

**PENDEKATAN PEMODELAN KINEMATIKA BALIK ROBOT
MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE *SPARSE*
*IDENTIFICATION OF NONLINEAR DYNAMICS (SINDy)***

(Skripsi)

Oleh

NUR ZIDAN HAQ

NPM 1915031014



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

ABSTRAK

PENDEKATAN PEMODELAN KINEMATIKA BALIK ROBOT MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE *SPARSE IDENTIFICATION OF NONLINEAR DYNAMICS (SINDy)*

OLEH

Nur Zidan Haq

Robot Manipulator merupakan salah satu jenis robot yang paling banyak digunakan pada industri. Robot manipulator diperlukan pada suatu alat untuk menggerakkan posisi barang yang tepat sesuai akurasi dan presisi. Untuk mengecek keakuratannya diperlukan pemodelan kinematika agar dapat mengetahui kesalahan yang ada saat robot lengan sedang beroperasi. Pemodelan kinematika cukup sulit dilakukan hal ini karena dilakukan pengetahuan terkait prinsip dan hukum fisika untuk memodelkan kinematika robot. Selain itu semakin banyak banyak DOF maka semakin kompleks pemodelannya sehingga dibutuhkan teknik pemodelan dalam kinematika robot. Penelitian yang dilakukan difokuskan pada pemodelan kinematika balik dengan metode *sparse identification of nonlinear dynamics* dengan menggunakan robot manipulator *lynxmotion*. Hasil yang diperoleh berasal dari pengukuran manual menggunakan penggaris centimeter dan busur serta dilakukan beberapa pengujian parameter, banyak data, dan *library SINDy* yang menghasilkan pemodelan lengan robot 2 DOF dengan nilai MSE θ_1 yaitu 5,384 dan RMSE θ_1 yaitu 2,3204 serta MSE θ_2 yaitu 7,221 dan RMSE θ_2 yaitu 2,687. Penelitian ini menambahkan 20 data uji baru didapatkan akurasi rata-rata θ_1 yaitu 95,854 % dan akurasi rata-rata θ_2 yaitu 85,669 %.

Kata Kunci : Akurasi, Kinematika Balik, *Lynxmotion*, Robot manipulator, *Sparse Identification Nonlinear*.

ABSTRACT

REVERSE KINEMATICS MODELING APPROACH OF ROBOT MANIPULATOR USING SPARSE IDENTIFICATION OF NONLINEAR DYNAMICS (SINDy) METHOD

BY

Nur Zidan Haq

The Robot Manipulator is one of the most widely used types of robots in the industry. A robot manipulator is essential in a device to move items to precise positions with accuracy and precision. To verify its accuracy, kinematic modeling is required to identify errors during the operation of the robotic arm. Kinematic modeling is challenging due to the application of knowledge related to the principles and laws of physics in robot kinematics modeling. Additionally, the more Degrees of Freedom (DOF), the more complex the modeling becomes, necessitating modeling techniques in robot kinematics. This research focuses on inverse kinematics modeling using the sparse identification of nonlinear dynamics method with the Lynxmotion robot manipulator. The results were obtained from manual measurements using a centimeter ruler and protractor, along with various parameter tests, extensive data, and the SINDy library. The modeling of the 2-DOF robot arm yielded MSE θ_1 values of 5.384 and RMSE θ_1 values of 2.3204, as well as MSE θ_2 values of 7.221 and RMSE θ_2 values of 2.687. With an additional 20 new test data, the research achieved an average accuracy of 95.854% for θ_1 and 85.669% for θ_2 .

Keywords: Accuracy, Invers Kinematics, Lynxmotion, Robot Manipulator, Sparse Nonlinear Identification.

**PENDEKATAN PEMODELAN KINEMATIKA BALIK ROBOT
MANIPULATOR MENGGUNAKAN METODE *SPARSE
IDENTIFICATION OF NONLINEAR DYNAMICS (SINDy)***

Oleh

NUR ZIDAN HAQ

Skripsi

**Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

Judul Tugas Akhir : PENDEKATAN PEMODELAN
KINEMATIKA BALIK ROBOT
MANIPULATOR MENGGUNAKAN
METODE *SPARSE IDENTIFICATION OF
NONLINEAR DYNAMICS (SINDy)*

Nama Mahasiswa : **Nur Zidan Haq**

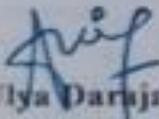
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031014

Jurusan : Teknik Elektro

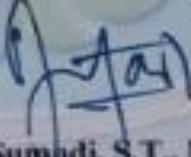
Fakultas : Teknik



1. Komisi Pembimbing


Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.

NIP. 199106102019032024

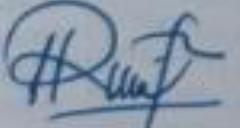

Sunardi, S.T., M.T.

NIP. 197311042000031001

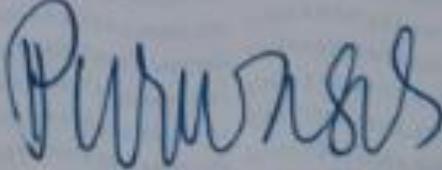
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197006091999031002

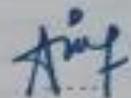


Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP. 197108131999031003

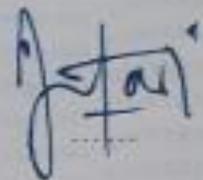
MENGESAIHKAN

1. Tim Penguji

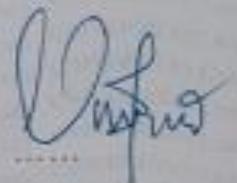
Ketua : Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.



Sekretaris : Sumadi, S.T., M.T.



Penguji
Bukan Pembimbing : Umi Murdika, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Ing. Iri Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIR:197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **22 November 2023**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 05 Desember 2023



Nur Zidan Haq

NPM. 1915031014

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, pada tanggal 22 Januari 2001 sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, anak dari bapak Husin Yamin dan ibu Maskupah. Riwayat Pendidikan Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-kanak (TK) di TK Taruna Jaya pada tahun 2007. Sekolah Dasar (SD) di SDN 2 Perumnas Way Halim pada tahun 2013. Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 19 Bandar Lampung pada tahun 2016. Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMAN 13 Bandar Lampung pada tahun 2019.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2019 melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa Penulis aktif sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro periode kepengurusan 2020 diamanahkan sebagai anggota Divisi Pendidikan dan periode kepengurusan 2021 diamanahkan sebagai anggota Divisi Sosial. Selain itu, Penulis berkesempatan menjadi asisten Laboratorium Teknik Kendali dari tahun 2021 sebagai asisten praktikum Dasar Sistem Kendali dan Sistem Kendali Lanjut. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangkitan Tarahan, Bandar Lampung dalam bagian Pemeliharaan Instrumen dan Kontrol pada tahun 2022.



PERSEMBAHAN



Dengan Ridho Allah Subhanahu Wa Ta'ala
Teriring shalawat kepada Nabi Muhammad Shalallahu Alaihi Wassalam
Karya Tulis ini ku persembahkan untuk:

Ayah dan Ibuku Tercinta
Husin Yamin dan Maskupah

Serta Kakak dan Adikku Tersayang
Muhammad Rasyid Redho
Tria Ayu Pebriana

Terimakasih untuk semua dukungan dan doa selama ini
Sehingga aku dapat menyelesaikan hasil karyaku ini





“Lelah itu pasti, namun Menyerah bukan Solusi”

(Penulis)

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri.”

(Q.S Ar-ra'd:11)

“Teruslah bermimpi, teruslah berani, dan teruslah menjadi versi terbaik dari dirimu sendiri”

(Penulis)

SANWACANA

Puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat, karunia, serta petunjuk-Nya sehingga penyusunan skripsi yang berjudul **“Pendekatan Pemodelan Kinematika Balik Robot Manipulator Menggunakan Metode *Sparse Identification Of Nonlinear Dynamics (SINDy)*”** dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan skripsi ini diselesaikan untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan pada Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung. Perjalanan panjang telah penulis lalui dalam rangka menyelesaikan skripsi ini. Banyak hambatan yang dihadapi dalam penyusunannya namun penulis mendapatkan arahan, bantuan, serta dukungan dari berbagai pihak sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Herlinawati, S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T. selaku Pembimbing Akademik, yang telah banyak membimbing dan membantu penulis selama menjalani kuliah.
6. Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediaannya meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, ilmu yang bermanfaat, dukungan moral, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini.

7. Sumadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediaannya untuk memberikan bimbingan, saran dan kritik yang sangat membangun dalam proses penyelesaian skripsi ini.
8. Umi Murdika, S.T., M.T. selaku Penguji Utama skripsi, terimakasih atas saran dan kritik yang membangun sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung atas pengajaran dan bimbingannya yang diberikan selama perkuliahan di kampus Universitas Lampung.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Serta yang paling utama dari segalanya yaitu kepada kedua orang tua yakni Husin Yamin dan Maskupah dan keluarga tercinta yang selalu memberikan doa dan semangat dalam penyusunan skripsi ini.
12. Saudara seperjuangan skripsi robot manipulator yaitu Steven Haryanto yang selalu menemani penulis dari awal pengerjaan skripsi hingga akhir skripsi yang dapat dituntaskan, dengan *tagline* penyemangat kita “GAS AJA POKOKNYA”.
13. Kawan kuliah terbaik “Salam Dari Binjai” yang menemani dari awal perkuliahan (Steven, Dika, Raffi, dan Faruk) dalam hal pengerjaan tugas maupun berbagi pengetahuan bersama.
14. Serta kawan-kawan ku yang selalu memberikan *support* kepada penulis yakni Adi, Adimas, Sefdoy.
15. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Teknik Kendali; Ibu Umi Murdika dan Kak Dana atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Hafizd, Aqil Jado, Fakari, Fidy, Lutfi, Najmi, Ridho, Rachel, Raple, Dika, Yunita, dan Sofyan sebagai asisten laboratorium semoga segera menyusul dan dipermudah segala urusan tugas akhirnya.
16. Teman-teman Eternity’19 sebagai rekan seperjuangan dari mahasiswa baru sampai sekarang.
17. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis ucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dikarenakan keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki. Penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun. Akhir kata semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menambah ilmu pengetahuan bagi para pembaca.

Bandar Lampung, 05 Desember 2023
Penulis,

Nur Zidan Haq

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Robot <i>Arm</i> Robot Manipulator.....	7
2.2.2 Pemodelan Sistem Robotik	8
2.2.3 Kinematika Robot.....	9
2.2.4 Motor Servo	10
2.2.5 <i>Gripper</i>	11
2.2.6 LSS Board.....	12
2.2.7 <i>Link dan Joint</i>	12
2.2.8 Aplikasi <i>FlowBotics Studio:LSS Flowarm</i>	14
2.2.9 Metode Geometry.....	14
2.2.10 Metode SINDy	17

III. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Alur Penelitian	20
3.1.1 Identifikasi Masalah	21
3.1.2 Studi Literatur	21
3.1.3 Perancangan Sistem	21
3.1.4 Pengumpulan Data.....	21
3.1.5 Pemodelan	22
3.1.6 Pengujian Model.....	22
3.1.7 Implementasi Alat	22
3.1.8 Analisis dan Evaluasi.....	22
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	23
3.3 Alat dan Bahan	23
3.4 Diagram Blok Sistem.....	24
3.5 Perancangan Identifikasi Model dengan Metode SINDy.....	25
3.6 Perancangan Pengujian <i>Error</i>	28
3.7 Pengujian Alat mencari θ	29
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1 Data Penelitian.....	30
4.2 Alur Model	34
4.3 Analisis Hasil Pengujian	41
4.4 Pembahasan	47
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran.....	59
LAMPIRAN A. Source Code <i>SINDy MATLAB</i>	64
LAMPIRAN B. Source Code <i>pySINDy Polynomial</i>	65
LAMPIRAN C. Source Code <i>pySINDy Fourier</i>	71
LAMPIRAN D. Kegiatan Pengambilan Data Robot	77
LAMPIRAN E. Turnitin <i>Checker</i>	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Robot Manipulator.....	7
Gambar 2.2 Perhitungan jarak jangkauan maksimum	8
Gambar 2.3 Perhitungan jarak jangkauan minimum	8
Gambar 2.4 Diagram Sistem Robotik	8
Gambar 2.5 Transformasi kinematika maju dan kinematika balik.....	9
Gambar 2.6 Konfigurasi robot <i>arm 2 DOF</i>	10
Gambar 2.7 Motor Servo <i>Lynxmotion</i>	11
Gambar 2.8 Pengukuran Sudut.....	11
Gambar 2.9 <i>Gripper</i>	12
Gambar 2.10 <i>Lynxmotion Smart Servo (LSS) Board</i>	12
Gambar 2.11 <i>Link dan Joint</i>	13
Gambar 2.12 Pengukuran panjang <i>link 1</i>	13
Gambar 2.13 Pengukuran panjang <i>link 2</i>	13
Gambar 2.14 Aplikasi <i>FlowBotics Studio:FlowArm LSS</i>	14
Gambar 2.15 Grafik <i>inverse kinematic 2 DOF</i>	15
Gambar 2.16 Grafik mencari θ_1 dengan trigonometri.....	16
Gambar 2.17 Struktur persamaan SINDy pada Python	19
Gambar 3.1 Alur Penelitian	20
Gambar 3.2 Diagram langkah penyelesaian metode SINDy.....	22
Gambar 3.3 Blok diagram sistem	24
Gambar 4.1 Posisi koordinat x, y.....	31
Gambar 4.2 Posisi sudut θ_1 dan θ_2	33
Gambar 4.3 Proses <i>import library PySINDy</i>	35
Gambar 4.4 Proses <i>import data robot</i>	36
Gambar 4.5 Proses persiapan data <i>training θ_1</i>	37

Gambar 4.6 Proses persiapan data <i>training</i> θ_2	38
Gambar 4.7 <i>Source code</i> pySINDy.....	39
Gambar 4.8 Proses mendapatkan data θ_1 dan θ_2 SINDy	39
Gambar 4.9 Proses pembuatan grafik θ_1 dan θ_2	40
Gambar 4.10 Perhitungan nilai akurasi dan <i>error</i>	41
Gambar 4.11 Persamaan model SINDy θ_1	42
Gambar 4.12 Grafik θ_1 model SINDy	42
Gambar 4.13 Akurasi rata-rata dan <i>error</i> rata-rata θ_1	43
Gambar 4.14 Persamaan model SINDy θ_2	43
Gambar 4.15 Grafik θ_2 model SINDy	44
Gambar 4.16 Akurasi rata-rata dan <i>error</i> rata-rata θ_2	44
Gambar 4.17 <i>Syntax</i> MATLAB dari data uji	54
Gambar 4.18 Hasil <i>run</i> data uji	54
Gambar 4.19 Grafik <i>error</i> data uji baru terhadap persamaan SINDy θ_1	56
Gambar 4.20 Grafik <i>error</i> data uji baru terhadap persamaan SINDy θ_2	56

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Penelitian terkait.....	5
Tabel 3.1 Alat dan bahan	23
Tabel 3.2 Tabel Pengujian Alat pada sudut robot.....	29
Tabel 3.3 Tabel Pengujian Alat untuk <i>error</i> dan akurasi sudut robot.	29
Tabel 4.1 Data posisi.....	31
Tabel 4.2 Data sudut	33
Tabel 4.3 Data pengukuran robot lengan 2-DOF	36
Tabel 4.4 Hasil pengujian penelitian	46
Tabel 4.5 Penentuan parameter <i>degree</i> terbaik	48
Tabel 4.6 Penentuan parameter <i>degree</i> terbaik	49
Tabel 4.7 Pengaruh jumlah data terhadap akurasi.....	51
Tabel 4.8 Akurasi <i>library polynomial</i>	52
Tabel 4.9 Akurasi <i>library fourier</i>	53
Tabel 4.10 Data uji baru.....	53
Tabel 4.11 Hasil pengujian data uji baru	55
Tabel 4.12 Pengaruh jumlah data terhadap akurasi data uji baru	57

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama pada bidang elektronik sudah berkembang dengan pesat di era modern saat ini [1]. Perkembangan tersebut berdampak pada beberapa pekerjaan manusia yang sudah semakin tergantikan oleh teknologi kendali otomatis terutama dalam bidang industri [2]. Salah satunya dalam perkembangan teknologi robot sangat diperlukan dalam berbagai bidang kehidupan dengan tujuan mempermudah kegiatan sehari-hari [3]. Beberapa kegiatan yang dapat dilakukan oleh robot lengan salah satunya yaitu proses menggerakkan benda untuk berpindah posisi [3]. Menggerakkan benda tersebut dapat dilakukan oleh manusia, akan tetapi manusia memiliki kekurangan dari segi tenaga maupun konsentrasi dalam bekerja sehingga berpengaruh pada efektifitas pekerjaan tersebut [4]. Pekerjaan yang membosankan atau yang dilakukan secara berulang-ulang membuat manusia jenuh pada pekerjaan itu, maka untuk mengatasi kebosanan tersebut hadirilah robot untuk membantu manusia mengerjakan pekerjaan yang *monoton* sehingga manusia terbantuan.

Sebuah robot manipulator diperlukan dalam membantu manusia dengan melakukan beberapa tugas seperti untuk memilih dan menempatkan suatu objek [5]. Gerak robot tersebut memerlukan suatu metode perhitungan untuk menggerakkan dan mengkoordinasikan beberapa motor servo pada lengan robot supaya bergerak pada lokasi yang ditentukan [5]. Tujuan utama adalah agar ujung dari lengan robot (*end-point*) dapat mencapai posisi target yang ditentukan [5].

Pemodelan dan analisis sistem respon motor servo sebagai penggerak dalam robot manipulator yang berguna menghasilkan gerak presisi dan akurat terhadap pergerakan robot [6]. Robot Manipulator salah satu jenis robot yang paling banyak digunakan pada industri, robot ini biasa dikenal dengan robot lengan dimana robot ini terdiri dari *link* (rangka) dan *joint* (sendi) [2]. Robot manipulator yang meniru karakteristik lengan manusia disebut juga lengan diartikulasikan. Semua *joint* yang

digunakan robot manipulator adalah *rotary*, dapat dikatakan gerakan lengan robot berbeda dari gerakan lengan manusia karena gerakan robot bergerak bebas dibanding lengan manusia [2].

