

Implementasi Kontrol SRM (*Switched Reluctance Motor*) sebagai Pengendali Model Kendaraan Listrik

Tugas Akhir

Disusun sebagai salah satu syarat untuk
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan Diploma IV

Oleh

Azzira Luthfi

220341027



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MEKATRONIKA
JURUSAN TEKNIK OTOMASI MANUFAKTUR DAN MEKATRONIKA
POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir yang berjudul:

**Implementasi Kontrol SRM (*Switched Reluctance Motor*) sebagai Pengendali
Model Kendaraan Listrik**

Oleh:

Azzira Luthfi

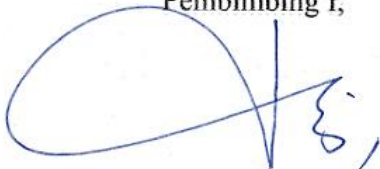
220341027

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program
pendidikan Sarjana Terapan (Diploma IV)
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 21 Agustus 2024

Disetujui,

Pembimbing I,



Dr. Setyawan Ajie Sukarno, S.ST.,
M.T., M.Sc.Eng.
NIP 198004282008101001

Pembimbing II,



Afaf Fadhil Rifa'i, S.T., M.T.
NIP. 198502282014041002

Disahkan,

Penguji I,



Siti Aminah, S.T., M.T.
NIP.197408172009122001

Penguji II,



Muhammad Nursyam
Rizal, S.Tr.T., M.Sc.
NIP.199503012024061001

Penguji III,



Fitria Suryatini, S.Pd.,
M.T.
NIP.198804242018032001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Azzira Luthfi
NIM : 220341027
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika
Jenjang Studi : Diploma 4
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : Implementasi Kontrol SRM (*Switched Reluctance Motor*) sebagai Pengendali Model Kendaraan Listrik

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para Pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 21 – 08 – 2024
Yang Menyatakan,

Azzira Luthfi
NIM 220341027

PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Azzira Luthfi
NIM : 220341027
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika
Jenjang Studi : Diploma 4
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : Implementasi Kontrol SRM (*Switched Reluctance Motor*) sebagai Pengendali Model Kendaraan Listrik

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaannya berada di bawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right) atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 21 – 08 – 2024
Yang Menyatakan,

Azzira Luthfi
NIM 220341027

MOTO PRIBADI

Hidup Berakal, Mati Beriman. Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi orang lain.

Berangkat dengan penuh keyakinan. Berjalan dengan penuh keikhlasan dan Istiqomah dalam menghadapi cobaan. Hanya kepada Allah saya mengabdikan, memohon ampunan dan pertolongannya.

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk kedua orang tua saya tercinta, adik-adik saya, teman-teman saya dan semua pihak yang telah membantu saya menyelesaikan tugas akhir ini. Jazakallahu Khairan

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepadaNya kami memuji, memohon pertolongan, dan mohon keampunan. Kami berlindung kepadaNya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barangsiapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan, dan barangsiapa yang tersesat dari jalanNya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Dan aku bersaksi bahwa tiada sembah yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagiNya. Dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hambaNya dan RasulNya.

Atas petunjuk dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul: “Implementasi Kontrol SRM (Switched Reluctance Motor) sebagai Pengendali Model Kendaraan Listrik”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan (Diploma-IV) pada Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika di Politeknik Manufaktur Bandung.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penulisan tugas akhir ini hingga selesai, terutama kepada yang saya hormati:

1. Direktur Politeknik Manufaktur Bandung, Bapak Mohammad Nurdin, S.T.,M.A.B.
2. Ketua Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Bapak Ismail Rokhim S.T., M.T.
3. Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Bapak Dr. Setyawan Ajie Sukarno, S.ST., M.T., M.Sc.Eng.
4. Para Pembimbing tugas akhir Bapak Dr. Setyawan Ajie Sukarno, S.ST., M.T., M.Sc.Eng., dan Bapak Afaf Fadhil Rifa'i, S.T., M.T.
5. Para Penguji sidang tugas akhir Ibu Siti Aminah, S.T., M.T., Bapak Muhammad Nursyam Rizal, S.Tr.T., M.Sc., dan Ibu Fitria Suryatini, S.Pd., M.T.

