TUGAS AKHIR - TF 181801

RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*

YORDAN FANANI
NRP. 02311640000039

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

TUGAS AKHIR - TF 181801

RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*

YORDAN FANANI
NRP. 02311640000039

Dosen Pembimbing:
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

FINAL PROJECT - **TF 181801**

DESIGN OF A REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM USING PROPORTIONAL INTEGRAL CONTROL

YORDAN FANANI
NRP. 02311640000039

Supervisors:
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama	: Yordan Fanani
NRP	: 02311640000039
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM***" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 26 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,

Yordan Fanani

NRP. 02311640000039

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI)
PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*
Oleh:

Yordan Fanani
NRP. 02311640000039

Surabaya, 26 Juli 2020

Menyetujui,
Pembimbing I

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 19690507 1995121 001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FT-IRS ITS

Dr. Suyanto, S.T., M.T
NIP. 19711113 1995121 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Yordan Fanani
NRP. 02311640000039

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Bambang Lelono W., S.T., M.T. …… (Pembimbing I)
2. Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. …… (Ketua Penguji)
3. Dr. Suyanto, S.T., M.T. …… (Penguji I)
4. Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T. …… (Penguji II)

SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*

Nama	**:**	**Yordan Fanani**
NRP	**:**	**02311640000039**
Departemen	**:**	**Teknik Fisika FTIRS - ITS**
Dosen Pembimbing	**:**	**Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.**

ABSTRAK

Teknologi sistem pengereman terkini yang dikenal dan menjadi perangkat standar kendaraan adalah *anti-lock braking system* (ABS) dengan mengoptimalkan nilai *slip ratio*. Pada kendaraan listrik juga terdapat pengereman regeneratif. Yaitu metode yang memanfaatkan regenerasi energi saat dilakukan pengereman dengan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi energi listrik melalui proses menyalurkan energi dari motor listrik ke dalam baterai selama proses pengereman. Oleh karena itu, penelitian kali ini bertujuan untuk merancang pengereman regeneratif ABS dan mengetahui responnya saat diberi kontrol proportional integral. Bagian utama rancang bangun penelitian ini yaitu sistem pengeremen hidraulik, elektrik modulator, sensor kecepatan, sensor pembagi tegangan, motor bldc dan baterai. Komponen tersebut dibangun dengan model *quarter car*. Aktuator yang digunakan adalah *solenoid valve* dan *transmitter* adalah sensor kecepatan kendaraan dan roda dengan menggunakan sensor *proximity*. Sedangkan untuk mengukur nilai SOC baterai menggunakan sensor pembagi tegangan. Dilakukan 5 variasi percobaan untuk mencari nilai kp dan ki yang terbaik. Hasil terbaik dari penelitian adalah dengan nilai kp sebesar 1,5 dan ki sebesar 0,02 menghasilkan *overshoot* sebesar 52 % dan sistem berhenti pada waktu 1,6 detik. Untuk kenaikan SOC baterai tertinggi saat nilai kp 1,5 dan ki 0,04 dengan kenaikan 0,78%.

Kata Kunci: ABS, *regeneratif*, bldc, proportional integral

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OF A REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM USING PROPORTIONAL INTEGRAL CONTROL

Name	**:**	**Yordan Fanani**
NRP	**:**	**02311640000039**
Department	**:**	**Engineering Physics FTIRS – ITS**
Supervisors	**:**	**Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.**

ABSTRACT

The latest braking system technology that is anti lock braking system (ABS) by optimizing the value of the slip ratio. In electric vehicles there is also regenerative braking. The method developed is utilize braking energy regeneration current which converts mechanical energy into electrical energy. Therefore, this study aims are disigning regenerative ABS and know the response when given a proportional integral control. The main parts of the design of this study are the hydraulic braking system, electric modulator, wheel speed sensor, voltage divider sensor, bldc motor and battery. These components are built with the quarter car model. The actuator used is a solenoid valve and the transmitter is a vehicle and wheel speed sensor using proximity sensors. Meanwhile, to measure the SOC value of the battery using a voltage divider sensor. Five variations of experiments were conducted to find the best kp and ki values. The best result of this study is that value of kp 1.5, ki 0.02, the overshoot of the system is 52% and the system stopped at 1.6 seconds. The highest increase battery SOC when the value of kp 1.5 and ki 0.04 with an increase of 0.78%.

Keywords: ABS, regenerative, bldc, proportional integral

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**RANCANG BANGUN KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) PADA *REGENERATIVE ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM*".** Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang turut membantu baik moril maupun materiil dan berperan penting dalam penyelesaian Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Bapak Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T..dan Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T. selaku Kepala Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
4. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan.
5. Seluruh Bapak/Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang ikhlas memberikan ilmu dan didikannya kepada penulis, semoga Allah SWT membalas semuanya dan menjadikan ilmu yang telah diberikan menjadi amal jariyah bagi Bapak/Ibu.
6. Kedua orang tua (Bapak Bambang EkoWiyono dan Ibu Mintuk). Terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
7. Seluruh teman-teman Departemen S1 Teknik Fisika angkatan 2016, dan teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa, terima kasih untuk dukungan dan bantuannya.
8. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

9. Keluarga Workshop Instrumentasi yang banyak membantu menyemangati penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Serta semua orang yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 11 Juni 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL……i
COVER PAGE..... iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT..... xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI..... xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL..... xxi
BAB I PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan.....2
1.4 Batasan Masalah.....3
1.5 Sistematika Laporan 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... 5
2.1 *Anti-Lock Braking System* (ABS).....5
2.2 *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS).....8
2.3 Komponen Pada *Plant* Sistem Pengereman *Regenerative* ABS 9
2.4 Kontrol *Proportional Integral* (PI).....14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... 19
3.1 Studi literatur.....19
3.2 Rancang Bangun Plant *Regenerative Anti-Lock Braking System* 20

3.3 Uji Validasi Plant *Regenerative* ABS 22
3.4 Perancangan Sistem Pengendali Proportional Integral 23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 25
4.1 Pengujian Sensor 25
4.2 Uji Pemodelan Plant R-ABS 27
4.3 Uji Closed Loop Menggunakan Kontrol Proportional Integral (PI) 29
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 41
5.1 Kesimpulan 41
5.2 Saran 41
DAFTAR PUSTAKA 43
LAMPIRAN 47
BIODATA PENULIS 55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 ABS dengan Rem Hidrolik 5
Gambar 2. 2 Kurva perbandingan koefisien gesek dengan slip ratio pada kondisi jalan tertentu 6
Gambar 2. 3 Pengereman Menggunakan ABS dan tanpa ABS 7
Gambar 2. 4 Regenerative Anti-Lock Braking System Configuration 9
Gambar 2. 5 Master Silinder 10
Gambar 2. 6 Selenoid Valve 11
Gambar 2. 7 Brake Switch 11
Gambar 2. 8 Sensor Proximity 12
Gambar 2. 9 Unit Modulator Hidrolik 12
Gambar 2. 10 Tiga posisi operasi unit modulator pengereman ABS 13
Gambar 2. 11 Brushless DC Motor 14
Gambar 2. 12 Grafik SOC Baterai Li-ion 48 volt 15
Gambar 2. 13 Arduino UNO 16
Gambar 2. 14 Diagram blok kontrol proportional integral 17
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian 19
Gambar 3. 2 Skema plant *regenerative anti-lock braking system* 20
Gambar 3. 3 Diagram proses regenerative pada plant 21
Gambar 3. 4 Rangkaian pembagi tegangan 22
Gambar 3. 5 Blok Diagram Sistem Pengendalian PI 23
Gambar 4. 1 Respon *slip ratio open loop* 28
Gambar 4. 2 Respon kecepatan *open loop* 28
Gambar 4. 3 Respon Slip Ratio kp 1,5 dan ki 0,02 29
Gambar 4. 4 Respon kecepatan kp 1,5 dan ki 0,02 30
Gambar 4. 5 Nilai SOC baterai kp 1,5 dan ki 0,02 31
Gambar 4. 6 Respon Slip Ratio kp 1,5 dan ki 0,04 31
Gambar 4. 7 Respon kecepatan kp 1,5 dan ki 0,04 32
Gambar 4. 8 Nilai SOC baterai kp 1,5 dan ki 0,04 33
Gambar 4. 9 Respon Slip Ratio kp 1,8 dan ki 0,02 33
Gambar 4. 10 Respon kecepatan kp 1,8 dan ki 0,02 34

Gambar 4. 11 Nilai SOC baterai kp 1,8 dan ki 0,02 35
Gambar 4. 12 Respon Slip Ratio kp 1,8 dan ki 0,04 35
Gambar 4. 13 Respon kecepatan kp 1,8 dan ki 0,04 36
Gambar 4. 14 Nilai SOC baterai kp 1,8 dan ki 0,04 37
Gambar 4. 15 Respon Slip Ratio kp 1 dan ki 0,04 37
Gambar 4. 16 Respon kecepatan kp 1 dan ki 0,04 38
Gambar 4. 17 Nilai SOC baterai kp 1 dan ki 0,04 39

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Koefisien Gesek Roda - Jalan (Jingang dkk, 2014)..... 6
Tabel 4. 1 Data Kalibrasi sensor proximity.....25
Tabel 4. 2 Data kalibrasi sensor pembagi tegangan..... 26

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan bahan bakar fosil pada zaman yang modern ini masih terbilang cukup tinggi. Tingginya konsumsi bahan bakar minyak (BBM) di Indonesia salah satunya disebabkan pemakaian kendaraan bermotor konvensional atau berbahan bakar fosil yang menjadi sarana transportasi untuk menunjang mobilitas dan beraktivitas sehari-hari. Kendaraan bermotor menjadi salah satu alat trasnportasi yang paling umum digunakan di Indonesia. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS) per tahun 2018 jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mencapai angka 146.858.759 unit (Statistik, 2020). Dengan kemajuan teknologi yang ada sekarang kendaraan listrik atau *electric vehicle* (EV) merupakan salah satu solusi untuk mengurangi dampak negatif dari kendaraan yang berbahan bakar fosil.

Dalam kendaraan listrik, salah satu faktor yang paling penting adalah keamanan (*safety*). Salah satu faktor keamanan (*safety*) yang sangat penting untuk suatu kendaraan adalah sistem pengereman. Dewasa ini, sistem pengereman yang digunakan adalah *anti-lock braking system* (ABS) yang mana sistem pengereman ini memungkinkan roda tidak mengalami penguncian ketika dilakukan pengereman darurat atau pengereman secara mendadak (Chen & Wang, 1996). ABS memberikan pengaruh berupa jarak pengereman (*stopping distance*) yang lebih pendek dan kendaraan masih tetap stabil atau mudah dikendalikan meskipun direm pada kondisi berbelok ataupun jalan licin (Lee & Zak, 2002).

Pada kendaraan listrik juga dikenal adanya pengereman regeneratif. Metode ini digunakan untuk mengatasi kendala utama yang muncul akibat penggunaan baterai yang membutuhkan waktu recharging lama. Pengereman regeneratif adalah sebuah sistem pengereman dengan mengkonversikan energi mekanis sistem menjadi energi listrik melalui proses menyalurkan energi dari motor listrik ke dalam baterai selama proses pengereman (Artikel-Teknologi, 2020). Pada saat pengemudi menginjak pedal gas, supply listrik dari baterai masuk ke motor listrik sehingga mobil berakselerasi, sedangkan pada saat pengemudi melepas pedal gas atau

menginjak pedal rem maka motor listrik akan berubah fungsi menjadi generator sehingga putaran roda mobil seakan-akan terbebani oleh generator tersebut. Pada saat inilah sisa putaran motor listrik akan terkonversi menjadi energi listrik yang digunakan untuk mengisi daya baterai (Dity, 2016).

Meskipun sudah digunakan dalam beberapa dekade terakhir, pengendalian sistem ABS sulit dilakukan karena sistem ABS adalah sistem yang non linier (Chen & Wang, 1996). Sistem nonlinier ini dapat dilihat dari parameter keadaan kendaraan yang sulit diketahui dan karakteristik non linier dari sistem pengereman itu sendiri. Selain itu, banyak hal yang dapat mengganggu sistem yang dapat disebabkan oleh performa komponen yang menurun dan gangguan dari luar sistem yang tidak dapat di prediksi. Sehingga dalam sistem pengereman ABS diperlukan suatu sistem kontrol yang baik yang dapat mengakomodasi ketidaklinier dari sistem pengeream ABS itu sendiri dan metode kontrol *proporsional integral* (PI) dapat digunakan dalam pengendalian sistem pengereman ABS (Antic, 2010).

Berdasarkan uraian diatas, maka permasalahan yang diangkat dalam penelitian tugas akhir ini adalah rancang bangun kontrol *proporsional Integral* (PI) pada *regenerative anti-lock braking system* (ABS) sehingga di hasilkan suatu sistem pengereman yang dapat terhindar dari terkuncinya roda saat proses pengereman terjadi yang dapat meningkatkan keamanan dalam berkendara dan juga pemanfaataan energi pengereman yang terbuang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam penelitian ini, yaitu:

a) Bagaimana merancang pengereman *regenerative anti-lock braking system* (ABS) menggunakan metode kontrol *proportional integral* (PI)?
b) Bagaimana respon dari sistem kontrol pada *regenerative anti-lock braking system* (ABS) menggunakan metode *proportional integral* (PI)?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

a) Merancang pengereman *regenerative anti-lock braking system* (ABS) menggunakan metode kontrol *proportional integral* (PI).

b) Mengetahui respon dari sistem kontrol pada *regenerative anti-lock braking system* (ABS) menggunakan metode *proportional integral* (PI).

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a) Kendaraan yang ditinjau pemodelannya adalah *Quarter Car Model* (QCM) tanpa beban atau massa kendaraan.

b) Kendaraan diasumsikan berada pada lintasan lurus, datar, kering dan tidak bergelombang.

c) Perancangan sistem kontrol menggunakan Arduino Uno.

d) Nilai *set point* adalah 0.2 berdasarkan nilai *slip ratio* optimal pada kondisi jalan aspal kering.

e) Proses *regenerative* hanya menggunakan proses *charge.*

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan tugas akhir diuraikan sebagai berikut :

a) BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang gambaran umum dari penulisan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

b) BAB II TINJAUAN PUSTAKA DANDASAR TEORI

Bab ini berisi mengenai teori – teori pada tugas akhir, seperti pengertian, gambaran umum, dan proses pada ABS regeneratif, sistem kendali PI, dan komponen pada sistem ABS regeneratif.

c) BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang langkah langkah yang digunakan dalam penyelesaian masalah pada Tugas Akhir. Selain itu dijelaskan juga prosedur dan proses pelaksanaan tiap-tiap langkah yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

d) BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan hasil dari penelitian disertakan hasil analisis dan juga pembahasan setiap pengambilan data. Terdapat 5 variasi data yang ditunjukkan dalam laporan Tugas Akhir ini.