Pemodelan kinematika bertujuan untuk menggerakkan robot berdasarkan pergerakan pada robot itu sendiri terhadap koordinat cartesius dan koordinat lokal [7]. Terdapat dua jenis pemodelan kinematika, yaitu pemodelan kinematika maju dan kinematika balik. Kinematika maju digunakan dalam mencari koordinat kartesian/posisi (x,y,z) dengan menggunakan koordinat *joint* yang sudah diketahui, sedangkan kinematika balik digunakan dalam mencari nilai sudut setiap *joint* dengan diketahui nilai koordinat posisi [7].

Pemodelan kinematika akan semakin kompleks ketika derajat kebebasan / *degree of freedom* (DOF) bertambah. Pendekatan yang dapat dilakukan pada pemodelan kinematika yaitu pendekatan pemodelan *blackbox*. Pendekatan *blackbox* merupakan teknik pemodelan yang hanya menggunakan masukan dan keluaran data pengukuran yang kemudian diproses dengan menggunakan algoritma komputer untuk menghasilkan persamaan matematis sebagai model kinematika robot [7].

Metode *Sparse Identification Of Nonlinear Dynamics* (SINDy) digunakan sebelumnya untuk mencari persamaan matematika dari dinamika sistem non-linear oleh Brunton et al [8]. Metode SINDy dapat digunakan untuk mencari persamaan matematis kinematika lengan robot menggunakan mekanisme yang serupa yang dilakukan pada dinamika sistem yaitu menggunakan data masukan dan keluaran yang kemudian diolah SINDy [7].

Oleh karena itu, dari beberapa penelitian tersebut maka ide dari penelitian ini adalah untuk membuat pemodelan matematis dari suatu *plant* robot manipulator *Lynxmotion* dengan gerakan robot yang 2 arah saja. Pemodelan yang akan digunakan yaitu pemodelan matematis dengan metode SINDy yang bertujuan mengetahui apakah pergerakan lengan robot sesuai dengan yang diinginkan atau ada terdapat terjadinya *error* yang dicari dengan menggunakan *mean squared error* (MSE) dan *root mean squared error* (RMSE) serta mencari akurasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah industri saat ini dalam memindahkan dan menyimpan barang dari satu tempat ke tempat yang lain membutuhkan perangkat yang bekerja dengan akurasi dan presisi. Sementara, masih terdapat industri yang menggunakan tenaga manusia saat proses pengangkutan barang dari satu tempat ke tempat lain. Diperlukan suatu alat untuk menggerakkan barang yang tepat seperti robot manipulator yang akurasi dan presisi. Untuk mengecek keakuratannya diperlukan pemodelan kinematika agar dapat mengetahui kesalahan yang ada saat robot manipulator sedang beroperasi. Pemodelan kinematika cukup sulit dilakukan hal ini karena dilakukan pengetahuan terkait prinsip dan hukum fisika untuk memodelkan kinematika robot. Selain itu, semakin banyak banyak DOF maka semakin kompleks pemodelannya sehingga dibutuhkan teknik pemodelan dalam kinematika robot.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menyelesaikan permasalahan yang sudah diuraikan yaitu merancang pendekatan pemodelan matematis dari kinematika robot 2-DOF dengan metode SINDy, dan menganalisis sudut kinematika robot 2-DOF setiap joint pada saat perpindahan posisi lengan robot agar sesuai pergerakannya.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Derajat kebebasan pada penelitian ini menggunakan 2 DOF.
2. Hanya membahas kinematika robot, tidak membahas dinamika robot.
3. Pengujian yang dilakukan tidak membahas robot manipulator ketika mengangkat beban.
4. *Gripper* tidak digunakan pada penelitian ini.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah mendapatkan pemodelan matematis untuk pergerakan kinematika robot dalam gerak berpindah dari titik koordinat awal ke titik koordinat akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada proposal ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat, hipotesis, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan tentang landasan teori dari penelitian ini yang didapat dari sumber buku, jurnal, serta penelitian terdahulu.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat, alat dan bahan, metode penelitian dan pelaksanaan serta pengamatan dalam pengerjaan tugas akhir.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menganalisis dan menjelaskan hasil penelitian dari pemodelan kinematika robot berbasis *Lynxmotion* menggunakan metode *SINDy*.

BAB 5. PENUTUP

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan dan saran yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Adapun pada Tabel 2.1 merupakan beberapa referensi penelitian terdahulu yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.1 Penelitian terkait

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
1	Pemodelan Robot Kinematik Manipulator Menggunakan Matlab [1]	Bambang Hari Purwoto, Devita Rindhani Rhokhim dan Dwi Indraswari, 2020	<ul style="list-style-type: none">- Mengevaluasi kinematika terbalik lebih kompleks daripada kinematika maju ketika tidak ada solusi analitis tunggal.- Metode pendekatan aljabar lebih <i>efisien</i>- Menggunakan GUIDE MATLAB Environment untuk mempermudah pemantauan dan pengendalian lengan robot.
2	Pemodelan Dan Simulasi Fuzzy Logic Control Pada Model Arm Robot Manipulator [6]	M. Amirullah Akbar, dan Munadi, 2014	<ul style="list-style-type: none">- Desain sistem motor DC servo menggunakan kedua kontrol PID dan FLC.- Kontrol FLC yang diusulkan dapat secara efektif menghilangkan osilasi berbahaya dan memberikan kelancaran dalam periode transient.- Kontrol PID tidak dapat digunakan dalam gerakan presisi control model lengan robot manipulator karena berosilasi.

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
3	Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP [4]	Uchrowi Az, Lasmadi dan Sutjiyanto, 2019	<ul style="list-style-type: none"> - Robot Lengan 3 derajat kebebasan dengan metode <i>forward kinematics</i> dapat disimulasikan pada V-REP dengan cukup efektif. - Simulasi robot lengan 3 derajat kebebasan pada <i>software</i> V-REP <i>repeatability</i> yang baik.
4	Penerapan Metode Denavit-Hartenberg Pada Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot [5]	Agus Budi Dharmawan, dan Lina, 2017	<ul style="list-style-type: none"> - Metode Denavit-Hartenberg Inverse Kinematics dalam pencarian posisi dari <i>end-effector</i> dari robot manipulator lebih mudah dan cepat serta efisien dengan menggunakan aplikasi. - Perhitungan metode ini yang berisi matrik rotasi dan translasi menghasilkan perhitungan dengan baik pada perhitungan aljabar dan geometri nya. - Tidak terdapat penjelasan rumus yang runtun
5	Pemodelan dan Simulasi Dinamika Lengan Robot 3-DOF Menggunakan Perangkat Lunak Open Source [9]	Indar Sugiarto, 2008	<ul style="list-style-type: none"> - Metode alternatif untuk analisis dinamik sebuah robot lengan menggunakan <i>software Open Source</i> yang disebut ODE (<i>open dynamic engine</i>) - Tidak menghasilkan program visualisasi - Menggunakan ODE, sebuah robot lengan dapat dimodelkan dan disimulasikan dengan sederhana dan menghasilkan hasil yang akurat.
6	Inverse Kinematic of 1-DOF Robot Manipulator Using Sparse Identification of Nonlinear System [7]	Anisa Ulya Darajat dkk, 2023	<ul style="list-style-type: none"> - Identifikasi persamaan kinematik pada robot manipulator 1-DOF - Metode SINDy dapat digunakan untuk pemodelan kinematik yang semula hanya digunakan untuk

No.	Judul	Nama Penulis	Kelebihan/Kekurangan
			identifikasi sistem dinamik saja. - Pengujian menggunakan library trigonometri fungsi yang memiliki hasil sempurna yaitu 100%

2.2 Landasan Teori

Pengetahuan dan informasi yang berhubungan dengan penelitian ini dikumpulkan sebagai dasar teori untuk melakukan penelitian. Teori yang dipakai sebagai acuan pada penelitian ini sebagai berikut.

2.2.1 Robot Arm Robot Manipulator

Robot manipulator merupakan robot yang memiliki bentuk seperti tangan untuk memudahkan pekerjaan di dunia industri menggunakan motor penggerak. Robot ini memiliki 2 bagian saja yaitu bagian lengan dan bagian tubuh. Dua bagian ini berfungsi untuk memosisikan alat atau bagian dalam jangkauan kerjanya [10]. Robot manipulator juga merupakan sebuah rangkaian benda kaku (*rigid bodies*) terbuka yang terdiri dari sendi (*joint*) dan terhubung dengan *link* dimana setiap posisi *joint* ditentukan dengan variabel tunggal sehingga jumlah *joint* sama dengan nilai derajat kebebasan [11]. Robot Manipulator (robot lengan) adalah bagian mekanik yang berfungsi untuk memindah, mengangkat dan memanipulasi benda kerja [12].