6. Panitia tugas akhir yang telah mempersiapkan mahasiswa dalam melaksanakan rangkaian kegiatan tugas akhir ini.
7. Teristimewa kepada Orang Tua penulis Ibu Susmita dan Bapak Junaidi yang selalu mendoakan, memberikan motivasi dan pengorbanannya baik dari segi moril, materi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Untuk adik-adik saya tersayang Defiz dan Alya yang selalu turut mendoakan dan mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Buat teristimewa Murti Anggraeni Sumanto dan Nurjanah yang selalu kebersamai, mendukung penulis dan menjadi pelipur lara hingga ini, dan semoga tetap hingga seterusnya.
10. Untuk terkhusus teman-teman AEB'20/AEA-2 seperjuangan yang selalu mendukung dan membantu penulis dalam segala keadaan.
11. Buat rekan-rekan AE'20 yang telah berjuang bersama dalam melaksanakan perkuliahan.
12. Serta teman-teman penulis yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu yang selalu mendukung penulis dalam segala keadaan.

Akhir kata penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun demi kesempurnaannya dan semoga bermanfaat bagi kita semua. Aamiiiin Ya Rabbal Alamin.

Bandung, Agustus 2024

Penulis

ABSTRAK

Penurunan cadangan bahan bakar minyak mendorong pengembangan kendaraan ramah lingkungan, khususnya kendaraan listrik. *Switched Reluctance Motor* (SRM) menjadi salah satu opsi penggerak kendaraan listrik yang banyak digunakan, karena konstruksi yang sederhana dan tangguh. Kendali PI (Proportional Integral) memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja SRM. Dalam penelitian ini, implementasi kendali PI pada driver SRM untuk model kendaraan listrik dijabarkan dengan penggunaan dinamometer hidrolik sebagai pembebanan, memungkinkan variasi simulasi kondisi berkendara. Penggunaan MATLAB sebagai antarmuka kontrol dan mikrokontroler Arduino memberikan pendekatan menyeluruh dalam mengembangkan sistem kontrol kendaraan listrik. Hasil penelitian model SRM sebagai representasi kendaraan listrik ini menunjukkan perbandingan torsi SRM dengan torsi kendaraan yaitu 1 : 139.69, pada kecepatan SRM 1500 rpm dan kondisi kemiringan jalan maksimum pada 0.15 rad. Implementasi kontrol SRM dengan pengendalian PI menggunakan $K_p = 0.006159$ dan $K_i = 0.054752$ menunjukkan respon sistem dengan *delay time* 1 detik, *rise time* 9 detik, *peak time* 12.5 detik, maksimum *overshoot* 1508 rpm (0.54% dari set point 1500 rpm), dan *settling time* 12.5 detik dengan toleransi *steady state error* sebesar 2% (± 30 rpm). Implementasi pada plant memberikan performa yang lebih stabil dengan *overshoot* 0.54% namun *settling time* lebih lama sebesar 12.5 detik dibandingkan dengan simulasi pada simulink yang lebih cepat dengan *settling time* 0.1181 detik, tetapi *overshoot* lebih besar yaitu 8.881% (1633.21 rpm).

Kata kunci: Arduino, Kendaraan Listrik, Kontrol PI, MATLAB, *Switched Reluctance Motor* (SRM)

ABSTRACT

The depletion of fossil fuel reserves has driven the development of environmentally friendly vehicles, particularly electric vehicles. Switched Reluctance Motors (SRM) have emerged as a popular choice for electric vehicle propulsion due to their simple and robust design. Proportional Integral (PI) control plays a crucial role in enhancing SRM performance. This study details the implementation of PI control in an SRM driver for an electric vehicle model, using a hydraulic dynamometer for load testing to simulate various driving conditions. MATLAB is used as the control interface, while an Arduino microcontroller facilitates the control system development. This study's findings reveal a torque comparison between the SRM and the vehicle at a ratio of 1:139.69, at an SRM speed of 1500 rpm and a maximum road slope of 0.15 rad. The PI control implementation with parameters $K_p = 0.006159$ and $K_i = 0.054752$ resulted in a system response characterized by a delay time of 1 second, rise time of 9 seconds, peak time of 12.5 seconds, maximum overshoot of 1508 rpm (0.54% of the 1500 rpm set point), and a settling time of 12.5 seconds with a steady-state error tolerance of 2% (± 30 rpm). The physical implementation provided more stable performance with an overshoot of 0.54%, though the settling time was longer at 12.5 seconds compared to the Simulink simulation, which exhibited a faster settling time of 0.1181 seconds but a larger overshoot of 8.881% (1633.21 rpm).