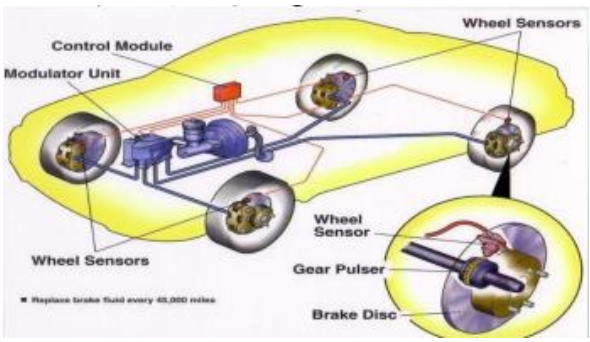
e) BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini tersiri dari kesimpulan dari hasil penelitian dan juga saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 *Anti-Lock Braking System* (ABS)

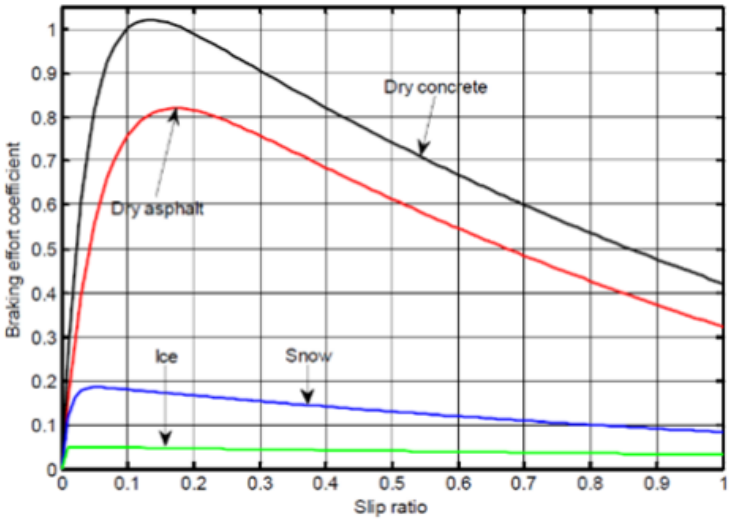
Anti-Lock Braking System (ABS) seperti pada **Gambar 2.1** digunakan untuk mencegah slip dan penguncian pada roda saat pengereman. Unit ini adalah salah satu sistem keamanan (*safety*) pada mobil. Pada saat terjadi pengereman yang parah dan mendadak, terdapat sebuah titik dimana kecepatan tangensial permukaan ban tidak sama dengan kecepatan pada permukaan jalan sehingga dapat diperoleh slip optimal yang sesuai dengan gesekan maksimum (Aly A. , Zeidan, Hamed, & Salem, 2011). ABS pertama kali diterapkan pada industri penerbangan pada tahun 1930. Pada tahun 1945, ABS pertama kali digunakan pada pesawat Boeing B-47 dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas dan meningkatkan *steerability* ketahanan selama pengereman (Aly A. A., Zeidan, Hamed, & Salem, 2011). ABS pertama kali diterapkan untuk kendaraan otomotif mobil pada tahun 1971 dengan tujuan utama mencegah roda terkunci, mengurangi jarak henti (*stopping distance*), meningkatkan stabilitas dan meningkatkan *steerability* kendaraan selama pengereman (Solyon, 2002).



Gambar 2.1 ABS dengan Rem Hidrolik (Aly A. A., Zeidan, Hamed, & Salem, 2011)

Pada penelitian sebelumnya (Guo, Jian, & Lin, 2014) terdapat grafik fungsi *non-linear* antara *breaking effort coefficient* (μ) yaitu gesekan antara ban dan

permukaan jalan dengan *slip ratio* roda (λ) pada kondisi jalanan tertentu, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2.**



Gambar 2. 2 Kurva perbandingan koefisien gesek dengan slip ratio pada kondisi jalan tertentu (Guo, Jian, & Lin, 2014)

Pada **Gambar 2.2** menunjukkan bahwa pada kondisi jalan bersalju dan es, gesekan antara ban dan jalan memiliki μ (*breaking effort coefficient*) yang sangat rendah dan mengakibatkan resiko slip roda semakin tinggi. Sebaliknya dengan kondisi jalan aspal kering dan beton kering yang dapat dikatakan kondisi jalan normal, gesekan memiliki μ yang besar, sehingga resiko roda akan slip menjadi sangat rendah. Nilai μ berdasarkan pada (Guo, Jian, & Lin, 2014) diperoleh melalui persamaan:

$$\mu(\lambda, v) = [C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda]e^{-C_4\lambda v} \tag{2.1}$$

Dimana,
C_1 = Nilai maksimum kurva gesekan
C_2 = Bentuk kurva gesekan
C_3 = Perbedaan kurva gesekan antara nilai maksimum dan nilai λ = 1
C_4 = Karakteristik kebasahan jalan

Tabel 2. 1 Koefisien Gesek Roda - Jalan (Jingang dkk, 2014)

Kondisi Jalan	C_1	C_2	C_3	C_4
Aspal Kering	1.029	17.16	0.523	0.03
Beton Kering	1.1973	25.168	0.5373	0.03

Salju	0.1946	94.129	0.0646	0.03
Es	0.05	306.39	0	0.03

Slip ratio didefinisikan sebagai berikut,

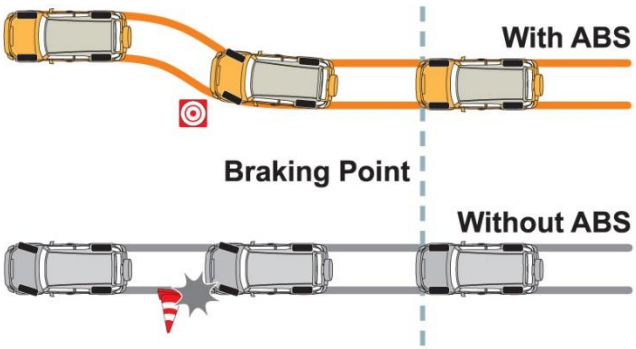
$$\lambda = \frac{v_x - \omega r_\omega}{v_x} \tag{2.2}$$

dimana,

v_x = Kecepataan kendaraan

ω = Kecepatan roda

r_ω = Jari-jari roda



Gambar 2.3 Pengereman Menggunakan ABS dan tanpa ABS (Aly A. A., Zeidan, Hamed, & Salem, 2011)

Berdasarkan tujuan utama penggunaan ABS terdapat 3 hal penting dari ABS yaitu jarak henti, kestabilan, dan ketahanan dari kendaraan. Jarak henti dari kendaraan pada proses pengereman menjadi salah satu faktor penting. Parameter yang mempengaruhi jarak henti dari kendaraan adalah massa kendaraan, kecepatan awal kendaraan, dan gaya pengereman. Jarak henti dari kendaraan dapat diperkecil dengan peningkatan gaya pengereman dikarenakan setiap jenis permukaan jalan memiliki koefisien puncak dari gaya pengereman tersebut, sehingga adanya ABS dapat mengkontrol kendaraan untuk mencapai gaya gesek maksimum dan menghasilkan jarak pengereman minimum (Diarnise, 2017).

Perbedaan kendaraan yang menggunakan ABS dan tanpa ABS seperti pada **Gambar 2.3** saat terjadi proses pengereman dan permukaan jalan yang licin

dibutuhkan gaya gesekan maksimum untuk memperlambat dan menghentikan kendaraan, sehingga dengan kondisi permukaan jalan seperti itu kendaraan mobil yang tidak menggunakan ABS tidak akan mendapatkan gaya gesekan maksimum dikarenakan gaya pengereman lebih besar disatu sisi kendaraan saja, dari pada disisi lainnya. Ketika menerapkan rem penuh pada kedua sisi dari kendaraan akan menghasilkan momen mengayuh atau meluncur yang dapat menarik kendaraan ke sisi yang memiliki gaya gesekan tinggi dan mengkibatkan ketidakstabilan kendaraaan. Menjaga slip kedua roda belakang maupun depan pada tingkat yang sama dan meminimalkan dua koefisien gesekan puncak adalah konsep dari ABS ini.

Dalam praktiknya pada mobil, ada dua cara untuk mendeteksi terjadinya *slip* pada roda mobil, yaitu dengan membandingkan kecepatan putar roda yang akan terkunci dengan roda lainnya atau dapat mengukur laju perlambatan roda yang akan terkunci. Dua cara tersebut biasa dilakukan secara bersamaan, namun sistem yang tersebut cukup rumit dan harganya relatif mahal sehingga dewasa ini banyak digunakan sensor mekanis yang dapat mendeteksi roda yang melambat secara cepat.

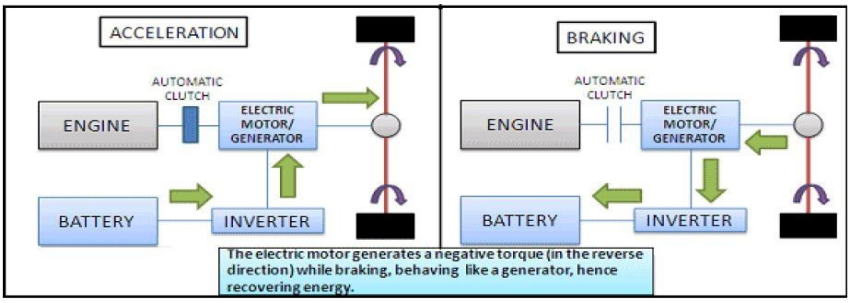
2.2 *Regenerative Anti-Lock Braking System* (ABS)

ABS mengalami kemajuan teknologi dalam kemampuannya mengkonversi energi kalor yang dihasilkan pada saat proses pengereman menjadi energi listrik dan dapat disimpan didalam baterai. Sistem pengereman inilah yang dinamakan dengan *regenerative* ABS. Sebuah teknologi pengereman kendaraan untuk mencapai tingkat akselerasi minimum dengan optimal dan efisien tanpa mempengaruhi stabilitas dan kemampuan kendali kemudi kendaraan dengan tingkat keselamatan maksimum dan mampu menyimpan energi terbuang pada saat pengereman menjadi energi listrik (Guo, Jian, & Lin, 2014). Pada *EV* sistem pengereman ABS sudah dilengkapi dengan sistem *regenerative.* Sistem *regenerative* pada EV yaitu merubah fungsi dari motor dalam sebuah EV untuk bekerja berkebalikan yaitu menjadi generator. Sistem pengereman ini menggunakan motor listrik, dengan cara menghasilkan torsi negatif ke roda

kendaraan dan mengubah energi mekanik dari motor menjadi energi listrik untuk dilakukan pengisian baterai.

Pengereman regeneratif dapat dilakukan dengan cara mengoperasikan mesin listrik sebagai generator. Mesin arus searah tanpa sikat (BLDC) juga biasa disebut mesin sinkron magnet permanen, maka dari itu keluarannyapun saat dioperasikan sebagai generator akan mirip dengan keluaran generator sinkron 3 fasa. Pengereman regeneratif adalah metode pengereman untuk menggunakan energi mekanik dari motor dan mengubah energi kinetik menjadi energi listrik serta mengembalikan kembali pada baterai (Azzumar, 2012).

Sistem pengereman *regenerative* ABS terdiri dari beberapa komponen penting didalamnya yang ditunjukan pada **Gambar 2.4** Pada gambar tersebut ditunjukkan sistem pengereman *regenerative ABS*, baik sistem saat dalam kondisi berjalan maupun dalam keadaan pengereman, serta perubahan dari motor ketika menjadi generator.



Gambar 2.4 Regenerative Anti-Lock Braking System Configuration (Maliye, 2014)

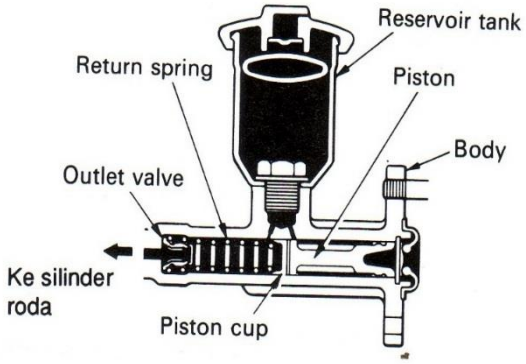
2.3 Komponen Pada *Plant* Sistem Pengereman *Regenerative* ABS

ABS memiliki komponen-komponen yang dapat menunjang kinerja dari ABS tersebut. Ada tiga komponen utama yang diperlukan untuk membuat suatu system ABS, komponen-komponen tersebut adalah sebagai berikut.

a) Silinder *Master*

Pada **Gambar 2.5** ini *master* silinder terdapat reservoir tank yang berfungsi untuk menampung cairan rem pada kendaraan. Baik pada rem hidrolik tipe *tromol* maupun *cakram* tetap menggunakan master silinder pada sistem remnya. *Master* silinder sendiri berfungsi untuk menaikkan tekanan dari pedal setelah pedal diinjak

oleh pengemudi, yang nantinya tekanan dari pedal akan dirubah menjadi tekanan hidrolik pada master silinder yang kemudian digunakan untuk menekan piston pada kaliper atau silinder roda yang terdapat pada tiap-tiap roda. Master silinder rem terletak setelah pedal, namun pada kendaraan yang menggunakan booster rem, master silinder terletak setelah booster rem (Peng, 2008).



Gambar 2. 5 Master Silinder (Peng, 2008)

b) ***Selenoid Valve***

Solenoid valve merupakan katup yang dikendalikan dengan arus listrik baik AC maupun DC melalui kumparan / selenoida. Solenoid valve ini merupakan elemen kontrol yang paling sering digunakan dalam sistem fluida. Seperti pada sistem pneumatik, sistem hidrolik ataupun pada sistem kontrol mesin yang membutuhkan elemen kontrol otomatis.

Pada **Gambar 2.6** ini *solenoid valve* untuk fluida kerja cair. Prinsip kerja dari *solenoid valve* yaitu katup listrik yang mempunyai koil sebagai penggeraknya dimana ketika koil mendapat *supply* tegangan maka koil tersebut akan berubah menjadi medan magnet sehingga menggerakan *piston* pada bagian dalamnya ketika piston bertekanan yang berasal dari *supply (service unit)*, pada umumnya *solenoid valve pneumatic* ini mempunyai tegangan kerja 100/200 VAC namun ada juga yang mempunyai tegangan kerja DC sebesar 12 – 24 VDC.

Gambar 2. 6 Selenoid Valve (Peng, 2008)

c) *Brake Switch*

Gambar 2. 7 Brake Switch (Peng, 2008)

Fungsi *switch* sendiri untuk mengaktifkan ataupun mematikan sistem ABS. Pada **Gambar 2.7** *brake switch* memiliki 2 kaki yang berfungsi menghubungkan kabel ke aki untuk mendapatkan tegangan sebesar 5 *volt*. Pemasangan kutub positif dan negatif pada *brake switch* ini bebas dikarenakan berfungsi hanya untuk memutus arus.

d) Sensor Kecepatan

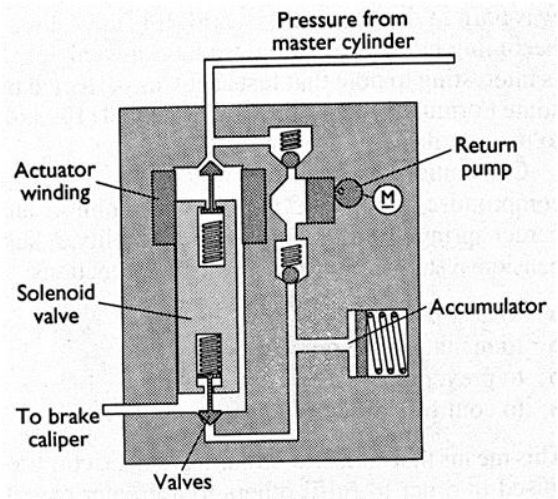
Sensor yang digunakan untuk mengetahui kecepatan roda adalah sensor *proximity* seperti pada **Gambar 2.8** Sensor ini dipasang diatas piringan bergerigi yang secara langsung berhubungan dengan poros penggerak roda. Putaran yang dihasilkan oleh roda akan sama dengan putaran pada piringan bergerigi dan hal ini

akan menyebabkan terjadinya perubahan fluks magnetik pada sensor. Medan magnet yang berubah-ubah inilah yang akan menginduksi tegangan pada koil yang diukur. Frekuensi dan amplitude sinyal yang dihasilkan sensor dapat merepresentasikan kecepatan putar roda.

