifying and modeling two-axis linear control systems using trajectory response data to step inputs. Two-axis control systems, such as XY tables, are crucial in many applications that require high precision. To effectively control these systems, an accurate model of how they move is required. The method used involves applying step inputs to each axis and then recording the resulting trajectories, with the goal of implementing Nominal Characteristic Trajectory Following (NCTF). From this trajectory data, a linear mathematical model for each axis is identified and created. This model takes the form of a transfer function, also considering how one axis might influence the other (coupling). The main advantage of this approach is that it allows for a dynamic model of the system without requiring knowledge of its internal physical details, simply from experimental data. Analysis is performed on the control object for open-loop and closed-loop experiments, then compared with the transfer function simulation results. This study examines the error values that occur when comparing simulations with open-loop and closed-loop experiments. The resulting model will be a strong basis for designing a highly precise control system, ensuring that the two-axis system can perform optimally in terms of position accuracy, response speed, and stability through the implementation of NCTF.

Keywords: system modeling, linear control, Nominal Characteristic Trajectory (NCT)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
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>Abstrak</i>	x
Daftar Isi	xi
Daftar Tabel.....	xiii
Daftar Gambar	xiv
Daftar Notasi.....	xvi
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 Dasar Teori	6
2.2.1 Sistem Kendali.....	6
2.2.2 Sistem Kendali <i>Open-Loop</i>	6
2.2.3 Sistem Kendali <i>Closed-Loop</i>	7
2.2.4 Konsep Dasar NCTF	9
2.2.5 Eksperimen <i>Open Loop</i>	10
2.2.6 Pembentukan NCT	11
Bab 3 Metode Penelitian	14
3.1 Alur Penelitian	14

3.2	Peralatan.....	15
3.2.1	Perangkat Keras	15
3.2.2	Perangkat Lunak	18
3.2.3	Merangkai Perangkat Keras	19
Bab 4	Hasil dan Pembahasan	23
4.1	Identifikasi Sistem Kendali Linier Dua Aksis	23
4.1.1	Pemeriksaan Resolusi Enkoder Linear	23
4.1.2	Kalibrasi Nilai Tegangan <i>Driver</i> L298N dengan Nilai PWM.....	24
4.1.3	Perangkaian Blok Diagram Eksperimen <i>Open-loop</i>	26
4.1.4	Konstruksi NCT.....	29
4.1.5	Fungsi Transfer.....	30
4.1.6	Simulasi Segitiga	33
4.1.7	Eksperimen <i>Open-loop</i> Segitiga.....	36
4.1.8	Eksperimen <i>Close-Loop</i> Segitiga	39
Bab 5	Penutup.....	43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran atau Peneltian Selanjutnya	43
Daftar Pustaka		44

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1 Fungsi Pin pada <i>Driver</i> L298N	20
Tabel 3-2 Konfigurasi warna kabel linear <i>encoder</i> RLS LM101C001AA10K12 21	
Tabel 4-1 Kalibrasi nilai tegangan.....	25
Tabel 4-2 Konfigurasi arah putaran motor DC.....	27
Tabel 4-3 Parameter NCT sumbu X	29
Tabel 4-4 Parameter NCT sumbu Y	30
Tabel 4-5 Hasil pengukuran simulasi segitiga.....	36
Tabel 4-6 Perbandingan simulasi dan eksperimen <i>open-loop</i> sumbu X	38
Tabel 4-7 Perbandingan simulasi dan eksperimen <i>open-loop</i> sumbu Y	39
Tabel 4-8 Perbandingan simulasi dan eksperimen <i>close-loop</i> sumbu X.....	42
Tabel 4-9 Perbandingan simulasi dan eksperimen <i>close-loop</i> sumbu Y	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 Sistem kendali sederhana	6
Gambar 2-2 Sistem kendali <i>Open-Loop</i>	7
Gambar 2-3 Sistem kendali <i>Closed-Loop</i>	8
Gambar 2-4 Struktur sistem kendali NCTF.....	9
Gambar 2-5 NCT dan pergerakan objek kendali.....	10
Gambar 2-6 <i>Input stepwise</i> dan respon objek kendali	11
Gambar 2-7 <i>Nominal characteristic trajectory</i> (NCT).....	13
Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian.....	14
Gambar 3-2 Arduino Mega 2560.....	15
Gambar 3-3 <i>Driver</i> L298N	16
Gambar 3-4 Maxon Motor DC	16
Gambar 3-5 Linear <i>ball-screw</i>	16
Gambar 3-6 <i>Encoder</i> Linier.....	17
Gambar 3-7 Posisi Enkoder Linear pada <i>ball-screw</i>	17
Gambar 3-8 <i>Power Supply</i>	17
Gambar 3-9 Kabel <i>Jumper</i>	18
Gambar 3-10 <i>Project board</i>	18
Gambar 3-11 Rangkaian Perangkat Keras.....	19
Gambar 3-12 Rangkaian koneksi perangkat keras	20
Gambar 3-13 Rangkaian Proses Alur Kerja	22
Gambar 4-1 Blok diagram pembacaan <i>encoder</i> linear	23
Gambar 4-2 Hasil pembacaan <i>encoder</i> linear pada sumbu X	24
Gambar 4-3 Hasil pembacaan <i>encoder</i> linear pada sumbu Y	24
Gambar 4-4 Blok diagram pengukuran tegangan.....	25
Gambar 4-5 Blok diagram eskperimen <i>open-loop</i> sumbu X.....	26
Gambar 4-6 Blok diagram eskperimen <i>open-loop</i> sumbu Y	26
Gambar 4-7 Respons kecepatan eksperimen <i>open-loop</i> sumbu X	28
Gambar 4-8 Respons kecepatan eksperimen <i>open-loop</i> sumbu X	28
Gambar 4-9 <i>Nominal Characteristic Trajectory</i> (NCT) sumbu X.....	29
Gambar 4-10 <i>Nominal Characteristic Trajectory</i> (NCT) sumbu Y	30

Gambar 4-11 Blok diagram kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu X	31
Gambar 4-12 Blok diagram kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu Y	32
Gambar 4-13 Respons kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu X	32
Gambar 4-14 Respons kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu Y	33
Gambar 4-15 Blok diagram simulasi segitiga	34
Gambar 4-16 <i>Signal builder</i> sumbu X.....	34
Gambar 4-17 <i>Signal builder</i> sumbu Y.....	35
Gambar 4-18 Visualisasi simulasi segitiga.....	36
Gambar 4-19 Rangkaian blok diagram simulasi dan eksperimen <i>open-loop</i> segitiga.....	37
Gambar 4-20 Visualisasi simulasi dan eksperimen <i>open-loop</i> segitiga	38
Gambar 4-21 Rangkaian blok diagram simulasi dan eksperimen <i>close-loop</i> Segitiga	40
Gambar 4-22 Visualisasi simulasi dan eksperimen <i>close-loop</i> Segitiga	41

DAFTAR NOTASI

NCTF	: <i>Nominal Characteristic Trajectory Following</i>	
NCT	: <i>Nominal Characteristic Trajectory</i>	
PTP	: <i>Point to Point</i>	
CM	: <i>Countinous Motion</i>	
CNC	: <i>Computer Numerical Control</i>	
PWM	: <i>Pulse Width Modulation</i>	
PID	: <i>Propotional Integral Derivative</i>	
PI	: <i>Propotional Integral</i>	
PV	: <i>Propotional Velocity</i>	
e	: <i>Error</i>	
$\dot{e}$	: <i>Error-rate</i>	
m	: Gradien pada NCT	
h	: Kecepatan <i>maximum</i> objek kendali	(mm/s)
U	: <i>Input</i> pada objek kendali	(V)
K	: Parameter sederhana dari objek kendali	
α	: Parameter sederhana dari objek kendali	
A	: Area deselerasi pada objek kendali	
AC	: <i>Alternating Current</i>	
DC	: <i>Direct Current</i>	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi sistem kendali telah menjadi fondasi utama dalam berbagai bidang teknik, mulai dari otomasi industri, sistem robotik, hingga kendali presisi dalam perangkat mekatronika. Salah satu tantangan penting dalam penerapan sistem kendali adalah bagaimana merancang pengendali yang mampu mengatur posisi atau kecepatan secara akurat, cepat, dan stabil, meskipun terdapat gangguan maupun variasi parameter sistem. Dalam hal ini, sistem kendali linier banyak digunakan karena sifat matematisnya yang relatif sederhana dan kemampuannya untuk merepresentasikan dinamika banyak sistem fisik secara memadai.

Sistem kendali dua aksis misalnya pada meja XY, lengan robotik, atau mesin CNC (*Computer Numerical Control*) memerlukan perhatian khusus karena melibatkan interaksi antar sumbu yang dapat mempengaruhi performa secara keseluruhan. Salah satu pendekatan penting dalam merancang kendali yang efektif adalah melalui proses identifikasi sistem, yaitu membangun model matematis dari sistem berdasarkan data respon sistem terhadap masukan tertentu. Identifikasi ini menjadi penting terutama ketika model teoritis sulit ditentukan secara analitik karena kompleksitas sistem atau ketidakpastian parameter.

Salah satu cara untuk merancang sistem kendali adalah dengan membuat fungsi transfer dari sebuah objek kendali. Untuk itu perlu mengetahui data fisik dari sebuah objek kendali. Dalam penelitian kali ini objek kendali yang digunakan berupa motor DC, identifikasi terhadap data fisik motor DC ini dapat dilakukan dengan melihat *datasheet* dari motor DC tersebut.

Dalam praktiknya, dalam merancang sistem kendali masih terjadi kesalahan, seperti motor DC yang digunakan dalam kondisi telah terpakai cukup lama, sehingga kondisinya sudah tidak sesuai dengan yang tertera di *datasheet*, kondisi ini dapat menyebabkan sistem kendali tidak stabil, kesalahan lain yang terjadi di sistem kendali linear dapat dipengaruhi oleh ketidakpastian parameter,

salah satunya adalah parameter yang disebabkan oleh variasi inersia. Variasi inersia disebabkan karena variasi beban.

Untuk mengatasi hal tersebut, pada penelitian ini dipilih sistem kendali *nominal characteristic trajectory following* (NCTF), karena dalam membuat NCTF didasarkan pada prinsip karakteristik objek kendali pada saat melakukan eksperimen *open-loop*, ketika perlambatan laju objek kendali dari maksimal menuju nol. Hasil dari eksperimen *open-loop* tersebut menampilkan respon kecepatan dan perpindahan yang digunakan untuk membuat *nominal characteristic trajectory* (NCT). Parameter yang terdapat pada NCT digunakan untuk membuat fungsi transfer dari objek kendali (Purtojo, 2017).

Penerapan NCTF telah banyak dikaji pada berbagai jenis aktuator, termasuk sistem pneumatik (Yamada et al., 2015), aktuator elektromagnetik (Jia et al., 2017), dan sistem dua aksis berbasis motor DC (Saichon et al., 2018). Penelitian yang dilakukan (Wahyudi et al., 2003) menggunakan sistem kendali NCTF sebagai *controler* dengan metode perancangan sederhana yang diaplikasikan pada mekanisme *rotary* untuk sistem kendali posisi *point-to-point* (PTP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa NCTF efektif meningkatkan performa *tracking*, mengurangi *overshoot*, dan memperbaiki kestabilan sistem.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini berfokus pada identifikasi dan pemodelan sistem kendali linier dua aksis menggunakan motor DC sebagai *actuator*, untuk mendapatkan nilai fungsi transfer yang selanjutnya menjadi dasar bagi perancangan sistem kendali berbasis NCTF. Dan menganalisa nilai *error* atau perbandingan nilai antara simulasi dan eksperimen pada konfigurasi *open-loop* dan *close-loop*. Dengan demikian, diharapkan sistem kendali yang dihasilkan mampu mencapai performa yang presisi, responsif, dan *robust* terhadap variasi beban dan gangguan.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut adalah rumusan masalah penelitian terkait Identifikasi dan Pemodelan Sistem Kendali Linier Dua Aksis Berdasarkan Respon Trajectory Terhadap Input Step :

1. Bagaimana cara mengidentifikasi karakteristik objek kendali linear dua aksis?
2. Bagaimana cara memodelkan fungsi transfer berdasar pada karakteristik dari sistem kendali linier dua aksis?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan dengan membuat fungsi transfer dari objek kendali untuk menentukan karakteristik objek kendali. Parameter percepatan tidak dibahas pada penelitian ini.
2. Metode kendali yang digunakan adalah NCTF.
3. Perangkat lunak yang digunakan adalah Sci-lab versi 6.1.1 dan Arduino IDE 2.3.2.
4. Pemrograman Arduino menggunakan *arduino toolbox v3*. Program *toolbox v3* ini menghubungkan *board* Arduino dengan Scilab versi 6.1.1 sehingga tidak perlu melakukan pemrograman ulang di Arduino IDE 2.3.2.
5. Arduino Mega 2560 digunakan sebagai *controller-card*.

1.4 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengidentifikasi karakteristik objek kendali linear dua aksis.
2. Untuk membuat model fungsi transfer berdasar pada karakteristik sistem kendali linier dua aksis.

1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui bagaimana mengidentifikasi dan memodelkan sistem kendali linear dua aksis. Dapat digunakan sebagai acuan untuk membuat/menentukan *compensator*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian ini dibagi menjadi lima bab, diantaranya:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang penelitian, rumusan masalah yang dihadapi, batasan masalah, tujuan serta manfaat dari pelaksanaan penelitian, dan sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini terdiri dari landasan teori untuk melakukan penelitian terkait seperti rumus-rumus yang akan digunakan dan juga referensi-referensi dari penelitian sebelumnya.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas tentang alur penelitian yang akan dikerjakan, perangkat keras yang digunakan, serta pengaturan perangkat lunak seperti pengaturan pada aplikasi arduino dan Scilab Xcos.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menunjukkan dan membahas hasil dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari penelitian serta kritik dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian mengenai sistem kendali posisi presisi berbasis identifikasi sistem telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Namun, sebagian besar penelitian tersebut difokuskan pada sistem satu aksis. Sedangkan, penelitian mengenai identifikasi sistem kendali dua aksis berbasis respon trajektori dengan metode kontrol Nominal *Characteristic Trajectory Following* (NCTF) masih jarang dilakukan.

