

SKRIPSI
DESAIN SISTEM PENEREMAN REGENERATIF
PADA MOTOR BLDC *SENSORLESS*



Disusun untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Sriwijaya

Oleh :

PRIMA NUGRAHA ADIANSYAH

03041281722049

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2022

LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN SISTEM Pengereman REGENERATIF
PADA MOTOR BLDC *SENSORLESS*



SKRIPSI


Disusun untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya

Oleh :

PRIMA NUGRAHA ADIANSYAH

03041281722049

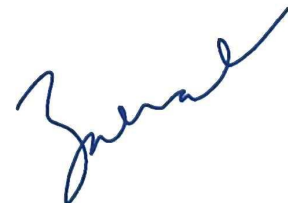
Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro



M. Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197108141999031005

Palembang, 18 Juli 2022

Menyetujui,
Pembimbing Utama



Ir. Zaenal Husin, M.Sc.
NIP. 195602141985031002

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Prima Nugraha Adiansyah
NIM : 03041281722049
Fakultas : Teknik
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro
Universitas : Universitas Sriwijaya

Hasil Pengecekan *Software iThenticate/Turnitin* : 1%

Menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul “Desain Sistem Pengereman Regeneratif Pada Motor Bldc *Sensorless*”. merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam karya ilmiah ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan tanpa paksaan.

Palembang, 18 Juli 2022



Prima Nugraha Adiansyah

NIM. 03041281722049

HALAMAN PERNYATAAN DOSEN

Saya sebagai Pembimbing dengan ini menyatakan bahwa saya telah membaca dan menyetujui skripsi ini dan dalam pandangan saya ruang lingkup dan kualitas skripsi ini mencukupi sebagai skripsi mahasiswa sarjana strata satu (S1).

Tanda Tangan

:  _____

Pembimbing Utama : Ir. Zaenal Husin, M.Sc.

Tanggal

: 22 / Juli / 2022

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK
KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Prima Nugraha Adiansyah
NIM : 03041281722049
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**DESAIN SISTEM Pengereman REGENERATIF
PADA MOTOR BLDC *SENSORLESS***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih media /formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tulisan saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di Palembang

Pada tanggal : 18 Juli 2022

Yang menyatakan,



Prima Nugraha Adiansyah
NIM. 03041281722049

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah ﷻ serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad ﷺ, keluarga dan para sahabat Tuhan yang Maha Esa. Atas Berkat dan Kasih dari Tuhan, keluarga dan para sahabat. Berkat rahmat dan karunia Allah ﷻ, penulis dapat menyelesaikan skripsi “Desain Rangkain Penguat Tegangan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut”.

Pembuatan skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya dan Ibu Dr. Eng. Suci Dwijayanti S.T., M.S. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya.
2. Bapak Ir. Zaenal Husin, M.Sc selaku pembimbing utama tugas akhir ini yang telah memberikan bimbingan dan memberikan ilmu selama proses penulisan skripsi.
3. Bapak Dr. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T. dan Ibu Dr. Eng. Suci Dwijayanti S.T., M.S. selaku pencetus dan memberikan bimbingan pada tugas akhir ini serta pengembang ide.
4. Dosen pembimbing akademik, bapak Dr. Ir. H. Syamsuri Zaini, M.M. yang telah memberikan arahan serta bimbingan kepada penulis selama masa perkuliahan.
5. Segenap Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan.
6. Orang tua, saudara, keluarga yang selalu memberikan semangat dan memberi dukungan baik secara mental, fisik, maupun finansial.
7. Sri Weda Sari yang menjadi tempat cerita suka duka dan selalu memberikan support terbaiknya kepada penulis.

8. Muhammad Nuraji Abdilah, dan teman-teman satu angkatan konsentrasi Teknik kendali dan Komputer yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini khususnya.
9. Rekan satu perjuangan menulis skripsi dengan tempat berbagi keluh kesah (M. Rizky Bayu Prasetyo, Ari Gunawan, Hauzaan Kalimatullah, M. Gilang Ramadhan, M. Nazri, Achmad Syaugi Ramadhan).
10. Keluarga besar Teknik Elektro 2017, Kampus indralaya dan Palembang Universitas Sriwijaya, kakak dan adik tingkat Teknik Elektro 2014-2020 Universitas Sriwijaya
11. Pihak-pihak yang sangat membantu di dalam penyusunan skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Di dalam penyusunan skripsi ini, masih terdapat kekurangan karena keterbatasan penyusun, oleh karena itu penyusun mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar dapat menjadi evaluasi dan berguna untuk penyusun dimasa yang akan datang.