Gambar 2. 8 Sensor Proximity (Stanislaw, 2002)

e) Hydraulic Control Unit (HCU)

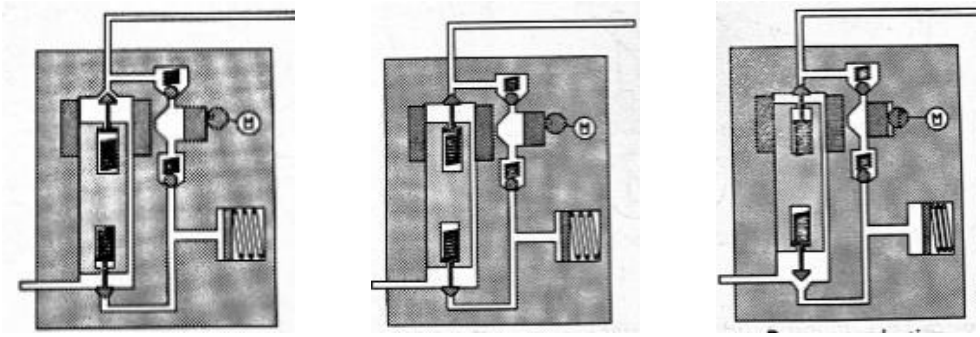
Unit Modulator *atau disebut juga dengan ABS Modulator Valve* berfungsi untuk mengatur tekanan ke masing-masing rem yang dikontrol oleh ABS. Pada saat pengereman normal, ABS *Modulator Valve* tidak diaktifkan sehingga fluida mengalir melalui katup ABS ke ruang rem. Selama ABS beroperasi, katup ABS bertugas untuk memodulasi tekanan fluida di ruang rem yang berfungsi untuk mengendalikan pengereman dan mencegah roda terkunci.



Gambar 2. 9 Unit Modulator Hidrolik (Denton, 1995)

Gambar 2.9 menunjukkan unit modulator secara umum. Katup ABS adalah katup yang dikontrol oleh *solenoid*, terdiri dari dua jenis *solenoid* yang dioperasikan

secara elektrik dan dua katup diafragma. ECU bertugas bertugas untuk mengendalikan *solenoid* agar bertindak sangat cepat, karena *solenoid* berfungsi untuk mengendalikan diafragma, yang akan membuka dan menutup agar memberikan dan mengurangi tekanan pada ruang rem. **Gambar 2.10** menunjukkan posisi operasi dari unit modulator.



(a) Build Up *(b) Holding Phase* *(c) Release*

Gambar 2. 10 Tiga posisi operasi unit modulator pengereman ABS (Dento,1995)

f) *Brushless* DC Motor

Saat ini mobil listrik populer dengan penggerak motor BLDC karena dalam segi mekanik tidak memiliki brush (brushless) sehingga motor akan berputar dengan lebih cepat dan memiiki ketahanan yang lebih lama karena tidak cepat panas. Secara umum BLDC terdiri dari dua bagian, yakni rotor, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan stator, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik synchronous AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter 3 fasa.

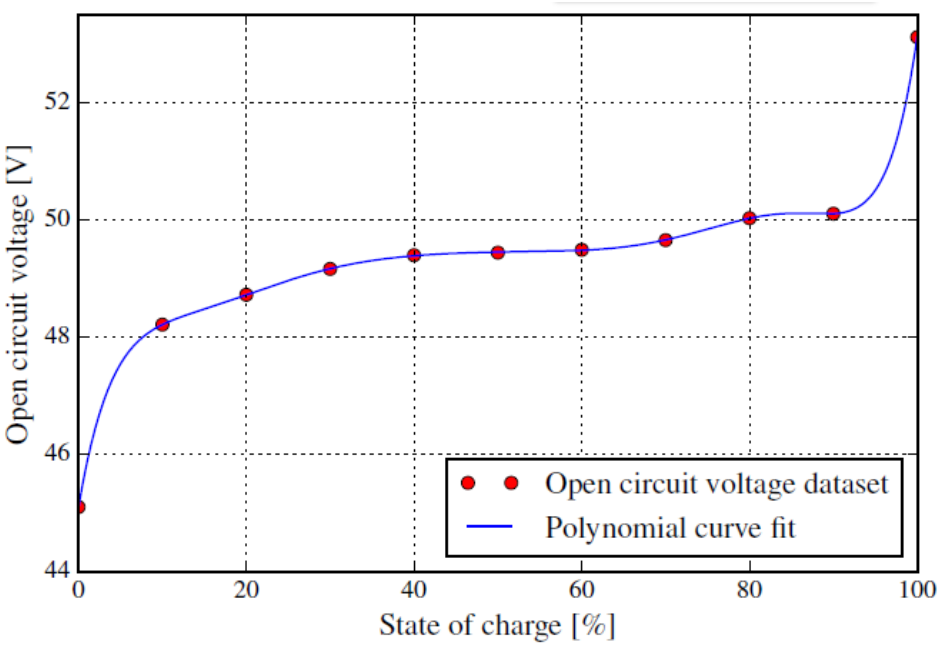
Gambar 2. 11 Brushless DC Motor (Bogipower, 2020)

g) Baterai Li-ion

Bentuk baterai paling awal ditemukan di peradaban kuno, seperti Mesir dan Parthia, di mana biasanya digunakan untuk keperluan pelapisan listrik, bukan menyimpan energi. Baterai yang digunakan untuk keperluan penyimpanan energi pertama kali diteliti pada akhir abad ke-17. Alessandro Volta menemukan pada tahun 1800 bahwa dua logam berbeda bergabung bersama perantara yang lembab akan menghasilkan aliran daya listrik ketika kedua logam tersebut dihubungkan oleh konduktor. Penemuan ini mengarah pada penemuan sel volta pertama. Baterai hanyalah satu set sel secara seri. Dua abad kemudian, berbagai teknologi baru telah dikembangkan. Namun operasi dasarnya sama untuk semua teknologi ini, mulai dari baterai tidak dapat diisi ulang hingga dapat diisi ulang. (Horn, 2017)

Pada tahun 1912, eksperimen tentang baterai Li-ion dimulai. Dan pada tahun 1970 adalah pertama kali baterai Li-ion tersedia di pasaran. Dalam 40 tahun terakhir pengembangan signifikan telah dilakukan pada teknologi baterai Li-ion. Baterai Li-ion saat ini memiliki potensi daya spesifik tinggi dan energi spesifik tinggi. Itulah keunggulan dari baterai Li-ion dibandingkan jenis baterai yang lain. Hal tersebut membuat baterai Li-ion sering digunakan pada kendaraan listrik. (Horn, 2017)

Untuk mengetahui kapasitas pada suatu baterai dapat menemukan nilai State Of Charge (SOC) dari suatu baterai. SOC adalah jumlah pengisian daya baterai dalam waktu tertentu. Atau dapat juga diartikan sebagai total kapasitas energi yang tersedia pada baterai. Untuk nilai SOC pada baterai Li-ion 48 volt dapat dilihat pada **Gambar 2.12**



Gambar 2. 12 Grafik SOC Baterai Li-ion 48 volt (Horn, 2017)

h) Arduino UNO

Arduino Merupakan papan elektronik berbasis mikrokontroller ATMega yang memenuhi sistem minimum mikrokontroller agar dapat bekerja secara mandiri (*standalone controller*) (Saptaji, 2015). Arduino UNO adalah sebuah board mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin digital input/output (6 di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah power jack, sebuah ICSP header, dan sebuat tombol reset. Arduino UNO memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah computer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya.

IDE (Integrated Development Environment) adalah sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk mengembangkan aplikasi mikrokontroler mulai dari menuliskan source program, kompilasi, upload hasil kompilasi dan uji coba secara terminal serial. IDE arduino merupakan software yang sangat canggih ditulis dengan menggunakan java.

Gambar 2. 13 Arduino UNO (Saptaji, 2015)

2.4 Kontrol *Proportional Integral* (PI)

Kontrol PI merupakan sistem kontrol gabungan dari kontrol proporsional dan sistem kontrol integral, dimana kedua sistem kontrol tersebut disatukan untuk mengontrol sebuah plant (katup solenoid). Kinerja yang baik dari sebuah kontrol PI dapat ditunjukkan dengan cara bagaimana sistem kontrol tersebut dapat mengatur plant sesuai nilai set point dengan respons time yang lebih cepat dan mampu mempertahankan posisi plant tetap stabil pada nilai set point yang telah ditentukan. Sehingga dengan begitu proses pendinginan pada suatu bahan pangan akan lebih cepat dan hasil pendinginnya mempunyai kualitas yang baik.

Kinerja kontrol PI akan didapatkan hasil yang maksimal apabila didapatkan konstanta yang tepat pada masing-masing sistem kontrol yaitu konstanta proporsional (Kp) dan konstanta integral (Ki). Nilai konstanta tersebut pada sistem kontrol PI perlu diatur, karena dengan mengatur nilai konstanta pada masing-masing sistem kontrol yaitu sistem kontrol proporsional dan sistem kontrol integral akan didapatkan hasil pengontrolan yang baik, yaitu respons waktu semakin cepat, temperatur pendinginan lebih stabil, dan nilai error overshoot dapat dihilangkan (Bashori, 2013).

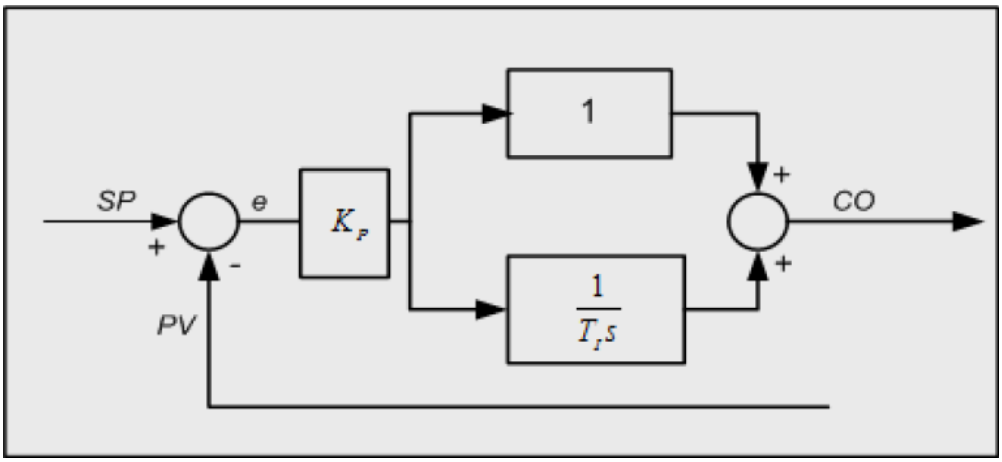
Proses penentuan nilai konstanta pada sistem kontrol PI pada penelitian ini diperoleh berdasarkan proses perhitungan dengan menggunakan metode *Trial and Error*. Metode *Trial and Error* tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai konstanta yang tepat, karena melihat banyaknya nilai konstanta yang dapat diatur pada sistem kontrol yang telah dibuat, serta adanya ciri-ciri dari masing-masing

sistem kontrol dalam hal ini adalah sistem kontrol proporsional dan sistem kontrol integral yang perlu dilakukan pertimbangan. Dimana menurut (Budi, 2011), ciri-ciri dari sistem kontrol proporsional yaitu:

a) Nilai Kp kecil, pengontrolan proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respons sistem yang lambat.
b) Nilai Kp dinaikkan, respons sistem menunjukkan semakin cepat mencapai set point dan keadaan stabil.
c) Nilai Kp diperbesar hingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil.

Sedangkan ciri-ciri sistem kontrol dari kontrol integral (Budi,2011) adalah:

a) Keluaran pengontrol integral membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol integral cenderung memperlambat respon.
b) Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya.
c) Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol (0) , keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai Ki.
d) Konstanta integral Ki yang berharga besar akan mempercepat hilangnya offset. Tetapi semakin besar nilai konstanta Ki akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengontrol.

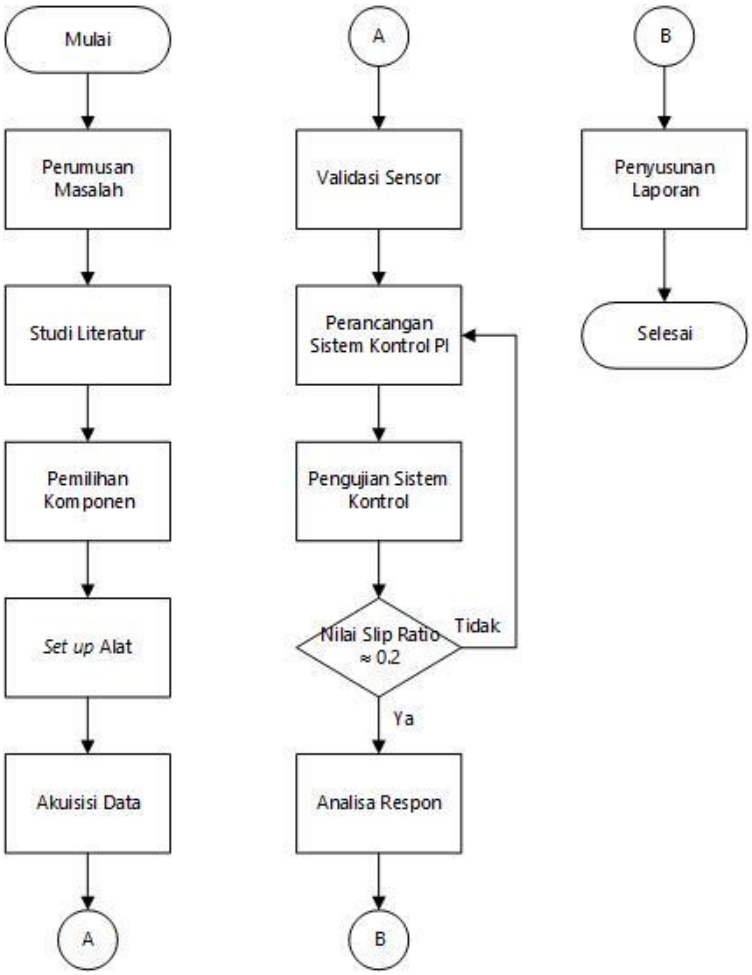


Gambar 2. 14 Diagram blok kontrol proportional integral (Setiawan, 2008)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan untuk mencapai tujuan dari tugas akhir ini dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1** yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

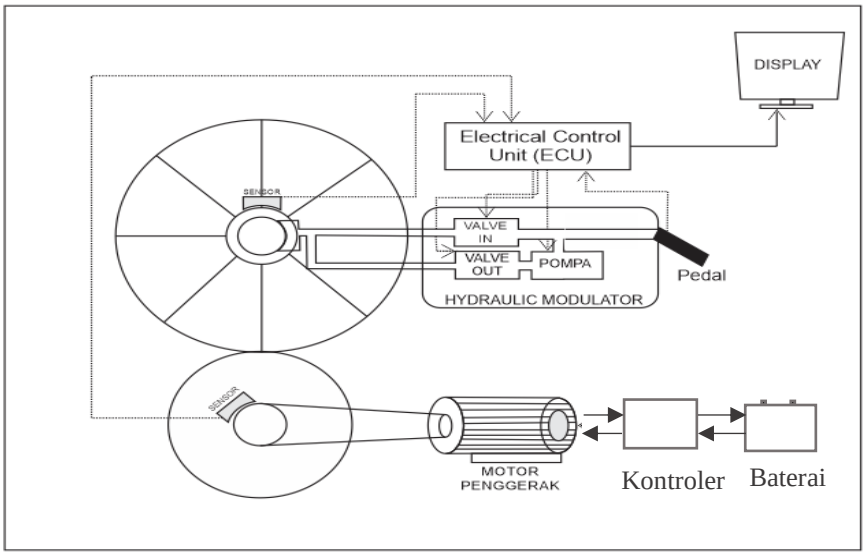
3.1 Studi literatur

Pada tahap studi literatur pada tugas akhir ini dimaksudkan untuk membangun pemahan awal hingga mendalam tentang penelitian yang akan dilakukan. Pemahaman secara teoritis terhadap penelitian tugas akhir ini agar kerangka pola terbentuk agar tidak menyusahkan penulis. Dengan mengumpulkan referensi yang mendukung penelitian tugas akhir mengenai *regenerative anti- lock*

braking system pada mobil konvensional, komponen – komponen yang membentuk sistem *regenerative* ABS, teori pengendalian PI, pemograman menggunakan Arduino Uno. Pengumpulan literatur dan referensi ini diharapkan membantu untuk menerapkan metode kontrol terhadap *plant regenerative* ABS.

