



**KORELASI KONSTANTA KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL*  
*DERIVATIVE* TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**SKRIPSI**

Oleh

**Darma Arif Wicaksono**

**NIM 111910201068**

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2015**



**KORELASI KONSTANTA KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL*  
*DERIVATIVE* TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Darma Arif Wicaksono**

**NIM 111910201068**

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2015**

## PERSEMBAHAN

Dengan naungan rahmat Allah S.W.T. yang telah memberikan segala nikmat serta anugerah-Nya sehingga dapat kupersembahkan skripsi ini kepada :

1. Ibundaku Siti Mu'aliful Waroh dan Ayahanda Hidayat Azhari yang selalu memberikan cinta, kasih sayang serta supportnya sehingga saya dapat menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.).
2. Kakakku Risky Arif Rahman Hidayat dan Betty aku ucapkan terima kasih karena telah menjadi kakak yang bertanggung jawab dan telah memberikan do'a serta support agar saya dapat menyelesaikan studi di Universitas Jember.
3. Bapak Bambang Sujanarko, terima kasih banyak atas bimbingan, ilmu dan nasehatnya.
4. Untuk Rifqi Wafda Rozana, terima kasih atas do'a dan dukungannya sehingga dapat terselesaikannya skripsi ini.
5. Seluruh asisten laboratorium Konversi Energi Listrik dan Mas sugi yang telah berbagi pengalaman menarik selama saya mengerjakan studi di Teknik Elektro, Universitas Jember.
6. Arek-arek kontrakan pagah 52 Budi Novian Syah S.T, Dimas Waluyo Jati S.T, Rifan Hadiyanto S.T, Moh. Iskandar S.T, (Alm.) M. Fikri Ahlian terima kasih atas canda tawa yang kalian berikan, you're best guys.
7. Untuk kontrakan U10 beserta sahabat Dicky, Ichal, Yanu, Noval, Manu, Aji, Jamal, Fiqi, Sidiq , Yudha, Yoppi terima kasih atas waktu yang telah kita gunakan untuk ngopi bareng.
8. Untuk BbCorp terima kasih kerja samanya.
9. Tim mobil listrik Elevatron yang telah menambah pengalaman selama saya kuliah di Universitas Jember.
10. Keluarga besar Teknik Elektro 2011 "GATEL", aku bangga menjadi bagian dari kalian.
11. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember

**MOTTO**

*“man saara ala darbi washala”  
(Ranah 3 Warna)*

*“There are two of spreading light,  
to be the candle or the mirror that reflects it”  
(A Non)*

*“Awards are so unnecessary, because I think we get so much out of our work,  
just by doing it. The work is a reward in itself”  
(Natalie Portman)*

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Darma Arif Wicaksono

NIM : 111910201068

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis yang berjudul: **Korelasi Konstanta Kontrol *Proportional Integral Derivative* Terhadap Kinerja Mobil Listrik Universitas Jember** adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 22 September 2015

Yang menyatakan,

Darma Arif Wicaksono  
NIM. 111910201068

**SKRIPSI**

**KORELASI KONSTANTA KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL*  
*DERIVATIVE* TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

Oleh

Darma Arif Wicaksono

NIM 101910201068

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Ir. Bambang Sujanarko M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : Ir. Widyono Hadi, M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “**Korelasi Konstanta Kontrol *Proportional Integral Derivative* Terhadap Kinerja Mobil Listrik Universitas Jember**” telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Selasa

Tanggal : 22 September 2015

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Mengetahui,

Dosen Pembimbing Utama,

Dosen Pembimbing Anggota,

Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

NIP 19631201 199402 1 002

Ir. Widyono Hadi, M.T

NIP 19610414 198902 1 001

Tim Penguji,

Penguji I

Penguji II

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T.,M.T

NIP 19710402 200312 1 001

Bambang Supeno, S.T.,M.T

NIP 19690630 199512 1 001

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Teknik,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

NIP 19610414 198902 1 001

**KORELASI KONSTANTA KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**Darma Arif Wicaksono**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

**ABSTRAK**

Mobil listrik pertama kali dikenalkan oleh Robert Anderson dari Skotlandia pada tahun 1832-1839, namun pada saat itu harga bahan bakar minyak (BBM) relatif murah. Saat ini harga BBM semakin mahal dan cadangannya semakin menipis. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan menyelenggarakan suatu kompetisi yang diharapkan dapat turut meningkatkan kesadaran akan lingkungan bersih pada kompetisi Mobil Listrik Indonesia (KMLI). Berdasarkan alasan tersebut maka dilakukan penelitian tentang kontrol mobil listrik dengan berpenggerak motor *Brushless Direct Current* (BLDC) 1000 W berbasis *Proportional Integral Derivative* (PID). Kontrol ini akan mengatur kinerja mobil agar berjalan stabil sesuai *setpoint* ketika diberi beban. Aksi Kontrol P adalah meningkatkan respon sistem, sedangkan aksi kontrol I adalah kecenderungan mengejar *setpoint* sedekat mungkin dan pada aksi kontrol D adalah pengoreksi *error* sehingga *error* yang akan terjadi dapat diatasi, sehingga pada penelitian ini memilih korelasi dari ketiga variabel kontrol P, I dan D. Kontrol PID mempunyai karakteristik *reset control* dan *rate control* yaitu meningkatkan respon dan stabilitas sistem serta mengeliminasi *steady state error* dengan *setling time* selama 2 detik daripada kontrol PI dengan *settling time* selama 4 detik. Namun *rise time* kontrol PID selama 1,6 detik, lebih lama daripada kontrol PI selama 1,4 detik. Penalaan konstanta  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dilakukan dengan *trial* dan *error*. Pada penelitian ini diperoleh  $K_p=1,6$ ,  $K_i=0,0055$  dan  $K_d=0,53$ .

**Kata Kunci :** KMLI, Kontrol PID, Motor BLDC 1000 W, Mobil Listrik.

## *Corelation control constan of P, I and D to electrical vehicle performance at Jember University*

**Darma Arif Wicaksono**

*Department Electrical of Engineering, Faculty of Engineering,  
Jember University*

### **ABSTRACT**

*Electric vehicle introduced by Robert Anderson from Scotland in 1832-1839. But at that time the price of fuel oil (BBM) is relatively cheap. At this time more expensive fuel prices and dwindling reserves. Directorate General of Higher Education, Ministry of Education and Culture held a competition which is expected to contribute to socialize of increase awareness of environmental clean the electric car competition Indonesia (KMLI). Based of these reasons, the research on electric car control with motorized Brushless Direct Current (BLDC) 1000 W-based Proportional Integral Derivative (PID). These controls will regulate the performance of the car so that it equal runs of the setpoint when given load. Control action P is improving system responsiveness, while control action I is the tendency of pursuing the setpoint as closely as possible and the control action D is correcting the error so the error will occur can be overcome, so that in this study chose the correlation of the three control variables P, I and D. PID control has the characteristic reset control and rate control that increases the responsiveness and stability of the system and eliminate steady state error with settling time for 2 seconds instead of PI control with a settling time for 4 seconds. However, rise time PID control for 1.6 seconds longer than the PI control for 1.4 seconds. Tuning constants control  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  are by trial and error. In this study obtained values of  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  the most has the best performance at  $K_p = 1,6$ ,  $K_i = 0,0055$  and  $K_d = 0,53$ .*

**Keywords:** *Brushless Direct Current 1000 W Electric Vehicle, PID Controller.*

## RINGKASAN

**KORELASI KONSTANTA KONTROL *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE* TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK UNIVERSITAS JEMBER;** Darma Arif Wicaksono; 111910201068, 2015; 94 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Mobil listrik pertama kali dikenalkan oleh Robert Anderson dari Skotlandia pada tahun 1832-1839, namun pada saat itu harga bahan bakar minyak (BBM) relatif murah sehingga masyarakat dunia cenderung mengembangkan motor bakar yang menggunakan BBM. Saat ini harga BBM semakin mahal dan cadangannya semakin menipis serta sulit dikendalikan untuk masa yang akan datang.

Dengan berlandaskan uraian tersebut, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan menyelenggarakan suatu kompetisi yang diharapkan dapat turut mensosialisasikan penggunaan mobil listrik dalam upaya mengurangi gas rumah kaca (GRK) dan meningkatkan kesadaran akan lingkungan bersih pada kompetisi Mobil Listrik Indonesia (KMLI).

Dengan mengacu alasan diatas dibentuk penelitian tentang mobil listrik berpenggerak *Brushless* DC (BLDC) 1000 watt, dengan kontrol sendiri untuk kinerja dari mobil listrik. Pada penelitian ini menggunakan kontrol PID sebagai kontrol kecepatan, sedangkan rangkaian *driver* menggunakan IC GAL 16V8, dimana IC ini tidak bisa diprogram lebih dari satu kali karena itu kerahasiaan dari rangkaian ini bernilai tinggi.