Penelitian oleh (Wakitani et al., 2008) membahas penerapan metode NCTF sebagai salah satu strategi kendali posisi presisi. Dalam penelitian tersebut, NCTF mampu meningkatkan kinerja kendali dengan mengikuti lintasan karakteristik nominal tanpa memerlukan model sistem yang sangat akurat. Hal ini menjadi penting dalam sistem kendali dua aksis yang kompleks dan rentan terhadap variasi parameter.

Penelitian oleh (Wakitani et al., 2010) juga mengembangkan lebih lanjut konsep NCTF pada sistem dua aksis berbasis mekatronik. Dalam penelitian tersebut, NCTF dipadukan dengan teknik umpan balik sederhana untuk menghasilkan sistem kendali yang *robust* terhadap gangguan dan variasi parameter. Metode ini relevan dengan penelitian yang dilakukan karena sistem dua aksis memiliki dinamika yang saling berinteraksi dan membutuhkan kontrol yang adaptif.

Penelitian lain oleh (Ogata, 2010) menekankan pentingnya representasi sistem kendali dalam bentuk fungsi transfer untuk memudahkan analisis dan perancangan kendali. Fungsi transfer digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sistem, khususnya pada sistem kendali posisi linier. Pendekatan ini juga digunakan dalam penelitian ini untuk menyederhanakan model sistem dua aksis berdasarkan data hasil identifikasi.

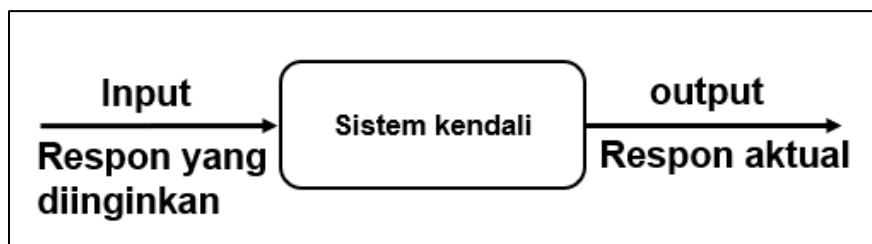
Dari beberapa referensi di atas, dapat disimpulkan bahwa pendekatan identifikasi sistem dan penerapan metode NCTF memiliki relevansi yang kuat

untuk pengembangan sistem kendali dua aksis. Meskipun metode identifikasi sistem dan penerapan NCTF telah banyak dibahas di berbagai literatur, penerapannya secara spesifik pada sistem dua aksis dengan karakteristik dinamis berbasis motor DC dan aktuator linier masih menjadi ruang penelitian yang terbuka.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Kendali

Sistem kendali merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mengatur atau mengendalikan perilaku dinamik suatu proses, peralatan, atau mesin sehingga keluaran yang dihasilkan dapat berjalan sesuai dengan kondisi atau nilai yang diinginkan. Pada dasarnya, sistem kendali bekerja dengan memberikan aksi pengendalian berdasarkan sinyal masukan (*input*) yang diterima, dengan tujuan agar variabel keluaran (*output*) dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan. Diagram blok sederhana dari sistem dapat dilihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1 Sistem kendali sederhana

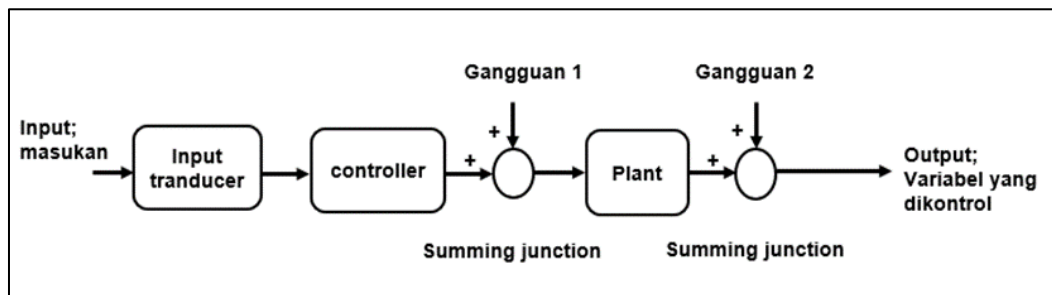
Sistem kendali secara umum diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar berdasarkan penggunaan umpan balik, yaitu sistem kendali terbuka (*open-loop control system*) dan sistem kendali tertutup (*closed-loop control system*). Keduanya memiliki prinsip kerja, kelebihan, dan kekurangan masing-masing yang sangat bergantung pada kebutuhan pengendalian sistem yang dirancang.

2.2.2 Sistem Kendali *Open-Loop*

Sistem kendali *open-loop* atau sistem kendali terbuka adalah suatu sistem kendali di mana sinyal masukan diberikan kepada sistem pengendali dan

selanjutnya diteruskan ke proses atau plant tanpa adanya mekanisme umpan balik dari hasil keluaran sistem tersebut. Dalam sistem ini, pengendalian dilakukan sepenuhnya berdasarkan pada input yang diberikan tanpa mempertimbangkan perubahan yang mungkin terjadi pada keluaran akibat gangguan atau variasi sistem. Dengan demikian, sistem kendali *open-loop* tidak memiliki kemampuan untuk mengoreksi kesalahan atau penyimpangan antara keluaran aktual dengan nilai referensi yang diinginkan.

Diagram blok sederhana dari sistem kendali *open-loop* terdiri atas tiga komponen utama, yaitu masukan (*input*), pengendali (*controller*), dan *plant* (sistem). Masukan diterima oleh pengendali yang menghasilkan sinyal kendali menuju *plant*, lalu *plant* menghasilkan keluaran (*output*) tanpa adanya jalur umpan balik ke pengendali. Dapat dilihat pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2 Sistem kendali *Open-Loop*

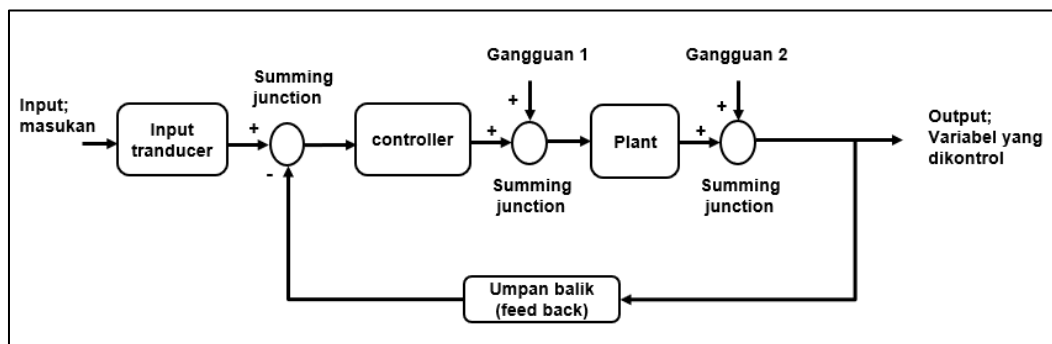
Kelebihan utama dari sistem *open-loop* terletak pada kesederhanaan desain, biaya yang lebih rendah, dan kemudahan implementasi. Namun, kelemahan utamanya adalah ketidakmampuan sistem untuk beradaptasi terhadap gangguan dan perubahan kondisi beban, sehingga sistem ini tidak cocok digunakan pada aplikasi yang memerlukan presisi tinggi atau yang beroperasi dalam lingkungan yang berubah-ubah (Nise, 2011).

2.2.3 Sistem Kendali *Closed-Loop*

Berbeda dengan sistem *open-loop*, sistem kendali *closed-loop* atau sistem kendali tertutup adalah sistem kendali yang dilengkapi dengan mekanisme umpan balik yang memungkinkan sistem untuk memonitor dan menyesuaikan keluaran

secara otomatis. Pada sistem ini, sinyal keluaran diukur menggunakan sensor, kemudian dibandingkan dengan sinyal referensi. Selisih antara keduanya, yang dikenal sebagai sinyal *error*, digunakan oleh pengendali untuk mengatur aksi kendali agar kesalahan dapat diminimalkan atau dihilangkan. Dengan adanya umpan balik ini, sistem *closed-loop* memiliki kemampuan untuk mengoreksi pengaruh gangguan dan kompensasi terhadap perubahan beban atau parameter sistem.

Diagram blok dari sistem *closed-loop* terdiri dari masukan, pengendali, *plant*, *sensor*, dan jalur umpan balik. Masukan diberikan ke pengendali, yang kemudian mengatur aksi kendali ke *plant*. *Output* dari *plant* diukur oleh sensor, lalu hasil pengukuran tersebut dikembalikan ke pengendali melalui jalur umpan balik untuk dibandingkan dengan masukan. Diagram *blok* sederhana dari sistem *closed-loop* dapat dilihat pada Gambar 2-3.

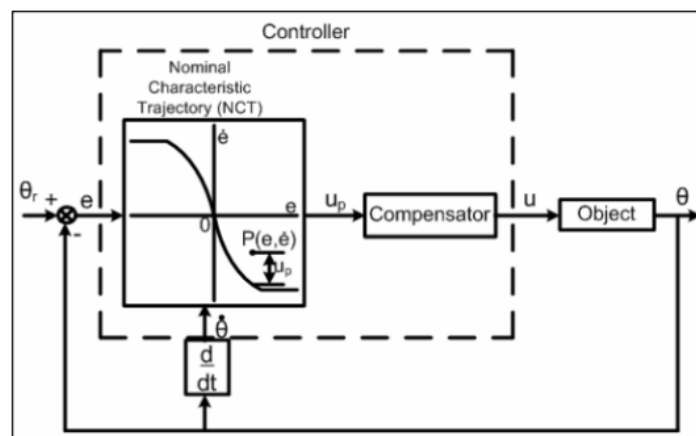


Gambar 2-3 Sistem kendali *Closed-Loop*

Sistem kendali *closed-loop* memang memerlukan rancangan yang lebih kompleks dan biaya yang lebih tinggi dibandingkan sistem *open-loop*, tetapi keunggulannya dalam menjaga performa sistem meskipun terjadi perubahan lingkungan atau gangguan *eksternal* menjadikan sistem ini sangat ideal untuk aplikasi kendali posisi, kecepatan, dan sistem robotika yang memerlukan presisi tinggi (Ogata, 2010; Nise, 2011).

2.2.4 Konsep Dasar NCTF

Struktur dari sistem kendali NCTF ditampilkan pada Gambar 2-4. Pengendali dalam sistem ini terdiri atas dua komponen utama, yaitu nominal *characteristic trajectory* (NCT) dan kompensator. Tujuan utama dari pengendali NCTF adalah memastikan agar pergerakan sistem yang dikendalikan dapat mengikuti lintasan NCT dan akhirnya mencapai titik awalnya kembali. NCT berfungsi sebagai lintasan referensi bagi pergerakan sistem kendali, yang diperoleh berdasarkan kurva hasil respon sistem tersebut. Sementara itu, kompensator bertugas mengolah informasi dari NCT dan kemudian mengirimkan sinyal kendali ke sistem, sehingga sistem terdorong untuk bergerak sesuai dengan lintasan NCT (Purtojo, 2017).



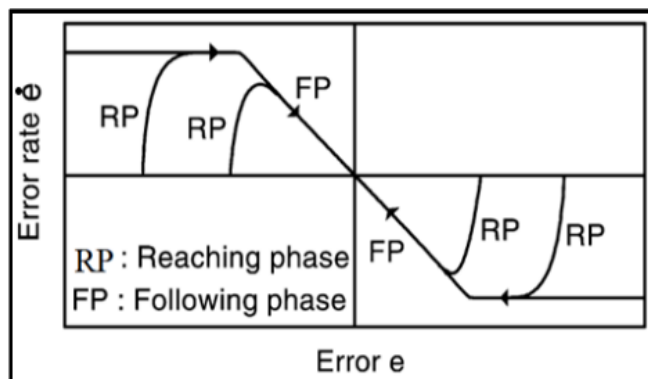
Gambar 2-4 Struktur sistem kendali NCTF

Sumber : (Purtojo, 2017)

Input dari *controller* berupa *error*, e , dan kecepatan gerak objek kendali, $\dot{x}$. Prinsip kerja *controller* adalah dengan membandingkan gerakan aktual dari objek kendali dengan data *error-rate*, $\dot{e}$, yang diperoleh dari NCT. Selisih antara koordinat *error-rate* aktual hasil pergerakan objek kendali dengan koordinat referensi pada NCT menghasilkan sinyal u_p . Nilai u_p akan menjadi nol apabila pergerakan objek kendali sepenuhnya mengikuti lintasan NCT. Jika nilai u_p belum nol, maka kompensator akan memberikan aksi pengendalian sampai u_p menjadi nol, yang berarti objek kendali telah bergerak sesuai dengan NCT. Sinyal

kendali u merupakan output dari *controller* yang digunakan untuk menggerakkan objek kendali.

Dalam proses pengendalian, kompensator berperan dalam mengatur pergerakan objek kendali agar dapat mengikuti lintasan yang ditentukan oleh NCT. Gerakan objek kendali saat mengikuti lintasan NCT ditampilkan pada Gambar 2-5, di mana terdapat dua fase utama dalam proses tersebut, yaitu *reaching phase* dan *following phase*. Fase pertama, *reaching phase*, merupakan keadaan saat objek kendali bergerak dari posisi awal menuju lintasan NCT. Selanjutnya, fase kedua, *following phase*, merupakan kondisi ketika objek kendali sudah berada pada lintasan NCT dan bergerak mengikuti lintasan tersebut hingga akhirnya mencapai titik origin.