3.2 Rancang Bangun Plant *Regenerative Anti-Lock Braking System*

Plant regenerative ABS yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini hanya menggunakan satu roda saja. Roda atas mewakili kecepatan roda. Hal tersebut dikarenakan sistem ABS terhubung dengan roda atas. Sedangkan roda bawah untuk mewakili kecepatan kendaraan. Hal tersebut dikarenakan roda bawah yang terhubung dengan motor BLDC. Pada keadaan normal, kecepatan roda atas dan bawah pada titik kontak bernilai nol. Terdapat beberapa komponen utama pada *plant regenerative* ABS ini antara lain dua buah sensor kecepatan (*wheel speed sensor*) yang berfungsi mengukur kecepatan putaran roda dan kecepatan kendaraan, dua buah solenoid *valve* dan satu pompa yang merupakan kesatuan dari *hydraulic modulator* dan *electrical control unit* yang menggunakan Arduino Uno yang berfungsi sebagai pengendali dari sistem ABS.



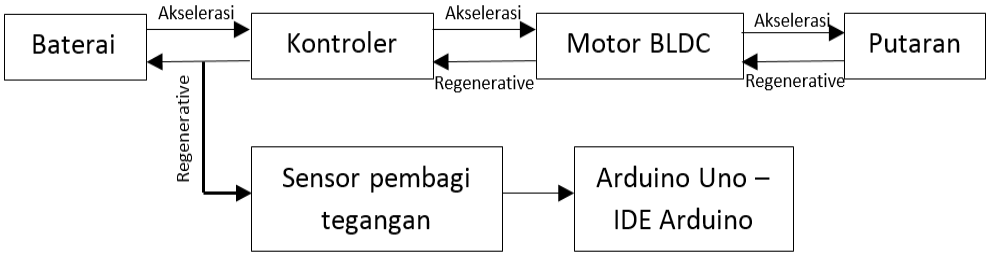
Gambar 3. 2 Skema plant *regenerative anti-lock braking system*

Gambar 3.2 merupakan skema keseluruhan dari *plant anti-lock braking system* dengan *Kelly Controller* menjalankan roda sehingga menghasikan kecepatan putar roda dan kecepatan kendaraan. Setelah itu dua buah sensor

proximity akan melakukan pengukuran kecepatan masing – masing roda. Ketika dilakukan pengereman ECU akan menerima data kecepatan dan melakukan aksi terhadapa *hydraulic modulator* dan menjalankan kontrol PI dan dapat ditampikan pada *display* dalam bentuk grafik respon.

Sensor proximity ini berfungsi menghasilkan sinyal *High* dan *Low*. Jika bernilai *high* maka adanya *ring* yang terdeteksi oleh sensor (s*ignal trigger*) dan ketika bernilai *low* sensor tidak mendeteksi adanya *ring* yang melewati sensor. Nilai yang diukur oleh sensor adalah waktu putaran *ring* untuk mencapai satu putaran. Semakin cepat roda berputar maka waktu yang dibutuhkan sensor untuk menerima sinyal lebih cepat begitu pula sebaliknya semakin lambat roda berputar maka waktuyang dibutuhkan sensor untuk mengukur semakin lambat.

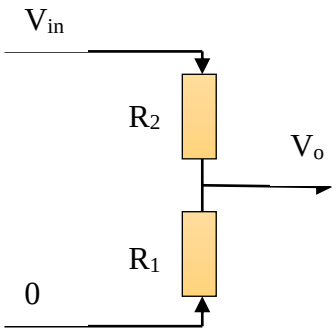
Electrical Control Unit (ECU) sangat berperan penting dalam *plant* ini. ECU yang digunakan yaitu Arduino Uno, semua data yang dihasilkan akan diproses oleh ECU seperti data kecepatan dua roda, *slipratio*, controller, dan memberikan aksi ke setiap *valve* dan pompa. Ketika pada saat melakukan pengereman terjadi *slip* maka ECU melakukan aksi kepada *input* solenoid *valve* untuk menutup dan *output* solenoid *valve* untuk terbuka serta menyalakan pompa. Sehingga tidak terjadi *lock* atau penguncian terhadap roda.



Gambar 3. 3 Diagram proses regenerative pada *plant*

Gambar 3.3 adalah diagram untuk proses regenerative dari plant regenerative ABS. untuk mendapatkan putaran motor menggunakan daya dari baterai li-ion yang kecepatannya dapat diatur pada kontrol dari Kelly Controller. Sedangkat saat proses regenerative atau saat pengereman motor berubah fungsinya menjadi generator. Baterai akan dipasok energi dari motor BLDC yang berfungsi menjadi generator. Hal tersebut dihasilkan melalui sisa energi kinetik yang dihasilkan melalui proses pengereman.

Untuk mengetahui tegangan yang menuju ke baterai dibutuhkan rangkaian pembagi tegangan seperti yang ditunjukkan **Gambar 3.4**. Rangkaian pembagi tegangan berfungsi untuk mengukur tegangan keluaran motor sebagai generator hasil pengereman. Rangkaian pembagi tegangan dapat digunakan untuk mengukur nilai SOC atau kapasitas energi pada baterai. Dengan menggunakan persamaan (3.1) didapatkan nilai V0 yang diterapkan pada sistem.



Gambar 3. 4 Rangkaian pembagi tegangan

$$V_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times Vi \tag{3.1}$$

V_0 = tegangan keluaran rangkaian pembagi tegangan

Vi = tegangan yang dihasilkan motor BLDC

R_1 = resitor 1 (10K ohm)

R_2 = resistor 2 (100K ohm)

3.3 Uji Validasi Plant *Regenerative* ABS

Setelah perancangan dan pembuatan mekanik dari plant regenerative ABS telah selesai, diperlukan uji validasi plant sehingga dapat diketahui bahwa plant regenarative ABS tersebut telah benar atau sesuai. Pertama dilakukan kalibrasi pada sensor kecepatan. Hal ini bertujuan supaya sensor dapat membaca kecepatan roda dengan baik dan sesuai dengan standar.

Selanjutnya dilakukan pengereman secara open loop. Variable yang akan di kendalikan dalam penelitian ini adalah nilai slip ratio. Sehingga data yang dapat digunakan untuk memvalidasi plant ABS yang telah dibuat adalah dengan melihat

nilai slip ratio ketika diberikan aksi pengereman pada plant ABS. Slip ratio bernilai 100% ketika roda (roda atas) berhenti berputar dan terkunci.

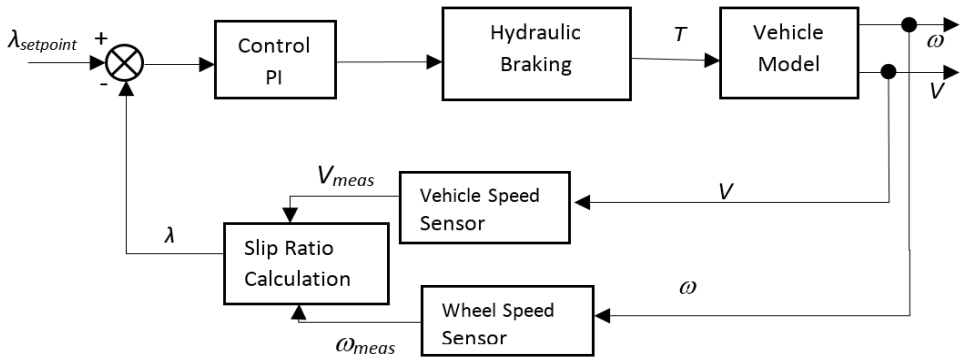
Pada sensor pembagi tegangan dilakukan kalibrasi menggunakan alat DC power supply. Nilai dari sensor pembagi tegangan dibandingkan dengan nilai yang ada pada DC power supply. Hal ini bertujuan supaya sensor dapat membaca tegangan keluaran dari motor BLDC dengan baik dan sesuai dengan standar.

3.4 Perancangan Sistem Pengendali Proportional Integral

Pengendalian proporsionnal integral pada penelitian kali ini digunakan untuk memberikan sinyal kontrol guna mengendalikan pompa serta kedua solenoid *valve* pada sistem *hydraulic modulator*. Sinyal kontrol ini yang akan mengubah nilai *duty cycle* yang merupakan nilai *output* buka tutup untuk kedua solenoid dan pompa untuk memberi nilai *on off*.

Gambar 3.5 merupakan diagram blok pengendalian PI, *controller* yang digunakan yaitu proporsional integral , *hydraulic modulator* sebagai aktuator, *anti-lock braking* system sebagai *plant*, *output* dari *plant* ada dua yaitu kecepatan roda (ω) dan kecepatan kendaraan (V). Pengendalian ini dilakukan agar dapat memepertahankan nilai *slip ratio* pada nilai λ* *references* yang dapat dilihat pada grafik Fx- λ pada **Gambar 2.2**. Dimana pengendalian ini didasarkan pada nilai error yang didefinisikan sebagai berikut pada persamaan (3.2).

$$\lambda_e = \lambda_{ref} - \lambda \tag{3.2}$$



Gambar 3. 5 Blok Diagram Sistem Pengendalian PI

Sinyal kontrol yang dihasilkan oleh pengendalian PI ini mempunyai persamaan yaitu :

$$u(t) = K_P . e(t) + K_I \int_0^t e\ (t)dt \tag{3.3}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab iv berisi tentang hasil perancangan sistem kontrol proporsional Integral (PI) pada *regenerative anti-lock braking system* yang telah dilakukan. Kemudian dilakukan anilisis terhadap data yang diperoleh melalui grafik respon dan dilakukan pembahasan untuk menjawab rumusan masalah.

4.1 Pengujian Sensor

Sensor dapat dikatakan sebagai salah satu komponen penting pada *regenerative anti-lock braking system* (ABS). Hal ini dikarenakan sensor menjadi satu-satunya pemberi informasi mengenai kecepatan roda, kecepatan kendaraan dan nilai tegangan sehingga pengendalian dapat dilakukan. Sebelum digunakan sensor harus dikalibrasi ataupun divalidasi sehingga menghasilkan nilai yang sesuai. **Tabel 4.1** menunjukkan hasil pengujian sensor.

Tabel 4. 1 Data Kalibrasi sensor proximity

No	pembacaan alat (rpm)	pembacaan standar (rpm)	koreksi
1	294.1	294.6	0.5
2	295.16	294.6	0.56
3	294.1	294.6	0.5
4	294.1	294.6	0.5
5	292.5	294.6	2.1
6	293.42	294.6	1.18
7	293.42	294.6	1.18
8	292.5	294.6	2.1
9	295.16	294.6	0.56
10	292.5	294.6	2.1

Data dari **Tabel 4.1** digunakan untuk menghitung nilai ketidakpastian dari sensor yang digunakan. Berdasarkan data tersebut diperoleh nilai-nilai berikut.

Uc = 2,727051358

Veff = 10,31060545

Pada table *T-student* menghasilkan nilai faktor koreksi (k) sebesar 2,2197069385. Sehingga didapatkan nilai ketidakpastian :

$$U_{exp} = k\ x\ U_c$$

$$U_{exp} = 2{,}2197069385x\ 2{,}727051358 = 6{,}05325482$$

Nilai ketidakpastian alat sebesar ± 6,05. Nilai ketidakpastian tersebut akan menjadi acuan untuk pembacaan alat ukur selama alat ukur tersebut digunakan.

Untuk sensor pembagi tegangan, informasi tentang keluaran daya motor BLDC sebagai generator dapat dimonitor melalui Arduino. Perhitungan output yang dihasilkan dari rangkaian pembagi tegangan jika baterai dalam kondisi penuh adalah sebagai berikut .

$$Vo = \frac{10.000}{10.000 + 100.000} \times 48$$

$$Vo = 4.36$$

Tegangan baterai dalam kondisi penuh apabila lebih dari sama dengan 48 volt. Tegangan V_0 yang dihasilkan oleh rangkaian pembagi tegangan akan dibandingkan dengan nilai 4.36 volt yang terhubung pada Arduino UNO.

Tabel 4. 2 Data kalibrasi sensor pembagi tegangan

No	pembacaan standar (volt)	pembacaan alat (volt)	koreksi
1	1.28	1.18	0.1
2	2.13	2	0.13
3	3.02	2.92	0.1
4	4.05	3.92	0.13
5	5.13	5.02	0.11
6	6.2	6.09	0.11
7	7.12	6.99	0.13
8	8.09	7.99	0.1
9	9.05	8.92	0.13
10	10.14	10.01	0.13
11	11.23	11.13	0.1
12	12.09	11.97	0.12
13	13.09	12.99	0.1
14	14.17	14.06	0.11
15	15.12	15.01	0.11

16	16.18	16.08	0.1
17	17.13	17	0.13
18	18.2	18.08	0.12
19	19.14	19.02	0.12
20	20.23	20.13	0.1
21	21.06	20.96	0.1
22	22.24	22.11	0.13
23	23.08	22.96	0.12
24	24	23.9	0.1
25	25.06	24.94	0.12
26	26.24	26.11	0.13
27	27.18	27.06	0.12
28	28.13	28	0.13
29	29.18	29.06	0.12
30	30.15	30.05	0.1

Data dari **Tabel 4.2** digunakan untuk menghitung nilai ketidakpastian dari sensor yang digunakan. Berdasarkan data tersebut diperoleh nilai-nilai berikut.