Keywords: *Arduino, Electric Vehicle, PI Control, MATLAB, Switched Reluctance Motor (SRM)*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN ORISINALITAS	i
PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)	iii
MOTO PRIBADI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xiv
I. BAB I PENDAHULUAN	I-1
I.1 Latar Belakang	I-1
I.2 Rumusan Masalah	I-3
I.3 Batasan Masalah	I-3
I.4 Tujuan dan Manfaat	I-4
I.5 Sistematika Penulisan	I-4
II. BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
II.1 Tinjauan Teori	II-1
II.1.1 Switched Reluctance Motor (SRM)	II-1
II.1.2 Dinamika Kendaraan	II-4
II.1.3 Sistem Kendali	II-6
II.1.4 Respon Transien dan <i>Steady State</i>	II-9
II.1.5 Kontrol Proporsional-Integral	II-11
II.2 Tinjauan Alat	II-12
II.2.1 Arduino UNO	II-12
II.2.2 Rotary Encoder	II-14
II.2.3 IR Speed Sensor LM393	II-14
II.3 Studi Penelitian Terdahulu	II-15
III. BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH	III-1
III.1 Metodologi Penelitian	III-1
III.2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian	III-2
III.2.1 Studi Literatur Mengenai SRM dan Kendali PI	III-2

III.2.2	Rumusan Masalah pada Kontrol Kecepatan SRM.....	III-2
III.2.3	Gambaran Umum Sistem Pembebanan SRM	III-2
III.2.4	Desain Sistem.....	III-3
III.2.5	Perancangan Panel Kontrol, Plant, dan Sistem Kendali	III-4
III.2.5.1	Perancangan Panel Kontrol dan Plant	III-4
III.2.5.2	Perancangan Sistem Kendali	III-7
III.2.6	Membangun Model Dinamis Kendaraan	III-10
III.2.6.1	Perhitungan Gaya Hambatan Aerodinamis	III-10
III.2.6.2	Perhitungan Gaya Hambatan Rolling.....	III-11
III.2.6.3	Perhitungan Gaya Hambatan Tanjakan.....	III-11
III.2.6.4	Perhitungan Gaya Hambatan Total	III-12
III.2.7	Implementasi.....	III-13
III.2.8	Pengujian.....	III-13
IV.	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	IV-1
IV.1	Model SRM sebagai Kendaraan Listrik.....	IV-1
IV.1.1	Torsi Kendaraan	IV-1
IV.1.2	Torsi SRM.....	IV-2
IV.1.3	Perbandingan Torsi SRM dengan Torsi Kendaraan.....	IV-2
IV.2	Pengujian IR Speed Sensor LM393.....	IV-3
IV.3	Pengontrolan Kecepatan SRM dengan Kendali PI	IV-4
IV.3.1	Hasil Implementasi pada Plant.....	IV-4
IV.3.2	Hasil Simulasi pada Simulink	IV-5
IV.4	Analisis Performa Kontrol SRM sebagai Pengendali Model Kendaraan	IV-5
V.	BAB V PENUTUP.....	V-1
V.1	Kesimpulan.....	V-1
V.2	Saran.....	V-1
	DAFTAR PUSTAKA	xvi
	LAMPIRAN.....	xx

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Koefisien Hambatan Aerodinamis [17].....	II-4
Tabel II. 2 Nilai Rata-rata Hambatan Rolling [17]	II-5
Tabel II. 3 Spesifikasi Arduino UNO [20].....	II-13
Tabel II. 4 Penelitian Terdahulu.....	II-15
Tabel III. 1 Kriteria Kendaraan.....	III-10
Tabel III. 2 Perhitungan Hambatan Total untuk Berbagai Sudut Tanjakan.....	III-12
Tabel IV. 1 Nilai Torsi berdasarkan Gaya Hambatan Total Kendaraan.....	IV-1
Tabel IV. 2 Data Perbandingan Pembacaan IR Speed Sensor dengan Kecepatan Aktual SRM	IV-3
Tabel IV. 3 Perbandingan Respon Sistem dari Hasil Implementasi pada Plant dengan Hasil Simulasi pada Simulink.....	IV-6