Gambar 2-5 NCT dan pergerakan objek kendali

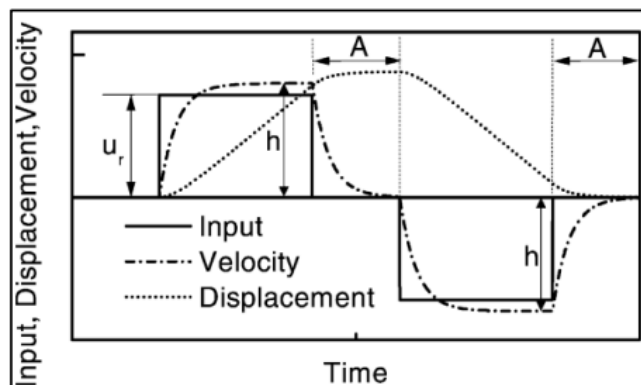
Sumber : (Wahyudi et al., 2003)

Dalam perancangan konsep sistem kendali NCTF, motor DC dianggap sebagai aktuator yang digunakan. Sifat dinamik aktuator, khususnya saat mengalami deselerasi atau perlambatan, berpengaruh terhadap tingkat ketelitian akhir dalam sistem kendali. Karakteristik ini kemudian dimanfaatkan sebagai acuan dalam proses perancangan pengendali.

2.2.5 Eksperimen *Open Loop*

Eksperimen *open-loop* yang bersifat sederhana dan mudah dilakukan digunakan untuk mengetahui karakteristik dari objek kendali. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan sinyal masukan berupa *stepwise* pada objek

kendali, sehingga data terkait perpindahan dan kecepatan dapat diperoleh, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2-6. Nilai masukan yang diberikan kepada objek kendali dinyatakan dengan simbol u_r , sedangkan A menunjukkan area deselerasi, yaitu bagian dari gerakan objek kendali yang merepresentasikan perubahan dari kecepatan maksimum hingga mencapai nol. Kecepatan maksimum yang dicapai oleh objek kendali dilambangkan dengan h .



Gambar 2-6 Input stepwise dan respon objek kendali

Sumber : (Purtojo, 2017)

Dari hasil respons objek kendali diperoleh informasi mengenai kecepatan maksimum serta karakteristik perlambatan atau deselerasi dari sistem. Dalam sistem kendali PTP, aspek penting yang harus diperhatikan adalah kemampuan untuk menghentikan pergerakan objek kendali di posisi yang telah ditentukan. Oleh karena itu, karakteristik perlambatan menjadi salah satu faktor utama yang dimanfaatkan. Selain itu, karakteristik *nonlinier* sistem, seperti gesekan dan saturasi, dapat teridentifikasi selama fase perlambatan berlangsung. Dengan demikian, data yang diperoleh selama proses ini dapat merepresentasikan karakteristik keseluruhan dari sistem.

2.2.6 Pembentukan NCT

NCT dibentuk berdasarkan hasil analisis grafik yang merekam respons kecepatan dan perpindahan objek kendali dalam area A, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2-7. Data kecepatan serta perpindahan yang diperoleh saat objek kendali memasuki fase perlambatan kemudian disimpan dan diolah

lebih lanjut hingga dapat digambarkan dalam bentuk lintasan NCT. Kemiringan atau *gradien* dari lintasan NCT di sekitar titik origin dilambangkan dengan m . Apabila karakteristik nonlinier seperti gesekan (*friction*) diabaikan, maka objek kendali dapat diasumsikan sebagai sistem orde dua (Nise, 2015), yang dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = K \frac{\alpha}{s(s+\alpha)} \quad (2.1)$$

Pada Persamaan(2.1), $\theta(s)$ digunakan untuk merepresentasikan perpindahan dari objek kendali, sementara $U(s)$ menyatakan *input* yang diterapkan pada objek kendali. Parameter K dan α berfungsi sebagai model penyederhanaan yang menggambarkan karakteristik objek kendali. Dengan mengacu pada asumsi bahwa motor DC bertindak sebagai aktuator yang menggerakkan sistem kendali, maka model parameter yang disederhanakan tersebut dapat digunakan dalam perancangan sistem.

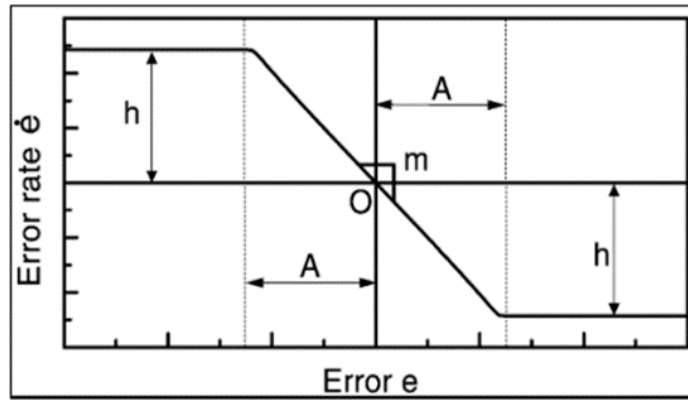
Gradien m di sekitar titik *origin* pada lintasan NCT memiliki keterkaitan dengan parameter penyederhanaan objek kendali, yaitu α . Berdasarkan bentuk lintasan NCT yang ditampilkan pada Gambar 2-7, diperoleh bahwa ;

$$\frac{d\theta}{de} = m \quad (2.2)$$

$$\frac{d\theta}{de} = -\alpha \quad (2.3)$$

$$m = -\alpha \quad (2.4)$$

$$K = \frac{h}{u_r} \quad (2.5)$$



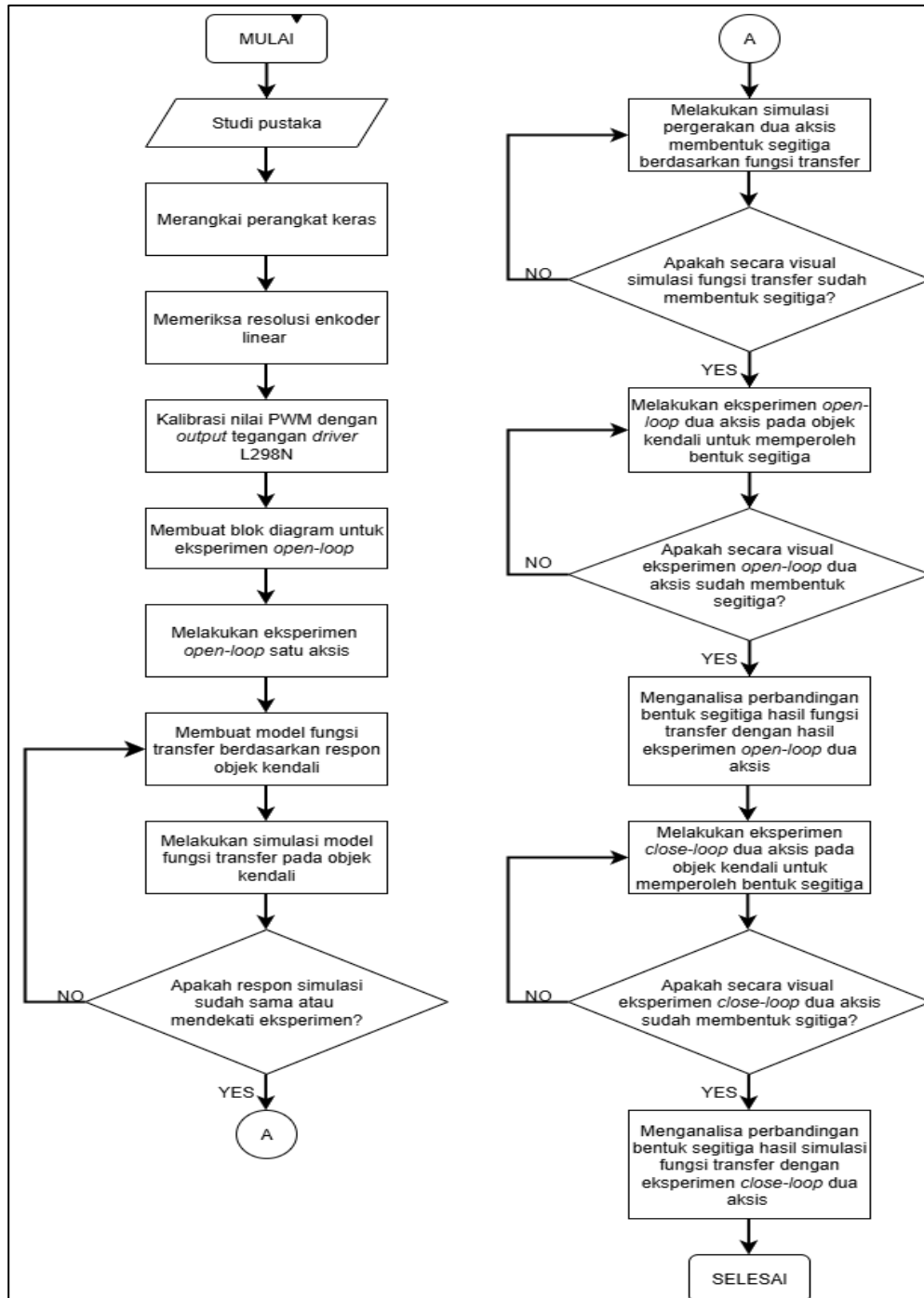
Gambar 2-7 Nominal characteristic trajectory (NCT)

Sumber : (Purtojo, 2017)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian



Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian

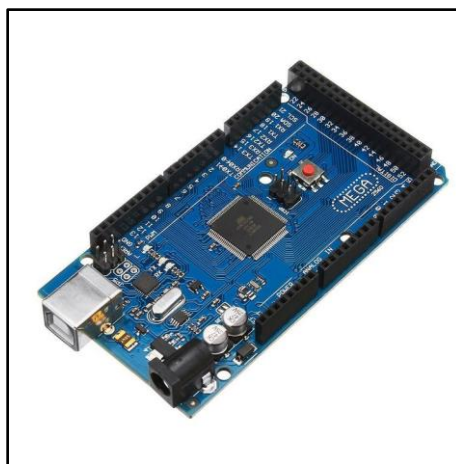
3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua jenis, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak.

3.2.1 Perangkat Keras

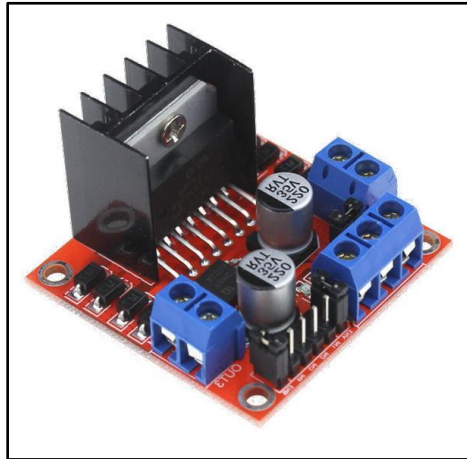
Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Arduino Mega 2560 sebagai *controller-card*. (Gambar 3-2)
2. *Driver* L298N sebagai *driver* motor DC. (Gambar 3-3)
3. Maxon dc motor tipe 126691 sebagai *actuator*. (Gambar 3-4)
4. Linear *ball-screw* sebagai bagian dari *actuator*. Pada peneltian ini menggunakan dua linear *ball-screw* dengan panjang 22 cm untuk sumbu X dan 11 cm untuk sumbu Y. (Gambar 3-5)
5. RLS LM10IC001AA10K12 adalah *linear encoder* yang digunakan sebagai sensor untuk membaca perubahan posisi dari *actuator*. (Gambar 3-6 dan Gambar 3-7)
6. *Power Supply* (220 VAC, 24 VDC) sebagai penyuplai tegangan untuk *actuator* dan *driver* motor. (Gambar 3-8)
7. Kabel *jumper* sebagai penyambung rangkaian. (Gambar 3-9)
8. *Project board* sebagai *base* penghubung rangkaian. (Gambar 3-10)



Gambar 3-2 Arduino Mega 2560

Sumber : (<https://blogger.googleusercontent.com>)



Gambar 3-3 Driver L298N

Sumber : (<https://blogger.googleusercontent.com>)



Gambar 3-4 Maxon Motor DC



Gambar 3-5 Linear *ball-screw*



Gambar 3-6 Encoder Linier

Sumber : (<https://www.rls.si>)



Gambar 3-7 Posisi Enkoder Linear pada ball-screw



Gambar 3-8 Power Supply

Sumber : (<https://encrypted-tbn0.gstatic.com>)



Gambar 3-9 Kabel Jumper

Sumber : (<https://blogger.googleusercontent.com>)



Gambar 3-10 Project board

Sumber : (<https://jogjarobotika.com>)

3.2.2 Perangkat Lunak

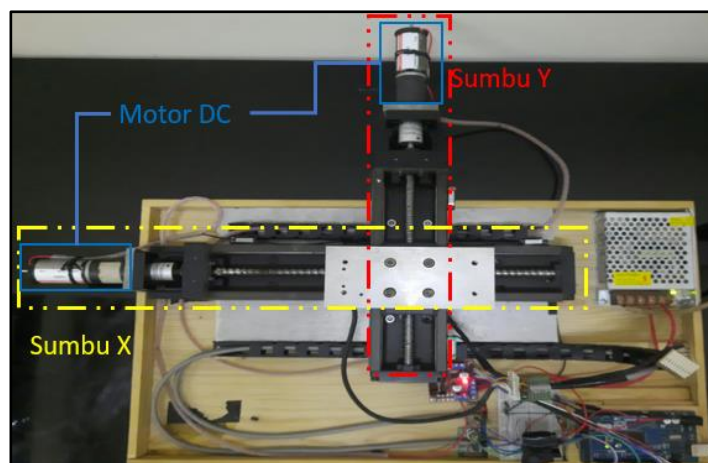
Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) 2.3.2 digunakan untuk mengunggah *source-code* Arduino toolbox.
2. Scilab 6.1.1 digunakan untuk mendesain blok diagram.