Uc = 0.244796809

Veff = 34.00538877

Pada table *T-student* menghasilkan nilai faktor koreksi (k) sebesar 2,0322285193. Sehingga didapatkan nilai ketidakpastian :

$$U_{exp} = k\ x\ U_c$$

$$U_{exp} = 2{,}0322285193x\ 0{,}244796809 = 0.49748$$

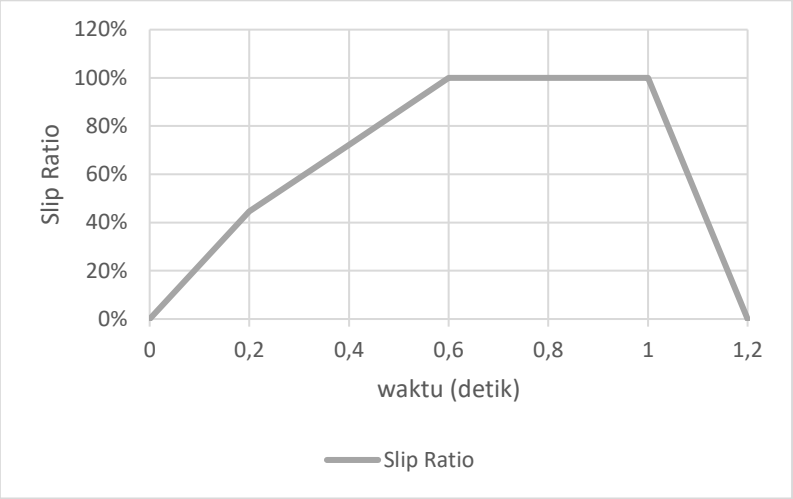
Nilai ketidakpastian alat sebesar ± 0.497. Nilai ketidakpastian tersebut akan menjadi acuan untuk pembacaan alat ukur selama alat ukur tersebut digunakan.

4.2 Uji Pemodelan *Plant* R-ABS

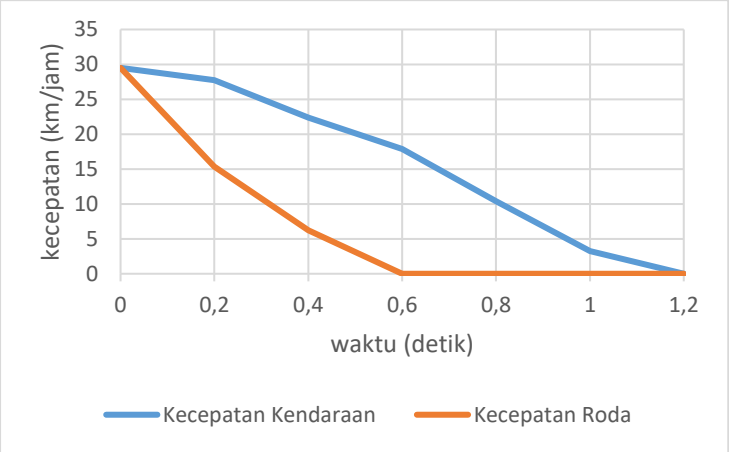
Sebelum penelitian dilakukan, terlebih dahulu sistem di uji dengan tahapan validasi untuk memastikan agar sistem yang akan digunakan dalam penelitian benar dapat dikendalikan. Pengujian dilakukan dengan *open loop* tanpa adanya ABS. Hasil respon pengujian ditunjukkan pada **Gambar 4.1**.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan *time sampling* (ts) sebesar 0,2 detik. *Time sampling* sebesar 0,2 detik dipilih dengan mempertimbangkan

kemampuan sensor dalam membaca data. *Time sampling* yang terlalu kecil akan menyebabkan sensor kesulitan dalam membaca data kecepatan sehingga data kecepatan yang dihasilkan tidak sesuai. Sedangkan untuk *time sampling* yang terlalu besar akan menyebabkan pengendalian sulit dilakukan, hal ini dikarenakan *regenerative* ABS adalah sistem yang berkerja pada waktu yang sangat cepat sehingga *time sampling* yang besar dinilai tidak cocok diimplementasikan pada sistem *regenerative* ABS.



Gambar 4. 1 Respon *slip ratio open loop*



Gambar 4. 2 Respon kecepatan *open loop*

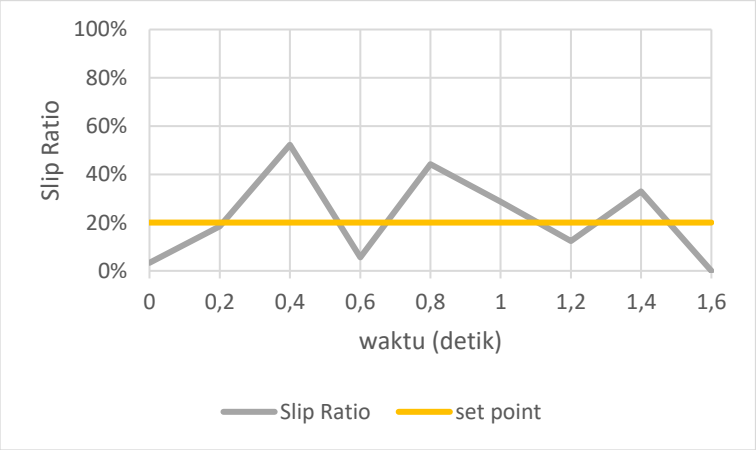
Hasil respon menunjukkan bahwa saat pengereman kuat dilakukan nilai *slip ratio* naik hingga 100 %. Hal ini menunjukkan bahwa saat pengereman terjadi roda berhenti berputar dan terkunci, sedangkan kendaraan (roda bawah) masih bergerak.

Nilai *slip ratio* terus berada pada angka 100% hingga kendaraan (roda bawah) benar-benar berhenti. **Gambar 4.2** menunjukkan grafik respon kecepatan roda dan kecepatan kendaraan tanpa menggunakan ABS. Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa pada waktu ke 0,6 detik setelah pengereman dilakukan, roda langsung berhenti berputar dan terkunci sedangkan kendaraan masih bergerak. Hal ini dapat menyebabkan kemampuan untuk mengendalikan kendaraan tidak stabil dan kendaraan berhenti pada waktu ke 1,2 detik.

4.3 Uji Closed Loop Menggunakan Kontrol Proportional Integral (PI)

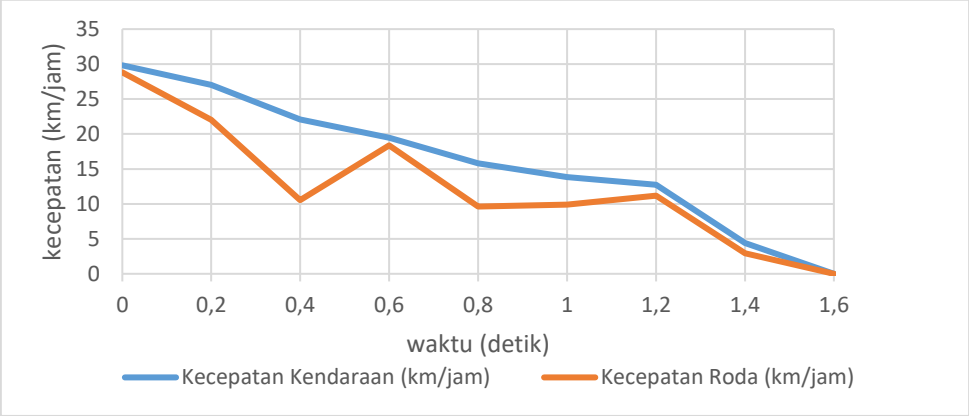
Uji *closed loop* bertujuan untuk meninjau respon yang dihasilkan sistem setelah adanya pengendalian *slip ratio*. Pengendalian dilakukan dengan harapan bawah nilai *slip ratio* stabil di nilai *set point* yang telah ditentukan. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 variasi yang berbeda untuk menemukan kontrol PI yang terbaik. Dan beberapa hasil respon ditunjukkan dalam beberapa grafik berikut ini.

4.3.1 Kontrol PI Menggunakan kp 1,5 dan ki 0.02



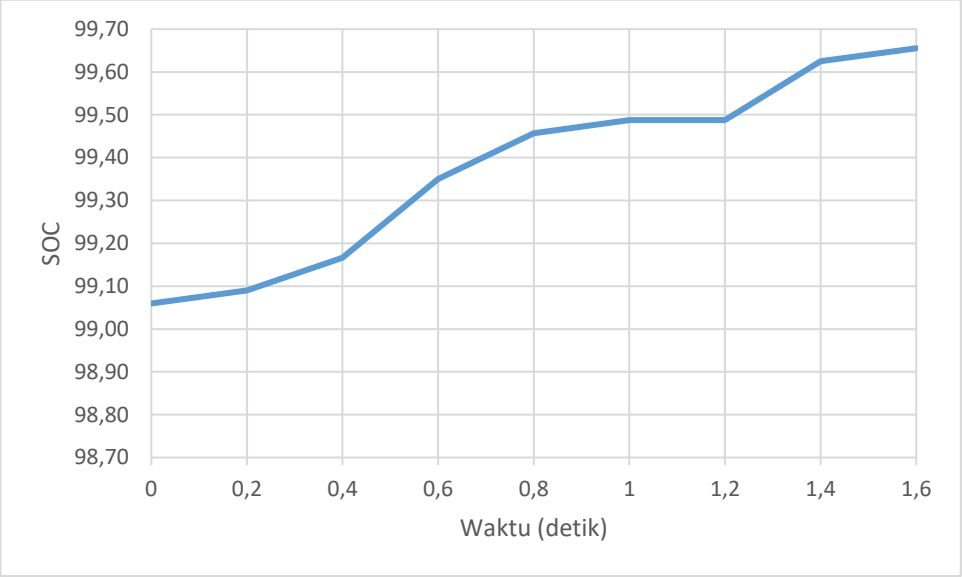
Gambar 4. 3 Respon Slip Ratio kp 1,5 dan ki 0,02

Gambar 4.3 menunjukkan respon yang dihasilkan ketika adanya pengereman. Sistem mulai di rem ditunjukkan dengan naiknya *slip ratio*. *Slip ratio* yang meningkat menuju 100% menunjukkan bahwa sistem mendekati keadaan *slip* sehingga harus di lakukan aksi yang dapat menghindari keadaan tersebut.



Gambar 4. 4 Respon kecepatan kp 1,5 dan ki 0,02

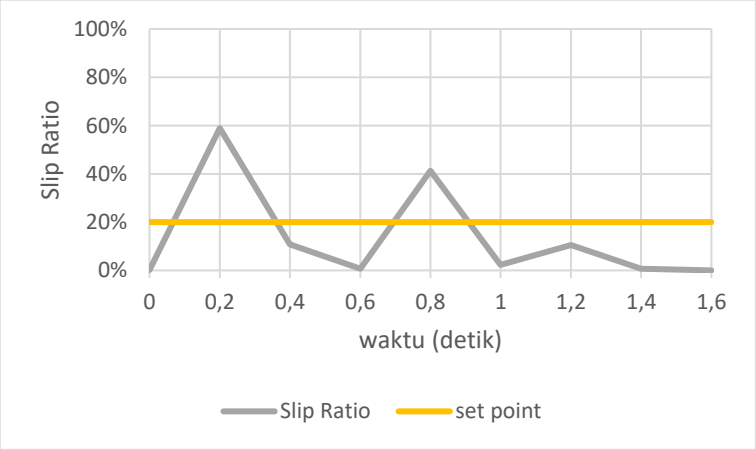
Gambar 4.4 menunjukkan respon kecepatan sistem ABS dengan pengendalian proporsional integral (PI) menggunakan nilai Kp sebesar 1,5 dan Ki sebesar 0.02. Pada saat dilakukan pengereman pada sistem menyebabkan kecepatan roda turun dari 28,81 km/jam menjadi 10,55 km/jam sedangkan kecepatan kendaraan turun dari 29,82 km/jam menjadi 22,08 km/jam, hal ini menyebabkan nilai *slip ratio* naik hingga 52%. Dengan naiknya nilai *slip ratio* sistem pengendalian kemudian mulai aktif dan memberikan sinyal ke aktuator sehingga pada waktu ke 0,4 detik pengereman dalam posisi *release* (tidak rem). Pada waktu ke 0,6 detik sistem mendeteksi bahwa nilai *slip ratio* berada dibawah nilai *set point* sehingga sistem pengendalian kembali memberikan sinyal ke aktuator sehingga posisi operasi sistem pengereman yang sebelumya dalam kondisi *release* berganti menjadi kondisi *build up* (rem). Seiring dengan aksi yang diberikan ke sistem, *slip ratio* terus berosilasi disekitar 20% namun tidak stabil. Hingga akhirnya pada waktu ke 1,6 detik kendaraan berhenti.



Gambar 4. 5 Nilai SOC baterai kp 1,5 dan ki 0,02

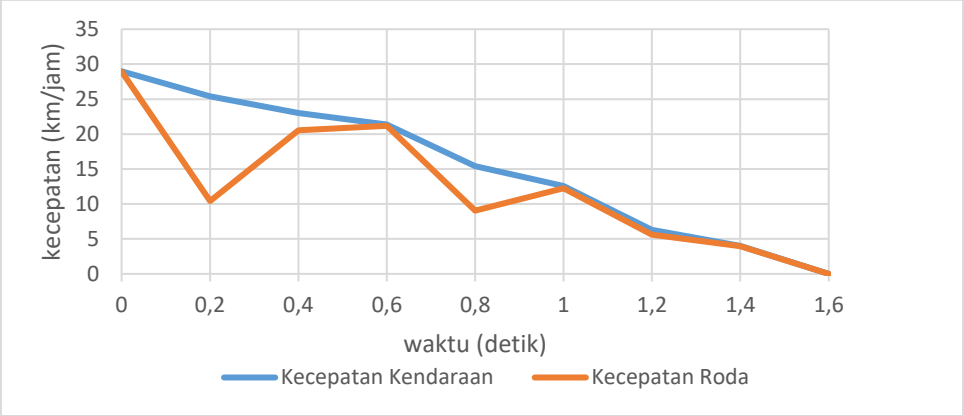
Gambar 4.5 menunjukkan nilai SOC dari baterai saat proses pengereman berlangsung. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari SOC baterai terus mengalami kenaikan. Pada awal memulai pengereman nilai SOC baterai sebesar 99,06%, dan nilai tersebut terus meningkat hingga roda berhenti pada detik ke 1,6 dengan nilai SOC baterai 99,66%. Kenaikan nilai SOC baterai pada sistem *closed loop* dengan kontrol PI (kp 1,5 dan ki 0,02) sebesar 0,6%.

4.3.2 Kontrol PI Menggunakan kp 1,5 dan ki 0.04



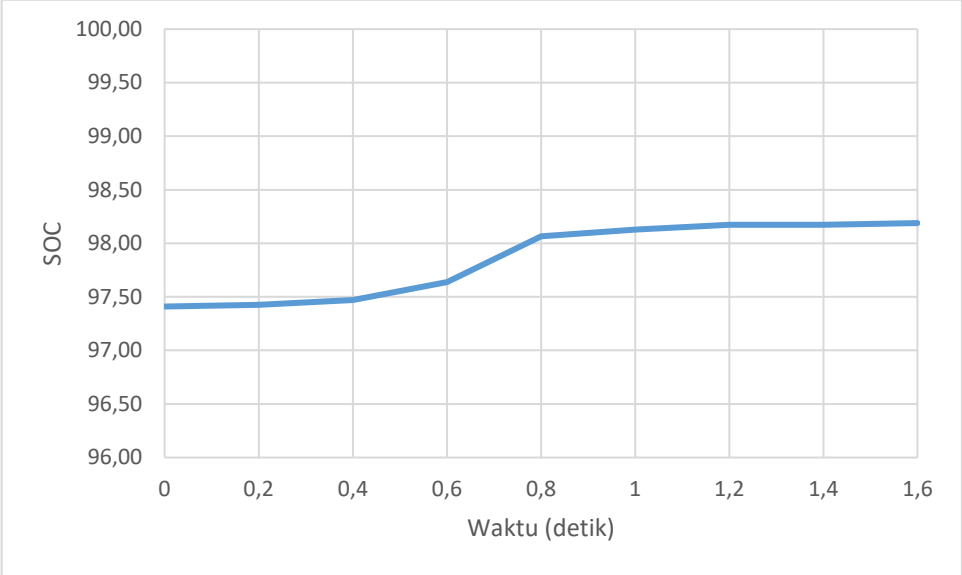
Gambar 4. 6 Respon Slip Ratio kp 1,5 dan ki 0,04

Pada **Gambar 4.6** menunjukkan respon *slip ratio* dengan pengendalian proporsional integral menggunaka nilai Kp sebesar 1,5 dan Ki 0,04. Ketika adanya pengereman, sistem menuju kondisi slip dengan nilai *slip ratio* mencapai 59 %. Aksi langsung diberikan pada sistem sehingga *slip ratio* akan turun kemudian osilasi disekitar 20% sebelum akhirnya berhenti pada detik ke 1,6.