Motor BLDC adalah motor *sinkron*. Hal ini berarti bahwa medan magnet yang dihasilkan *stator* dan medan magnet yang dihasilkan *rotor* berputar pada frekuensi yang sama. Putaran pada *rotor* disebabkan oleh medan magnet pada *stator* yang pada setiap saatnya hanya aktif dua fasa (hanya dua fasa yang tersuplai pada setiap saat sementara satu fasa lainnya tak tersuplai).

Alat yang digunakan dalam komutasi elektrik sebagai pengganti sikat adalah *inverter* 3 fasa. Sedangkan metode pengendalian *inverter* motor BLDC yakni dengan menggunakan metode *six-step*. Gelombang yang dihasilkan dari metode ini berbentuk *square* atau *trapezoid*. Dan agar motor mampu bekerja dengan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan *timing* perubahan komutasi yang tepat dalam pengendalian BLDC dengan metode *six-step*. Oleh karena itu, pada motor BLDC telah terpasang 3 buah sensor hall untuk menentukan *timing* perubahan komutasi pada pengendalian BLDC.

Secara keseluruhan prinsip kerja dari alat ini yaitu, ketika *turtle* kita injak maka akan mempunyai nilai *rise time* respon yang menimbulkan arus besar, sehingga dengan adanya kontrol PID ini diharapkan akan mempunyai respon yang *smooth* sehingga tidak membahayakan peralatan dan komponen yang lain. Selain itu ketika mobil diberikan suatu beban maka putaran motor akan menjadi lebih lambat, sehingga dengan adanya kontrol ini akan bertujuan untuk membuat stabil putaran motor ketika motor dalam keadaan berbeban. Aksi Kontrol P adalah meningkatkan respon sistem, sedangkan aksi kontrol I adalah kecenderungan mengejar *setpoint* sedekat mungkin dan pada aksi kontrol D adalah pengoreksi *error* sehingga *error* yang akan terjadi dapat diatasi, sehingga pada penelitian ini memilih korelasi dari ketiga variabel kontrol P, I dan D. Kontrol PID mempunyai karakteristik *reset control* dan *rate control* yaitu meningkatkan respon dan stabilitas sistem serta mengeliminasi *steady state error* dengan *setling time* selama 2 detik daripada kontrol PI dengan *settling time* selama 4 detik. Namun *rise time* kontrol PID selama 1,6 detik, lebih lama daripada kontrol PI selama 1,4 detik. Dari penalaan konstanta kontrol PID dengan menggunakan metode *trial and error* diperoleh nilai  $K_p = 1,6$  nilai  $K_i = 0,055$  dan nilai  $K_d = 0,53$ . Pada pengaplikasiannya metode PID analog masih belum memiliki performa yang baik untuk diterapkan pada mobil listrik pada kenyataan, namun dengan adanya kontrol PID ini respon sistem semakin cepat dalam mencapai kestabilan.

## PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim

Puji syukur ke hadirat Allah swt. atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul “**Korelasi Kontrol *Proportional Integral Derivative* terhadap kinerja mobil listrik Universitas Jember**” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan program studi Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu disampaikan ucapan terima kasih kepada:

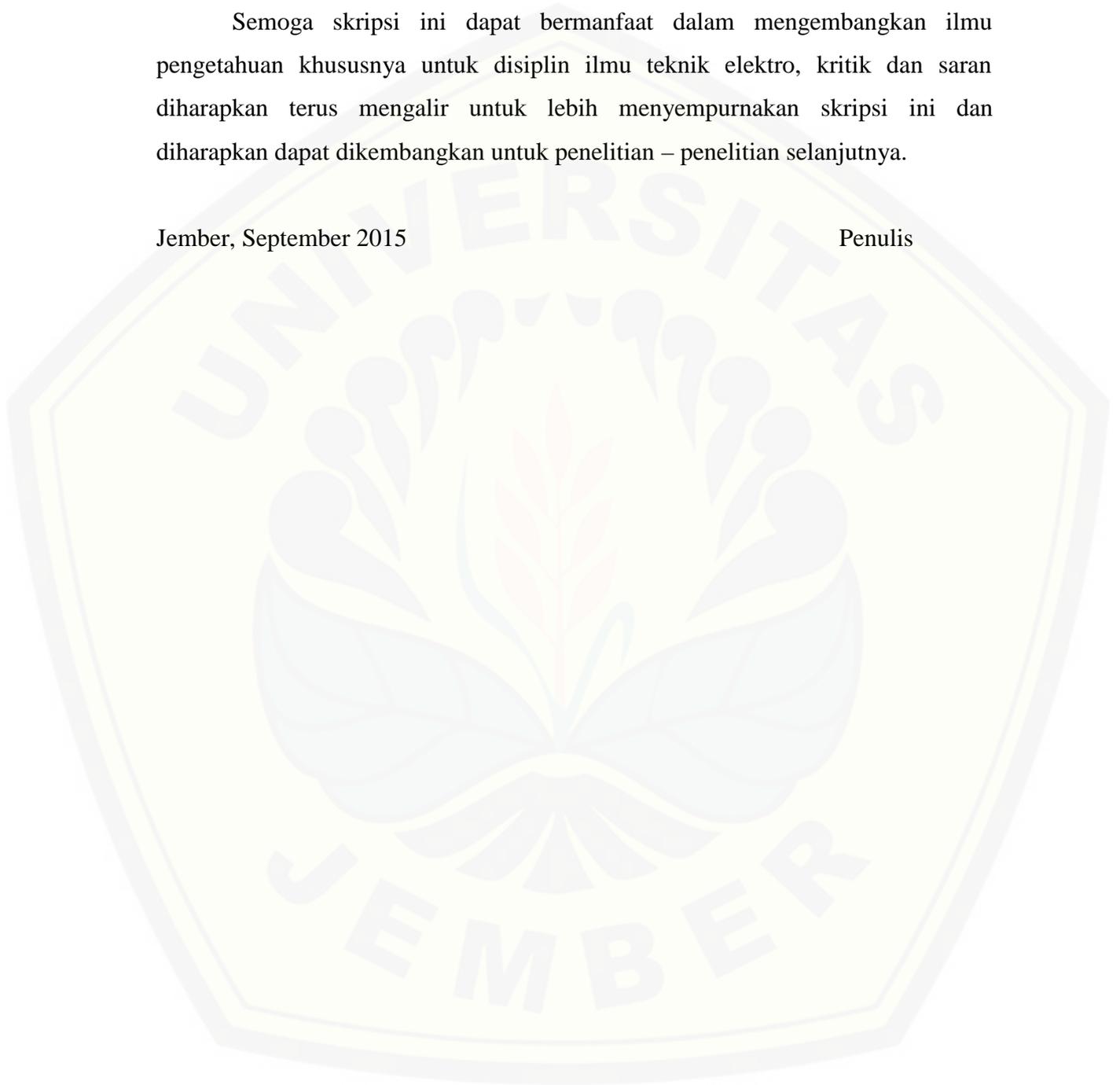
1. **Ir. Widyono Hadi, M.T** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. **Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T** selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. **Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M** selaku dosen pembimbing Utama dan **Ir. Widyono Hadi, M.T** selaku dosen pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan bimbingan dan pengarahan demi terselesainya penulisan laporan tugas akhir ini;
4. **Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T** dan **Bambang Supeno, S.T., M.T**, selaku Tim Penguji Skripsi yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan pengarahan demi terselesainya penulisan skripsi ini;
5. Ibunda **Siti Mu'aliful Waroh** dan Ayahanda **Hidayat Azhari** tercinta, yang telah membantu baik moril dan materiil, mendoakan, mendidik, dan memberi kasih sayang serta pengorbanan yang tidak terhingga selama ini;
6. Saudaraku **Risky Arif Rahman Hidayat** terima kasih atas doa dan dukungan yang telah diberikan kepadaku selama ini;

7. Keluarga Besar **Teknik Elektro Angkatan 2011**, aku bangga menjadi angkatan 2011. Terimakasih atas dukungan dan motivasi yang kalian berikan;

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin ilmu teknik elektro, kritik dan saran diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan skripsi ini dan diharapkan dapat dikembangkan untuk penelitian – penelitian selanjutnya.