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 SRM [15]	II-1
Gambar II. 2 Rangkaian Ekvivalen SRM Satu Fasa [6]	II-2
Gambar II. 3 Gaya yang Bekerja pada Mobil yang Melaju [16]	II-6
Gambar II. 4 Gambaran Sederhana Sistem Kendali [18].....	II-6
Gambar II. 5 Blok Diagram Sistem Kendali <i>Open-Loop</i> [18].....	II-7
Gambar II. 6 Blok Diagram Sistem Kendali <i>Closed-Loop</i> [18]	II-8
Gambar II. 7 Respon Transien dan Respon Keadaan Tunak (<i>Steady State</i>) [19]	II-10
Gambar II. 8 Skema Kontrol Proporsional-Integral [3]	II-11
Gambar II. 9 Arduino UNO [20].....	II-12
Gambar II. 11 IR <i>Speed Sensor</i> LM393 [26]	II-14
Gambar III. 1 Diagram Alir Penelitian	III-1
Gambar III. 2 Gambaran Umum Sistem	III-2
Gambar III. 3 Desain Pemodelan Sistem	III-3
Gambar III. 4 Desain Sistem.....	III-4
Gambar III. 5 Plant Sistem.....	III-5
Gambar III. 6 Panel Kontrol.....	III-5
Gambar III. 7 SRM dan Sensor Kecepatan.....	III-6
Gambar III. 8 <i>Wiring</i> Panel Kontrol	III-7
Gambar III. 9 Diagram Alir Program.....	III-8
Gambar III. 10 Antarmuka <i>App Designer</i>	III-9
Gambar III. 11 <i>Simulink</i>	III-9
Gambar IV. 1 Grafik Respon Sistem Hasil Implementasi pada Plant	IV-4
Gambar IV. 3 Respon Sistem pada Simulasi Simulink	IV-5

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Arduino UNO

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

SRM	= <i>Switched Reluctance Motor</i>
PID	= Proporsional-Integral-Derivatif
kW	= Kilowatt
psi	= Pounds per Square Inch
emf	= Electromotive force (gaya gerak listrik)
DC	= Direct current (arus searah)
RPM	= Revolution per Minute
PWM	= Pulse Width Modulation
Mhz	= Megahertz
EEPROM	= Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
KB	= Kilobyte
RAM	= Random-access memory
PSMS	= Permanent Magnet Synchronous Motor
IDE	= Integrated Development Environment
V	= Volt (V)
R_s	= Resistansi (Ohm (Ω))
i	= Arus (A)
$\frac{d\lambda(\theta,i)}{dt}$	= Perubahan fluks magnetik terhadap waktu ($\frac{Wb}{s}$)
λ	= Fluks magnet (Wb)
$L(\theta,i)$	= Induktansi (H)
θ	= Posisi sudut (rad)
t	= Waktu (s)
$\frac{di}{dt}$	= Laju perubahan arus terhadap waktu ($\frac{A}{s}$)
$\frac{d\theta}{dt}$	= Laju perubahan sudut terhadap waktu ($\frac{rad}{s}$)
ω_m	= Kecepatan sudut ($\frac{rad}{s}$)
$\frac{dL(\theta,i)}{d\theta}$	= Turunan induktansi terhadap sudut ($\frac{H}{rad}$)
p_i	= Daya input (W)
p_a	= Daya mekanik (W)
T_e	= Torsi elektromekanik (Nm)

T	= Torsi (Nm)
J	= Momen inersia ($\frac{kg}{m^2}$)
$D\omega$	= Torsi redaman (Nm)
$\frac{d\omega}{dt}$	= Percepatan sudut ($\frac{rad}{s^2}$)
T_L	= Torsi beban (Nm)
F_d	= Gaya hambat (N)
C_d	= Koefisien hambat
ρ	= Densitas udara ($\frac{kg}{m^3}$)
V_a	= Kecepatan udara ($\frac{m}{s}$)
A_f	= Luas frontal (m^2)
R_r	= Hambatan gelinding (N)
F_r	= Koefisien hambatan gelinding
m	= Massa (kg)
g	= Percepatan gravitasi ($\frac{m}{s^2}$)
R_g	= Hambatan gradien (N)
W	= Berat (N)
F_t	= Gaya hambatan total (N)
$C(t)$	= Respon sistem
$C_{tr}(t)$	= Respon transien sistem
$C_{ss}(t)$	= Respon steady state sistem
$u(t)$	= Output dari pengontrol PID (<i>Manipulated Variable</i>)
$e(t)$	= Selisih antara set point dengan level aktual (<i>error</i>)
K_p	= Konstanta Proporsional
K_i	= Konstanta derivatif
$\int_0^t e(t) dt$	= Integral dari sinyal error