Palembang, 18 Juli 2022



Prima Nugraha Adiansyah
NIM. 03041281722049

ABSTRAK

DESAIN SISTEM PENEREMAN REGENERATIF

PADA MOTOR BLDC SENSORLESS

(Prima Nugraha Adiansyah, 03041281722049, 2022, 57 halaman)

Kecelakaan dapat terjadi karena beberapa faktor, salah satunya karena faktor manusia. Salah satu sarana perangkat yang memegang peranan besar dalam keamanan saat berkendara ialah pada pengereman. selain dibutuhkan keamanan berupa pengereman, jarak tempuh juga menjadi masalah dalam pengoperasian kendaraan listrik dikarenakan rendahnya kapasitas baterai yang terpasang pada kendaraan tersebut. Umumnya pengereman dilakukan secara mekanik, namun hal ini tergolong kurang efektif dikarenakan banyak membuang energi kinetik yang seharusnya dapat dimanfaatkan kembali menjadi energi listrik untuk meningkatkan jarak tempuh dari suatu kendaraan. Sistem pengereman regeneratif sangatlah cocok mengatasi kedua hal ini. Oleh sebab itu, penelitian dilakukan untuk mengimplementasikan sistem pengereman regeneratif pada motor BLDC Sensorless yang biasanya digunakan pada kendaraan listrik dan dapat menghasilkan BEMF dari pengereman tersebut. Pengereman regeneratif berhasil diterapkan dan dapat mempersingkat waktu yang dibutuhkan untuk perlambatan motor dengan waktu rata - rata lama 0,4654 detik, sedangkan untuk waktu yang paling cepat yaitu 0,143 detik dan yang paling lama 0,661 detik. Selain itu dengan penerapan pengereman ini dapat menghasilkan tegangan maksimum pada kapasitor sebesar 13,13 Volt dan memiliki arus maksimum yaitu 8,82 Ampere pada saat pengereman regeneratif berlangsung. Kemudian, pada saat kapasitor terhubung dengan baterai dapat meningkatkan tegangan baterai yang awalnya 12 Volt hingga sebesar 14,28 Volt.

Kata kunci: *Pengereman Regeneratif, Desain Sistem, Kendaraan Listrik, Motor dan BLDC Sensorless.*

ABSTRACT

DESIGN OF REGENERATIVE BRAKING SYSTEM ON SENSORLESS BLDC MOTOR

(Prima Nugraha Adiansyah, 03041281722049, 2022, 57 pages)

Accidents can occur due to several factors, one of which is the human factor. One of the means of devices that plays a big role in safety when driving is braking. In addition to the need for safety in the form of braking, mileage is also a problem in the operation of electric vehicles due to the low capacity of the battery installed in the vehicle. Generally, braking is done mechanically, but this is classified as less effective because it wastes a lot of kinetic energy that should be reused into electrical energy to increase the mileage of a vehicle. The regenerative braking system is very suitable to overcome these two things. Therefore, research was conducted to implement a regenerative braking system on BLDC. Sensorless motors, which are usually used in electric vehicles, can produce BEMF from braking. Regenerative braking has been successfully applied and can shorten the time required to decelerate the motor with an average time of 0.4654 seconds, while the fastest time is 0.143 seconds and the longest is 0.661 seconds. In addition, the application of this braking can produce a maximum voltage on the capacitor of 13.13 volts and has a maximum current of 8.82 amps when regenerative braking takes place. Then, when the capacitor is connected to the battery, it can increase the battery voltage from 12 volts to 14.28 volts.