Gambar 4. 7 Respon kecepatan kp 1,5 dan ki 0,04

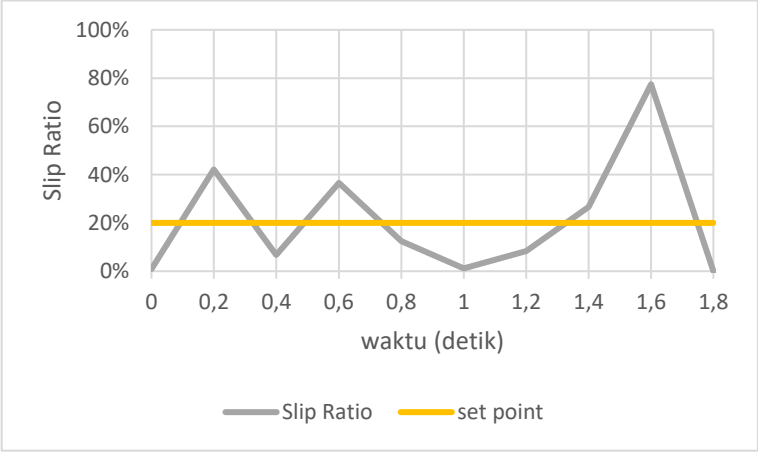
Jika dilihat dari respon kecepatan pada **Gambar 4.7**, pada waktu ke 0,2 detik kecepatan roda saat terjadi pengereman turun drastis mencapai nilai 10,42 km/jam sedangkan kecepatan kendaraan 25,38 km/jam, hal inilah yang menyebabkan nilai *slip ratio* naik mecapai nilai 59%. Aksi kemudian diberikan ke aktuator oleh pengendalian proporsional integral (PI) yang menyebabkan kecepatan roda mulai naik kembali, dan nilai *slip ratio* menjadi turun. Setelah itu sistem pengendalian terus memberikan sinyal ke aktuator yang menyebabkan nilai *slip ratio* berosilasi disekitar *setpoint* dan akhirnya berhenti pada waktu ke 1,6 detik.



Gambar 4. 8 Nilai SOC baterai kp 1,5 dan ki 0,04

Gambar 4.8 menunjukkan nilai SOC dari baterai saat proses pengereman berlangsung. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari SOC baterai terus mengalami kenaikan. Pada awal memulai pengereman nilai SOC baterai sebesar 97,41%, dan nilai tersebut terus meningkat hingga roda berhenti pada detik ke 1,6 dengan nilai SOC baterai 98,19%. Kenaikan nilai SOC baterai pada sistem *closed loop* dengan kontrol PI (kp 1,5 dan ki 0,04) sebesar 0,78%.

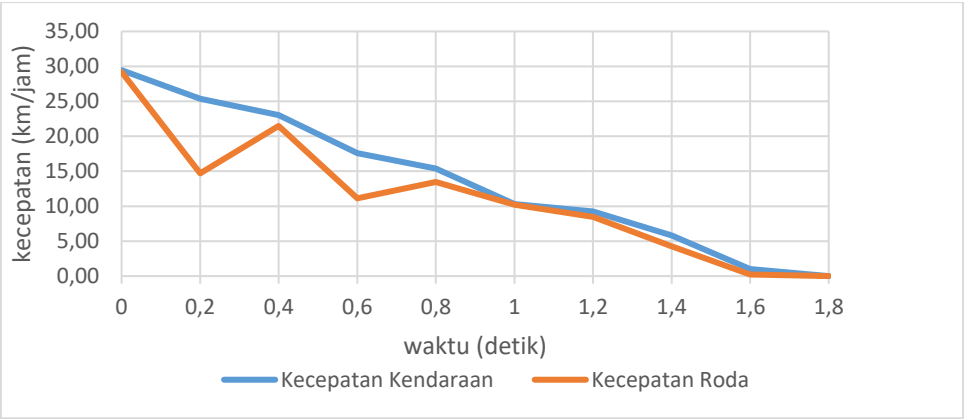
4.3.3 Kontrol PI Menggunakan kp 1,8 dan ki 0.02



Gambar 4. 9 Respon Slip Ratio kp 1,8 dan ki 0,02

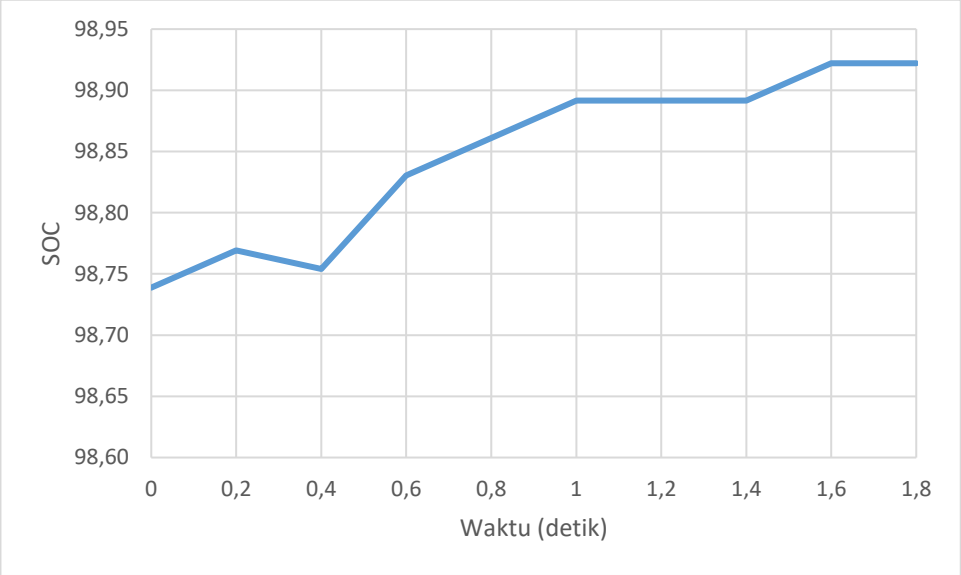
Pada waktu ke 0,2 detik nilai *slip ratio* **Gambar 4.9** naik yang kemudian pada waktu ke 0,4 detik kembali turun. Hal ini terjadi dikarenakan sistem pengendalian

terus memberikan sinyal ke aktuator bergantung dengan nilai *slip ratio* yang sedang terdeteksi. Ketika nilai *slip ratio* diatas nilai *setpoint* maka sistem pengereman berada diposisi *releas* dan ketika nilai *slip ratio* berdada dibawah nilai *setpoint* maka sistem pengereman dalam posisi *build up*. Secara bergantian posisi operasi ini dijalankan sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan sistem pengereman. Sistem kemudian berhenti pada waktu ke 1,8 detik.



Gambar 4. 10 Respon kecepatan kp 1,8 dan ki 0,02

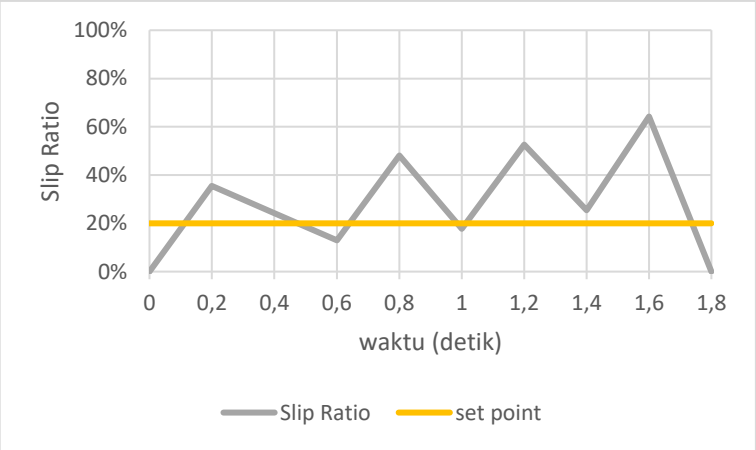
Dilihat dari respon kecepatan **Gambar 4.10**, saat dilakukan pengereman pada sistem yang menyebabkan kecepatan roda menjadi turun hingga mencapai nilai 14,69 km/jam, sedangkan kecepatan kendaraan hanya sedikit mengalami penurunan yaitu 25,38 km/jam. Perbedaan kecepatan ini menyebabkan sistem menuju kondisi *slip* dengan nilai *slip ratio* sebesar 42 %. Namun pada detik 1,6 nilai *slip ratio* mengalami kenaikan yang cukup drastis, hal tersebut terjadi saat kecepatan roda 0,23 km/jam dan kecepatan kendaraann 1.02 km/jam.



Gambar 4. 11 Nilai SOC baterai kp 1,8 dan ki 0,02

Pada **Gambar 4.11** menunjukkan nilai SOC dari baterai saat proses pengereman berlangsung. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari SOC baterai terus mengalami kenaikan meskipun pada detik ke 0,4 mengalami sedikit penurunan. Pada awal memulai pengereman nilai SOC baterai sebesar 98,74%, dan nilai tersebut terus meningkat hingga roda berhenti pada detik ke 1,8 dengan nilai SOC baterai 98,92% pada akhir pengereman. Kenaikan nilai SOC baterai pada sistem *closed loop* dengan kontrol PI (kp 1,8 dan ki 0,02) sebesar 0,18%.

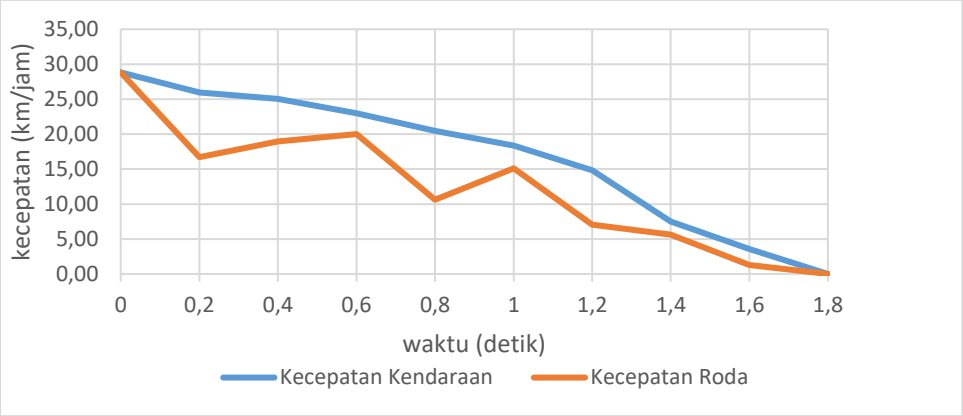
4.3.4 Kontrol PI Menggunakan kp 1,8 dan ki 0.04



Gambar 4. 12 Respon Slip Ratio kp 1,8 dan ki 0,04

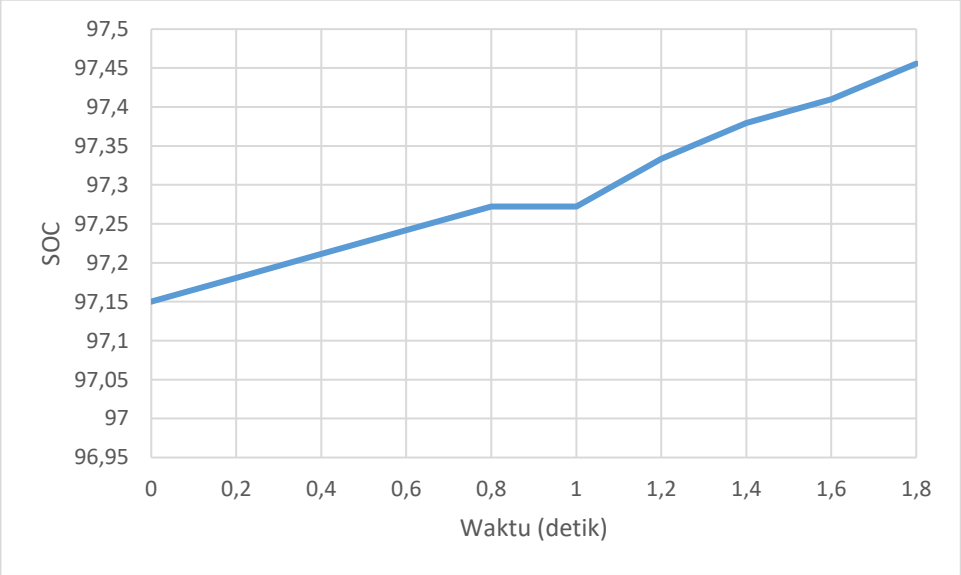
Gambar 4.12 respon yang yang dihasilkan ketika adanya pengereman. Pada saat dilakukan pengereman sehingga slip ratio naik hingga mencapai 36 %, hal ini menunjukan bahwa sistem dalam keadaan akan mencapai slip, sehingga harus dilakukan aksi yang dapat menghindari menuju *lock*. Nilai *slip* yang terlalu tinggi tidak baik bagi pengendara karena kurang bisa mengendalikan kendaraannya.

Seiring aksi yang diberikan untuk menjaga slip diangka 20 % maka slip turun sebesar 13% namun respon yang dihasilkan masih belum stabil, nilai slip ratio pada detik 0,8 ; 1,2 ; 1,6 semakin tinggi. hingga kendaraan berhenti pada detik ke 1,8. Pengendalian dikatakan baik pada sistem ini ketika nilai *slip* mendekati set point dan waktu pengereman sesingkat – singkatnya.