3.2.3 Merangkai Perangkat Keras

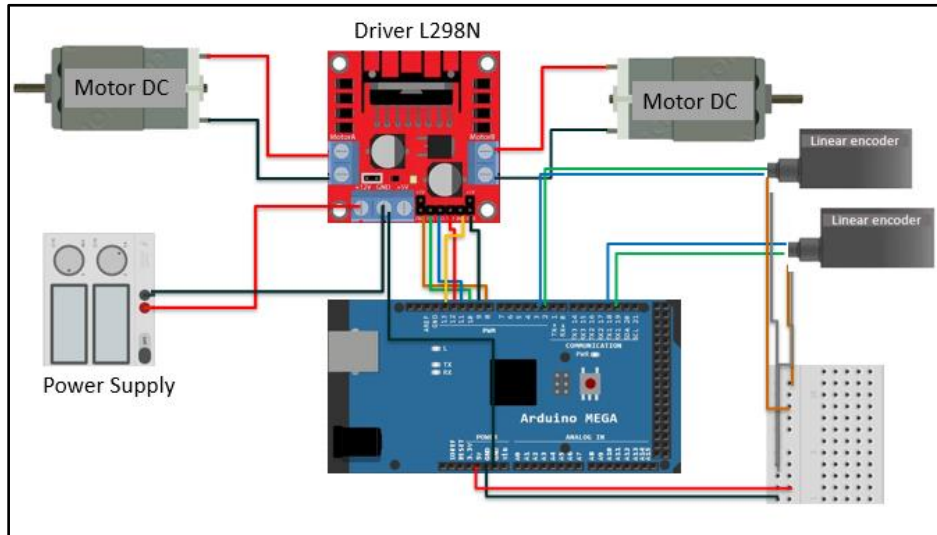
Untuk merangkai perangkat keras perlu menghubungkan antara *controller*, *driver*, *encoder* dan *actuator*. Pin negatif (-) dan pin positif (+) pada *driver* motor L298N dihubungkan ke pin negatif (0 volt) dan pin positif (24 volt) pada *power supply*. Pin negatif (-) *driver* dihubungkan ke pin ground Arduino. Secara berurutan terminal positif dan negatif pada kedua motor dc dihubungkan ke pin out (1, 2, 3, dan 4) pada *driver* motor L298N. Pin *enable* motor A dan B *driver* L298N dihubungkan ke pin pwm 8 dan 9 pada Arduino. Secara berurutan pin in (1, 2, 3 dan 4) pada *driver* dihubungkan ke pin pwm (10, 11, 12 dan 13) pada Arduino.

Pin *ground* dan 5v Arduino dihubungkan ke kabel *power* 5v dan 0v pada kedua *encoder*. Secara berurutan pin (2, 3) dan (18, 19) pada Arduino dihubungkan ke pin sinyal inkremental A dan B pada setiap *encoder*. Keterangan warna pada kabel *encoder* didapatkan pada *datasheet* RLS LM101C001AA10K1 2 dapat dilihat pada Tabel 3-2. Rangkaian menyeluruh dari *controller*, *driver*, *encoder*, dan *actuator* dapat dilihat pada Gambar 3-11 dibawah ini.



Gambar 3-11 Rangkaian Perangkat Keras

Koneksi pin dari *controller*, *driver*, *encoder*, dan *actuator* secara detail dapat dilihat pada Gambar 3-12 di bawah ini.



Gambar 3-12 Rangkaian koneksi perangkat keras

Fungsi pada setiap pin *driver* L298N dapat dilihat pada Tabel 3-1 di bawah ini.

Tabel 3-1 Fungsi Pin pada *Driver* L298N

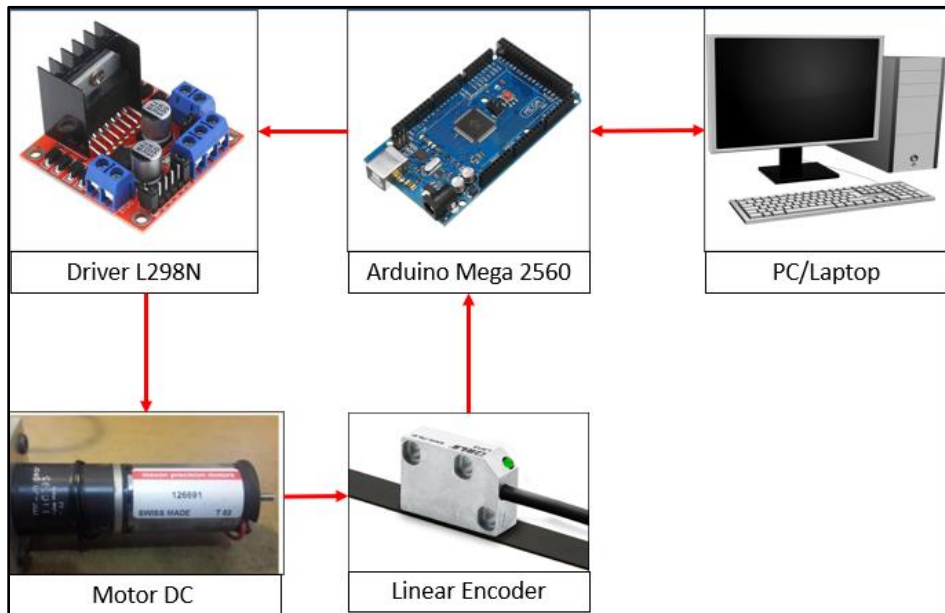
Pin	Fungsi
<i>Pin 12 volt</i>	Memberi tegangan pada motor yang terhubung sebesar 3.2 volt – 35 volt
<i>Ground (GND)</i>	Pin GND digunakan untuk menghubungkan rangkaian ke sistem ground
Motor A out 1 dan out 2	Menghubungkan <i>driver</i> dengan kutub motor DC yang terhubung
Motor B out 3 dan out 4	Menghubungkan <i>driver</i> dengan kutub motor DC yang terhubung
<i>In 1</i>	Mengendalikan arah putaran Motor A <i>Counter Clockwise</i>
<i>In 2</i>	Mengendalikan arah putaran Motor A <i>Clockwise</i>
<i>In 3</i>	Mengendalikan arah putaran Motor B <i>Counter Clockwise</i>
<i>In 4</i>	Mengendalikan arah putaran Motor B <i>Clockwise</i>
EN A	Mengendalikan kecepatan Motor A
EN B	Mengendalikan kecepatan Motor B

Tabel 3-2 Konfigurasi warna kabel linear *encoder* RLS

LM101C001AA10K12

<i>Funtion</i>	<i>signal</i>	<i>colour (option F)</i>
<i>Power</i>	5 V	<i>Brown</i>
	0 V	<i>White</i>
<i>Incremental signal</i>	A	<i>Green</i>
	A-	<i>Yellow</i>
	B	<i>Blue</i>
	B-	<i>Red</i>
<i>Reference signals</i>	Z	<i>Pink</i>
	Z-	<i>Gray</i>
<i>Alarm</i>	E	<i>Violet</i>
	E-	<i>Black</i>

Proses alur kerja pada rangkain dimulai ketika Arduino Mega 2560 yang digunakan sebagai jembatan komunikasi menerima sinyal dari *laptop/PC* kemudian diteruskan ke *Driver* L298N, selanjutnya *Driver* L298N akan menggerakkan motor DC. Gerakan dari motor DC menyebabkan *work block* ikut bergerak. Perubahan posisi pada *work block* yang diproses oleh *encoder* akan menghasilkan sinyal inkremental. Kemudian *encoder* mengirimkan sinyal inkremental menuju Arduino Mega 2560 untuk diproses dan dikirimkan ke *laptop/PC*. Rangkain proses alur kerja dapat dilihat pada Gambar 3-13 di bawah ini.



Gambar 3-13 Rangkaian Proses Alur Kerja

BAB 4

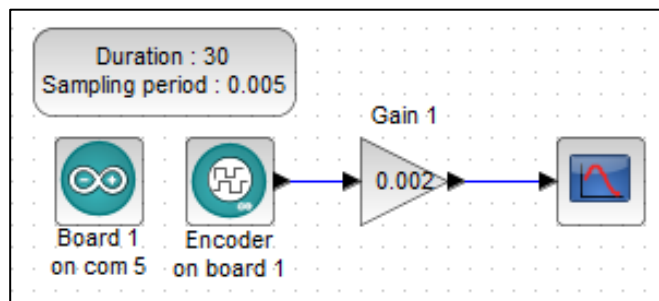
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Sistem Kendali Linier Dua Aksis

Identifikasi sistem kendali dilakukan untuk mendapatkan nilai fungsi transfer.

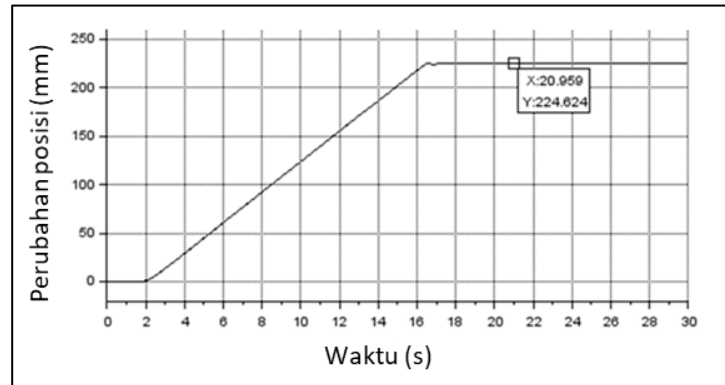
4.1.1 Pemeriksaan Resolusi Enkoder Linear

Encoder linier digunakan sebagai pembaca perubahan posisi pada aktuator linear. Pemeriksaan dilakukan untuk menyesuaikan pembacaan satuan yang diinginkan. Resolusi *encoder* linear yang dipakai sebesar $0.5 \mu\text{m}$. Blok diagram untuk pembacaan *encoder* linear ditunjukkan pada Gambar 4-1. Nilai gain 1 digunakan untuk mengubah satuan dari μm menjadi mm.

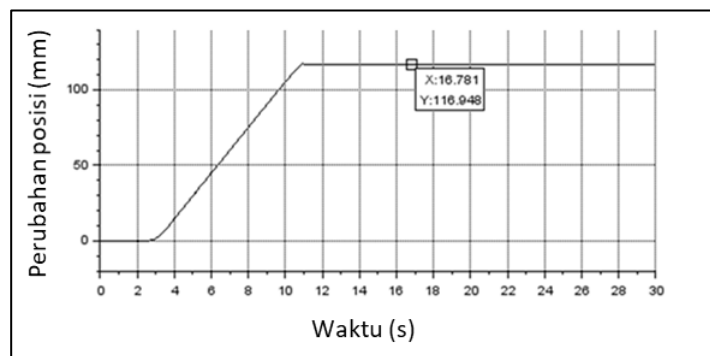


Gambar 4-1 Blok diagram pembacaan *encoder* linear

Gambar 4-2 menunjukkan hasil pengukuran panjang lintasan *actuator* sumbu X sebesar 224.62 mm. Gambar 4-3 menunjukkan hasil pengukuran panjang lintasan *actuator* sumbu Y sebesar 116.94 mm. Hasil pembacaan *encoder* linier sudah sesuai dengan spesifikasi *actuator* yang telah dijelaskan pada bagian 3.2.1.



Gambar 4-2 Hasil pembacaan *encoder* linear pada sumbu X



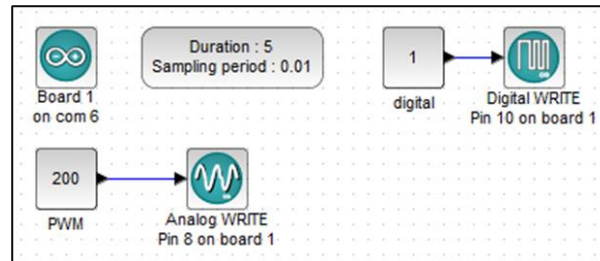
Gambar 4-3 Hasil pembacaan *encoder* linear pada sumbu Y

4.1.2 Kalibrasi Nilai Tegangan *Driver* L298N dengan Nilai PWM

Motor DC bergerak ketika diberi tegangan. *Driver* L298N berfungsi mengatur besar tegangan yang masuk ke motor DC. Oleh sebab itu, *input* pada objek kendali motor DC adalah tegangan yang keluar dari *Driver* L298N. *Controller-card* Arduino mega 2560 tidak dapat secara langsung mengirim sinyal tegangan menuju *Driver* L298N melainkan mengirim sinyal PWM (*pulse width modulation*). Sinyal PWM yang diterima oleh *Driver* L298N akan dikonversi menjadi tegangan yang akan diteruskan ke motor DC. Agar dapat mengetahui besar tegangan yang masuk ke motor DC, maka perlu dilakukan pengukuran antara sinyal PWM pada Arduino mega 2560 dengan besar tegangan yang keluar dari *Driver* L298N.

Gambar 4-4 menunjukkan blok diagram pada Scilab yang digunakan untuk pengukuran tegangan. Blok PWM pada Gambar 4-4 adalah besar nilai PWM

yang diberikan Arduino mega 2560 ke pin EN A dan EN B pada *Driver* L298N. Blok *digital* berisi nilai yang akan mengaktifkan pin *In* 1 maupun *In* 3 pada *Driver* L298N. Pengukuran dilakukan dengan mengukur tegangan yang keluar pada pin *Driver* L298N yang terhubung dengan motor DC menggunakan multimeter. Hasil kalibrasi tegangan dengan nilai PWM dapat dilihat pada Tabel 4-1.