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Penurunan cadangan bahan bakar minyak yang berlangsung secara terus-menerus menjadi salah satu motivasi berbagai negara di dunia untuk melakukan penelitian dan pengembangan ide kendaraan *zero emission* serta kendaraan *Low-Cost Green Car* (LCGC). Selain itu kekhawatiran akan dampak pencemaran lingkungan juga menjadi salah satu alasan yang mendorong penelitian dan berkembangnya ide tersebut [1]. Inovasi kendaraan listrik dibutuhkan sebagai upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut [2]. Dalam konteks pengaplikasian pada kendaraan listrik, motor listrik menjadi satu-satunya penggerak utama yang dapat menerapkan kedua konsep tersebut [1]. Saat ini terdapat beberapa jenis motor listrik yang digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik, diantaranya yaitu *induction motor*, *permanent magnet synchronous motor*, dan *Switched Reluctance Motor* (SRM) [3].

Studi terkait *Switched Reluctance Motor* (SRM) dan perkembangannya dalam bidang elektronika daya serta pengontrol digital menjadi solusi baru untuk menggantikan semua motor listrik konvensional yang saat ini digunakan dalam teknologi kendaraan listrik atau hibrida [4]. Pada kendaraan listrik, model fisik kendaraan dapat direpresentasikan sebagai SRM. Model kendaraan terdiri dari model fisik dan model lingkungan berkendaraan [5]. Model fisik merupakan dimensi dan berat kendaraan yang dipengaruhi oleh internal dan eksternal kendaraan. Model fisik kendaraan dapat direpresentasikan dengan torsi yang dihasilkan oleh SRM [5]. Sebagai motor listrik penggerak, SRM menjadi pilihan utama. SRM banyak digunakan dikarenakan konstruksi yang sederhana dan tangguh, kemampuan operasi pada berbagai kecepatan, sistem pengendalian arus yang sederhana, rasio torsi terhadap inersia yang tinggi, konsistensi, dan biaya yang rendah dan toleransi kesalahan saat pengoperasiannya [5]-[9]. Namun, SRM masih memiliki kekurangan, seperti kebisingan, riak torsi, dan topologi konverter yang perlu dirancang khusus, tetapi hal tersebut dapat diatasi dengan teknik pengendalian yang efektif [1], [9]. Konstruksi SRM terdiri dari gulungan medan yang terpasang hanya pada stator, sementara rotor tidak dilengkapi dengan magnet atau gulungan [6],

[10]. Reluktansi magnetik rotor menciptakan gaya setiap kali gulungan stator digerakan, yang membantu menyelaraskan kutub rotor dengan kutub stator. Untuk menjaga rotasi, diperlukan teknik pengendalian yang sesuai [10]. Salah satu teknik pengendalian yang dapat diterapkan yaitu metode kendali PI (Proporsional-Integral) [3], [11].

Kendali PI merupakan salah satu teknik kontrol yang sering dipakai dalam rekayasa kendali [11]. Kendali PI merupakan mekanisme loop kontrol dengan umpan balik yang membutuhkan pengaturan kontrol yang kontinu [11]. Kendali PI banyak digunakan dalam aplikasi motor listrik penggerak karena kemudahannya dalam implementasi, respons yang cepat, dan efisien [12]. Kendali PI merupakan gabungan dari kendali proporsional dan integral yang dapat digunakan untuk menghasilkan kontrol yang tepat dan optimal [8]. Kendali proporsional digunakan sebagai gain yang berfungsi untuk mencapai setpoint, dan kendali integral yang digunakan untuk mempercepat respon sistem [11].