Gambar 4. 13 Respon kecepatan kp 1,8 dan ki 0,04

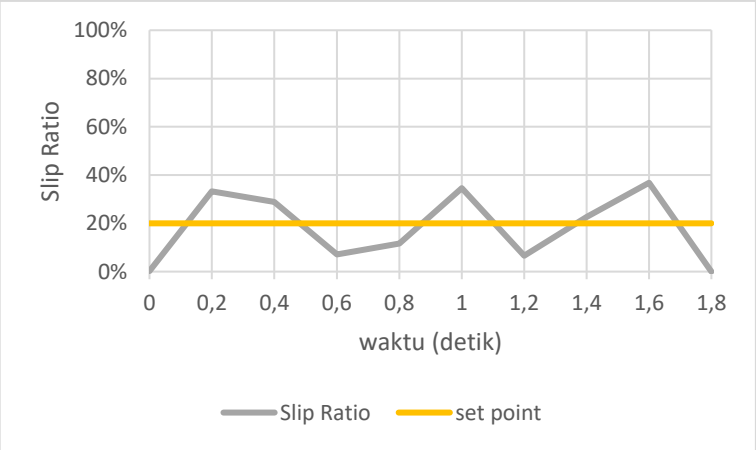
Gambar 4.13 menunjukkan respon kecepatan sistem ABS dengan pengendalian proporsional integral (PI) menggunakan nilai Kp sebesar 1,8 dan Ki sebesar 0.04. Pada saat dilakukan pengereman pada sistem menyebabkan kecepatan roda turun dari 28,83 km/jam menjadi 16,72 km/jam sedangkan kecepatan kendaraan turun dari 28,83 km/jam menjadi 25,95 km/jam, hal ini menyebabkan nilai *slip ratio* naik hingga 36%. Dengan naiknya nilai *slip ratio* diatas 20%, maka sistem pengendalian kemudian mulai aktif dan memberikan sinyal ke aktuator. Seiring dengan aksi yang diberikan ke sistem, *slip ratio* terus berosilasi disekitar 20%, namun pada detik 1,2 hingga 1,6 slip ratio berosilasi diatas 20% dan tidak stabil. Hingga akhirnya pada waktu ke 1,8 detik kendaraan berhenti.



Gambar 4. 14 Nilai SOC baterai kp 1,8 dan ki 0,04

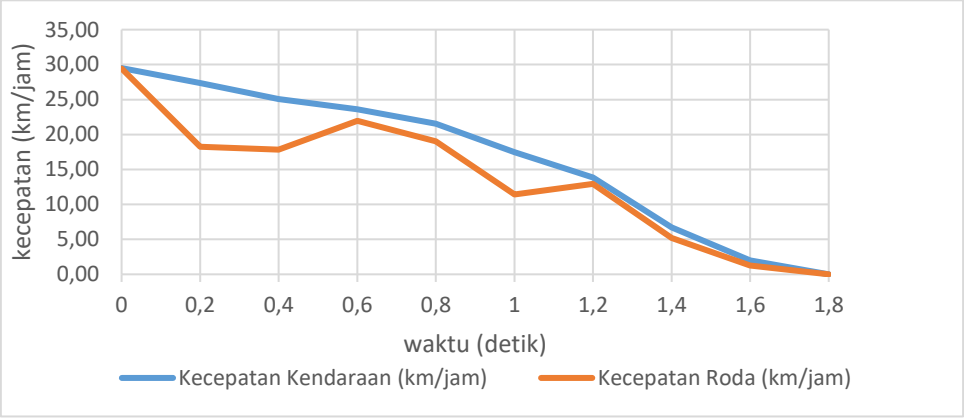
Pada **Gambar 4.14** menunjukkan nilai SOC dari baterai saat proses pengereman berlangsung. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa nilai dari SOC baterai terus mengalami kenaikan meskipun pada detik ke 0,8 sampai 1 mengalami *stagnant*. Pada awal memulai pengereman nilai SOC baterai sebesar 97,15%, dan nilai tersebut terus meningkat hingga roda berhenti pada detik ke 1,8 dengan nilai SOC baterai 97,46% pada akhir pengereman. Kenaikan nilai SOC baterai pada sistem *closed loop* dengan kontrol PI (kp 1,8 dan ki 0,04) sebesar 0,3%.

4.3.5 Kontrol PI Menggunakan kp 1 dan ki 0.04



Gambar 4. 15 Respon Slip Ratio kp 1 dan ki 0,04

Pada waktu ke 0,2 detik nilai *slip ratio* **Gambar 4.15** naik yang kemudian pada waktu ke 0,4 detik kembali turun. Hal ini terjadi dikarenakan sistem pengendalian terus memberikan sinyal ke aktuator bergantung dengan nilai *slip ratio* yang sedang terdeteksi. Ketika nilai *slip ratio* diatas nilai *setpoint* maka sistem pengereman berada diposisi *releas* dan ketika nilai *slip ratio* berada dibawah nilai *setpoint* maka sistem pengereman dalam posisi *build up*. Secara bergantian posisi operasi ini dijalankan sesuai dengan kondisi yang dibutuhkan sistem pengereman.



Gambar 4. 16 Respon kecepatan kp 1 dan ki 0,04

Gambar 4.16 menunjukkan respon kecepatan sistem ABS dengan pengendalian proporsional integral (PI) menggunakan nilai Kp sebesar 1 dan Ki sebesar 0.04. Pada saat dilakukan pengereman pada sistem menyebabkan kecepatan roda turun dari 29,44 km/jam menjadi 18,27 km/jam sedangkan kecepatan kendaraan turun dari 29,50 km/jam menjadi 27,36 km/jam, hal ini menyebabkan nilai *slip ratio* naik hingga 33%. Dengan naiknya nilai *slip ratio* diatas 20%, maka sistem pengendalian kemudian mulai aktif dan memberikan sinyal ke aktuator. Respon berosilasi disekitar *slip ratio* dan berhenti pada detik ke 1,8.

Gambar 4. 17 Nilai SOC baterai kp 1 dan ki 0,04

Sedangkan untuk nilai SOC baterai yang diakibatkan pengereman *closed loop* dengan pengendalian PI (kp = 1 dan ki = 0,04) mengalami peningkatan. Pada awal memulai pengereman nilai SOC baterai sebesar 95,93%, dan nilai tersebut terus meningkat hingga roda berhenti pada detik ke 1,8 dengan nilai SOC baterai 96,26% pada akhir pengereman. Kenaikan nilai SOC baterai pada sistem *closed loop* dengan kontrol PI (kp 1 dan ki 0,04) sebesar 0,34%.

Berdasarkan grafik-grafik diatas, nilai respon *slip ratio* sistem *closed loop* dari berbagai tunning kp dan ki berbeda-beda. Nilai *overshoot* slip ratio sistem *closed loop* berturut-turut dari kp 1, ki 0,04 ; kp 1,5, ki 0,02 ; kp 1,5, ki 0,04 ; kp 1,8, ki 0,02 ; kp 1,8, ki 0,04 adalah 33%, 52%, 59%, 42%, 36%. Dan waktu respon sistem berhenti berturut-turut adalah 1,8 detik, 1,6 detik, 1,6 detik, 1,8 detik, 1,8 detik. Berdasarkan data tersebut, semakin besar nilai kp dan semakin besar nilai ki, maka semakin besar nilai *overshoot* pada respon *slip ratio* pada suatu sistem. Sedangkan untuk waktu respon sampai berhenti, semakin besar nilai kp dan ki, semakin cepat respon berhenti. Namun pada kp 1,8, ki 0,02 dan kp 1,8, ki 0,04 nilai overshoot dan waktu respon berhenti semakin menurun. Hal tersebut terjadi karena terdapat kendala pada proses pengambilan data seperti tingkat fungsional dari master rem yang menurun atau perbedaan tekanan fluida yang diberikan ke kaliper rem.

Penambahan nilai SOC sistem *closed loop* untuk kp 1, ki 0,04 ; kp 1,5, ki 0,02 ; kp 1,5, ki 0,04 ; kp 1,8, ki 0,02 ; kp 1,8, ki 0,04 berturut-turut adalah 0,34%, 0,6%, 0,78%, 0,18%, 0,3%. Penambahan nilai SOC baterai tertinggi ketika sistem *closed loop* dengan nilai kp 1,5 dan ki 0,04. Ketika saat akan dilakukan pengereman nilai SOC baterai sebesar 97.41% dan saat sistem berhenti nilai SOC baterai sebesar 98.19%. Penambahan nilai SOC baterai diambil saat nilai akhir SOC baterai ketika pengereman berhenti dikurangi nilai SOC baterai saat akan pengereman dilakukan. Berdasarkan nilai SOC baterai diatas, semakin cepat waktu pengereman semakin besar pula perubahan nilai SOC baterai.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

a) Perancangan sistem *regenerative* ABS dengan menggunakan pengendalian PI dapat memberikan waktu pengereman yang lebih baik, roda tidak terkunci, nilai *slip ratio* yang optimal dibandingkan tanpa ABS. Selain itu perancangan RABS dapat memberikan regenerasi energi ke baterai saat pengereman berlangsung.
b) Respon sistem *closed loop* menggunakan kontrol PI dengan *gain* Kp = 1,5 dan Ki = 0,02 mendapat hasil terbaik dengan *slip ratio* 52 % pada detik 0,4 dengan kecepatan kendaraan sebesar 22.08 km/jam dan kecepatan roda sebesar 10.55 km/jam. Dan hasil respon *slip ratio* sistem semakin mendekati *set point*. Untuk kecepatan sistem berhenti pada detik ke 1,6.
c) Semakin cepat waktu pengereman, semakin besar pula kenaikan nilai SOC baterai. Nilai kenaikan SOC baterai tertinggi terjadi pada saat pengendalian *closed loop* proportional integral dengan nilai kp 1,5 dan ki 0,04 dengan kenaikan 0,78%. Ketika saat akan dilakukan pengereman nilai SOC baterai sebesar 97.41% dan saat sistem berhenti nilai SOC baterai sebesar 98.19%.

5.2 Saran

Dalam proses tugas akhir ini terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yaitu :

a) Set up plant regenerative ABS dibuat lebih integral, sistematis, terstruktur agar menghasilkan sistem *regenerative* ABS yang lebih stabil, akurat dan dapat mempertahankan *slip ratio* pada batas yang masih aman.
b) Memperhatikan pemilihan komponen berupa spesifikasi dan fungsionalitas yang sesuai dengan kebutuhan dari plant ataupun lebih mendukung penelitian.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Aly, A. A., Zeidan, E. S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 186-195.

Aly, A., Zeidan, E., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking System (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 186-195.

Antic, D. (2010). Sliding Mode Control of Anti-Lock Braking System : An Overview. *Automatic Control and Robotics, 9*, 41-58.

Artikel-Teknologi. (2020, Juni 21). *Prinsip Kerja Pengereman Regeneratif*. Retrieved from Artikel Teknologi: https://artikel-teknologi.com/prinsip-kerja-pengereman-regeneratif/

Azzumar, M. (2012). Pemodelan dan simulasi brushless DC Motor Kecil Untuk Aplikasi Aktuator Sirip. Jakarta: Unniversitas Indonesia.

Bai, L. (2011). Electric Drive System with BLDC Motor. *International Conference on Electric Information and Control Engineering* (p. 254). Kuala Lumpur: Universiti Malaya.

Blanke, M. (1999). *Fault Tolerant Control Systems.* London: Adventure Workd Press.

Bogipower. (2020, 2 13). *BLDC*. Retrieved from https://www.bogipower.com/2018/05/bldc-disk-motor-800-1000w.html

Chen, C. K., & Wang, Y. C. (1996). Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System. *Fuzzy Systems Symposium* (pp. 67-72). Kenting, Taiwan: IEEE.

Chen, C., & Wang, Y. (1996). Fuzzy Control for Anti-Lock Braking System. Fuzzy Systems Symposium. *IEEE*, 67-72.

Denton, T. (1995). *Automobile Electrical & Electronics System.* Colchester: Arnold.

Diarnise, S. (2017). *Perancangan Sistem Active Fault Tolerant Control pada Regenerative Anti-Lock Braking System Mobil Listrik dengan Kesalahan pada Aktuator.* Surabaya: Teknik Fisika ITS.

Dity, D. F. (2016). Perancangan dan Implementasi Sistem Pengereman Regeneratif pada Mobil Listrik dengan Penggerak BLDC Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy. Bandung: Open Library Telkom University.

Errabelli, R. (2012). Fault-Tolerant Voltage Source Inverter for Permanent Magnet Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics, 27*.

Gao, Y. (2001). Electronic Braking System of EV and HEV--Integration of Regenerative Braking, Automatic Braking Force Control and ABS. *42 Volt Technology and Advanced Vehicle Electrical Systems*.

Guo, J., Jian, X., & Lin, G. (2014). Performance Evaluation of an Anti-Lock Braking System foe Electric Vehicle with a Fuzzy Sliding Mode Controller. *Energies*, 6459-6476.

Horn, B. v. (2017). The Development of a 48V, 10kWh LiFePO4 Battery Management System for Low Voltage Battery Storage Applications. Matieland: Department of Electrical and Electronical Engineering University of Stellenbosch.

Lee, Y., & Zak, S. (2002). Designing a Genetic Neural Fuzzy Anti-lock Brake System Controller. *Transaction on Evolutionary Computation.*, 198-211.

Lubbers, K. (2014). Design and Analysis of a Model Based Low Level Slip Controller Based on a Hybrid Braking System. *Science in Systems and Control Delft University*.

Maliye, S. (2014). REGENERATIVE AND ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM IN ELECTRIC VEHICLES.

Murali, T. (2017). Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor. *International Conference on Circuits Power and Computing Technology*.

Offer, G. J. (2010). Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell, and hybrid vehicle in a future sustainable road transport system. *energy policy, 38*, 24-29.

Peng, D. Z. (2008). Combined Control of a Regenerative Braking and Anti-lock Braking System for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal Automotive Technology*, 749-757.

Saptaji, H. (2015). Mudah Belajar Mikrokontroller dengan Arduino. Bandung: Widya Media.

Setiawan, I. (2008). Kontrol PID untuk Proses Industri. Surabaya: Elex Media Komputindo.

Shiosansi, R. (2008). Emissions Impacts and Benefits of Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Vehicle-to-Grid Services. *Environmental Science Technology*, 1199-1204.

Singh, C. P. (2012). State-space Based Simulink Modeling of BLDC Motor and its Speed Control Using Fuzzy PID Controller. *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology, 2*, 359-369.

Solyon, S. (2002). *Sysnthesis of a Model-Based Tire Slip Controller.* Departement of Automotive Control, Lund, Sweden.

Stanislaw, H. Z. (2002). Designing a Genetic Neural Fuzzy Anti-lock Brake System Controller. *IEEE*, 198-211.

Statistik, B. P. (2020, 2 18). *Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor*. Retrieved from https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1133

Tashakori, A. (2011). Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Applications. *World Congress on Engineering.* London.

Tur, O. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-Lock Braking System. *Proceedings of 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (pp. 13-15). Istanbul.

Tur, O., Ustun, O., & Tuncay, R. N. (2007). An Introduction to Regenerative Braking of Electric Vehicles as Anti-lock Braking System. *Intelligent Vehicles Symposium* (pp. 944–948). Istanbul, Turkey: IEEE.