Keyword: *Regenerative Braking, System Design, Electric Vehicle, Motor and BLDC Sensorless.*

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| SKRIPSI..... | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS | iii |
| HALAMAN PERNYATAAN DOSEN..... | iv |
| PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS..... | v |
| KATA PENGANTAR..... | vi |
| ABSTRAK | viii |
| ABSTRACT..... | ix |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xvi |

BAB I PENDAHULUAN

| | |
|-------------------------------|---|
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Pembatasan Masalah | 3 |
| 1.5 Keaslian Penelitian | 3 |

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

| | |
|-------------------------------------|----|
| 2.1 <i>State of The Art</i> | 5 |
| 2.2 <i>Autonomous Vehicle</i> | 15 |
| 2.3 Motor BLDC | 16 |
| 2.4 Pengereman Regeneratif..... | 18 |
| 2.6 Baterai Li-Po | 18 |

BAB III METODELOGI PENELITIAN

| | |
|---------------------------|----|
| 3.1 Studi Literatur | 20 |
|---------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 3.2 Perancangan Sistem | 21 |
| 3.2.1 Perancangan Pemograman | 21 |
| 3.2.2 Perancangan <i>Hardware</i> | 22 |
| 3.3 Pengujian Sistem | 27 |

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

| | |
|--|----|
| 4.1 Penentuan Model Rangkaian..... | 28 |
| 4.2 Perancangan Alat..... | 31 |
| 4.3 Pengujian Sistem Pengereman Regeneratif..... | 32 |
| 4.3.1 Pengujian Sistem Pengereman Menggunakan Kapasitor 12uF..... | 33 |
| 4.3.1.1 Kecepatan Motor dengan kapasitor 12uF | 33 |
| 4.3.1.2 Tegangan Kapasitor dengan kapasitor 12uF..... | 40 |
| 4.3.1.3 Tegangan Baterai dengan kapasitor 12uF | 41 |
| 4.3.1.4 Arus Kapasitor dengan kapasitor 12uF..... | 42 |
| 4.3.2 Pengujian Sistem Pengereman Menggunakan Kapasitor 200uF..... | 43 |
| 4.3.1.1 Kecepatan Motor dengan kapasitor 200uF | 44 |
| 4.3.1.2 Tegangan Kapasitor dengan kapasitor 200uF | 51 |
| 4.3.1.3 Tegangan Baterai dengan kapasitor 200uF..... | 52 |
| 4.3.1.4 Arus Kapasitor dengan kapasitor 200uF | 53 |
| 4.3.3 Perbandingan Pengereman Regeneratif menggunakan kapasitor 12 uF dan 200 uF..... | 54 |

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

| | |
|---------------------|----|
| 5.1 Kesimpulan..... | 58 |
| 5.2 Saran..... | 58 |