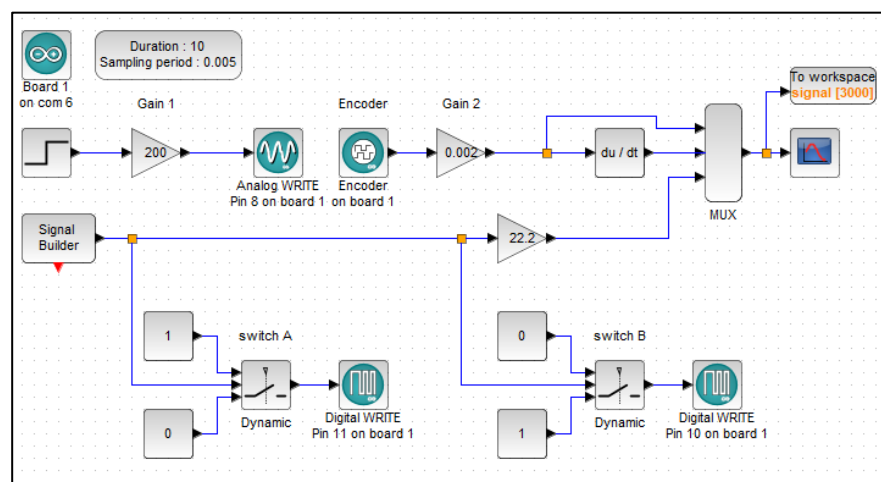
Gambar 4-4 Blok diagram pengukuran tegangan

Tabel 4-1 Kalibrasi nilai tegangan

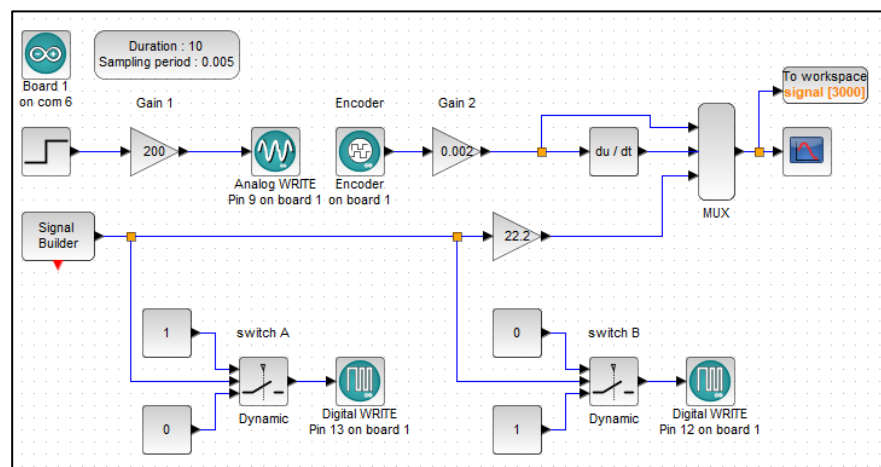
PWM	Tegangan (V)
26	14.9
35	17.3
50	19.2
65	20.2
80	20.8
95	21.2
110	21.4
125	21.7
145	21.8
155	21.9
170	22
185	22.1
200	22.2
215	22.3
229	22.3
240	22.4
255	22.4

4.1.3 Perangkaian Blok Diagram Eksperimen *Open-loop*

Gambar 4-5 dan Gambar 4-6 berturut- turut menunjukkan rangkaian blok diagram pada Scilab untuk eksperimen *open-loop* pada sumbu X dan sumbu Y. Blok *input stepwise* berisi nilai 1 yang akan masuk menuju blok *Gain 1* untuk mewakili nilai PWM yang akan diterima oleh blok *Analog WRITE* pin 8. Nilai PWM yang digunakan adalah 200. Blog *Analog WRITE* pin 8 terhubung dengan pin EN A pada *Driver L298N* yang akan mengatur kecepatan motor DC pada sumbu X. *Input stepwise* pada sumbu Y terhubung dengan *Analog WRITE* pin 9 yang terhubung dengan pin EN B pada *Driver L298N*.



Gambar 4-5 Blok diagram eskperimen *open-loop* sumbu X



Gambar 4-6 Blok diagram eskperimen *open-loop* sumbu Y

Pengaturan arah putaran motor DC menggunakan blok diagram *switch* yang terhubung dengan blok diagram *Digital WRITE*. Dengan menggunakan

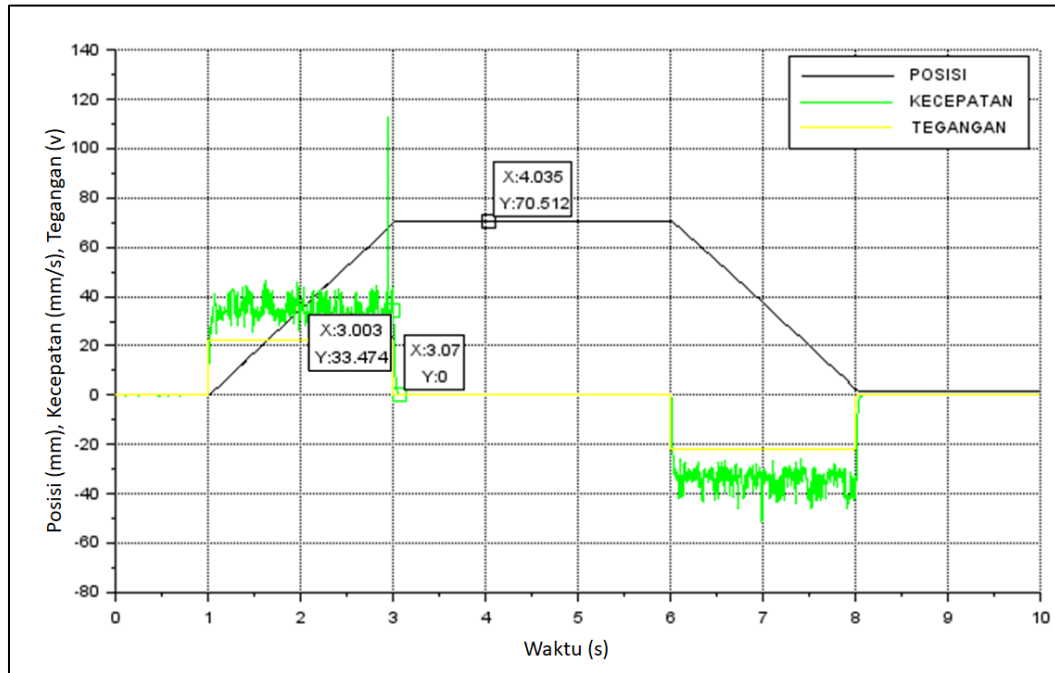
logika *high and low switch* mengatur *output* yang keluar bergantian antara nilai 1 dan 0. Sinyal yang keluar dari *signal builder* adalah 1, 0 dan -1, sinyal ini akan mempengaruhi *output* yang keluar dari *switch*. Tabel 4-2 menunjukkan konfigurasi putaran motor DC.

Tabel 4-2 Konfigurasi arah putaran motor DC

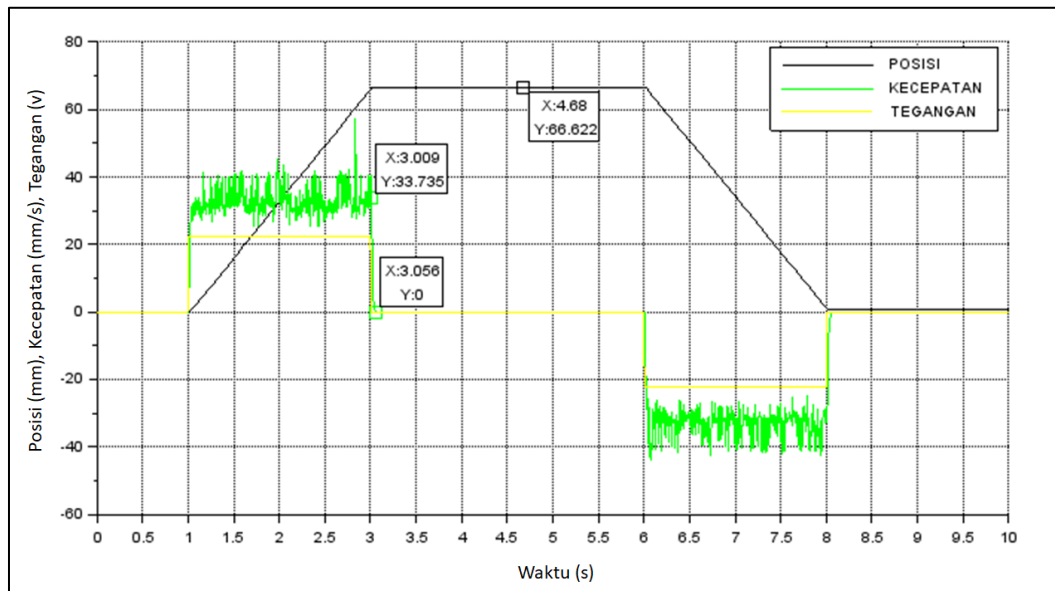
<i>Signal Builder</i>	<i>Switch A</i>	<i>Switch B</i>	Putaran
1	1	0	<i>Clockwise (CW)</i>
0	0	0	Berhenti
-1	0	1	<i>Counter clockwise (CCW)</i>

Blok enkoder pada Gambar 4-5 dan Gambar 4-6 digunakan untuk menyimpan nilai perubahan posisi yang terbaca oleh linier enkoder. Linier enkoder memiliki resolusi sebesar $0.5 \mu m$. Blok *Gain 2* digunakan untuk mengubah satuan pada enkoder menjadi *mm*.

Gambar 4-7 dan Gambar 4-8 menunjukkan grafik kecepatan, posisi dan tegangan. Kurva berwarna hijau merupakan kurva kecepatan dengan satuan *mm/s* dan kurva berwarna hitam merupakan kurva posisi dengan satuan *mm*. sedangkan kurva berwarna merah adalah tegangan dengan satuan *volt*.



Gambar 4-7 Respons kecepatan eksperimen *open-loop* sumbu X



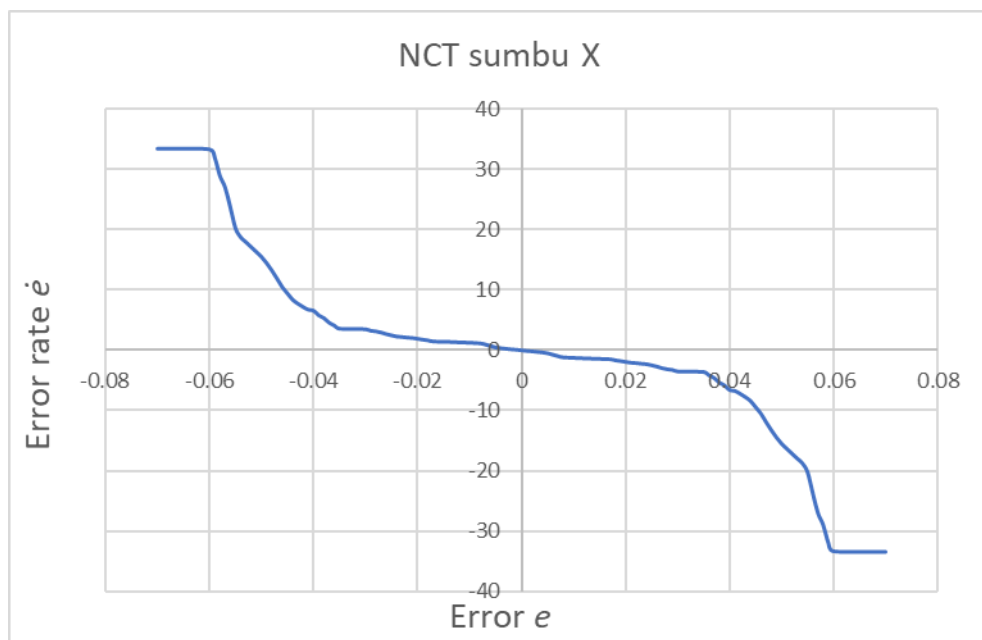
Gambar 4-8 Respons kecepatan eksperimen *open-loop* sumbu X

4.1.4 Konstruksi NCT

Pembentukan NCT didasarkan pada data perlambatan atau deselerasi yang diperoleh melalui eksperimen *open-loop*. Eksperimen *open-loop* disimulasikan dalam waktu 10 detik dengan menggunakan sampling periode sebesar 0.005 detik (Lihat Gambar 4-5 dan Gambar 4-6).

NCT pada sumbu X dikonstruksi dengan mengambil data eksperimen *open-loop* sumbu X pada detik ke 3 sampai detik ke 3.07. Dari data tersebut kemudian dibalik dimulai dari detik ke 3.07 sampai detik ke 3 (Lihat Gambar 4-7). Sehingga menghasilkan lintasan NCT yang dapat dilihat pada Gambar 4-9.

Berdasarkan penjelasan pada bagian 2.2.6 parameter NCT sumbu X dapat dilihat pada Tabel 4-3. Parameter NCT tersebut diperoleh berdasarkan data yang terdapat pada NCT sumbu X.