Jember, September 2015

Penulis

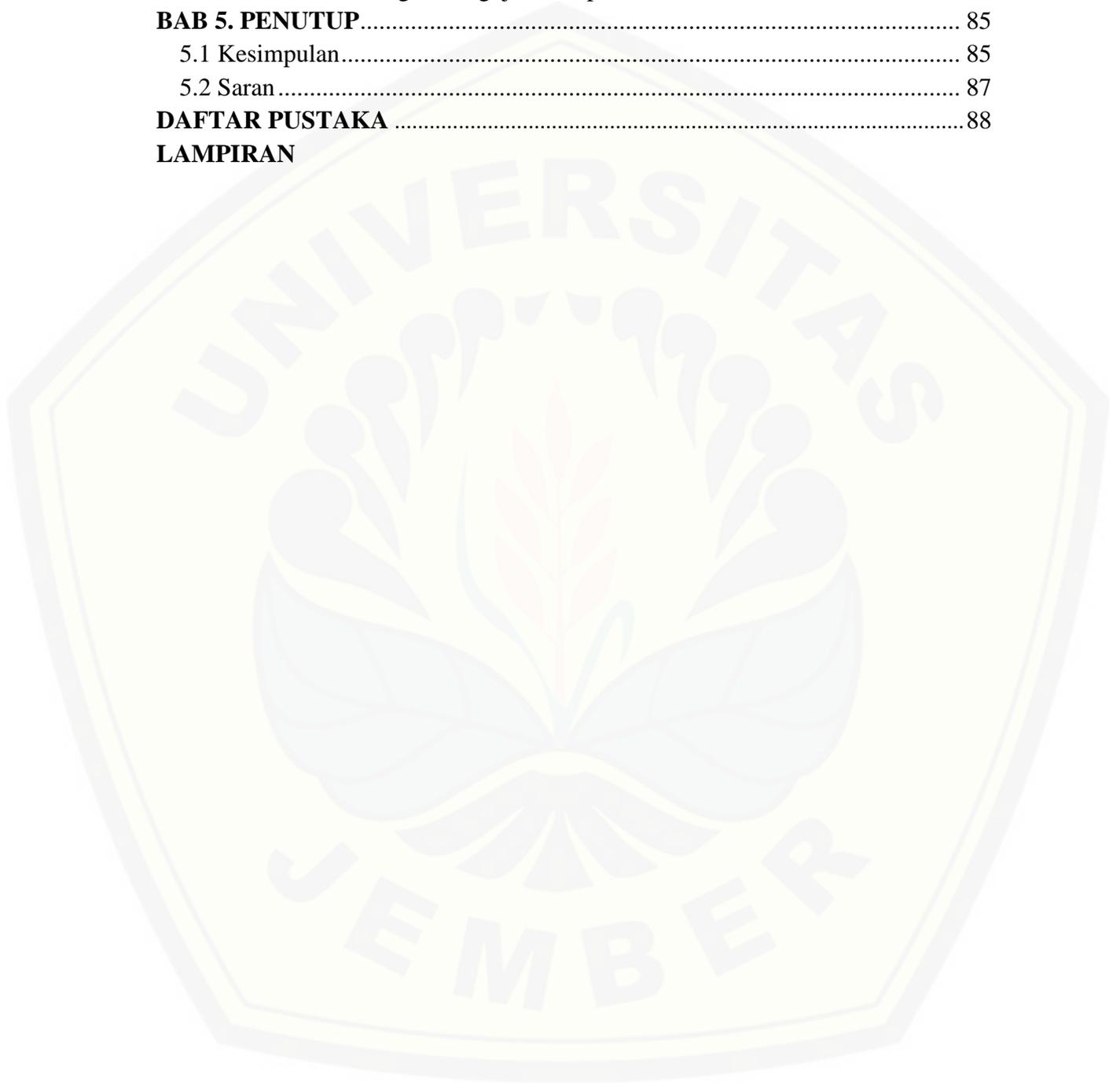


## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vii
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>PRAKATA</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xix
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
1.6 Sistematika Penelitian .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 Kontes Mobil Listrik Indonesia (KMLI VI).....	6
2.2 Motor <i>Brush Less Direct Current</i> (BLDC) .....	6
2.2.1 Prinsip kerja motor BLDC.....	8
2.3 Mobil Listrik ELTOB I UNEJ.....	10
2.4 Baterai .....	11
2.5 <i>Inverter</i> 3 Fasa.....	12
2.6 Sensor Hall .....	13
2.7 <i>Programmable Logic Device</i> (PLD) .....	15
2.7.1 <i>Programmable Array Logic</i> (PAL).....	16
2.7.2 <i>Generic Array Logic</i> (GAL) .....	17
2.8 <i>Proportional, Integral, dan Derrivative</i> (PID).....	18
2.8.1 Pengontrol <i>Proportional</i> .....	18
2.8.2 Pengontrol <i>Integral</i> .....	19
2.8.3 Pengontrol <i>Derrivative</i> .....	21
2.8.4 Pengontrol PID .....	22

2.8.5 Penalaan Paramater Pengontrol PID.....	29
2.8.6 Pengontrolan PID berdasarkan pemodelan motor BLDC.....	31
2.9 Pulse Width Modulation (PWM) .....	32
2.9.1 Dasar Pembangkitan PWM.....	32
2.9.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM.....	32
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>33</b>
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	33
3.2 Alat dan Bahan .....	33
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	33
3.4 Prosedur Penelitian.....	35
3.5 Perancangan <i>Hardware</i> .....	36
3.5.1 Sensor Kecepatan.....	38
3.5.2 Motor BLDC.....	41
3.5.3 Baterai.....	42
3.5.4 <i>Power Supply</i> .....	42
3.5.5 <i>Inverter</i> 3 Fasa .....	43
3.5.6 Rangkaian <i>Driver</i> Mosfet .....	44
3.5.7 Rangkaian PWM.....	45
3.5.8 IC GAL 16V8 .....	46
3.5.9 Kontrol PID.....	46
3.6 Perancangan <i>Software</i> .....	48
3.6.1 Rangkaian <i>Integrated Circuit</i> (IC).....	48
3.6.2 Pemrograman Rangkaian Terintegrasi (IC).....	49
3.7 Pengujian Sistem .....	53
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>54</b>
4.1 Sensor Kecepatan .....	54
4.2 Metode <i>Sixstep Commutation</i> dengan IC GAL 16V8 .....	55
4.3 Rangkaian <i>Inverter</i> .....	56
4.4 Rangkaian PWM .....	58
4.5 Hubungan <i>Duty Cycle</i> PWM dan Kecepatan Motor .....	62
4.6 Detektor <i>Error</i> Kecepatan .....	65
4.6.1 Pengujian Rangkaian <i>Error Detector</i> .....	65
4.7 Pengujian Tanpa Beban.....	67
4.7.1 Pengujian Tanpa Kontrol.....	67
4.7.2 Kontrol P.....	68
4.7.3 Kontrol PI .....	70
4.7.4 Kontrol PID.....	72
4.7.5 Perbandingan Pengujian Tanpa Beban .....	74
4.8 Pengujian Dengan Beban .....	76
4.8.1 Pengujian Tanpa Kontrol.....	77

4.8.2 Kontrol P.....	77
4.8.3 Kontrol PI.....	79
4.8.4 Kontrol PID.....	80
4.8.5 Perbandingan Pengujian Tanpa Beban.....	82
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	<b>85</b>
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	87
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>88</b>
<b>LAMPIRAN</b>	



**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 2.1 Hubungan Hall Sensor dengan Sistem <i>Switching</i> pada <i>Inverter</i> .....	14
Tabel 2.2 Efek dari Kontrol P,I dan D .....	22
Tabel 4.1 Pengujian Konfigurasi Kecepatan Motor, Tegangan dan Data ADC .	54
Tabel 4.2 Pengujian Tegangan Logika <i>Input</i> dan <i>Output</i> .....	55
Tabel 4.3 Hubungan Metode <i>Sixstep Commutation</i> dengan Tegangan Fasa R, S dan T.....	57
Tabel 4.4 Bentuk Perubahan Sinyal PWM .....	60
Tabel 4.5 Pengujian Tegangan <i>Setpoint</i> dari <i>Tortle</i> dan Tegangan <i>Feedback</i> Sistem dari Generator DC terhadap Kecepatan Motor .....	65
Tabel 4.6 Data Pengujian Tanpa Kontrol.....	67
Tabel 4.7 Pengujian Kontrol P dengan Nilai $K_p$ Bervariasi.....	69
Tabel 4.8 Pengujian Kontrol PI pada $K_p$ dan $K_i$ Bervariasi .....	71
Tabel 4.9 Pengujian Kontrol PID pada $K_p$ , $K_i$ dan $K_d$ Bervariasi .....	73
Tabel 4.10 Pengujian Respon Tanpa Beban.....	74
Tabel 4.11 Data Pengujian Tanpa Kontrol dengan Beban.....	77
Tabel 4.12 Pengujian Kontrol P dengan Beban saat Nilai $K_p$ Bervariasi.....	78
Tabel 4.13 Pengujian Kontrol PI dengan Beban saat Nilai $K_p$ dan $K_i$ Bervariasi.....	79
Tabel 4.14 Pengujian Kontrol PID dengan Beban saat Nilai $K_p$ , $K_i$ dan $K_d$ Bervariasi.....	81
Tabel 4.15 Pengujian Kontrol pada saat dengan Beban .....	82