Gambar 2.1 Robot Manipulator



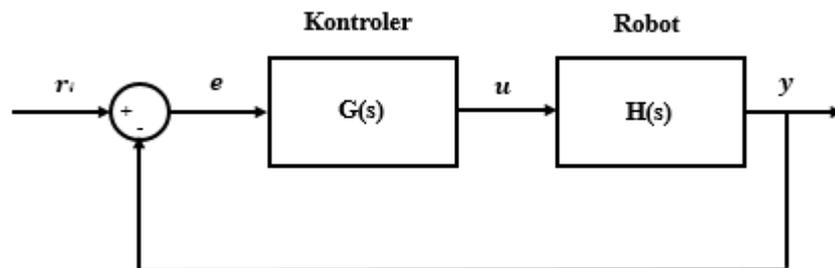
Gambar 2.2 Perhitungan jarak jangkauan maksimum



Gambar 2.3 Perhitungan jarak jangkauan minimum

2.2.2 Pemodelan Sistem Robotik

Analisis kinematik berkaitan dengan gerakan robot tanpa memandang efek inersia / kelembaman yang terjadi ketika robot melakukan gerakan. Sistem Robotik secara garis besar terdiri dari sistem kontroler, elektronik, mekanik robot. Dalam bentuk diagram dinyatakan seperti Gambar 2.4.



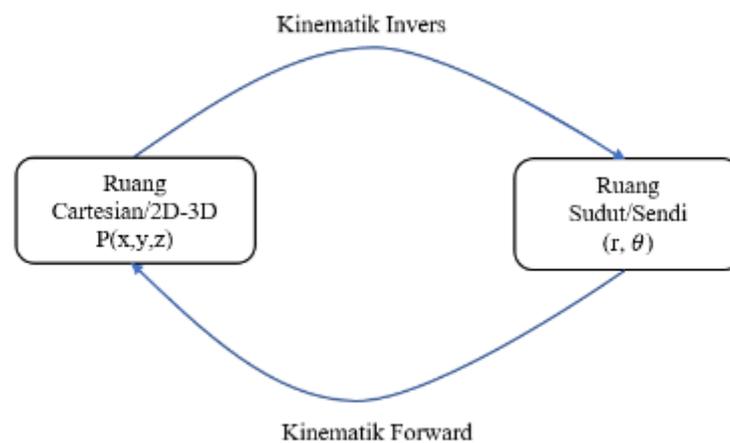
Gambar 2.4 Diagram Sistem Robotik

$G(s)$ adalah persamaan matematik kontroler sedangkan $H(s)$ adalah persamaan untuk sistem robot secara fisik termasuk aktuator dan sistem

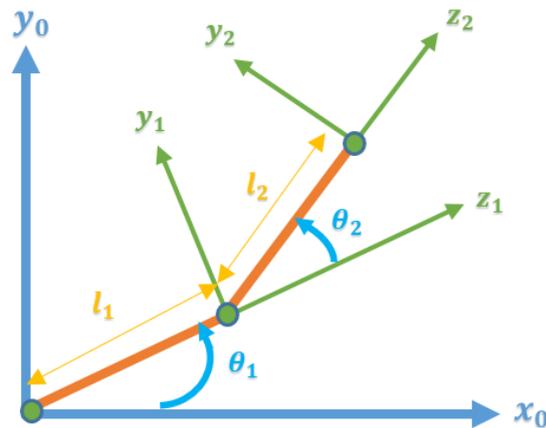
elektroniknya. Komponen r_i adalah referensi input yang dalam aplikasinya dapat berupa referensi posisi, kecepatan, dan akselerasi. Komponen e adalah *error* dan komponen u adalah output dari kontroller. Output y adalah fungsi gerak robot yang diharapkan selalu sama dengan referensi (gerak) yang didefinisikan pada input r_i [13].

2.2.3 Kinematika Robot

Kinematika dalam robotik adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematik geometri dari suatu struktur robot. Persamaan kinematik memperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu objek [13]. Kontroler kinematik mengandung komponen transformasi ruang kartesian ke ruang sendi. Sebaliknya, kontroler memerlukan umpan balik dalam bentuk koordinat karena referensi diberikan dalam bentuk koordinat [13]. Penjelasan tersebut dapat dipahami dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Transformasi kinematika maju dan kinematika balik



Gambar 2.6 Konfigurasi robot *arm* 2 DOF

2.2.8.1 *Forward Kinematics*

Forward kinematics adalah algoritma yang digunakan untuk menghitung pada koordinat mana sebuah titik berada dengan mengetahui panjang lengan serta sudut-sudutnya. *Forward kinematics* harus mencari titik *end-effector* pada koordinat kartesius berdasarkan panjang tiap bagian lengan dan sudut yang diketahui [14].

2.2.8.2 *Inverse Kinematics*

Inverse kinematics adalah lawan dari *Forward kinematics*. Pada *Inverse kinematics* digunakan mencari sudut yang dihasilkan tiap lengan berdasarkan panjang setiap lengan dan titik *end-effector* pada koordinat kartesius [14].

2.2.4 Motor Servo

Motor servo merupakan komponen penggerak sebagai sistem kontrol kalang tertutup. Sistem kontrol kalang tertutup pada motor servo digunakan untuk mengontrol gerakan dan posisi akhir dari poros motor servo [15]. Posisi poros output akan dideteksi untuk mengetahui posisi poros sudah tepat atau belum. Jika posisi poros belum tepat maka kontrol input akan mengirim sinyal kendali yang membuat posisi poros tersebut tepat sesuai yang diinginkan [15].



Gambar 2.7 Motor Servo *Lynxmotion*



Gambar 2.8 Pengukuran Sudut $\theta_{1 \max}$ dan $\theta_{1 \min}$ serta Sudut $\theta_{2 \max}$ dan $\theta_{2 \min}$

2.2.5 Gripper

Gripper adalah salah satu alat yang digunakan dalam proses otomatis. *Gripper* dapat digunakan mengambil dan memindahkan benda pada posisi yang ditentukan. Salah satu kegunaan *gripper* yaitu menggenggam material yang akan diambil. Sedangkan material yang ada biasanya akan sangat beragam, baik dari segi bentuk bahan dan ukuran [16].



Gambar 2.9 *Gripper*

2.2.6 LSS Board

Lynxmotion Smart Servo (LSS) Board merupakan papan elektronik yang memungkinkan dalam pengkoneksian lebih mudah terhubung dengan *Lynxmotion Smart Servos*. Papan tersebut mencakup berbagai fitur dan fungsi sebagai distribusi daya pusat melalui enam konektor LSS [17].

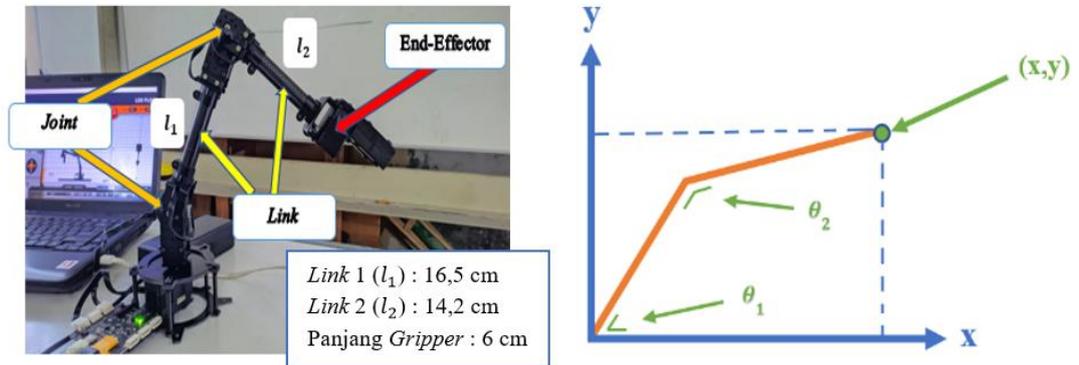


Gambar 2.10 *Lynxmotion Smart Servo (LSS) Board*

2.2.7 Link dan Joint

Link merupakan panjang dari lengan robot, sedangkan *joint* merupakan pertemuan antara link dengan link atau sebuah *link* dengan *base*. Dengan adanya *joint* yang menghubungkan dua *link* tersebut, *joint* tersebut akan membentuk satu derajat kebebasan. Sedangkan pada ujung *link* yang merupakan *end-effector* yang

biasanya sebuah *gripper* yang digunakan untuk melakukan suatu fungsi tertentu seperti mengangkat beban [18].