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Hasil simulasi dari sistem kontrol fuzzy & PID..... | 6 |
| Gambar 2.2 Struktur pendistribusian torsi pengereman..... | 7 |
| Gambar 2.3 Perbandingan pengisian arus dengan PID dan NN <i>self-adaptive</i> PID . | 9 |
| Gambar 2.4 Perbandingan torsi pengereman dengan SMC dan PI | 10 |
| Gambar 2.5 <i>Waveform</i> jarak tempuh dan arus pengereman dengan SMC dan PI. | 11 |
| Gambar 2.6 Rangkaian Ekuivalent kontrol MOSFET <i>single switch</i> | 11 |
| Gambar 2.7 Struktur sistem kontrol pengereman regeneratif | 12 |
| Gambar 2.8 Fungsi keanggotaan pengereman regeneratif..... | 13 |
| Gambar 2.9 Hasil simulasi dengan masukan rendah fuzzy control & PID..... | 14 |
| Gambar 2.10 Hasil simulasi dengan masukan 50% fuzzy control & PID | 14 |
| Gambar 2.11 Energi yang terpulihkan dari pengereman regeneratif | 15 |
| Gambar 2.12 Kendaraan Listrik..... | 16 |
| Gambar 2.13 Motor BLDC | 17 |
| Gambar 2.14 Baterai Li-Po | 19 |
| Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian | 20 |
| Gambar 3.2 <i>Flowchart</i> sistem kerja..... | 21 |
| Gambar 3.3 Diagram Perancangan perangkat keras | 22 |
| Gambar 3.4 Motor BLDC <i>Sensorless</i> Techtonics Sunnysky A2212 | 22 |
| Gambar 3.5 MOSFET IRF-3205 | 23 |
| Gambar 3.6 Arduino UNO R3 | 23 |
| Gambar 3.7 ESC (Electronic Speed Control) ZTW Spider Series 30 A..... | 24 |
| Gambar 3.8 Potensiometer | 24 |
| Gambar 3.9 Kapasitor Pompa | 25 |
| Gambar 3.10 OLED | 25 |
| Gambar 3.11 Sensor Tegangan | 26 |
| Gambar 3.12 Sensor Arus Sensor Arus ACS-712 | 26 |
| Gambar 4.1 Desain Rangkaian Pengereman Regeneratif | 28 |
| Gambar 4.2 Loop Pengisian Kapasitor | 29 |
| Gambar 4.3 Kapasitor terhubung dengan baterai..... | 30 |
| Gambar 4.4 Alat Uji Sistem Pengereman Regeneratif Motor BLDC <i>Sensorless</i> .. | 31 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.5 Arduino IDE | 32 |
| Gambar 4.6 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 10% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 34 |
| Gambar 4.7 Grafik Hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 20% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 34 |
| Gambar 4.8 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 30% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 35 |
| Gambar 4.9 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 40% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 36 |
| Gambar 4.10 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 50% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 36 |
| Gambar 4.11 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 60% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 37 |
| Gambar 4.12 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 70% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 38 |
| Gambar 4.13 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 80% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 38 |
| Gambar 4.14 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 90% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 39 |
| Gambar 4.15 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 100% dan menggunakan kapasitor 12 uF. | 40 |
| Gambar 4.16 Grafik tegangan Kapasitor 12 uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda | 41 |
| Gambar 4.17 Grafik tegangan Baterai dengan kapasitor 12 uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda..... | 42 |
| Gambar 4.18 Grafik arus Kapasitor 12 uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda. | 43 |
| Gambar 4.19 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 10% dan menggunakan kapasitor 200uF. | 44 |
| Gambar 4.20 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 20% dan menggunakan kapasitor 200uF. | 45 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.21 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 30% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 45 |
| Gambar 4.22 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 40% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 46 |
| Gambar 4.23 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 50% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 47 |
| Gambar 4.24 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 60% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 47 |
| Gambar 4.25 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 70% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 48 |
| Gambar 4.26 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 80% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 49 |
| Gambar 4.27 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 90% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 50 |
| Gambar 4.28 Grafik hubungan antara RPM dan waktu ketika kecepatan motor 100% dan menggunakan kapasitor 200 uF. | 50 |
| Gambar 4.29 Grafik tegangan Kapasitor 200 uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda | 51 |
| Gambar 4.30 Grafik tegangan Baterai dengan kapasitor 200uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda..... | 52 |
| Gambar 4.31 Grafik arus Kapasitor 200 uF saat melakukan pengereman dengan <i>duty cycle</i> yang berbeda. | 53 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Aturan <i>fuzzy control</i> 3 input..... | 5 |
| Tabel 2.2 Perbandingan hasil simulasi dengan metode UDDS | 7 |
| Tabel 2.3 Perbandingan hasil simulasi dengan metode EUDC..... | 8 |
| Tabel 2.4 Perbandingan hasil simulasi dengan metode FTP..... | 8 |
| Tabel 4.1 Pengaruh perbedaan kapasitor 12 uF dan 200 uF terhadap kecepatan motor..... | 55 |
| Tabel 4.2 Pengaruh perbedaan kapasitor 12 uF dan 200 uF terhadap tegangan dan arus pada kapasitor dan baterai..... | 56 |