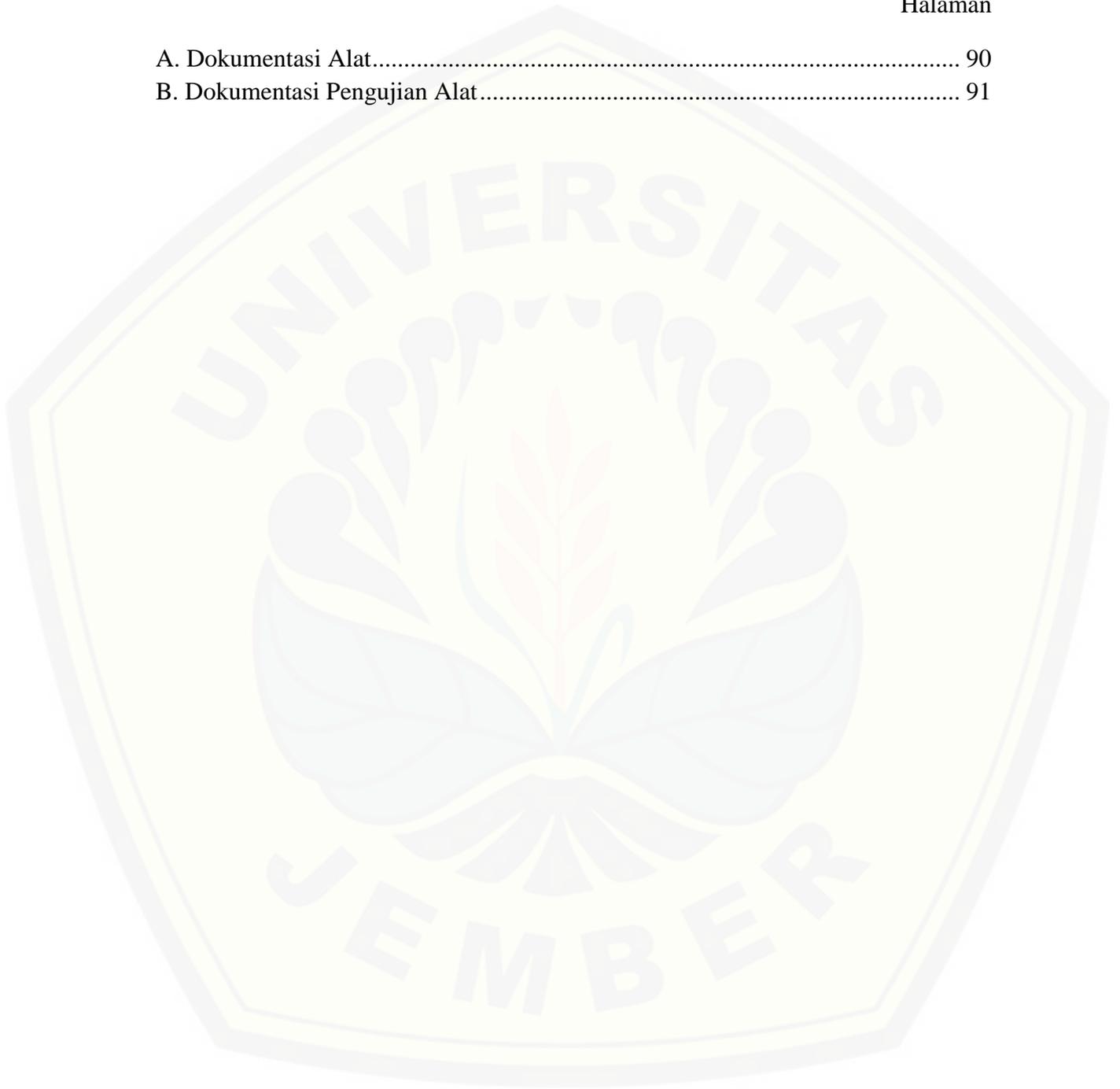
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Motor BLDC .....	7
Gambar 2.2 Rotor dan Sensor Hall .....	8
Gambar 2.3 Tegangan Stator BLDC.....	9
Gambar 2.4 Mobil Listrik ELTOB I UNEJ .....	11
Gambar 2.5 Rangkaian Inverter 3 fasa .....	12
Gambar 2.6 Metode Konduksi 120° .....	13
Gambar 2.7 Urutan Switch Q1-Q6.....	14
Gambar 2.8 Programmable Logic Devices .....	15
Gambar 2.9 Programmable array logic .....	16
Gambar 2.10 Pin GAL 16V8 .....	18
Gambar 2.11 Respon Kontrol P .....	19
Gambar 2.12 Respon Kontrol P, I dan PI.....	21
Gambar 2.13 Respon Kontrol P,D dan PD .....	22
Gambar 2.14 Blok Diagram Kontroler PID .....	23
Gambar 2.15 Hubungan dalam Fungsi Waktu Antara Sinyal Keluaran dengan Masukan untuk Pengontrol PID .....	23
Gambar 2.16 Respon Kontrol P,PI dan PID .....	24
Gambar 2.17 Rangkaian Kontrol PID Analog .....	25
Gambar 2.18 Rangkaian Kontrol Error Detector .....	26
Gambar 2.19 Rangkaian Kontrol PID .....	27
Gambar 2.20 Kurva Respon Berbentuk S .....	30
Gambar 2.21 Kurva Kecepatan Motor Orde 2 .....	32
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	34
Gambar 3.2 Konfigurasi Sistem.....	37
Gambar 3.3 Generator DC sebagai Sensor Kecepatan.....	39
Gambar 3.4 Arduino Uno.....	40
Gambar 3.5 Daftar Program Data Logger Arduino Uno.....	40
Gambar 3.6 Motor BLDC .....	41
Gambar 3.7 Baterai 12V 45 Ah.....	42
Gambar 3.8 Rangkaian Power Supply .....	43
Gambar 3.9 Rangkaian Inverter 3 Fasa.....	44
Gambar 3.10 Skematik Rangkaian Driver Mosfet.....	45
Gambar 3.11 Skematik Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM.....	45
Gambar 3.12 IC GAL 16V8.....	46
Gambar 3.13 Diagram Skematik Kontrol PID.....	47

Gambar 3.14 <i>Function Block Diagram</i> IC GAL 16V8.....	49
Gambar 3.15 Tampilan Awal <i>Software WinCUPL</i> .....	50
Gambar 3.16 Tampilan Awal <i>Universal Programmer G540</i> .....	51
Gambar 3.17 Program Rangkaian Logika.....	52
Gambar 4.1 Gelombang Tiga Fasa .....	57
Gambar 4.2 Gambar 4.2 Bentuk Gelombang Segitiga.....	58
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang Pada Kaki Komparator <i>Duty Cycle 50 %</i> .....	62
Gambar 4.4 Hubungan Tegangan <i>Setpoint</i> Generator DC dan juga Kecepatan Motor.....	65
Gambar 4.5 Gelombang Tegangan <i>Feedback</i> Sebelum Filterasi.....	66
Gambar 4.6 Gelombang Tegangan <i>Feedback</i> Setelah Filterasi .....	66
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID pada saat Tanpa Beban dengan Tegangan <i>Setpoint 1,6 V</i> .....	75
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID pada saat Tanpa Beban dengan Tegangan <i>Setpoint 2,4 V</i> .....	75
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID dengan Beban saat Tegangan <i>Setpoint 1,6 V</i> .....	83
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID dengan Beban saat Tegangan <i>Setpoint 2,4 V</i> .....	83

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
A. Dokumentasi Alat.....	90
B. Dokumentasi Pengujian Alat.....	91



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Mobil listrik pertama kali dikenalkan oleh Robert Anderson dari Skotlandia pada tahun 1832-1839, namun pada saat itu harga bahan bakar minyak (BBM) relatif murah sehingga masyarakat dunia cenderung mengembangkan motor bakar yang menggunakan BBM. Saat ini harga BBM semakin mahal dan cadangannya semakin menipis serta sulit dikendalikan untuk masa yang akan datang. Selain itu, terdapat isu lingkungan yang menjadi perhatian dunia tertuang dalam *Education for Sustainable Development* (EfSD). Hal ini memicu pengembangan penggunaan energi listrik dalam sistem transportasi sebagai pengganti bahan bakar fosil, sebab energi listrik mudah dibangkitkan dari berbagai macam sumber termasuk dari sumber-sumber energi terbarukan.