Gambar 2.11 Link dan Joint



Gambar 2.12 Pengukuran panjang link 1



Gambar 2.13 Pengukuran panjang link 2

2.2.8 Aplikasi *FlowBotics Studio:LSS Flowarm*

Berikut tampilan Aplikasi *FlowBotics Studio:FlowArm LSS*

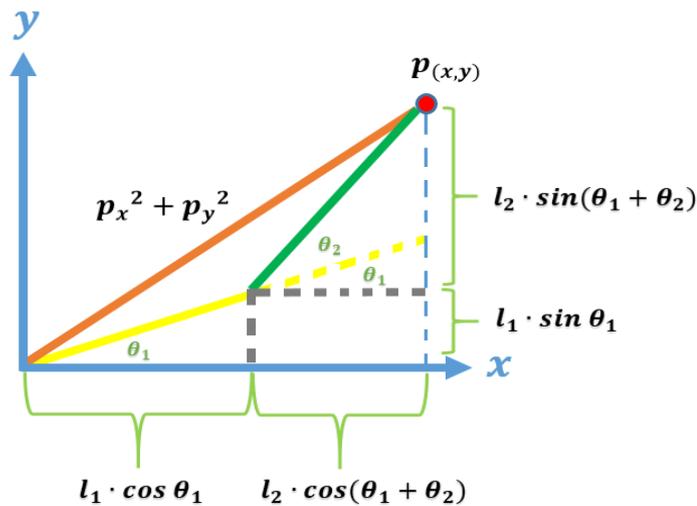


Gambar 2.14 Aplikasi *FlowBotics Studio:FlowArm LSS*

Pada Gambar 2.14 merupakan aplikasi *FlowBotics Studio:FlowArm LSS* yang digunakan untuk simulasi pergerakan robot manipulator, membuat pola pergerakan robot manipulator *lynxmotion*. Aplikasi ini bisa untuk mengontrol robot manipulator secara langsung dengan menghubungkan kabel USB *LSS Board* pada robot manipulator ke port USB laptop/PC kemudian jika *ter-detected* perangkat yang masuk pada aplikasi *FlowBotics Studio:FlowArm LSS*, maka robot manipulator tersebut bisa digerakan secara langsung.

2.2.9 Metode Geometry

Metode Geometri ini biasana digunakan pada robot dengan jumlah derajat kebebasan sedikit [19]. Metode ini berdasarkan pada pencarian jumlah hubungan geometris yang mencakupi dari koordinat posisi *end-effector* robot [19]. Rumus *inverse kinematics* digunakan pada pendekatan geometri dalam menghitung sudut setiap sumbu gerak atau sendi lengan robot supaya *end-effector* dapat mencapai posisi yang dituju [19], dapat dilihat pada Gambar 2.15.

Gambar 2.15 Grafik *inverse kinematic* 2 DOF

Dalam invers kinematik 2-DOF memiliki kesulitan jika diselesaikan dengan menggunakan persamaan *geometry*, tetapi masih dapat dengan cara berikut :

1. Berdasarkan *forward kinematic* 2-DOF

$$p_x = l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$p_y = l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

2. Selanjutnya, harus mencari θ_2 terlebih dahulu, θ_2 dapat diperoleh dari pengkuadratan di kedua sisi persamaan baik P_x maupun P_y .

$$p_x^2 = [l_1 \cdot \cos \theta_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2)]^2$$

$$p_x^2 = l_1^2 \cdot \cos^2 \theta_1 + l_2^2 \cdot \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + 2l_1 l_2 \cdot \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$p_y^2 = [l_1 \cdot \sin \theta_1 + l_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2)]^2$$

$$p_y^2 = l_1^2 \cdot \sin^2 \theta_1 + l_2^2 \cdot \sin^2(\theta_1 + \theta_2) + 2l_1 l_2 \cdot \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

3. Berdasarkan persamaan $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$

$$p_x^2 + p_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 (\cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2))$$

4. Berdasarkan $\cos(a + b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b$, serta

$$\sin(a + b) = \sin a \cdot \cos b + \cos a \cdot \sin b$$

$$p_x^2 + p_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 (\cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2))$$

$$\begin{aligned}
 p_x^2 + p_y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2(\cos^2\theta_1 \cdot \cos\theta_2 - \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\
 &\quad + \sin^2\theta_1 \cdot \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2) \\
 p_x^2 + p_y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2(\cos\theta_2[\cos^2\theta_1 + \sin^2\theta_1] + \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2 \\
 &\quad - \sin\theta_1 \cdot \cos\theta_1 \cdot \sin\theta_2)
 \end{aligned}$$

$$p_x^2 + p_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos\theta_2$$

$$\cos\theta_2 = \frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}$$

5. Berdasarkan $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$

$$\sin^2\theta_2 = 1 - \cos^2\theta_2$$

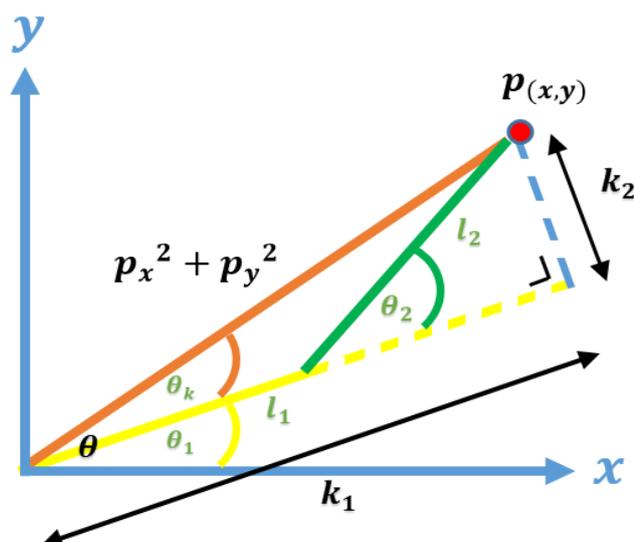
$$\sin\theta_2 = \pm\sqrt{1 - \cos^2\theta_2}$$

$$\sin\theta_2 = \pm\sqrt{1 - \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)^2}$$

6. Didapatkan θ_2 dari $\cos\theta_2$ dan $\sin\theta_2$ yaitu

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}\right)$$

7. Untuk mencari θ_1 maka dapat menggunakan referensi dari Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Grafik mencari θ_1 dengan trigonometri

$$k_1 = l_1 + l_2 \cdot \cos\theta_2$$

$$k_2 = l_2 \cdot \sin\theta_2$$

$$\theta = \tan^{-1}2 \left(\frac{p_y}{p_x} \right)$$

$$\theta = \theta_k + \theta_1$$

$$\theta_1 = \theta - \theta_k$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}2 \left(\frac{p_y}{p_x} \right) - \tan^{-1}2 \left(\frac{k_1}{k_2} \right)$$

2.2.10 Metode SINDy

Metode SINDy dapat memodelkan persamaan *inverse kinematics* dengan hanya menggunakan data masukan x , y , dan data keluaran θ . Metode ini digunakan untuk mencari kesamaan matematika dari dinamika sistem *non-linear*. Metode SINDy dapat juga untuk mencari persamaan matematis kinematika lengan robot dengan mekanisme yang sama menggunakan data masukan dan keluaran. Pemodelan kinematika merupakan salah satu dari dua pemodelan pada robot manipulator yaitu pemodelan yang tidak mempertimbangkan dinamika dalam mempengaruhi proses gerak robot.

Untuk menerapkan SINDy sebuah data dalam bentuk waktu berkala misalkan t_1, t_2, \dots, t_n . Data dikumpulkan ke dalam matriks x, y (input) masing-masing pada persamaan (2.1) dan (2.2).

$$x = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \cdots & x_n(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \cdots & x_n(t_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_1(t_m) & x_2(t_m) & \cdots & x_n(t_m) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1(t_1) & y_2(t_1) & \cdots & y_n(t_1) \\ y_1(t_2) & y_2(t_2) & \cdots & y_n(t_2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ y_1(t_m) & y_2(t_m) & \cdots & y_n(t_m) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Selanjutnya, membentuk library untuk mencari koefisien dari rumus *least square* dari SINDy yang terdiri dari beberapa basis pada data seperti pada persamaan (2.3).

$$P(x, y) = \begin{bmatrix} | & | & | & | & | & | & | & | & | & | & | \\ 1 & x & y & x^2 & y^2 & xy & \sin x & \sin y & \cos x & \cos y \\ | & | & | & | & | & | & | & | & | & | & | \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Untuk mencari koefisien SINDy menggunakan rumus *least square linear*. *Least Square Linear* merupakan model regresi linear dengan model terdiri dari kombinasi parameter yang linear.

Menempatkan variabel independendan dependen dalam matriks x dan y, dengan dihitung *least square linear* dengan cara berikut; D merupakan himpunan semua data.

$$\begin{aligned} L(D, \Xi) &= \|\theta - P(x, y) \Xi\|^2 \\ L(D, \Xi) &= (\theta - P(x, y) \Xi)^T (\theta - P(x, y) \Xi) \\ L(D, \Xi) &= \theta^T \theta - \theta^T P(x, y) \Xi - P(x, y)^T \Xi^T \theta - P(x, y)^T \Xi^T P(x, y) \Xi \end{aligned}$$

Gradien *loss* ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(D, \Xi)}{\partial \Xi} &= \frac{\partial L(\theta^T \theta - \theta^T P(x, y) \Xi - P(x, y)^T \Xi^T \theta - P(x, y)^T \Xi^T P(x, y) \Xi)}{\partial \Xi} \\ \frac{\partial L(D, \Xi)}{\partial \Xi} &= -2 P(x, y)^T \theta + 2 P(x, y)^T P(x, y) \Xi \end{aligned}$$

Mengatur nilai gradien *loss* ke nilai nol untuk mencari Ξ (*least square linear*)

$$\begin{aligned} -2 P(x, y)^T \cdot \theta + 2 P(x, y)^T \cdot P(x, y) \cdot \Xi &= 0 \\ -2 P(x, y)^T \cdot \theta &= -2 P(x, y)^T \cdot P(x, y) \cdot \Xi \\ P(x, y)^T \cdot \theta &= P(x, y)^T \cdot P(x, y) \cdot \Xi \\ \Xi &= \frac{P(x, y)^T \cdot \theta}{P(x, y)^T \cdot P(x, y)} \\ \Xi &= \frac{1}{P(x, y)^T \cdot P(x, y)} \cdot P(x, y)^T \cdot \theta \\ \Xi &= (P(x, y)^T \cdot P(x, y))^{-1} \cdot P(x, y)^T \cdot \theta \end{aligned} \quad (2.4)$$