Westbrook, M. H. (2005). *Development and future of battery, hybrid, and fuel-cell cars.* London: The Institution of Electrical Engineers.

yao, j., zhong, z., & sun, z. (2006). A Fuzzy Logic Based Regenerative Braking Regulation for a fuel cell bus.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Hasil Pengendalian PI Closed Loop

Tabel A. 1 Uji Pengendalian Proporsional Integral (PI) dengan Kp=1,5 Ki=0,02

waktu (detik)	Kecepatan Kendaraan (km/jam)	Kecepatan Roda (km/jam)	Slip Ratio	set point	tegangan (volt)	SOC (%)
0	29.82	28.81	3%	0.2	52.53	99.06
0.2	27.03	22.03	18%	0.2	52.55	99.09
0.4	22.08	10.55	52%	0.2	52.6	99.17
0.6	19.48	18.38	6%	0.2	52.72	99.35
0.8	15.8	8.82	54%	0.2	52.79	99.46
1	13.84	9.88	29%	0.2	52.81	99.49
1.2	12.73	11.16	12%	0.2	52.81	99.49
1.4	4.38	2.94	33%	0.2	52.9	99.62
1.6	0	0	0%	0.2	52.92	99.66

Tabel A. 2 Uji Pengendalian Proporsional Integral (PI) dengan Kp=1,5 Ki=0,04

Waktu (detik)	Kecepatan Kendaraan (km/jam)	Kecepatan Roda (km/jam)	Slip Ratio	set point	tegangan (volt)	SOC (%)
0	28.98	28.95	0%	0.2	51.45	97.41
0.2	25.38	10.42	59%	0.2	51.46	97.43
0.4	23.02	20.54	11%	0.2	51.49	97.47
0.6	21.34	21.19	1%	0.2	51.60	97.64
0.8	15.39	9.03	41%	0.2	51.88	98.07
1	12.55	12.27	2%	0.2	51.92	98.13
1.2	6.28	5.62	11%	0.2	51.95	98.17
1.4	4.01	3.98	1%	0.2	51.95	98.17
1.6	0	0	0%	0.2	51.96	98.19

Tabel A. 3 Uji Pengendalian Proporsional Integral (PI) dengan Kp=1,8 Ki=0,02

Waktu (detik)	Kecepatan Kendaraan (km/jam)	Kecepatan Roda (km/jam)	Slip Ratio	set point	tegangan (volt)	SOC (%)
0	29.45	29.20	1%	0.2	52.32	98.74
0.2	25.38	14.69	42%	0.2	52.34	98.77
0.4	23.02	21.47	7%	0.2	52.33	98.75
0.6	17.59	11.15	37%	0.2	52.38	98.83
0.8	15.39	13.48	12%	0.2	52.40	98.86
1	10.32	10.20	1%	0.2	52.42	98.89
1.2	9.26	8.49	8%	0.2	52.42	98.89
1.4	5.83	4.28	27%	0.2	52.42	98.89
1.6	1.02	0.23	77%	0.2	52.44	98.92
1.8	0.00	0.00	0%	0.2	52.44	98.92

Tabel A. 4 Uji Pengendalian Proporsional Integral (PI) dengan Kp=1,8 Ki=0,04

Waktu (detik)	Kecepatan Kendaraan (km/jam)	Kecepatan Roda(km/jam)	Slip Ratio	set point	tegangan (volt)	SOC (%)
0	28.83	28.83	0%	0.2	51.28	97.1502
0.2	25.95	16.72	36%	0.2	51.30	97.18075
0.4	25.04	18.96	24%	0.2	51.32	97.2113
0.6	23.00	20.01	13%	0.2	51.34	97.24185
0.8	20.47	10.62	48%	0.2	51.36	97.2724
1	18.36	15.11	18%	0.2	51.36	97.2724
1.2	14.84	7.03	53%	0.2	51.40	97.3335
1.4	7.52	5.61	25%	0.2	51.43	97.37933
1.6	3.58	1.28	64%	0.2	51.45	97.40988
1.8	0.00	0.00	0	0.2	51.48	97.4557

Tabel A. 5 Uji Pengendalian Proporsional Integral (PI) dengan Kp=1 Ki=0,04

waktu (detik)	Kecepatan Kendaraan (km/jam)	Kecepatan Roda (km/jam)	Slip Ratio	set point	tegangan (volt)	SOC (%)
0	29.50	29.44	0%	0.2	50.48	95.9282
0.2	27.36	18.27	33%	0.2	50.50	95.95875
0.4	25.08	17.85	29%	0.2	50.50	95.95875
0.6	23.62	21.94	7%	0.2	50.55	96.03513
0.8	21.56	19.04	12%	0.2	50.57	96.06568
1	17.46	11.42	35%	0.2	50.60	96.1115
1.2	13.84	12.93	7%	0.2	50.61	96.12678
1.4	6.70	5.18	23%	0.2	50.68	96.2337
1.6	2.01	1.27	37%	0.2	50.70	96.26425
1.8	0.00	0.00	0%	0.2	50.70	96.26425

B. Kode Arduino Uno

```
#include <Wire.h>

//Deklarasi Variabel
double rpmRoda, rpmKendaraan;
volatile byte pulsesRoda, pulsesKendaraan;
unsigned long previousMillisRoda = 0;
unsigned long previousMillisKendaraan = 0;

//Durasi Sampling dalam satuan mili sekon
int intervalMillisRoda = 1000;          //Durasi Sampling Roda
int intervalMillisKendaraan = 1000;     //Durasi Sampling Kendaraan

unsigned long PulsesPerTurnRoda =  23;        //Jumlah Pin/Mur pada Roda
unsigned long PulsesPerTurnKendaraan = 8;     //Jumlah Pin/Mur pada
Kendaraan

#define PI 3.1415926536   //Mendefinisikan Nilai PI
int ButtonState = 0;      //Kondisi Tombol

double bacategangan, outputtegangan, slipratio, VeloRoda, VeloKendaraan;
double InputPID, OutputPID;
double KP, KI, KD, proportional, integral, derivative, error, SumError,
previousError;

#define SetpointPID 0.2   //Mendefinisikan Nilai Setpoint Slipratio
#define KP 1.5            //Mendefinisikan Nilai Koefisien KP
#define KI 0.04           //Mendefinisikan Nilai Koefisien KI
#define KD 0            //Mendefinisikan Nilai Koefisien KD
```

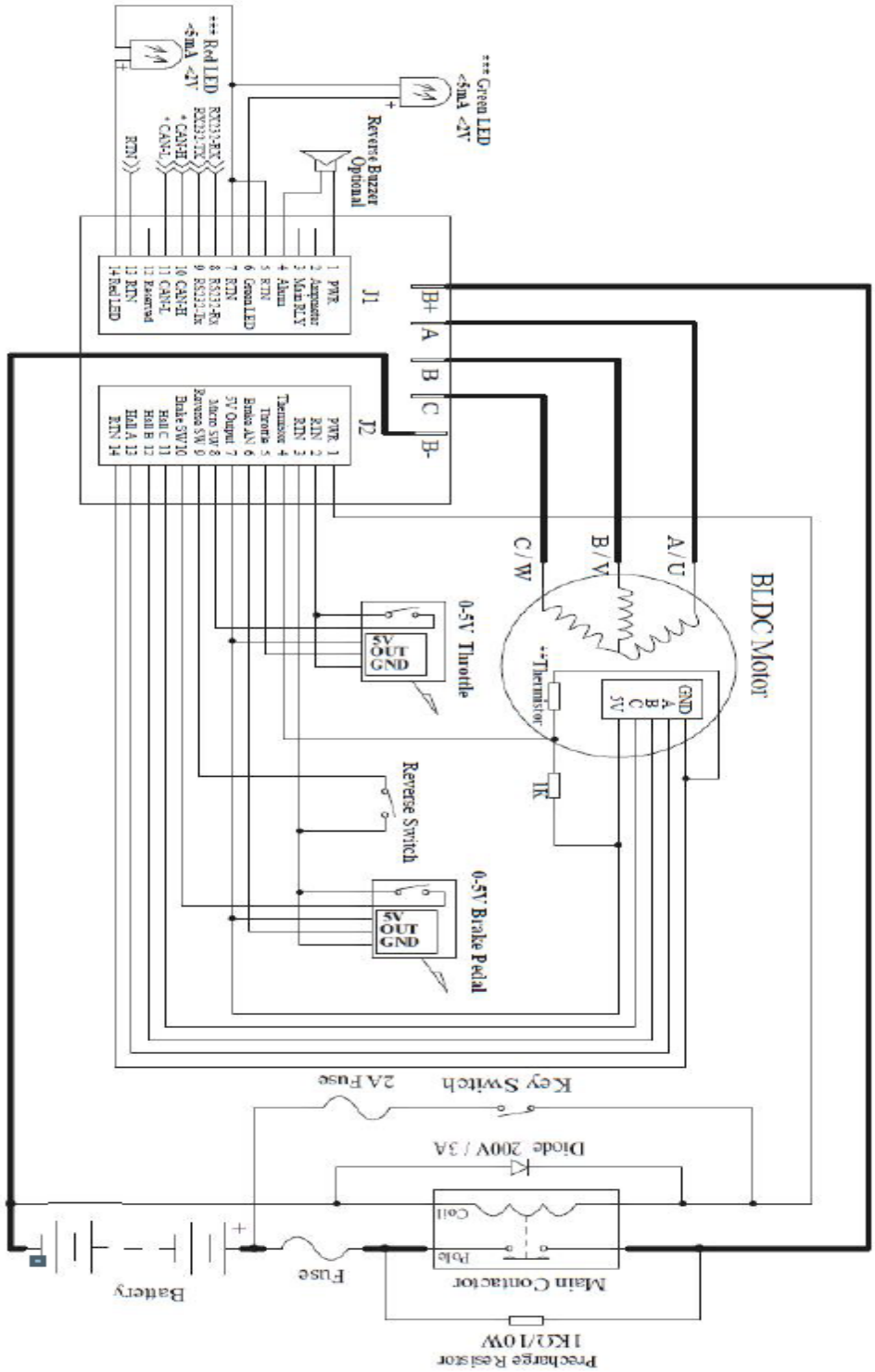
```
//Mendefinisikan Batas Max dan Min PID
#define integral_max 100
#define integral_min -100
#define derivative_max 100
#define derivative_min -100
#define OutputPID_max 255
#define OutputPID_min 0

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //Deklarasi Masing-Masing PIN Divais yg Tesambung dengan Arduino
  pinMode(13, OUTPUT);        //Pin LED

  //Perlu Dicek Ulang Apakah Pin sudah sesuai apa belum
  pinMode(2, INPUT);          //Pin Sensor Proximity Roda
  pinMode(3, INPUT);          //Pin Sensor Proximity Kendaraan

  pinMode(4, INPUT);          //Pin Rem
  pinMode(5, OUTPUT);         //Pin Pompa
  pinMode(6, OUTPUT);         //Pin Solenoid

  //Perintah Interrupt Untuk Penghitungan Pulsa
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), HitungPulsaRoda, FALLING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), HitungPulsaKendaraan, FALLING);

  //Inisiasi Nilai Variabel
  pulsesRoda = 0;
  pulsesKendaraan = 0;
  rpmRoda = 0;
  rpmKendaraan = 0;

  proportional = 0;
  integral = 0;
  derivative = 0;
  error = 0;
  SumError = 0;
  previousError = 0;
  OutputPID = 0;

}

void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();

  //Program Eksekusi Untuk Roda
```

```
  if ((unsigned long)(currentMillis - previousMillisRoda) >=
intervalMillisRoda)
  {
    //Jangan melakukan proses Interrupt selama Perhitungan (Mematikan
proses Interrupt)
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2));

    //Persamaan Hitung RPM Roda
    rpmRoda = (pulsesRoda / (currentMillis - previousMillisRoda)) * (60 *
1000) / PulsesPerTurnRoda;
    //(60 * 1000 / PulsesPerTurnRoda) / (currentMillis - previousMillisRoda) *
pulsesRoda;

    //Menyimpan nilai waktu saat ini pada previousMillis Roda
    previousMillisRoda = currentMillis;
    pulsesRoda = 0;

    //Mengaktifkan kembali fungsi Interrupt
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), HitungPulsaRoda, FALLING);
  }
  //Persamaan Hitung Nilai Kecepatan Roda (Km/Jam)
  VeloRoda = 0.06 * PI * 0.54 * rpmRoda;


  //Program Eksekusi Untuk Kendaraan
  if ((unsigned long)(currentMillis - previousMillisKendaraan) >=
intervalMillisKendaraan)
  {
    //Jangan melakukan proses Interrupt selama Perhitungan
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3));

    //Persamaan Hitung RPM Kendaraan
    rpmKendaraan = (pulsesKendaraan / (currentMillis -
previousMillisKendaraan)) * (60 * 1000) / PulsesPerTurnKendaraan;
    //(60 * 1000 / PulsesPerTurnKendaraan) / (currentMillis -
previousMillisKendaraan) * pulsesKendaraan;

    //Menyimpan nilai waktu saat ini pada previousMillis Roda
    previousMillisKendaraan = currentMillis;
    pulsesKendaraan = 0;

    //Mengaktifkan kembali fungsi Interrupt
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), HitungPulsaKendaraan,
FALLING);
  }

  //Persamaan Hitung Nilai Kecepatan Kendaraan (Km/Jam)
```

```
  VeloKendaraan = 0.06 * PI * 0.32 * rpmKendaraan;

  //Menghitung Nilai Slipratio
  slipratio = (VeloKendaraan - VeloRoda) / VeloKendaraan;
  InputPID = slipratio;
  HitungPID();

  //Menghitung Nilai Tegangan Baterai
  bacategangan = analogRead(A0);
  outputtegangan = ((bacategangan * 0.00489) * 10.5);

  //Program Eksekusi Tombol Rem
  ButtonState = digitalRead(4);
  if (ButtonState == LOW)          //Eksekusi Ketika Tombol Rem Mati
  {
    // turn LED on:
    digitalWrite(13, HIGH);        //Nyalakan LED
    digitalWrite(5, LOW);          //Matikan Pompa
    digitalWrite(6, LOW);          //Matikan Solenoid
  }
  else                             //Eksekusi Ketika Tombol Rem Nyala
  {
    // turn LED off:
    digitalWrite(13, LOW);         //Matikan Lampu
    digitalWrite(5, HIGH);         //Nyalakan Pompa
    digitalWrite(6, HIGH);         //Nyalakan Solenoid
  }

  //Menampilkan Hasil pada Serial Monitor
  Serial.print("Kecepatan Kendaraan =
");Serial.print(VeloKendaraan);Serial.print(" || ");
  Serial.print("Kecepatan roda = ");Serial.print(VeloRoda);Serial.print(" || ");
  Serial.print("Set point = ");Serial.print(SetpointPID);Serial.print(" || ");
  Serial.print("Slip ratio = ");Serial.print(slipratio);Serial.print(" || ");
  Serial.print("Output PID = ");;Serial.print(OutputPID);Serial.print(" || ");
  Serial.print("Tegangan Baterai = ");Serial.println(outputtegangan);
  delay(100);

}



void HitungPulsaRoda()
{
  pulsesRoda++;
}
```

```
void HitungPulsaKendaraan()
{
  pulsesKendaraan++;
}


void HitungPID()
{
  //Hitung Nilai Error
  error = SetpointPID - InputPID;
  SumError += error;

  //Hitung Nilai P, I, dan D
  if (integral > integral_max) integral = integral_max;
  else if (integral < integral_min) integral = integral_min;

  if (derivative > derivative_max) derivative = derivative_max;
  else if (derivative < derivative_min) derivative = derivative_min;

  proportional = KP * error;
  integral = KI * SumError;
  derivative = KD * (error - previousError);

  previousError = error;
  OutputPID = (short int) proportional + integral + derivative;

  if (OutputPID > OutputPID_max) OutputPID = OutputPID_max;
  else if (OutputPID < OutputPID_min) OutputPID = OutputPID_min;
}
```

C. Pengkabelan Plant



Gambar 1 Pengkabelan standar *Kelly Controller* – BLDC Motor

BIODATA PENULIS

Nama Yordan Fanani, dilahirkan di Probolinggo, tanggal 13 September 1997. Alamat penulis yaitu di Jalan KH. Hasan Gang Melati, Kelurahan Sukoharjo, Kecamatan Kanigaran, Kota Probolinggo, Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Sukoharjo 2, pendidikan di SMP Negeri 2 Proboliinggo, pendidikan di SMA Negeri 1 Probolinggo, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika di ITS hingga sekarang. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi melalui email : yordanfanani@gmail.com