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1.** Gambar Alat Prototype.
- Lampiran 2.** Grafik hasil dari pengujian dengan Arduino IDE (Serial Plotter).
- Lampiran 3.** Komponen – Komponen rangkaian pengereman regeneratif.
- Lampiran 4.** Program Alat Uji Pengereman Regeneratif.
- Lampiran 5.** Data Pengereman Regeneratif.
- Lampiran 6.** Perbandingan Tegangan dan Arus Terhadap Perbedaan Nilai Kapasitansi.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Angka kecelakaan lalu lintas (lakalantas) yang terjadi di Indonesia masihlah sangat tinggi. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik jumlah kecelakaan lalu lintas meningkat dari tahun 2017 hingga tahun 2019 yaitu dari 104.327 menjadi sebanyak 116.411 yang terdiri dari 25.671 meninggal dunia, 12.475 luka berat dan 137.342 luka ringan [1]. Kecelakaan dapat terjadi karena beberapa faktor, salah satunya karena faktor manusia. Berdasarkan hal tersebut, penting adanya suatu alat transportasi yang aman dan nyaman yang dapat digunakan masyarakat. Salah satu sarana perangkat yang memegang peranan besar dalam keamanan saat berkendara ialah pada pengereman.

Motor *Brushless* DC sangat sering digunakan pada kendaraan listrik, seperti mobil listrik ataupun sepeda listrik. Umumnya motor BLDC memiliki sensor sebagai acuan pengontrolan sistem komutasi agar motor dapat berjalan secara baik dan teratur. Akan tetapi, terdapat motor BLDC yang bisa bekerja tanpa perlu sensor seperti umumnya atau bisa juga disebut sebagai BLDC *Sensorless*. BLDC *Sensorless* ini bekerja dengan mendeteksi adanya BEMF dan *zero crossing* dalam pengontrolan sistem komutasi agar dapat bekerja sedemikian rupa.

Motor BLDC *Sensorless* biasanya dapat digunakan pada drone, mobil RC ataupun kendaraan yang memiliki berat ringan. Umumnya kendaraan tipe seperti ini biasanya hanya mengandalkan *speed control* dalam mengendalikan kecepatan saat melaju ataupun melambat. Terkadang ada beberapa kondisi yang mengharuskan adanya pengereman, namun hal ini jarang ditemui pengaplikasiannya pada kendaraan tersebut. Maka dari itu, selain dibutuhkananya keamanan lebih berupa pengereman, jarak tempuh juga menjadi masalah dalam pengoperasian kendaraan ini dikarenakan rendahnya kapasitas baterai yang umumnya dipasang pada kendaraan seperti ini.

Sistem pengereman regeneratif cukup menjadi favorit yang digunakan oleh para peneliti, beberapa penelitian tersebut cenderung menggunakan motor BLDC pada kendaraan listrik [2]–[5]. Hal ini berlangsung seiring dengan perkembangan

mobil listrik, yang mana membutuhkan daya tambahan untuk menambah jarak tempuh yang dapat dilakukan kendaraan tersebut. Sistem pengereman regeneratif ini dapat dikontrol dengan menggunakan kombinasi *fuzzy logic* & PID[2][3], SMC (*Sliding Mode Control*) [5], *Neural Network Self-adaptive PID Control* [6]. Dari beberapa penelitian dengan menggunakan sistem kontrol tersebut menunjukkan hasil yang baik dalam efisiensi pemanfaatan energi yang terbuang saat melakukan pengereman dan dapat meningkatkan jarak tempuh dari suatu kendaraan hingga 23,9% apabila dibandingkan dengan tidak memakai sistem pengereman ini [5].

Berdasarkan kebutuhan keamanan dan peningkatan jarak tempuh dalam pengoperasian kendaraan. Sistem pengereman regeneratif sangatlah cocok mengatasi kedua hal ini. Berdasarkan hal inilah sisa putaran dari motor listrik yang bekerja sebagai generator akan terkonversi menjadi sebuah energi listrik yang dapat digunakan mengisi daya pada baterai [7].

Pada penelitian ini, membahas mengenai desain sistem pengereman regenerative pada motor BLDC *sensorless* yang biasanya motor ini digunakan pada drone ataupun kendaraan ringan lainnya. Sistem pengereman ini dipilih karena efisiensi dalam pemanfaatan energi yang terbuang selama melakukan pengereman dan pernah diuji pada penelitian yang terdahulu dengan menggunakan motor BLDC [8]. Selain itu, sistem pengereman ini juga dapat di aplikasikan pada drone ataupun kendaraan listrik yang ringan seperti UAV, ROV, UGV ataupun yang lainnya.