Mengacu kepada *blueprint* Pengembangan energi baru terbarukan dan konservasi energi, ketahanan dan kemandirian energi harus ditingkatkan dengan menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK = CO<sub>2</sub>) serta meningkatkan pemanfaatan energi baru terbarukan. Presiden Republik Indonesia pada forum *The Group of Twenty* (G-20) di Pittsburgh, USA tahun 2009 dan pada *Conference of the Parties* (COP) 15 di Copenhagen menyampaikan bahwa Indonesia dapat menurunkan emisi GRK sebesar 26% dan bahkan bisa mencapai sebesar 41% dengan bantuan negara maju hingga tahun 2020. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah mengurangi pemakaian BBM untuk transportasi dan menggantikannya dengan energi listrik. Dengan berlandaskan uraian tersebut, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan menyelenggarakan suatu kompetisi yang diharapkan dapat turut mensosialisasikan penggunaan mobil listrik dalam upaya mengurangi GRK dan meningkatkan kesadaran akan lingkungan bersih. Hal yang tidak kalah pentingnya adalah penyelenggaraan kompetisi ini diharapkan dapat memotivasi mahasiswa dalam meningkatkan kreatifitas, inovasi dan jiwa berkompetisi

dalam ajang perlombaan sehingga dapat membentuk pribadi-pribadi yang tangguh dan mandiri. (Panduan Kontes Mobil Listrik Indonesia, 2014)

Universitas Jember bertujuan untuk berkontribusi dalam upaya mengurangi GRK dan menciptakan lingkungan bersih dengan mengikuti kompetisi tersebut. ELTOB UNEJ I merupakan mobil listrik dengan penggerak *brush less direct current* (BLDC) bentukan mahasiswa teknik elektro pada tahun 2014 yang diharapkan mampu menjadi mobil listrik yang mempunyai kinerja maksimal dalam kompetisi tersebut sehingga dapat mencapai gelar juara pada ajang Kontes Mobil Listrik Indonesia (KMLI). Dipilihnya motor penggerak BLDC adalah dengan pertimbangan dapat memenuhi kebutuhan akan efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan dan juga memiliki biaya perawatan yang lebih rendah daripada motor DC yang memiliki efisiensi tinggi namun dengan biaya perawatan yang lebih besar akibat adanya *brush* dalam komutasi dan motor induksi yang memiliki kecepatan yang tinggi dibandingkan motor DC dengan biaya perawatan yang lebih rendah namun memiliki efisiensi yang rendah karena motor cepat panas akibat *rotor* yang terbuat dari kumparan diinduksi dengan medan magnet putar *stator* terdapat disipasi daya (Dharmawan, 2009). Mobil ini adalah mobil berbentuk balap yang dikhususkan untuk lomba dengan harapan mempunyai waktu tersingkat dengan jarak yang sama sesuai dengan desain sirkuit panitia KMLI.

Pada mobil listrik ELTOB UNEJ I masih mempunyai kendala dalam pengontrolan kecepatan, yaitu dengan sebuah kontrol yang dapat mengatur kinerja mobil listrik ini sehingga dapat mempunyai kinerja yang optimal serta dapat diaplikasikan untuk mobil listrik ELTOB UNEJ I. Berdasarkan uraian tersebut akan dibuat sebuah penelitian tentang **KORELASI KONSTANTA KONTROL PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE TERHADAP KINERJA MOBIL LISTRIK UNIVERSITAS JEMBER**. Kontrol *Proportional, Integral, Derivative* (PID) tersebut menggunakan kontrol analog yang dapat diatur besar kecil nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ -nya dengan menggunakan hambatan potensiometer pada masing-masing rangkaian parameter kontrol sesuai dengan nilai konstanta yang memiliki respon baik untuk kinerja mobil listrik dalam perlombaan.

Penggunaan Kontroler PID merupakan salah satu kontrol yang memiliki kestabilan yang cukup baik. Kontroler PID merupakan gabungan dari kontroler P, I, dan D yang masing-masing mempunyai keunggulan dan kelemahan, dengan menggabungkan keunggulan ketiga kontroler tersebut, maka kontroler PID memiliki kestabilan yang cukup baik (Putri Ratna Ika,2008). Beberapa penelitian telah dilakukan yaitu diantaranya tentang pengontrolan kecepatan motor *direct current* (DC) dengan metode PID analog oleh Irvan Nur Ardiyansyah tahun 2012 mahasiswa Universitas Pendidikan Indonesia, yang membedakan adalah dalam penelitiannya menggunakan motor DC dan variabel yang dikontrol adalah kecepatan. Selain itu dilakukan juga penelitian tentang kontrol motor BLDC oleh Bayu Sovan tahun 2013 mahasiswa Universitas Jember terhadap mobil Sinosi Universitas Jember yang pada pengaplikasiannya difokuskan pada pemakaian mobil secara umum, sedangkan yang membedakan dengan penelitian ini adalah kontrol ini difokuskan pada mobil listrik perlombaan dengan satu orang kemudi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian masalah diatas, dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana desain *hardware* dan *software* kontrol kecepatan PID pada ELTOB I UNEJ?
2. Bagaimana pengaruh korelasi konstanta kontrol PID terhadap performa mobil listrik ELTOB I UNEJ?

### 1.3 Batasan Masalah

1. Motor BLDC yang digunakan berdaya 1000 watt.
2. Tidak dibahas secara mendetail konstruksi mobil listrik ELTOB I UNEJ.
3. Penentuan konstanta PID dilakukan secara *trial* dan *error*.
4. Kontrol ini dikhususkan untuk lomba mobil listrik ELTOB I UNEJ.
5. Kontrol yang digunakan adalah kontrol analog yang digunakan untuk kontrol kecepatan..

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mendesain *hardware* dan *software* kontrol kecepatan PID pada ELTOB I UNEJ .
2. Mengetahui korelasi kontrol PID pada performa mobil listrik ELTOB I UNEJ.

### 1.5 Manfaat

Menghasilkan kontrol motor listrik berpengerak BLDC terhadap performa mobil listrik ELTOB I UNEJ pada lomba KMLI VI.

### 1.6 Sistematika Penelitian

Secara garis besar penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

#### BAB 1. PENDAHULUAN

Latar belakang, tujuan pembahasan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika penulisan.

#### BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang tinjauan pustaka yang menguraikan pendapat-pendapat atau hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan, landasan teori merupakan penjabaran dari tinjauan pustaka.

**BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**

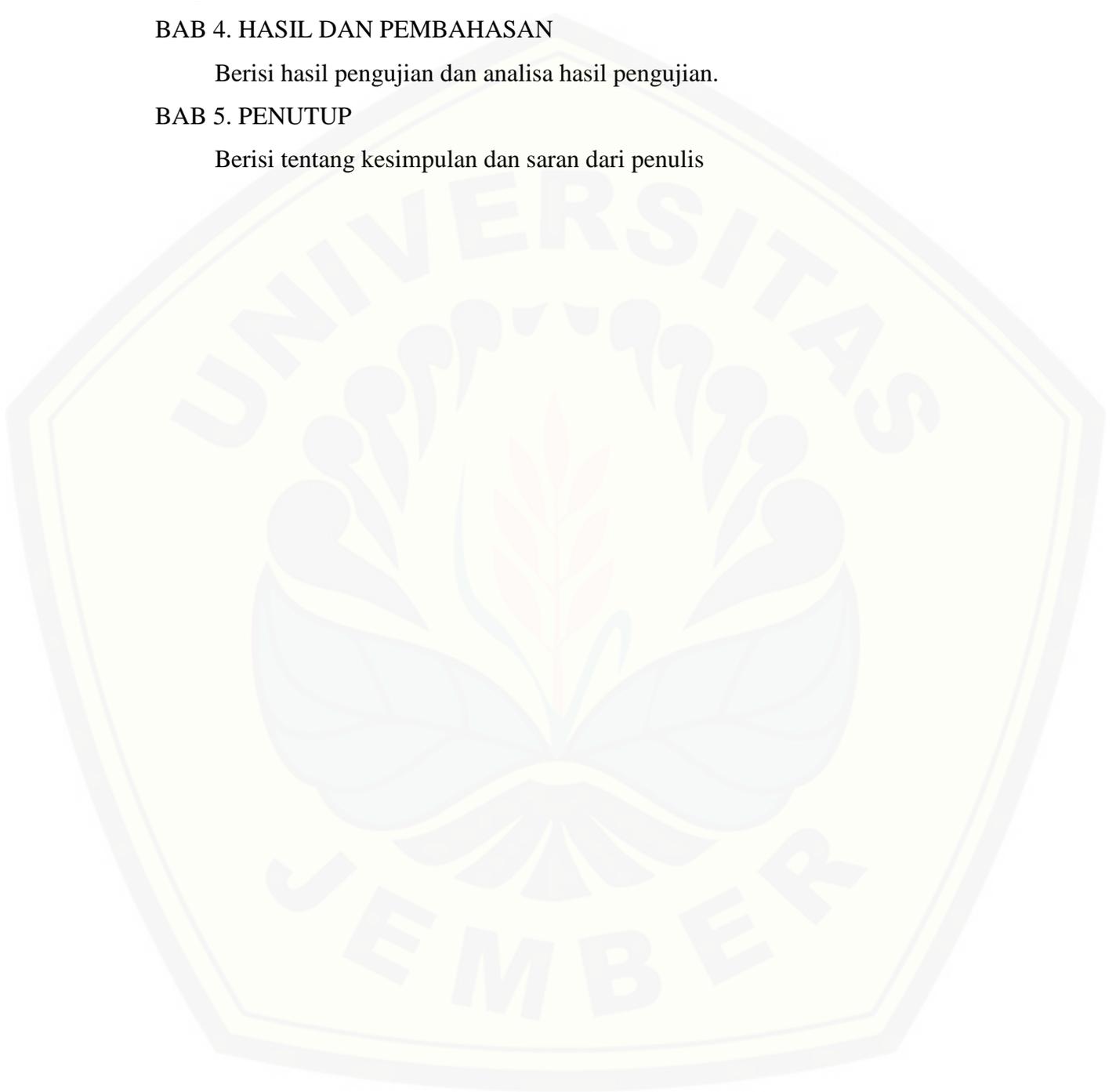
Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.

**BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi hasil pengujian dan analisa hasil pengujian.

**BAB 5. PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis



## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kontes Mobil Listrik Indonesia (KMLI VI)

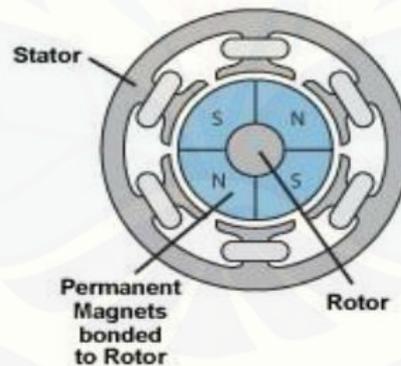
Kontes Mobil Listrik Indonesia (KMLI) adalah ajang perlombaan yang diadakan oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan di Politeknik Negeri Bandung sejak tahun 2009. KMLI pada tahun 2014 adalah Kontes Mobil Listrik Indonesia ke-6. Kompetisi diadakan sebagai upaya untuk menampung dan meningkatkan kreatifitas mahasiswa dibidang teknologi transportasi, serta untuk meningkatkan kesadaran dalam menanggapi isu global tentang lingkungan hidup dan energi yaitu mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) untuk mengurangi kerusakan lapisan ozon dengan cara menciptakan teknologi yang ramah lingkungan dan mengurangi pemakaian bahan bakar minyak. Pada awalnya peserta KMLI terbatas untuk 12 tim, karena semakin tahun semakin banyak peminat dari perlombaan ini maka pada tahun 2014 ini jumlah peserta ditambah menjadi 24 tim. KMLI tahun 2014 ini mengambil tema “Mobil Listrik sebagai Kendaraan Efisien, Ekonomis, dan Aman“. Melalui kegiatan kompetisi ini diharapkan dapat mengarahkan minat mahasiswa kepada kegiatan yang positif, produktif, inovatif, dan kompetitif dengan tetap mempertahankan silaturahmi antar mahasiswa dari berbagai perguruan tinggi dan disiplin ilmu demi kesuksesan mereka di masa depan (Panduan Kontes Mobil Listrik Indonesia, 2014 ).

### 2.2 Motor *Brush Less Direct Current* (BLDC)

Motor BLDC atau dapat disebut juga dengan motor *altenating current* (AC) merupakan motor listrik sinkron AC 3 fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki *back electro-motive force* (BEMF) berbentuk *trapezoid* sedangkan *brush less alternating current* (BLAC) memiliki BEMF berbentuk *sinusiodal*. Walaupun demikian keduanya memiliki struktur yang sama dan dalam pengaplikasiannya kedua jenis motor tersebut juga disebut motor

BLDC. Motor BLDC dapat dikendalikan dengan metode *six-step* maupun *PWM sinusoidal*. Kelebihan motor BLDC dibandingkan dengan motor DC adalah biaya perawatan yang lebih rendah, dan kecepatan yang lebih tinggi karena tidak adanya *brush* pada BLDC. Sedangkan untuk perbandingan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi dan torsi awal yang lebih tinggi karena *rotor* terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC maupun induksi, motor BLDC memiliki pengontrolan yang lebih rumit dari jenis motor yang lain dan juga harganya yang lebih mahal.

Motor BLDC secara umum terdiri atas 2 bagian, yaitu *rotor* adalah bagian yang bergerak terbuat dari magnet permanen dan juga *stator* bagian yang tidak bergerak terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik sinkron 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. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada *stator* BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet *rotor* (Dharmawan, 2009).

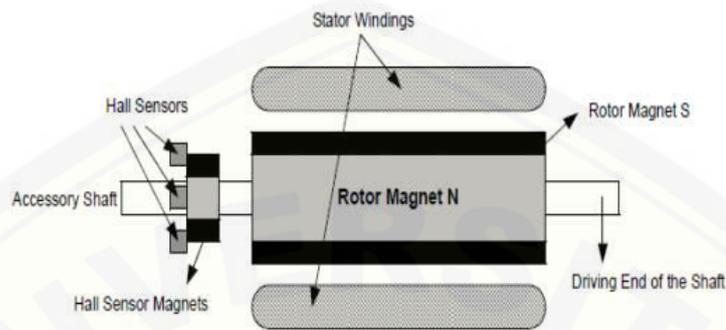


Gambar 2.1 Motor BLDC

(Kamble, 2012)

Oleh karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat torsi pada motor ini sehingga diperoleh torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor hall atau *encoder*. Pada sensor hall *timing* komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet

rotor dengan menggunakan 3 buah sensor hall untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda, sedangkan pada *encoder*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder* (Dharmawan, 2009).



Gambar 2.2 Rotor dan Sensor Hall  
(M. V. Ramesh, dkk, 2006)

Pada sensor hall, apabila terjadi perubahan *pole rotor* pada motor, posisi sensor hall dapat diubah dengan mudah. Hanya saja kelemahan sensor hall adalah apabila posisi sensor hall tidak tepat akan terjadi kesalahan dalam penelitian *timing* komutasi atau bahkan tidak didapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda.

### 2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika *stator* yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada *stator* timbul medan magnet ( $B$ ):

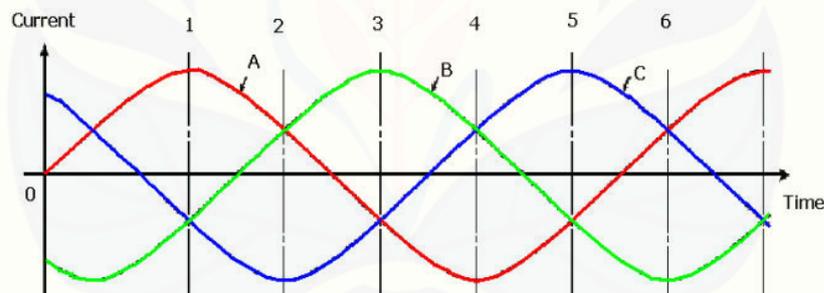
$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

Berdasarkan persamaan 2.1,  $N$  merupakan jumlah lilitan,  $i$  merupakan arus,  $l$  merupakan panjang lilitan dan  $\mu$  merupakan permeabilitas bahan. Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa *sinusoidal*, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang

ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan.

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.2)$$

Berdasarkan persamaan 2.2,  $f$  merupakan frekuensi arus *input* dan  $p$  merupakan jumlah *pole rotor*. Motor BLDC berputar sebagai akibat dari interaksi magnet permanen pada *rotor* dengan medan magnet yang dihasilkan ketika tegangan DC terhubung pada satu kumparan *stator*. Untuk menjaga rotasi, orientasi dari medan magnet di *stator* harus diputar secara berurutan. Hal ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan DC pada kumparan *stator* berikutnya agar *rotor* berputar (NEC Electronic Corporation, 2006). Pada gambar 2.3 berikut ditunjukkan bentuk sinyal pada tegangan *stator* motor BLDC yang berupa sinyal tiga fasa.