Pada penelitian sebelumnya [3] telah dilakukan pengendalian PI pada SRM dengan pendekatan linear. Sinyal kendali yang digunakan hanya menggunakan sinyal kendali positif tanpa efek pengeraman. Pada penelitian terdahulu ini sistem yang diimplementasikan mampu melakukan *tracking* pada *setpoint* 400 RPM, 600 RPM, dan 800 RPM dengan hasil respon sistem yang cukup baik walaupun *overshoot* yang cukup tinggi pada *setpoint* 400RPM dan 600 RPM yaitu sebesar 52.75% dan 62.16%. Selain itu, pada penelitian [8] menunjukkan tiga metode pengendalian terhadap SRM, diantaranya yaitu kendali PID. Pada penelitian ini dijelaskan bahwa kendali proporsional dan integral dapat digunakan untuk mengurangi nilai *error*, dan kendali derivatif digunakan untuk menghilangkan variasi *error* yang mendadak pada SRM. Penelitian lain [11] juga menunjukkan perbedaan respon sistem pada kendali PI dan PID, penelitian ini menunjukan bahwa *rise time* pada kendali PI yang lebih cepat dan *overshoot* yang lebih kecil dibanding kendali PID.

Pengendalian PI dapat menggunakan software MATLAB sebagai simulasi dan antarmukanya. Simulasi kontrol PI menggunakan MATLAB berguna untuk pemodelan serta melihat respon sistem dari model kendaraan listrik [3]. Telah banyak penelitian yang memanfaatkan MATLAB untuk berbagai keperluan, termasuk pemodelan perancangan, implementasi, dan analisis siklus penggerak

pada kendaraan listrik. Pada MATLAB terdapat beberapa emulator yang dapat digunakan untuk mensimulasikan perilaku kendaraan listrik tanpa memerlukan fisik kendaraan yang sebenarnya, salah satunya yaitu Arduino UNO [13].

Berdasarkan pemaparan latar belakang tersebut, pada penelitian kali ini akan dilakukan implementasi pengendalian PI pada SRM melalui driver SRM. Perbedaannya dengan penelitian sebelumnya yaitu dengan adanya pembebanan dari dinamometer hidrolik. Kendali PI dilakukan untuk mendapatkan respon sistem yang cepat dengan tujuan agar gaya yang terjadi pada SRM tidak berubah ketika dilakukan pembebanan. Dengan torsi yang dihasilkan SRM sebagai representasi model kendaraan listrik, dan pembebanan yang merupakan representasi lingkungan berkendara. Implementasi dilakukan dengan menggunakan mikrokontroler Arduino UNO beserta antarmuka pada *software* MATLAB.

I.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, rumusan masalah penelitian dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat model kendaraan listrik pada SRM agar sesuai dengan model kendaraan listrik?
2. Bagaimana implementasi kontrol SRM sebagai pengendali model kendaraan listrik berbasis PI?
3. Bagaimana performa kontrol SRM sebagai pengendali model kendaraan listrik yang dibebani sesuai dengan kondisi lingkungan berkendara?

I.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ada, agar fokus penelitian tetap terarah, ruang lingkup dan batasan penelitian ini akan dijelaskan secara spesifik, termasuk mengidentifikasi aspek-aspek tertentu yang akan menjadi pusat perhatian dan yang tidak akan diulas lebih jauh:

1. Motor SRM yang digunakan memiliki daya 1 kW.
2. Pembebanan konstan SRM menggunakan sistem hidrolik dengan beban maksimal 1500 psi.

3. Model kendaraan listrik menggunakan model longitudinal dengan hanya melihat pengaruh lingkungan berupa angin dan kondisi permukaan jalan pada cuaca yang cerah.

I.4 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Memperoleh model kendaraan listrik pada SRM yang sesuai dengan model kendaraan listrik.
2. Mengimplementasikan kontrol SRM sebagai pengendali model kendaraan listrik berbasis PI.
3. Menganalisis performa kontrol SRM sebagai pengendali model kendaraan listrik yang dibebani sesuai dengan kondisi lingkungan berkendara.

I.5 Sistematika Penulisan

Sistematika Karya Tulis Ilmiah Tugas Akhir ini dibahas dengan penjabaran sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi gambaran umum tentang landasan teori, menjelaskan istilah dan ilmu terkait, serta meninjau hasil penelitian terdahulu dengan topik atau kajian yang sama.

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH, berisi langkah-langkah penyelesaian tugas akhir, meliputi gambaran umum sistem, perancangan sistem, dan perencanaan pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi pemaparan hasil pengujian yang dilakukan pada beberapa domain dan sistem, dengan memperhatikan tuntutan yang harus dicapai.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan yang diperoleh dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.