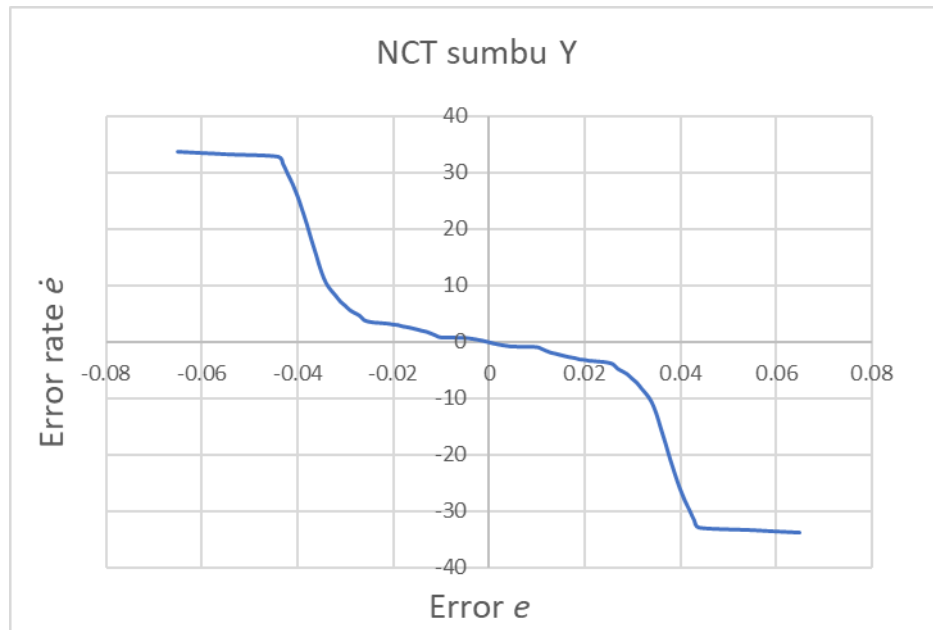
Gambar 4-9 Nominal Characteristic Trajectory (NCT) sumbu X

Tabel 4-3 Parameter NCT sumbu X

m_x	h_x (mm/s)	α_x	U_x (v)	K_x	" $K_x * \alpha_x$ "
-85.714	33.47	85.714	22.2	1.507	129.17

NCT pada sumbu Y dikonstruksi dengan mengambil data eksperimen *open-loop* sumbu Y pada detik ke 2.99 sampai detik ke 3.055. Dari data tersebut

kemudian dibalik dimulai dari detik ke 3.055 sampai detik ke 2.99 (Lihat Gambar 4-8). Hasil konstruksi NCT sumbu Y dapat dilihat pada Gambar 4-10. Parameter NCT sumbu Y diperoleh berdasarkan data NCT yang terdapat pada NCT sumbu Y. Parameter NCT sumbu Y dapat dilihat pada Tabel 4-4.



Gambar 4-10 Nominal Characteristic Trajectory (NCT) sumbu Y

Tabel 4-4 Parameter NCT sumbu Y

m_y	h_y (mm/s)	α_y	U_y (v)	K_y	" $K_y * \alpha_y$ "
-179	33.73	179	22.2	1.519	271.9

4.1.5 Fungsi Transfer

Perhitungan fungsi transfer pada objek kendali menggunakan persamaan (2.1). Dengan menggunakan parameter NCT maka nilai fungsi transfer dapat diketahui. Pada sumbu X nilai fungsi transfer dihitung dengan memasukan parameter NCT pada Tabel 4-3 ke persamaan (2.1). Sehingga fungsi transfer pada sumbu X dapat dinyatakan dengan.

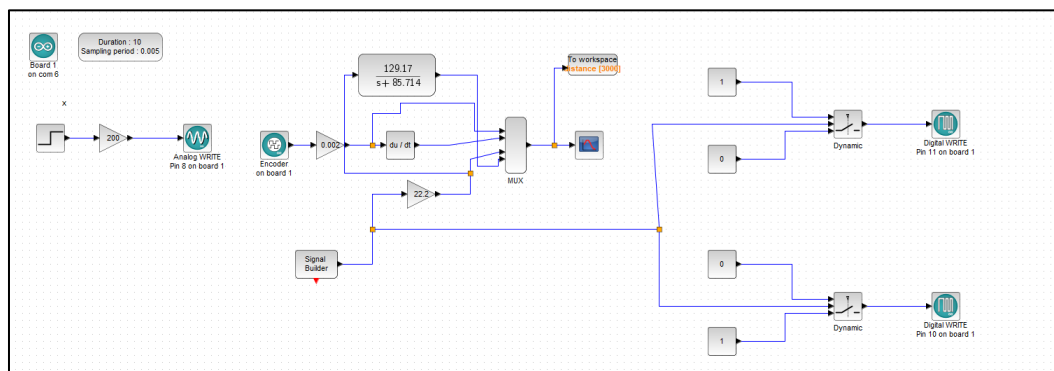
$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{129.17}{s(s+85.714)} \quad (4.1)$$

Perhitungan fungsi transfer pada sumbu y dilakukan dengan memasukkan parameter NCT pada Tabel 4-4 ke persamaan (2.1). Sehingga fungsi transfer pada sumbu Y adalah

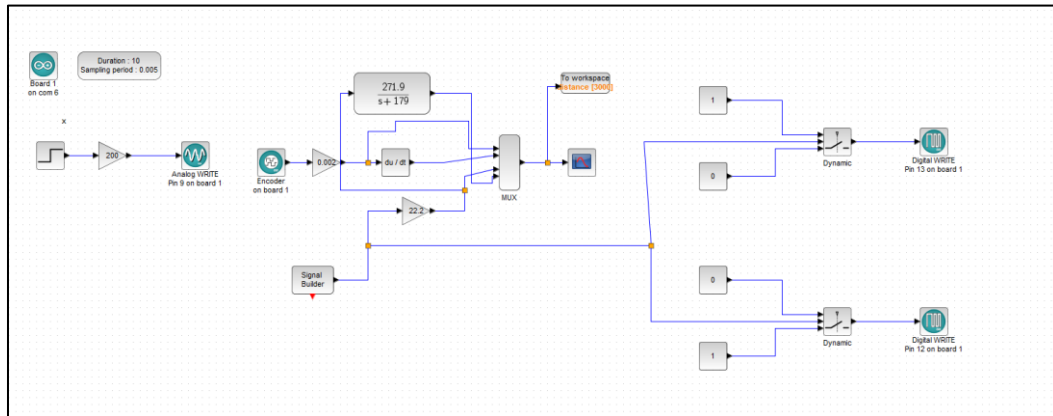
$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{271.9}{s(s+179)} \quad (4.2)$$

Selanjutnya, setelah mendapatkan nilai fungsi transfer verifikasi dilakukan dengan mensimulasikan blok diagram seperti pada Gambar 4-11 untuk sumbu X dan Gambar 4-12 untuk sumbu Y. Verifikasi fungsi transfer dilakukan untuk mengetahui bahwa fungsi transfer sudah dapat mewakili karakteristik dari sistem kendali. Fungsi transfer dapat dinyatakan sudah mewakili karakteristik objek kendali apabila kecepatan simulasi sudah sama atau mendekati kecepatan eksperimen.

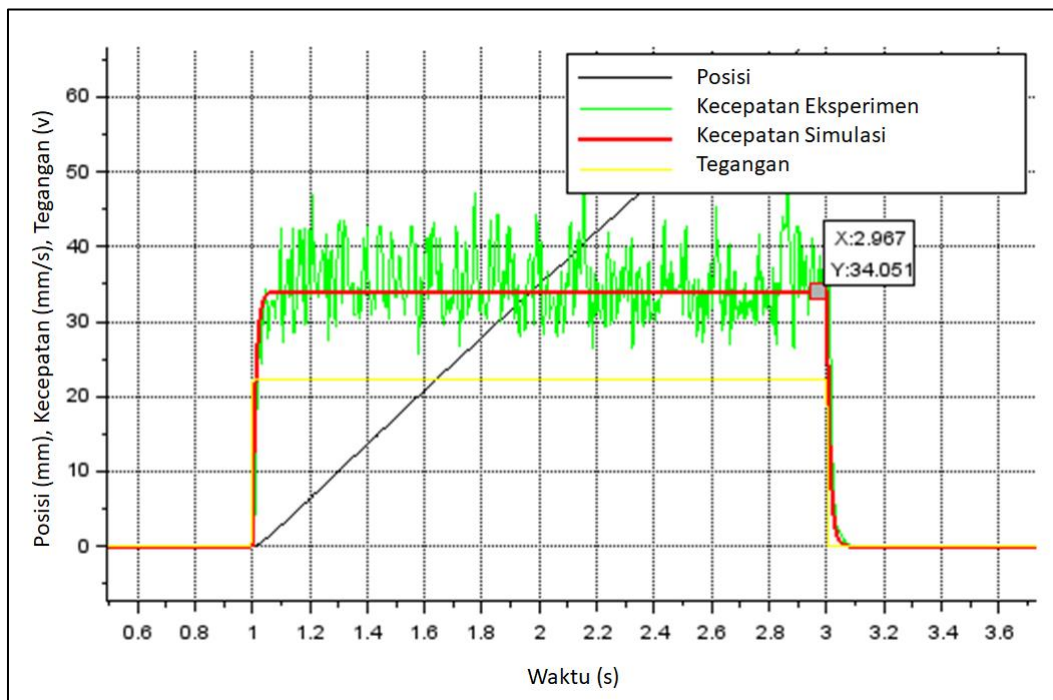
Gambar 4-13 dan Gambar 4-14 berturut-turut menunjukkan hasil simulasi fungsi transfer sumbu X dengan nilai $h_x = 34.051$ mm/s dan sumbu Y dengan nilai $h_y = 33.722$ mm/s.



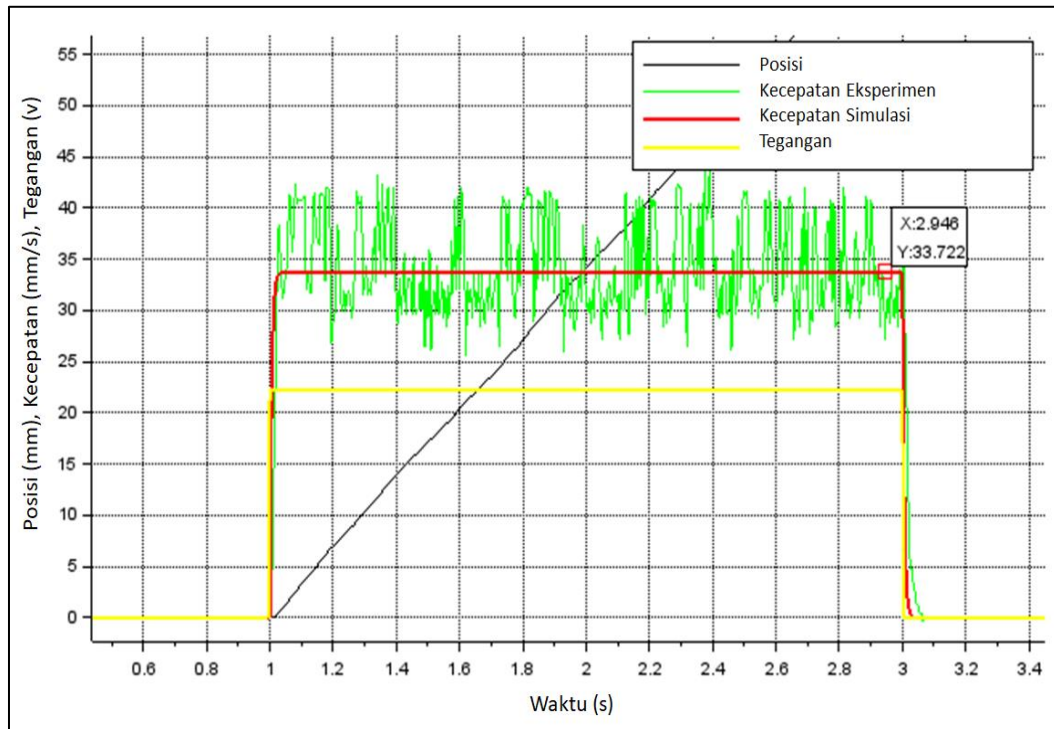
Gambar 4-11 Blok diagram kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu X



Gambar 4-12 Blok diagram kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu Y



Gambar 4-13 Respons kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu X

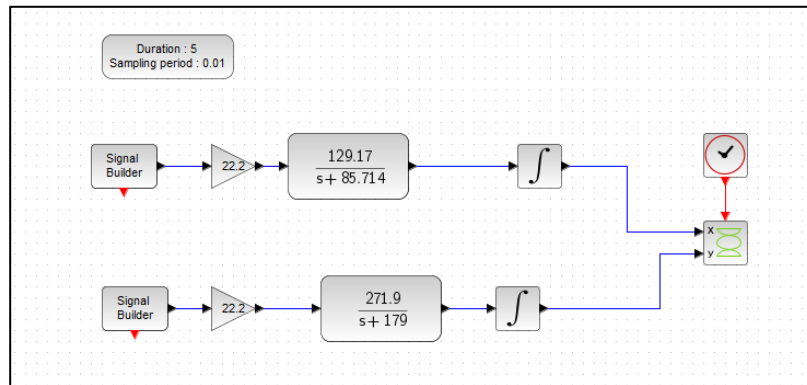


Gambar 4-14 Respons kecepatan eksperimen dan simulasi sumbu Y

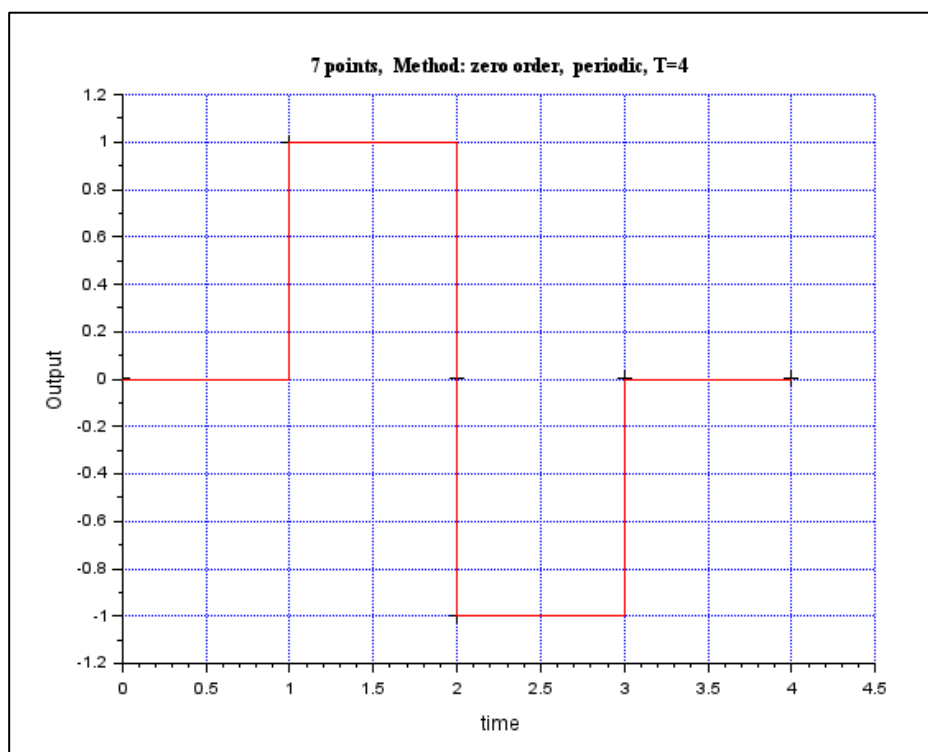
Berdasarkan respons kecepatan yang tersaji pada Gambar 4-13 dan Gambar 4-14 dapat dinyatakan bahwa fungsi transfer dapat mewakili sistem kendali posisi linier.