1.2 Perumusan Masalah

Perangkat pengaman yang paling penting dalam suatu kendaraan yaitu pengereman. Umumnya pengereman dilakukan secara mekanik, namun hal ini tergolong kurang efektif dikarenakan banyak membuang energi kinetik yang seharusnya dapat dimanfaatkan kembali menjadi energi listrik untuk meningkatkan jarak tempuh dari suatu kendaraan. Perancangan pengereman suatu kendaraan harus memiliki sistem kontrol yang dapat bekerja secara baik agar dapat bekerja sesuai yang diharapkan serta dapat memanfaatkan energy yang terbuang sebaik mungkin.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengimplementasikan sistem pengereman regeneratif pada motor BLDC *Sensorless*.
2. Pengereman regenerative berhasil menghasilkan *Back electromotive force* (BEMF) atau tegangan balik dari motor BLDC *sensorless*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian sebagai berikut :

1. Menggunakan mikrokontroler Arduino.
2. Menggunakan Bahasa pemrograman Arduino.
3. Menggunakan baterai *Li-Po* 12 Volt sebagai suplai tegangan.
4. Piringan CD digunakan sebagai acuan dalam menghitung rotasi motor.

1.5 Keaslian Penelitian

Pada penelitian yang dilakukan Mr. Rahul Ganpati Chougale dan Prof. C. R. Lakade yang membahas mengenai sistem kontrol dengan kombinasi antara *Fuzzy Logic* dan *PID* yang diterapkan pada sebuah pengereman regeneratif. Mereka menyimpulkan walaupun penggunaan metode *PID* sering diminati tetapi memiliki kelemahan yaitu sulitnya dalam mencapai beberapa parameter dari pengereman seperti kecepatan, kekuatan pengereman, dan *State of Charge (SOC)* [2].

Penelitian mengenai sistem kontrol pengereman regeneratif telah dilakukan oleh Yunliang Wang dan Yonglei Su yang menjelaskan strategi dalam pengereman dengan menggunakan metode *Fuzzy Control*. Mereka melakukan 3 simulasi pada beberapa driving cycles test seperti *Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS)*, *Extra Urban Driving Cycle (EUDC)*, dan *Federal Test Procedure (FTP)* dan berujung pada kesimpulan dengan menggunakan strategi pengereman ini dapat meningkatkan efisiensi dari regenerasi energi saat pengereman sebanyak 50% [9]. Namun, penelitian ini hanya menggunakan simulasi dari MATLAB SIMULINK, tidak melakukan penelitian secara langsung yang hanya sebatas teori.

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh Jianbo Cao, Binggang Cao, Wenzhi Chen dan Peng Xu membahas mengenai perbandingan sistem kontrol dalam pengereman regeneratif dan berkendara dengan menggunakan metode *Neural Network Self-adaptive PID Control* dan PID konvensional. Setelah melakukan simulasi, mereka menyimpulkan bahwa dengan menggunakan metode ini dibandingkan dengan metode PID pada umumnya, metode yang dilakukan mereka lebih performanya yang lebih baik dalam kecepatan respon, steady – state tracking error, mengurangi gangguan dan meningkatkan kestabilan serta keandalan pada mobil listrik [6]

Penelitian yang dilakukan oleh Bo Long, Shin Teak Lim, Ji Hyoung Ryu dan Kil To Chong membahas mengenai perbandingan antara menggunakan metode *PI (Proportional-Integral)* dan *SMC (Sliding Mode Controller)*. Berdasarkan uji coba yang dilakukan mereka terdapat perbedaan efisiensi sebesar 7% saat menggunakan *SMC* ketimbang dengan menggunakan controller *PI*. Saat beroperasi tanpa menggunakan sistem regeneratif jarak tempuh hanya mampu sebesar 50 km. Berdasarkan hal ini, jarak tempuh meningkat sebesar 12% dengan menggunakan sistem pengereman regeneratif dengan kontrol *SMC* hingga mencapai 60 km [5].