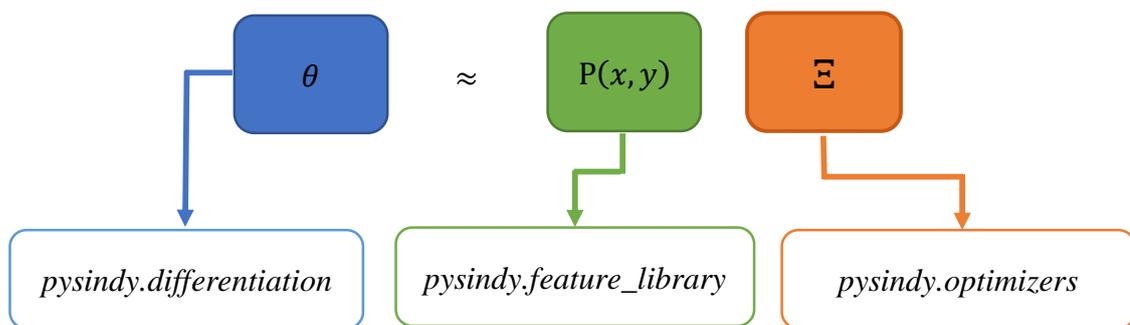
Fungsi tujuan SINDy adalah meminimalkan nilai kesalahan dinyatakan dalam persamaan (2.5), jika nilai error < 0 maka persamaan sistem SINDy tersebut baik.

$$e = \theta - P(x, y)\Xi \quad (2.5)$$

Dari masing-masing objek θ , $P(x, y)$, dan Ξ dapat didefinisikan persamaan SINDy pada persamaan (2.6)

$$\theta = P(x, y)\Xi \quad (2.6)$$

Struktur dari *PySINDy* [20] dengan menggunakan persamaan (2.6) dimana ;



Gambar 2.17 Struktur persamaan SINDy pada Python

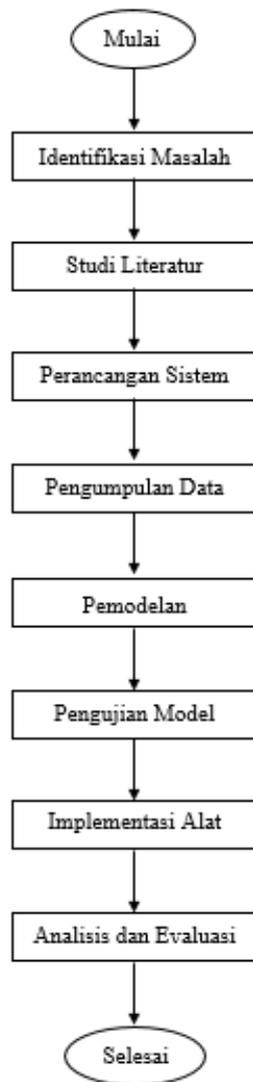
- *pysindy.differentiation* melakukan diferensiasi numerik untuk menghitung θ ;
- *pysindy.feature_library* memungkinkan pengguna untuk menentukan satu set fungsi *library* dan menangani pembentukan $P(x, y)$;
- *pysindy.optimizers* menyediakan satu set pemecah regresi jarang untuk menentukan Ξ .

Objek **SINDy** merangkum satu objek kelas dari masing-masing dari tiga submodul diatas dan menggunakannya, bersama dengan matriks data yang disajikan, untuk menemukan sistem dinamis yang mengatur.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.1 yaitu identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, pengumpulan data, pemodelan, pengujian model, implementasi alat, analisis dan evaluasi.



Gambar 3.1 Alur Penelitian

3.1.1 Identifikasi Masalah

Penelitian akan dilakukan dengan melakukan tahap awal yaitu mengidentifikasi masalah. Identifikasi masalah bertujuan untuk memfokuskan permasalahan dan menentukan solusi atas permasalahan yang akan diselesaikan pada penelitian yang dilakukan. Masalah utama yang akan coba diselesaikan pada penelitian ini yaitu terdapat industri yang menggunakan tenaga manusia saat proses pergerakan barang. Diperlukan suatu alat untuk menggerakkan barang yang tepat seperti robot lengan yang akurasi dan presisi. Untuk mengecek keakuratannya diperlukan pemodelan kinematika agar dapat mengetahui kesalahan yang ada saat robot lengan yang sedang beroperasi.

3.1.2 Studi Literatur

Solusi yang dihasilkan pada tahap identifikasi masalah membutuhkan pengkajian melalui studi literatur pada berbagai sumber seperti jurnal, buku, website dan sumber valid lainnya. Pengkajian yang dilakukan dengan cara mengumpulkan data dan informasi terkait solusi yang akan dibuat untuk menghasilkan teori yang diperlukan dalam pembuatan solusi. Tahapan ini juga dilakukan untuk mendukung solusi yang ditawarkan berdasarkan penelitian sebelumnya.

3.1.3 Perancangan Sistem

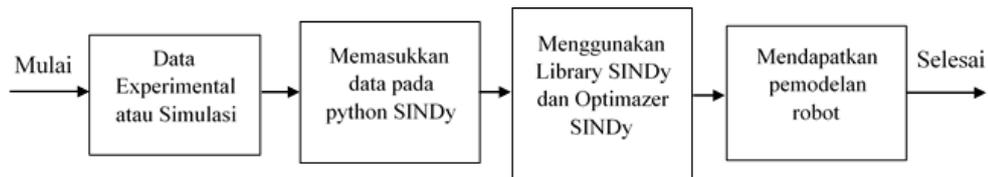
Robot manipulator dibuat untuk membuat gerakan. Pada perancangan sistem robot manipulator digunakan berupa input (x,y) dan output (θ_1, θ_2) .

3.1.4 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data dari beberapa percobaan lengan robot dalam bergerak secara 2-DOF. Pengumpulan data dilakukan 40 kali untuk menentukan persamaan dan pengujian model, sehingga didapatkan data *training* sekaligus digunakan menjadi data uji sebesar 40 data. Terdapat penambahan data uji sebesar 20 data uji baru yang digunakan pada persamaan model yang telah didapatkan pada 40 data *training*.

3.1.5 Pemodelan

Tahapan ini merupakan tahapan dalam metode yang digunakan pada penelitian ini. Pemodelan merupakan suatu proses membuat suatu model atau representasi matematis dari suatu sistem yang dapat digunakan dalam memahami, menganalisis, memprediksi, atau mensimulasikan perilaku sistem tersebut. Langkah penyelesaian metode SINDy dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram langkah penyelesaian metode SINDy

3.1.6 Pengujian Model

Tahapan ini merupakan pengujian model yang dilakukan dengan menguji persamaan yang didapat pada saat pemodelan dengan data uji yang digunakan. Selanjutnya hasil dari persamaan *real* dibandingkan dengan hasil metode dan dihitung nilai *error* dan keakuratan.

3.1.7 Implementasi Alat

Tahapan implementasi alat merupakan tahap pembuatan lengan robot agar dapat digerakkan. Terdapat dua tahapan yaitu tahap pemrograman alat dan pengujian robotnya. Pemrograman robot dilakukan menggunakan software *FlowBotics Studio:FlowArm LSS*. Pengujian robot dilakukan dengan menggerakkan robot dari hasil program yang dibuat.

3.1.8 Analisis dan Evaluasi

Tahap analisis dan evaluasi selanjutnya dilakukan terhadap hasil pengujian model dan error sistem yang dilakukan pada tahap sebelumnya. Beberapa hal yang akan dianalisis dalam tahap ini yaitu untuk mengetahui apakah sistem yang ada sudah mencapai tujuan penelitian. Selain itu evaluasi dilakukan untuk mengetahui hal-hal yang perlu diperbaiki pada penelitian yang dilakukan.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Lab Kendali Universitas Lampung mulai bulan Mei – September 2023.