Gambar 2.3 Tegangan *Stator* BLDC  
(Miftachul,2014)

Berdasarkan gambar 2.3, ketika *stator* A diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan B dan C yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan *stator* dan magnet *rotor*, sisi positif magnet *rotor* akan berputar mendekati medan magnet *stator* A, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet *stator* B dan

C. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC *sinusoidal*, medan magnet *stator* A, B, dan C akan berubah-ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan *sinusoidal* AC. Ketika A dan B memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan C memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen *rotor* akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet *stator* C dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet *stator* A dan B. Selanjutnya ketika B memiliki medan magnet negatif dan A serta C memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju B dan bagian negatif akan menuju A dari kumparan C. Karena tegangan AC *sinusoidal* yang digunakan berlangsung secara kontinyu, proses perubahan polaritas tegangan pada *stator* ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet *stator* dan magnet permanen *rotor* akan berputar mengikuti medan putar magnet *stator* ini. Hal inilah yang menyebabkan *rotor* pada motor BLDC dapat berputar (Dharmawan, 2009).

### 2.3 Mobil Listrik ELTOB I UNEJ

Mobil listrik dengan nama ELTOB I UNEJ adalah mobil listrik yang digagas pertama kali oleh mahasiswa teknik elektro angkatan 2011 juga bapak Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M selaku pembimbing utama yang didirikan pada tahun 2014. Mobil ini diharapkan menjadi mobil listrik dari program studi teknik elektro Universitas Jember yang mampu menjadi mobil listrik yang memiliki performa maksimal untuk mengikuti perlombaan, terutama dengan tujuan memenangkan perlombaan. Mobil listrik ELTOB I UNEJ merupakan jenis mobil balap berpenggerak BLDC 1000 W dengan kapasitas 1 orang kemudi. Mobil ini dirancang dan dibuat langsung oleh mahasiswa teknik elektro Universitas Jember untuk mengikuti jejak pendahulunya yaitu TITEN yang telah dulu dibentuk. Mobil Listrik ini memerlukan baterai sebagai *supply* energi dengan 4 buah baterai kapasitas 45 Ah, 12 V.



Gambar 2.4 Mobil Listrik ELTOB I UNEJ

## 2.4 Baterai

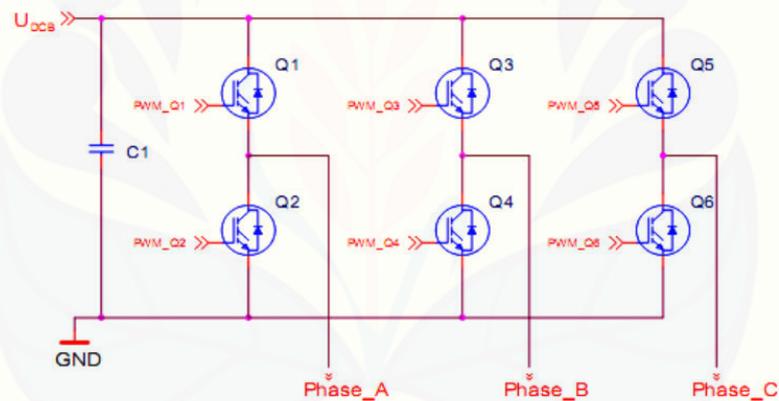
Baterai adalah sebuah sel atau elemen sekunder dan merupakan sumber arus listrik searah (DC) yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Aki termasuk elemen elektrokimia yang dapat mempengaruhi zat pereaksinya, sehingga disebut elemen sekunder. Kutub positif aki menggunakan lempeng oksida dan kutub negatifnya menggunakan lempeng timbal sedangkan larutan elektrolitnya adalah larutan asam sulfat.

Penyusunan baterai biasanya tersusun secara seri dari beberapa unit, dengan tegangan 12 V. Kapasitas suatu bateraipun juga bermacam-macam. Baterai yang digunakan pada penelitian ini adalah berkapasitas 45 Ah. Pada

pelaksanaanya baterai akan di ubah oleh konverter menjadi arus AC yang akan masuk kedalam mesin BLDC, sehingga dalam penelitian ini konverter juga menjadi suatu faktor yang penting dalam penggerak mobil listrik.

### 2.5 Inverter 3 Fasa

Untuk membangkitkan daya/tegangan dari sumber DC, maka digunakan *driver* 3 fasa. Definisi secara umum dari *inverter* adalah peralatan elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC). Untuk BLDC diperlukan *inverter* 3 fasa yang terdiri dari 6 komponen *switching*. Pada perancangan alat ini menggunakan mosfet IRF 540. Susunan dari keenam komponen *switching inverter* 3 fasa ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.

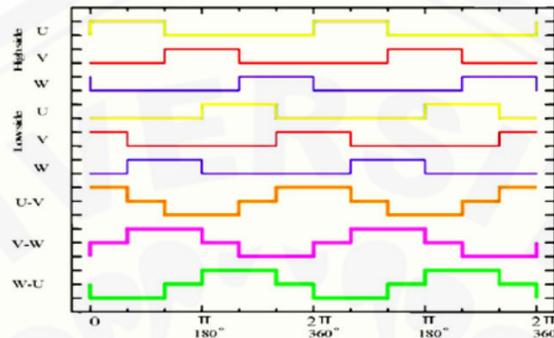


Gambar 2.5 Rangkaian *Inverter* 3 Fasa  
(freescle, 2005)

Terdapat 2 jenis mode operasi dari *inverter* jenis ini, yaitu mode konduksi  $120^\circ$  dan mode konduksi  $180^\circ$ . Agar dapat berputar, kumparan *stator* motor BLDC yang aktif tiap *step* hanya dua buah dan satu buah kumparan lainnya *off* atau tidak teraliri listrik. Hal ini menyebabkan tiap *step* hanya diperbolehkan dua buah *switch* saja yang aktif secara bergantian sehingga mode konduksi  $120^\circ$  yang digunakan. *Inverter* 3 fasa dengan mode konduksi  $120^\circ$  memungkinkan setiap komponen pensakelaran akan konduksi selama  $120^\circ$  dengan pasangan konduksi

yang berbeda, seperti pada gambar 2.5 halaman 12,  $60^\circ$  pertama antara U-V, dan  $60^\circ$  ke dua antara U-W, kemudian V-W, V-U, W-U, W-V, U-V dan siklus berulang kembali.

Pada gambar 2.6 berikut merupakan bentuk sinyal untuk tiap *switching* mode konduksi  $120^\circ$ .



Gambar 2.6 Mode Konduksi  $120^\circ$

(Miftachul, 2014)

## 2.6 Sensor Hall

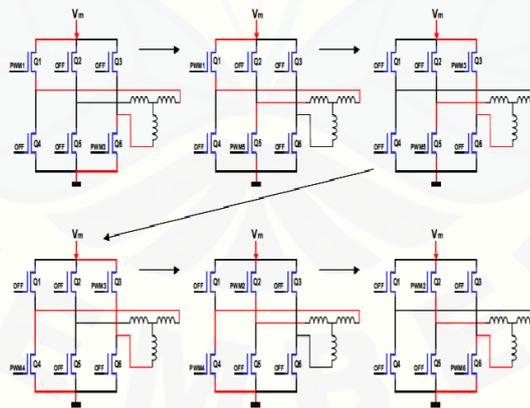
Salah satu cara untuk menentukan *timing* perubahan komutasi yang tepat adalah dengan menggunakan 3 buah sensor hall. Pada umumnya ketiga sensor hall terpisah  $120$  derajat satu dengan yang lainnya, walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus adalah pada motor BLDC yang memiliki *pole* dalam jumlah banyak (diatas  $6$  *pole*). Kelebihan dari penggunaan sensor hall ini adalah peletakkan dari sensor hall awal tidak perlu terlalu presisi dengan *rotor* selain itu untuk motor dengan *pole* yang berbeda cukup dengan menggeser letak dari sensor hall. Kelemahan dari sensor hall adalah apabila letak sensor hall tidak tepat satu dengan lainnya, misalkan pada motor  $2$  *pole* tidak benar-benar  $120$  derajat satu dengan lainnya, kesalahan dalam penentuan *timing* perubahan komutasi dapat terjadi, bahkan ada kemungkinan tidak didapatkannya 6 kombinasi yang berbeda. Pada saat hall sensor mendeteksi medan magnet maka dianalogikan 1 sedangkan apabila hall sensor tidak mendeteksi adanya medan magnet maka dianalogikan 0. Pada saat arah maju (CW Direction) maka dianalogikan 1 sedangkan untuk arah

mundur (CCW Direction) dianalogikan menjadi 0. Q1-Q6 adalah masing-masing *switch* pada bagian *inverter* BLDC.