4.1.6 Simulasi Segitiga

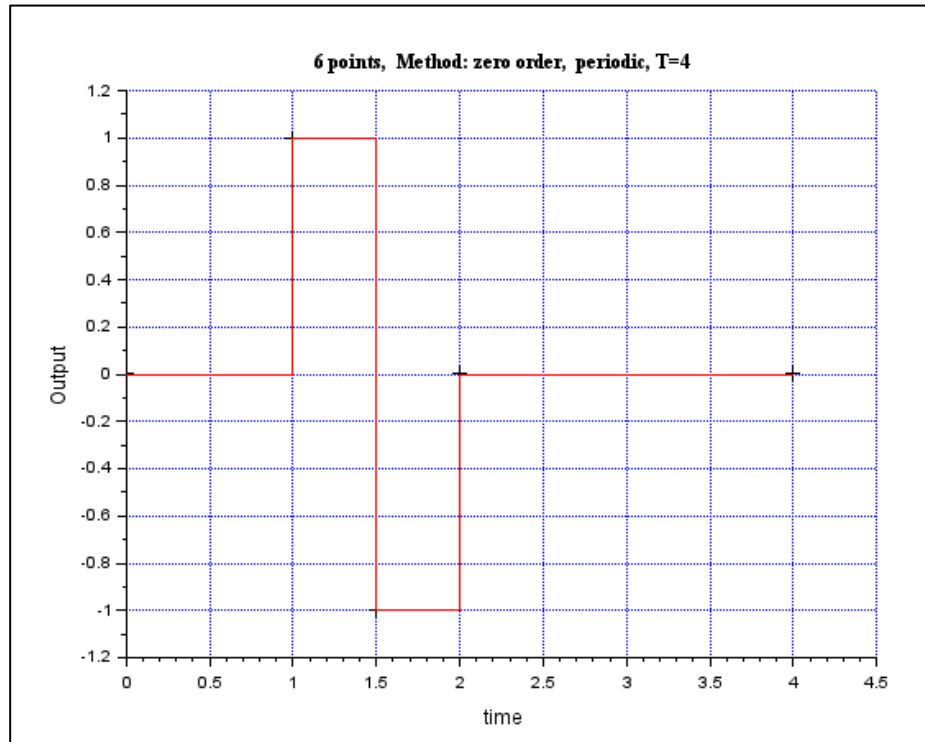
Gambar 4-15 menunjukkan rangkaian blok diagram simulasi *open-loop* bidang datar segitiga. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *input signal builder*, *signal builder* pada sumbu X berbeda dengan *signal builder* pada sumbu Y. Gambar 4-16 menunjukkan *signal builder* pada sumbu X dan Gambar 4-17 menunjukkan *signal builder* pada sumbu Y. Blok Gain 1 pada Gambar 4-15 merepresentasikan tegangan pada sistem kendali. Sinyal tegangan akan diterima oleh blok fungsi transfer *output* dari blok fungsi transfer berupa kecepatan. Blok integral digunakan untuk mendapatkan *output* posisi. Blok CSCOPXY 2D digunakan untuk memvisualisasikan pergerakan *actuator* pada sumbu X dan sumbu Y.



Gambar 4-15 Blok diagram simulasi segitiga

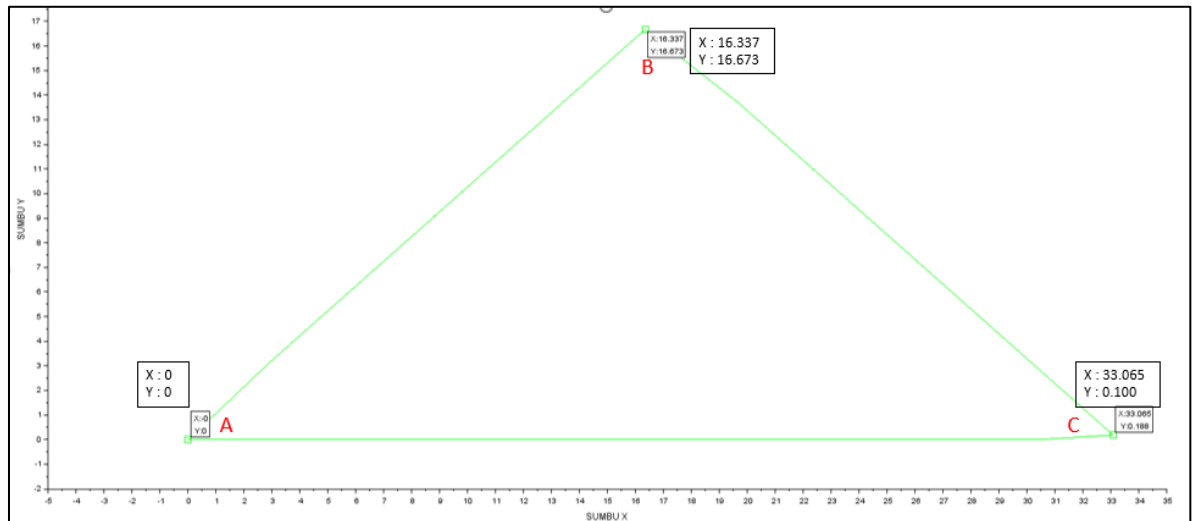


Gambar 4-16 Signal builder sumbu X



Gambar 4-17 *Signal builder* sumbu Y

Visualisasi gerak objek kendali simulasi *open-loop* segitiga dapat dilihat pada gambar 4-18. Pengukuran dilakukan pada area A, B, dan C pada bidang datar segitiga seperti yang ditunjukkan Gambar 4-18. Pada area tersebut diukur gerak objek kendali masing-masing sumbu. Area A merupakan titik awal dan titik akhir pada gerak objek kendali. Pada area A pengukuran dilakukan dua kali ketika berada pada titik awal dan titik akhir, dengan asumsi titik awal memiliki nilai yang selalu sama yaitu 0. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4-5.



Gambar 4-18 Visualisasi simulasi segitiga

Tabel 4-5 Hasil pengukuran simulasi segitiga

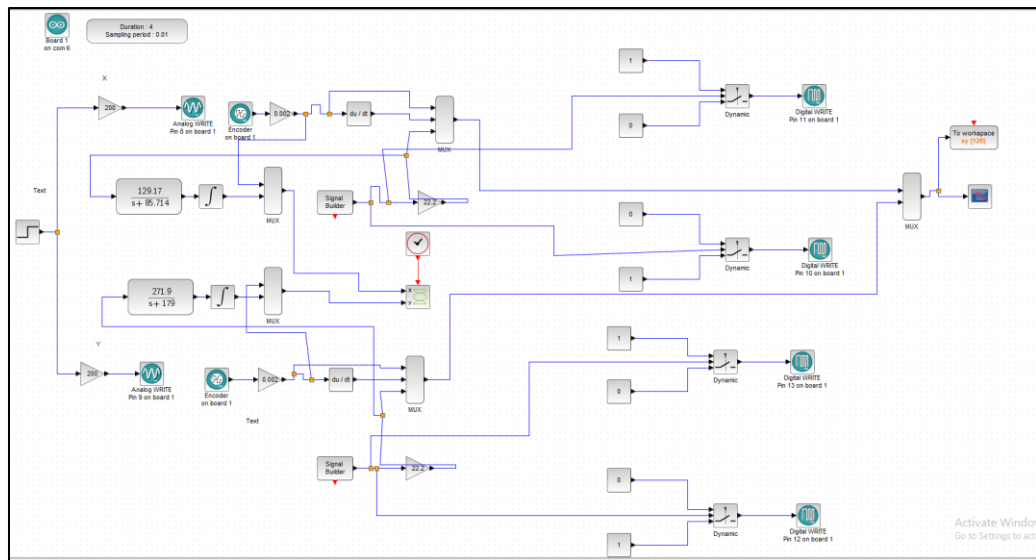
Area segitiga	Sumbu (mm)	
	X	Y
A (titik awal)	0	0
B	16.337	16.673
C	33.065	0.100
A (titik akhir)	0	0

Gerak objek kendali simulasi pada area A titik awal dan area A titik akhir memiliki nilai yang sama yaitu 0. Hal ini menyatakan bahwa gerak objek kendali simulasi dapat kembali ketitik awal secara sempurna. Pada area B sumbu X terukur pada posisi 16.337 mm dan sumbu Y pada posisi 16.673 mm. Area C sumbu X terukur pada posisi 33.065 mm dan sumbu Y pada posisi 0.100 mm.

4.1.7 Eksperimen *Open-loop* Segitiga

Eksperimen dilakukan dengan memberikan input berbentuk *stepwise* untuk mengatur kecepatan, serta input dari *signal builder* untuk mengontrol arah putaran objek kendali. Parameter pada *signal builder* disesuaikan dengan

parameter yang digunakan dalam simulasi *open-loop*. Aktuator bergerak secara berkelanjutan dari titik awal ke titik akhir. Data lintasan gerak aktuator direkam dan divisualisasikan menggunakan blok diagram CSCOPXY 2D, dengan target lintasan membentuk bidang datar berbentuk segitiga. Hasil pergerakan objek kendali dari simulasi kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk memperoleh nilai *error*. Susunan blok diagram pergerakan objek kendali pada simulasi dan eksperimen ditampilkan pada Gambar 4-19.

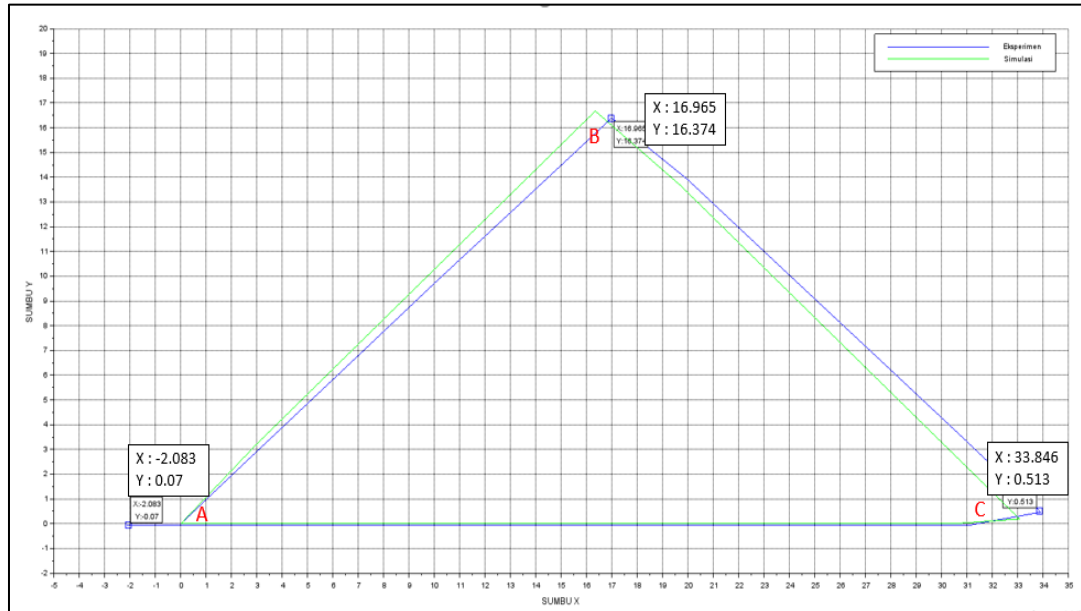


Gambar 4-19 Rangkaian blok diagram simulasi dan eksperimen *open-loop* segitiga

Perbandingan visual antara gerak objek kendali hasil simulasi *open-loop* dan hasil eksperimen ditampilkan pada Gambar 4-20. Pada eksperimen, panjang setiap sisi segitiga yang dibentuk oleh gerakan objek kendali dipengaruhi oleh sinyal keluaran dari blok diagram *signal builder*. Oleh karena itu, penulis hanya dapat mengatur waktu gerakan *actuator* untuk membentuk segitiga tanpa dapat memastikan panjang sisi sesuai dengan yang diinginkan.

Gerakan objek kendali pada simulasi merepresentasikan gerakan ideal yang menjadi target. Analisis perbedaan ukuran dilakukan di area A, B, dan C sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4-20. Pada area A, posisi titik awal gerakan objek kendali baik pada simulasi maupun eksperimen dianggap sama, yaitu 0. Pada hasil eksperimen *open-loop*, titik akhir di area A tercatat pada koordinat -2.083 mm di sumbu X dan 0.07 mm di sumbu Y. Di area B, posisi

akhir pada sumbu X sebesar 16.965 mm dan pada sumbu Y sebesar 16.374 mm. Sedangkan di area C, posisi akhir tercatat di 33.846 mm untuk sumbu X dan 0.513 mm untuk sumbu Y. Nilai *error* pada masing-masing area, baik untuk sumbu X maupun sumbu Y, disajikan pada Tabel 4-6 dan Tabel 4-7.