3.3 Alat dan Bahan

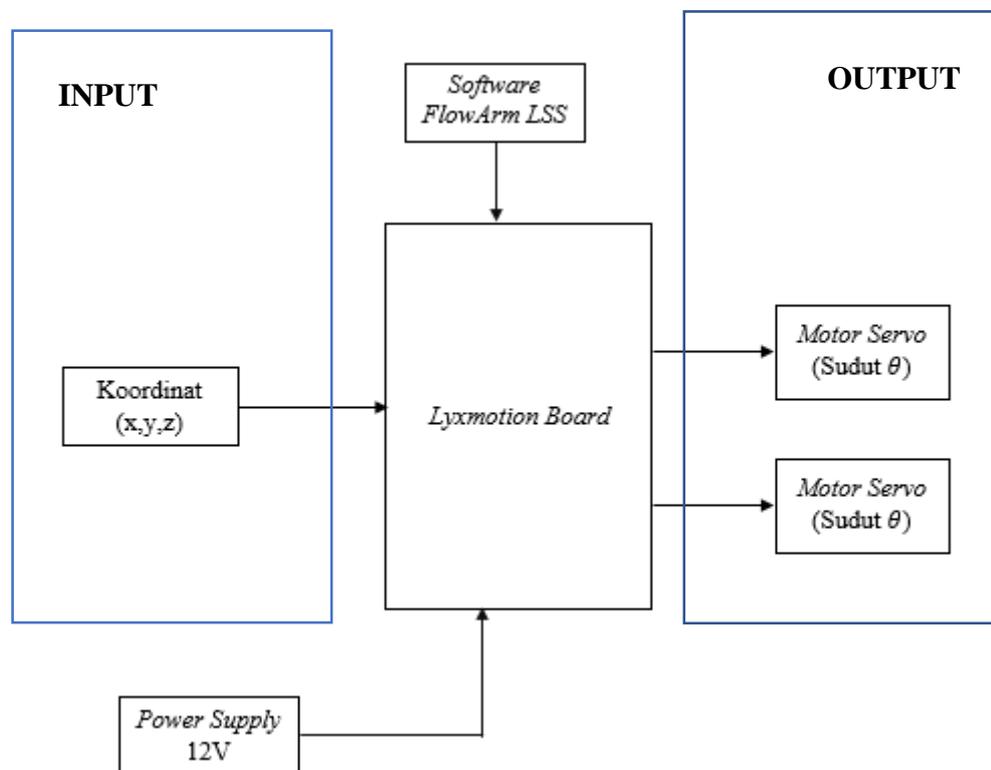
Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alat dan bahan

No	Komponen hardware dan software	Fungsi
1	Laptop ASUS X441U Series	Laptop digunakan sebagai pembuatan laporan dan pemrograman robot manipulator.
2	Robot Manipulator <i>Servo Erector Set (SES-V2) Lynxmotion</i>	Robot manipulator SES-V2 digunakan sebagai robot lengan yang akan digunakan.
3	<i>FlowBotics Studio:FlowArm LSS</i>	<i>FlowBotics Studio:FlowArm LSS</i> sebagai aplikasi pemrograman robot manipulator
4	<i>Lynxmotion Board</i>	<i>Lynxmotion Board</i> digunakan sebagai mikrokontroler robot manipulator.
5	Motor Servo	Motor servo digunakan sebagai penggerak robot manipulator
6	Penggaris 50 cm dan penggaris busur	Penggaris yang digunakan sebagai alat ukur dalam mengambil data posisi dan data sudut pada robot manipulator

3.4 Diagram Blok Sistem

Pada Gambar 3.3 merupakan blok diagram sistem yang merupakan perancangan sistem dari robot manipulator lengan robot yang akan diimplementasikan untuk posisi dan pemodelan matematisnya. *Lynxmotion Board* sebagai mikrokontroler yang akan terhubung dengan adaptor yang mendapatkan daya dari *power supply* 12V, dengan input dari motor servo, *software FlowArm LSS* dengan output berupa koordinat posisi (x,y,z) dan sudut *joint* (θ) yang menentukan perpindahan posisi yang akan dilakukan.



Gambar 3.3 Blok diagram sistem

3.5 Perancangan Identifikasi Model dengan Metode SINDy

Penelitian ini menggunakan metode SINDy, metode tersebut telah dijelaskan pada subbab 2.2.10. Penjelasan perhitungan secara detail penggunaan rumus dari metode yang digunakan penelitian ini dengan bantuan MATLAB dilihat pada lampiran A. Berikut langkah penyelesaian perhitungan manual metode SINDy.

Pembuktian metode SINDy mulai dari diketahui data input (x). dan selanjutnya dibuatkan library SINDy dengan menambahkan basis dengan angka “1” ke data inputnya.

$$x = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.4 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

Library yang dibuat (l_b) sebagai berikut;

$$P(x) = \begin{bmatrix} | & | \\ 1 & x \\ | & | \end{bmatrix}$$

$$P(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0,8 \\ 1 & 0,7 \\ 1 & 0,5 \\ 1 & 0,4 \\ 1 & 0,2 \end{bmatrix}, \quad P(x)^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 & 0,2 \end{bmatrix}$$

Dengan vektor matriks output (θ) yang ingin didapatkan misalnya:

$$\theta = 5x + 3$$

Masukkan nilai x ke dalam persamaan output tersebut;

$$\theta = 5 \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.4 \\ 0.2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 3,5 \\ 2,5 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya digunakan rumus *least square* pada persamaan 2.7 untuk mengecek nilai konstanta pada sistem persamaan sesuai atau tidak.

$$\Xi = (P^T(x) \cdot P(x))^{-1} \cdot P^T(x) \cdot \theta$$

$$\Xi = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0,8 \\ 1 & 0,7 \\ 1 & 0,5 \\ 1 & 0,4 \\ 1 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0,8 \\ 1 & 0,7 \\ 1 & 0,5 \\ 1 & 0,4 \\ 1 & 0,2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \left(\begin{bmatrix} 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 & 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,7 + 1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,2 \\ 0,8 \cdot 1 + 0,7 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1 + 0,2 \cdot 1 & 0,8 \cdot 0,8 + 0,7 \cdot 0,7 + 0,5 \cdot 0,5 + 0,4 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \left(\begin{array}{c} \text{Matriks A} \\ \left(\begin{bmatrix} 5 & 2,6 \\ 2,6 & 1,58 \end{bmatrix} \right)^{-1} \end{array} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

Untuk menentukan Matriks A *invers*, maka langkah-langkah penyelesaian matriks A sebagai berikut;

$$\text{Adj } A = \begin{bmatrix} 1,58 & -2,6 \\ -2,6 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\det|A| = ad - bc$$

$$\det|A| = (1,58 \cdot 5) - (-2,6) \cdot (-2,6)$$

$$\det|A| = 1,14$$

$$A^{-1} = \frac{1}{\det|A|} \cdot \text{Adj } A$$

$$A^{-1} = \frac{1}{1,14} \cdot \begin{bmatrix} 1,58 & -2,6 \\ -2,6 & 5 \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 1,385964912280702 & -2,280701754385965 \\ -2,280701754385965 & 4,385964912280702 \end{bmatrix}$$

Sehingga didapatkan Ξ ,

$$\Xi = \begin{bmatrix} 1,385964912280702 & -2,280701754385965 \\ -2,280701754385965 & 4,385964912280702 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 1,385964912280702 & -2,280701754385965 \\ -2,280701754385965 & 4,385964912280702 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \cdot 7 + 1 \cdot 6,5 + 1 \cdot 5,5 + 1 \cdot 5 + 1 \cdot 4 \\ 0,8 \cdot 7 + 0,7 \cdot 6,5 + 0,5 \cdot 5,5 + 0,4 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 1,385964912280702 & -2,280701754385965 \\ -2,280701754385965 & 4,385964912280702 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 28 \\ 15,7 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 1,385964912280702 \cdot 28 + (-2,280701754385965) \cdot 15,7 \\ (-2,280701754385965) \cdot 28 + 4,385964912280702 \cdot 15,7 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 38,80701754385966 + (-35,80701754385965) \\ (-63,85964912280702) + 68,85964912280702 \end{bmatrix}$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$$

Selanjutnya dicari nilai *error* sistem persamaan SINDy dengan menggunakan persamaan 2.8.

$$e = \theta - P(x) \Xi$$

$$e = \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0,8 \\ 1 & 0,7 \\ 1 & 0,5 \\ 1 & 0,4 \\ 1 & 0,2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$$

$$e = \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \times 3 + 0,8 \times 5 \\ 1 \times 3 + 0,7 \times 5 \\ 1 \times 3 + 0,5 \times 5 \\ 1 \times 3 + 0,4 \times 5 \\ 1 \times 3 + 0,2 \times 5 \end{bmatrix}$$

$$e = \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 7 \\ 6,5 \\ 5,5 \\ 5 \\ 4 \end{bmatrix} = 0$$

Karena nilai error sistem persamaan yang telah dihitung bernilai 0, maka sistem persamaan yang didapat sudah baik. Persamaan SINDy yang didapatkan sama dengan persamaan prediksi sebelumnya yaitu $\theta = 5x + 3$.

3.6 Perancangan Pengujian *Error*

Pengujian dilakukan dengan membandingkan persamaan kinematik dengan persamaan data pada robotnya, serta mencari *error* dan keakuratan [21] pada persamaan (3.1) – persamaan (3.4).