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Xiaohong Nian, Fei Peng dan Hang Zhang membahas mengenai sistem pengereman regeneratif yang digerakkan dengan motor *brushless DC*. Simulasi ini diuji dengan tiga *input*, yaitu dengan sedikit *input* dari pedal pengereman, 50% dari pedal pengereman dan 100% dari pedal pengereman. Hasil simulasi dari penelitian ini menunjukkan bahwa energi yang dapat dimanfaatkan kembali dengan rasio sebesar 50% saat menggunakan pengereman regeneratif [3]. Namun, pengujian ini hanya terbatas pada simulasi dengan MATLAB.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, “Jumlah Kecelakaan, Korban Mati, Luka Berat, Luka Ringan, dan Kerugian Materi 2017-2019.” p. 5, 2019, doi: 10.1055/s-2008-1040325.
- [2] R. G. Chougale and C. R. Lakade, “Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor using fuzzy logic,” *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPCSI 2017*, pp. 2167–2171, 2018, doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392101.
- [3] X. Nian, F. Peng, and H. Zhang, “Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5798–5808, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2300059.
- [4] J. Liu, Z. Su, and J. Chen, “Comparison of two electric braking methods with regenerative capability of brushless DC machine and their four-quadrant operation,” *Proc. - 2018 33rd Youth Acad. Annu. Conf. Chinese Assoc. Autom. YAC 2018*, pp. 1116–1120, 2018, doi: 10.1109/YAC.2018.8406538.
- [5] B. Long, S. T. Lim, J. H. Ryu, and K. T. Chong, “Energy-regenerative braking control of electric vehicles using three-phase brushless direct-current motors,” *Energies*, vol. 7, no. 1, pp. 99–114, 2014, doi: 10.3390/en7010099.
- [6] C. Jianbo, C. Binggang, C. Wenzhi, and X. Peng, “Neural network self-adaptive PID control for driving and regenerative braking of electric vehicle,” *Proc. IEEE Int. Conf. Autom. Logist. ICAL 2007*, pp. 2029–2034, 2007, doi: 10.1109/ICAL.2007.4338908.
- [7] D. F. Dity, “Perancangan dan implementasi sistem pengereman regeneratif pada mobil listrik dengan penggerak BLDC menggunakan kontrol logika fuzzy,” *Electr. Eng.*, pp. 1–4, 2016.
- [8] C. L. Lin, H. C. Hung, and J. C. Li, “Active control of regenerative brake for electric vehicles,” *High-Throughput*, vol. 7, no. 4, pp. 1–14, 2018, doi: 10.3390/act7040084.
- [9] Y. Wang and Y. Su, “A research for brake strategy based on fuzzy control in pure electric vehicles,” *Proc. 2015 4th Int. Conf. Comput. Sci. Netw. Technol. ICCSNT 2015*, no. Iccsnt, pp. 689–693, 2016, doi: 10.1109/ICCSNT.2015.7490838.
- [10] N. D. Irimia, F. I. Lazar, M. Luchian, and A. Ipatiov, “Improved fault tolerant control of a redundant actuation system provided with dual stator six phases BLDC motor for autonomous driving applications,” *2018 22nd Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. ICSTCC 2018 - Proc.*, pp. 164–169, 2018, doi: 10.1109/ICSTCC.2018.8540751.

- [11] V. Mach, S. Kovář, J. Valouch, and M. Adámek, “Brushless DC motor control on arduino platform,” *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 94, no. 11, pp. 105–107, 2018, doi: 10.15199/48.2018.11.24.
- [12] D. Vishwakarma and S. Chaurasia, “Regenerative Braking System,” *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.*, vol. 4, no. 03, pp. 27–30, 2017, doi: 10.21090/ijaerd.88558.
- [13] HELMI AULIA RAHMAN, “Pengaruh duty cycle terhadap perpindahan energi pada motor BLDC saat pengereman regeneratif berbasis dsPIC30fF4012,” no. UNIKA SOEGIJAPRANATA SEMARANG., pp. 17–28, 2019.
- [14] M. A. Kashem, A. Fattah, S. M. S. Farhan, and N. Nafis, “Fast Formation of Tubular Plate Deep Cycle Lead Acid Battery by Acid Recirculation System (ACS),” *2nd Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Eng. ECCE 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ECACE.2019.8679320.