Gambar 4-20 Visualisasi simulasi dan eksperimen *open-loop* segitiga

Tabel 4-6 Perbandingan simulasi dan eksperimen *open-loop* sumbu X

Area Segitiga	Sumbu X (mm)		<i>Error</i>
	Simulasi	Eksperimen	
A (Titik awal)	0	0	0
B	16.337	16.965	0.628
C	33.65	33.846	0.196
A (Titik akhir)	0	-2.083	-2.083

Tabel 4-7 Perbandingan simulasi dan eksperimen *open-loop* sumbu Y

Area Segitiga	Sumbu Y (mm)		<i>Error</i> (mm)
	Simulasi	Eksperimen	
A (Titik awal)	0	0	0
B	16.673	16.374	-0.299
C	0.100	0.513	0.413
A (Titik akhir)	0	0.07	0.07

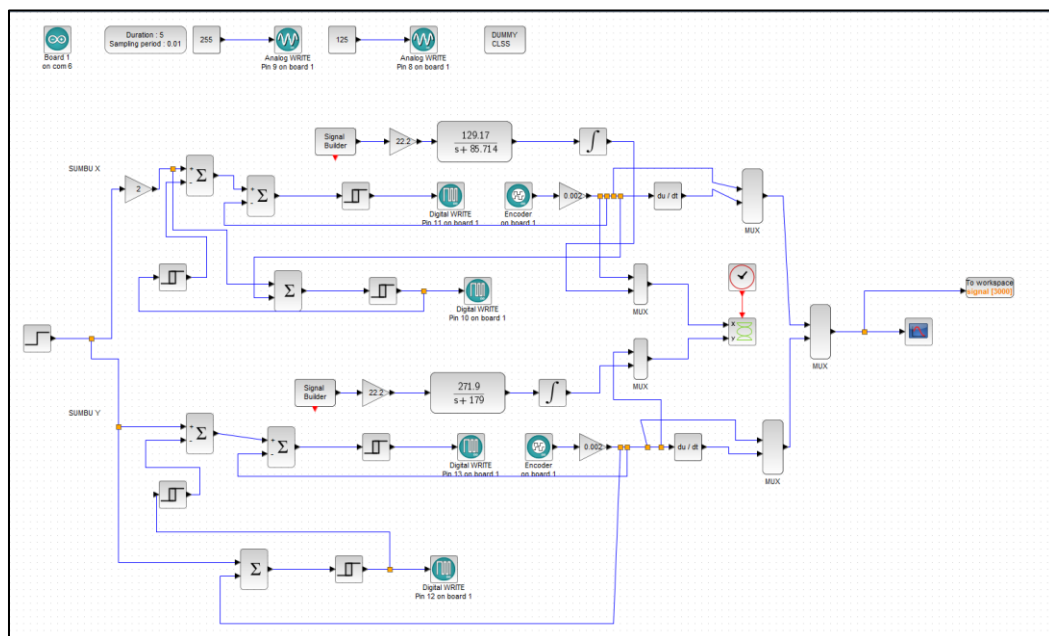
Nilai *error* sumbu X terbesar berada pada area A yaitu sebesar -2.083 mm dan sumbu Y berada pada titik akhir area A yaitu sebesar 0.413 mm. Nilai *error* terkecil sumbu X berada pada titik akhir area C yaitu sebesar 0.196 mm dan pada sumbu Y berada pada area A yaitu sebesar 0.07 mm. Secara visual lintasan pada area A menuju area B dan lintasan area B menuju area C terdapat selisih yang cukup besar.

4.1.8 Eksperimen *Close-Loop* Segitiga

Gambar 4-21 menunjukkan rangkaian blok diagram *close-loop* bidang datar segitiga melalui simulasi dan secara eksperimen. Aktuator sumbu X dan sumbu Y digerakan secara bersamaan agar dapat membentuk bidang datar segitiga. Pada sumbu X pergerakan aktuator terbagi menjadi dua fase, pertama aktuator bergerak menuju posisi yang ditentukan kemudian fase kedua aktuator kembali ke posisi awal. Aktuator pada sumbu X bergerak dari posisi 0 mm menuju posisi 32 mm dengan putaran CW, kemudian bergerak kembali ke posisi 0 dengan putaran CCW. Pergerakan pada aktuator sumbu Y terbagi menjadi dua fase. Pertama aktuator bergerak dari posisi 0 ke posisi 16 mm dengan putaran CW, kemudian bergerak kembali ke posisi 0 dengan putaran CCW. Pada blok *stepwise* berisi nilai posisi sebesar 16 mm. Blok *Hysteresis* akan mengirim sinyal 1 atau 0 menuju blok *Digital WRITE* untuk mengatur arah putaran motor DC. Sinyal yang keluar dari blok *Hysteresis* dipengaruhi oleh sinyal *output* dari blok *SUM*. Blok *SUM* berfungsi untuk menjumlahkan atau mengurangi 2 *input* yang masuk dengan mengeluarkan satu *output* hasil perhitungan 2 *input* tersebut.

Ketika linier enkoder berada pada posisi 0 mm blok *Hysteresis* 1 pada sumbu X mengirimkan sinyal 1 ke blok *Digital WRITE* 11 yang akan menggerakkan aktuator sumbu X untuk fase pertama. Selanjutnya, ketika linier encoder berada pada posisi 32 mm fase kedua dijalankan. Blok *Hysteresis* 2 mengirimkan sinyal 1 ke blok *Digital WRITE* 10. Blok *Hysteresis* 3 berfungsi untuk memutus sinyal *input* sehingga tidak terjadi perulangan pada pergerakan.

Pada sumbu Y ketika linier enkoder berada pada posisi 0 mm blok *Hysteresis* 1 akan mengirim sinyal ke blok *Digital WRITE* 13 untuk gerakan aktuator fase pertama. Blok *Hysteresis* 2 akan menggerakkan aktuator pada fase kedua dengan mengirim sinyal 1 ke blok *Digital WRITE* 12 ketika enkoder berada pada posisi 16 mm. Perbedaan nilai *input* ketika *Histerisis* 3 aktif akan memutus sinyal *input* sehingga tidak terjadi perulangan. Pergerakan fase sumbu Y selesai ketika sumbu X selesai pada fase pertama.

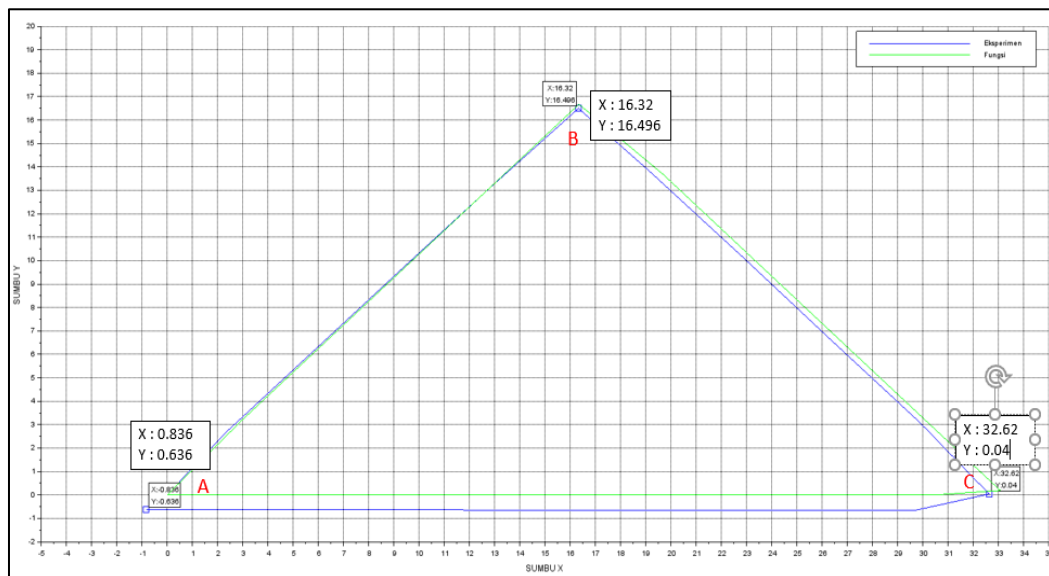


Gambar 4-21 Rangkaian blok diagram simulasi dan eksperimen *close-loop* Segitiga

Berbeda dengan gerak objek kendali *open-loop* gerak objek kendali *close-loop* memiliki umpan balik sehingga antara *input* dan *output* memiliki variabel yang sama. *Input* yang diberikan adalah perubahan posisi dari aktuator. *Input* yang diberikan sesuai atau mendekati nilai yang didapat dari gerak objek kendali

simulasi. Visualisasi pergerakan bentuk segitiga hasil simulasi dan eksperimen *close-loop* dapat dilihat pada Gambar 4-22. Garis hijau menunjukkan visualisasi dari simulasi dan garis biru menunjukkan visualisasi dari eksperimen *close-loop*.

Nilai *error* pada setiap area dapat dilihat pada Tabel 4-8 untuk sumbu X dan 4-9 untuk sumbu Y. Pergerakan eksperimen *close-loop* area A titik akhir pada sumbu X terukur 0.836 mm dan sumbu Y 0.636 mm. Area B untuk sumbu X terukur pada posisi 16.32 mm dan sumbu Y 16.496mm. Area C untuk sumbu X terukur pada posisi 32.62 mm dan sumbu Y 0.04 mm. Nilai *error* sumbu X terbesar berada pada titik akhir area C yaitu sebesar -1 mm dan sumbu Y berada pada area A yaitu sebesar 0.636 mm. Nilai *error* terkecil sumbu X berada pada area B yaitu sebesar -0.017 mm dan pada sumbu Y berada pada area C yaitu sebesar -0.06 mm.



Gambar 4-22 Visualisasi simulasi dan eksperimen *close-loop* Segitiga

Tabel 4-8 Perbandingan simulasi dan eksperimen *close-loop* sumbu X

Area Segitiga	Sumbu X (mm)		<i>Error</i>
	Simulasi	Eksperimen	
A (Titik awal)	0	0	0
B	16.337	16.32	-0.017
C	33.65	32.62	-1
A (Titik akhir)	0	0.836	0.836

Tabel 4-9 Perbandingan simulasi dan eksperimen *close-loop* sumbu Y

Area Segitiga	Sumbu Y (mm)		<i>Error</i> (mm)
	Simulasi	Eksperimen	
A (Titik awal)	0	0	0
B	16.673	16.496	-0.177
C	0.100	0.04	-0.06
A (Titik akhir)	0	0.636	0.636

Hasil data *error* dan pengamatan visual menunjukkan bahwa performa eksperimen *close-loop* lebih mendekati hasil simulasi dibandingkan dengan eksperimen *open-loop*. Hal ini disebabkan adanya sistem umpan balik pada konfigurasi *close-loop* yang memungkinkan pendeteksian perubahan posisi, sehingga pergerakan sistem dapat disesuaikan berdasarkan informasi tersebut. Pada penelitian ini, umpan balik hanya berfungsi untuk menentukan target posisi tanpa melakukan koreksi terhadap *error* yang muncul. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menambahkan kontroler yang mampu mengoreksi *error* selama proses berjalan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Identifikasi telah dilakukan dengan mencari resolusi *linear encoder* dan kalibrasi tegangan yang keluar dari *driver* L298N terhadap nilai PWM.
2. Model matematika berupa fungsi transfer untuk sistem kendali linier berhasil didapatkan dengan fungsi transfer $\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{129.17}{s(s+85.714)}$ untuk sumbu X dan $\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{271.9}{s(s+179)}$ untuk sumbu Y.

5.2 Saran atau Penelitian Selanjutnya

Penelitian selanjutnya dapat mengimplementasikan kompensator, seperti menggunakan PID (*proportional integral derivative*), *fuzzy*, *state space*, dan sebagainya.

Penelitian berikutnya dapat mempertimbangkan penggunaan perangkat lunak Matlab apabila memungkinkan, mengingat Matlab lebih umum dipakai di lingkungan industri secara luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Franklin, G. F., Powell, J. D., & Emami-Naeini, A. (2019). *Feedback Control of Dynamic Systems (8th ed.)*. Pearson.
- Jia, X., Chen, F., & Yamada, H. (2017). "Trajectory Tracking Control of an Electromagnetic Actuator System Using NCTF." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 97-108.
- Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering (Seventh edition)*. Wiley.
- Nise, N. S. (2011). *Control Systems Engineering (6th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering (5th ed.)*. Prentice Hall.
- Purtojo, P. (2017). *Sistem Kendali NCTF untuk Operasi Kendali Posisi Titik-ke-Titik*. Universitas Islam Indonesia.
- Saichon, J., Yamada, H., Chen, F., & Noritsugu, T. (2018). "Improvement of Trajectory Control for Two-Axis Pneumatic System Using NCTF-Based Control." *IEEE Access*, 6, 33915-33923.
- Wahyudi, SATO, K., & SHIMOKOHBE, A. (2003). *Characteristics of practical control for point-to-point (PTP) positioning systems. Effect of design parameters and actuator saturation on positioning performance. Precision Engineering*, 27, 157–169.
- Wakitani, S., Shimokohbe, A., & Yamada, K. (2008). "Robust Position Control by NCTF Control for a Two-Axis Mechatronic Stage." *Precision Engineering*, 32(4), 243–251.
- Wakitani, S., Shimokohbe, A., & Yamada, K. (2010). "Robust Trajectory Control of Mechatronic Systems Using NCTF Approach." *Journal of*

Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 4(3), 560–570.

Yamada, H., Noritsugu, T., & Kagawa, T. (2015). "Robustness Enhancement of NCTF Control for Two-Axis Pneumatic Systems." *Journal of Control Science and Engineering*, 2015.

Zhang, Z., Lu, Y., & Ding, H. (2013). "Dynamic Modeling and Control of a Ballscrew-Driven Precision Positioning Stage." *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(6), 1871–1879.