Persamaan 3.1 *error* untuk θ_1 :

$$MSE \theta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.1)$$

$$RMSE \theta_1 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.2)$$

Persamaan 3.2 *error* untuk θ_2 :

$$MSE \theta_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i\theta_2} - \hat{y}_{i\theta_2})^2 \quad (3.3)$$

$$RMSE \theta_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{i\theta_2} - \hat{y}_{i\theta_2})^2} \quad (3.4)$$

dimana,

$y_{i\theta_1}$: data pengukuran θ_1 ke- i

$y_{i\theta_2}$: data pengukuran θ_2 ke- i

$\hat{y}_{i\theta_1}$: data perhitungan θ_1 ke- i

$\hat{y}_{i\theta_2}$: data perhitungan θ_2 ke- i

i : data ke

N : jumlah data

Untuk mencari keakuratan digunakan persamaan 3.5 sampai 3.8 berikut.

$$\text{Akurasi } \theta_1 : 100\% - \left(\frac{|\theta_{1R} - \theta_{1S}|}{\theta_{1R}} \right) \times 100\% \quad (3.5)$$

$$\text{Akurasi rata-rata } \theta_1 : \frac{100\% - \left(\frac{|\theta_{1R} - \theta_{1S}|}{\theta_{1R}} \right) \times 100\%}{n} \quad (3.6)$$

$$\text{Akurasi } \theta_2 : 100\% - \left(\frac{|\theta_{2R} - \theta_{2S}|}{\theta_{2R}} \right) \times 100\% \quad (3.7)$$

$$\text{Akurasi rata-rata } \theta_2 : \frac{100\% - \left(\frac{|\theta_{2R} - \theta_{2S}|}{\theta_{2R}} \right) \times 100\%}{n} \quad (3.8)$$

dimana,

θ_{1R} : Output sudut pertama real

θ_{2R} : Output sudut kedua real

θ_{1S} : Output sudut pertama SINDy

θ_{2S} : Output sudut kedua SINDy

n : jumlah data

3.7 Pengujian Alat mencari θ

Ditampilkan Tabel 3.2 untuk pengujian alat pada sudut, serta Tabel 3.3 pengujian *error* dan keakuratan pada sudut robot.

Tabel 3.2 Tabel Pengujian Alat pada sudut robot.

Percobaan ke-	Input		Output			
	x (cm)	y (cm)	Real (Pengukuran)		SINDy (Perhitungan)	
			θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ_1 (°)	θ_2 (°)
1						
2						
...						
...						
n						

Tabel 3.3 Tabel Pengujian Alat untuk *error* dan akurasi sudut robot.

Percobaan ke-	<i>Error</i>		Akurasi rata-rata (%)	
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
1				
2				
...				
...				
n				

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pendekatan model kinematik balik lengan robot serta pengujiannya maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pendekatan dari pemodelan matematis dari kinematika balik robot lengan 2-DOF didapatkan model dengan nilai akurasi pengujian yang terbaik yaitu ;

$$\theta_1 = 83,570 + (-1,120)x + 4,710y + (-0,049)x^2 + (-0,045)xy + (-0,130)y^2$$

$$\theta_2 = 164,130 + (-9,236)x + (-7,633)y + 0,294x^2 + 0,245xy + 0,245y^2$$

Dengan nilai akurasi rata-rata θ_1 yaitu 97.17007199076521 dan θ_2 yaitu 98.07901268595329. Atau menurut angka penting dapat ditulis akurasi rata-rata θ_1 yaitu 97.170 dan θ_2 yaitu 98.079.

2. Sudut kinematik robot memiliki dua sudut yaitu θ_1 dan θ_2 dalam perpindahan posisi lengan robot memiliki dengan nilai *MSE* θ_1 yaitu 5,384 dan nilai *RMSE* θ_1 yaitu 2,3204. Sedangkan nilai *MSE* θ_2 yaitu 7,221 dan nilai *RMSE* θ_2 yaitu 2,687.
3. Pengaruh jumlah data dari 20 data uji baru didapatkan akurasi rata-rata θ_1 yaitu 95.854 dan θ_2 yaitu 85.669. Nilai akurasi tersebut lebih rendah dibandingkan akurasi rata-rata θ_1 dan θ_2 dengan 40 data.

5.2 Saran

Penelitian yang dilakukan untuk mengetahui model kinematika lengan robot 2-DOF menggunakan metode SINDy menghasilkan nilai persamaan θ_1 dan θ_2 yang bisa digunakan kedepannya pada robot lengan manipulator 2-DOF Lynxmotion. Penelitian yang mungkin akan dilakukan diharapkan untuk memperhatikan beberapa aspek seperti:

- Mengembangkan penelitian ini diharapkan memperbanyak pengujian, seperti mempergunakan *gripper* sebagai pengujian massa atau dapat menambah nilai DOF sehingga menghasilkan persamaan kinematika balik yang baru.
- Pada penelitian selanjutnya juga bisa menggunakan bantuan kamera atau sensor yang bisa mengukur nilai posisi dan sudut lengan robot secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. H. Purwoto, D. R. Rhokhim and D. Indraswari, "Pemodelan Robot Kinematik Manipulator Menggunakan Matlab," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 20, no. 2, pp. 141-146, 2020.
- [2] W. R. Adzani and M. S. Zuhrie, "Perancangan Kontroler PID Tyreus-Luyben Untuk Kendali Vibrasi Pada Robot Single Link Flexible Joint Manipulator," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 08, no. 03, pp. 523-530, 2019.
- [3] R. Oktama, R. Maulana and G. E. Setyawan, "Implementasi Robot Lengan Pemindah Barang 3 DOF Menggunakan Metode Inverse Kinematics," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 8, pp. 2810-2816, 2018.
- [4] A. Uchrowi, L. and S. , "Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP," *AVITEC*, vol. 1, no. 1, pp. 87-98, 2019.
- [5] A. B. Dharmawan and Lina, "Penerapan Metode Denavit-Hartenberg Pada Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot," *Jurnal Muara*, vol. 1, no. 1, pp. 287-292, 2017.
- [6] M. A. Akbar and M. , "Pemodelan Dan Simulasi Fuzzy Logic Control Pada Model Arm Robot Manipulator," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 2, no. 3, pp. 315-323, 2014.
- [7] A. U. Darajat, U. Murdika, A. S. Repelianto and R. Annisa, "Inverse Kinematic of 1-DOF Robot Manipulator Using Sparse Identification of Nonlinear Systems," *INTEK Jurnal Penelitian*, vol. 10, no. 1, pp. 22-25, 2023.
- [8] S. L. Brunton, J. L. Proctor, J. N. Kutz and W. Bialek, "Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems," *Proceedings of the National Academy of Sciences*

- (PNAS) of the United States of America, vol. 113, no. 15, pp. 3932-3937, 2016.
- [9] I. Sugiarto, "Pemodelan dan Simulasi Dinamika Lengan Robot 3-DOF Menggunakan Perangkat Lunak Open Source," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 57-63, 2008.
- [10] R. H. Abdillah, M. S. Zuhrie, B. Suprianto and I. G. P. A. Buditjahjanto, "Perancangan Sistem Kontrol Vibrasi Pada Robot Single Link Flexible Joint Manipulator Dengan Pid Tuning Genetic Algorithm," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 10, no. 01, pp. 9-17, 2021.
- [11] M. "Analisa Forward Kinematic Pada Simulator Arm Robot 5 DOF Yang Mengintegrasikan Mikrokontroler Arduino-UNO Dan LabVIEW," *ROTASI*, vol. 15, no. 2, pp. 37-43, 2013.
- [12] H. Y. Prayoga, R. Maulana and W. Kurniawan, "Implementasi Pergerakan Lengan Robot Dengan Flex-Sensor Menggunakan Kalman Filter," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 11, pp. 5799-5806, 2018.
- [13] E. Pitowarno, *ROBOTIKA : Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan*, Yogyakarta: C.V ANDI OFFSET, 2006.
- [14] S. and B. Harpad, "Prototype Lengan Robot Berbasis Arduino Dengan Menggunakan Algoritma Kinematics," *Jurnal Ilmiah Matrik*, vol. 22, no. 2, pp. 208-214, 2020.
- [15] Ramdan, Lasmadi and P. Setiawan, "Sistem Pengendali On-Off Lampu dan Motor Servo sebagai Penggerak Gerendel Pintu Berbasis Internet Of Things (IoT)," *AVITEC*, vol. 4, no. 2, pp. 211-224, 2022.
- [16] A. A. Jabbar and Y. , "Sistem Kendali Gripper Adaptif Pada Robot Transporter," *Jurnal MOSFET*, vol. 2, no. 2, pp. 26-31, 2022.
- [17] E. Nantel, "LSS-ADA Board (USB Mini)," Lynxmotion Wiki , 21 March 2019. [Online]. Available: <https://wiki.lynxmotion.com/info/wiki/lynxmotion/view/servo-erector-set-system/ses-electronics/ses-modules/lss-adapter-board/>. [Accessed 3 April 2023].

- [18] D. S. Pamungkas and M. S. Noviansyah, "Simulator Robot Lengan Dua Derajat Kebebasan," *SENTRINOV ke-VII*, vol. 7, no. 1, pp. 51-57, 2021.
- [19] I. D. Nugraha and P. M. Santika, "Pendekatan Geometri untuk Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot 4 Derajat Kebebasan," *JURNAL TEKNIK MESIN*, vol. 5, no. 1, pp. 1-8, 2021.
- [20] B. M. de Silva, K. Champion, M. Quade, J.-C. Loiseau, J. N. Kutz and S. L. Brunton, "PySINDy: A Python package for the Sparse Identification of Nonlinear Dynamics from Data," *math.DS*, pp. 2-14, 2020.
- [21] Trisnawan, A. Sambas and D. S. Rahayu, "Rancang Bangun Robot Arm 2 DOF Berbasis Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)," *Al Jazari Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 41-45, 2018.