Tabel 2.1 Hubungan *Hall Sensor* dengan Sistem *Switching* pada *Inverter*  
(Bambang Sujanarko, 2012)

<i>Direction</i>	Hall C	Hall B	Hall A	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
CW	1	1	0	1	0	0	0	1	0
	1	1	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	1	0	0	0	1	1	0
	1	0	1	0	0	1	0	1	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	1
	1	0	0	1	1	0	0	0	1
CCW	0	0	0	1	0	0	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	0	1	1	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	1	0	0	1
	0	1	0	1	0	1	0	1	0

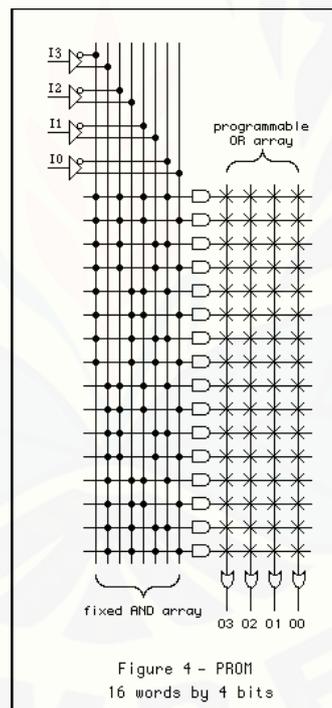
Berdasarkan gambar 2.7 merupakan urutan nyala *switch inverter* 3 fasa dari nilai kode dari sensor hall dan *direction* CW yang menghasilkan 6 komutasi berbeda untuk membangkitkan medan magnet putar pada stator motor BLDC berdasarkan tabel 2.1.



Gambar 2.7 Urutan *Switch* Q1-Q6  
(NXP Semiconductor, 2007)

## 2.7 Programmable Logic Device (PLD)

*Programmable Logic Devices (PLD)* diperkenalkan pada pertengahan tahun 1970-an. Konsep dasar dari PLD adalah bagaimana membuat sebuah rangkaian logika kombinasional yang bersifat *programmable* (mampu diprogram). Rangkaian kombinasional merupakan rangkaian yang di dalamnya tidak memiliki elemen memori. Hal ini berbeda dengan *microprocessor* yang mampu menjalankan sebuah program, namun nantinya mempengaruhi perangkat keras yang telah sudah ditentukan terlebih dahulu. Sedangkan kemampuan pemrograman PLD sudah direncanakan pada tingkat perangkat keras. Dengan kata lain, PLD adalah sebuah *chip* yang memiliki tujuan utama agar nantinya mampu mengatur perangkat keras sedemikian rupa sesuai dengan spesefikasinya.

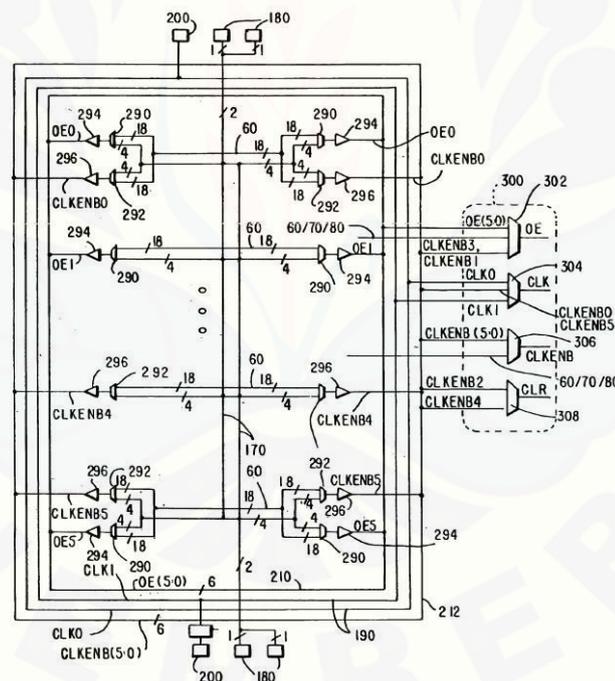


Gambar 2.8 Programmable Logic Devices

(Jeff Mitchel, 1984)

### 2.7.1 Programmable Array Logic (PAL)

Generasi PLD yang pertama dikenal dengan nama PAL (*Programmable Array Logic*) atau PLA (*Programmable Logic Array*), tergantung pada bentuk skema pemrograman *programmable logic array*. PAL merupakan sebuah keluarga rangkaian logika sekring *programmable* terintegrasi awalnya dikembangkan oleh MMI. Fungsi keluaran kombinatorial dimodelkan dalam jumlah bentuk produk. Setiap *output* adalah logika dari sinyal *input*. Struktur ini cocok untuk generasi otomatis pemrograman dengan kompilator logika Perangkat PAL diprogram dengan memasukkan rangkaian dengan menggunakan sekring tegangan. Saat ini, alat yang lebih kompleks berdasarkan arsitektur asli adalah (CPLD untuk *Complex PLD's*) yaitu menggabungkan beberapa *chip* setara PAL asli. Namun *chip* PAL masih populer karena kecepatan transfer data yang tinggi. *Generic Array Logic* perangkat *reprogrammable* dan berisi gerbang logika.



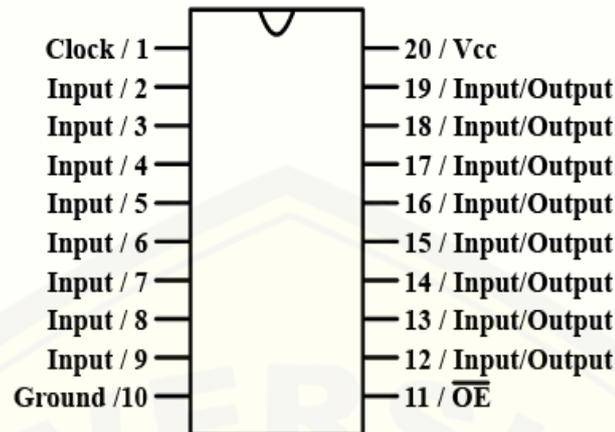
Gambar 2.9 Programmable Array Logic  
(Jeff Mitchel, 1984)

PAL/PLA biasanya hanya menggunakan gerbang logika (tidak ada flip flop), serta hanya memperbolehkan implementasi dari sebuah rangkaian kombinasional saja. Untuk menyelesaikan masalah ini, maka dibuatlah PLD yang telah memiliki sebuah *flip-flop* pada tiap *output* rangkaiannya. Dengan demikian, fungsi sekuensial sederhana dapat diimplementasikan dengan baik (bukan lagi hanya fungsi kombinasional saja).

Selanjutnya, pada awal tahun 1980-an, tambahan untaian logika ditambahkan pada tiap-tiap *output* PLD. *Output* baru tersebut diberi nama **Macrocell** yang diisi flip-flop, gerbang logika dan *multiplexer*. Selain itu, *Macrocell* sendiri juga bersifat *programmable*. Apalagi pada *cell* tersebut disediakan sinyal *feedback* yang berasal dari *output* rangkaian ke *programmable array*. Sinyal tersebut nantinya akan memberikan PLD tingkat fleksibilitas yang lebih tinggi. Struktur baru dari PLD inilah yang kemudian secara umum diberi nama PAL (GAL).

### 2.7.2 Generic Array Logic (GAL)

*Generic Array Logic* (GAL) adalah keping rangkaian terintegrasi terdiri dari gerbang-gerbang *logic* dan flip-flop yang dapat diprogram untuk keperluan spesifik. Sel memori mendefinisikan dan mengkonfirmasi bagaimana fungsi *logic* dan gerbang *logic* berkerja saling berhubungan. GAL selama ini hanya digunakan untuk mengganti rangkaian gerbang logika diskrit menjadi satu keping sehingga lebih sederhana, lengkap dan murah.



Gambar 2.10 Pin GAL 16V8

(<http://brettfieldmeter.weebly.com>)

## 2.8 Proportional, Integral, dan Derivative (PID)

Didalam suatu sistem kontrol dikenal adanya beberapa macam aksi kontrol, diantaranya yaitu aksi kontrol *proportional*, aksi kontrol *integral* dan aksi kontrol *derivative*. Masing-masing aksi kontrol ini mempunyai keunggulan-keunggulan tertentu, dimana aksi kontrol *proportional* mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, aksi kontrol *integral* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error*, dan aksi kontrol *derivative* mempunyai keunggulan untuk memperkecil *error* atau meredam *overshot/undershot*. Untuk itu agar dapat menghasilkan *output* dengan *rise time* yang cepat dan *error* yang kecil dapat ketiga aksi kontrol digabungkan menjadi aksi kontrol P, I, D. Parameter pengontrol *proportional integral derivative* (PID) selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*plant*). Dengan demikian bagaimanapun rumitnya suatu *plant*, perilaku *plant* tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum pencarian parameter PID itu dilakukan. (Ogata, 1994)

### 2.8.1 Pengontrol *Proportional*

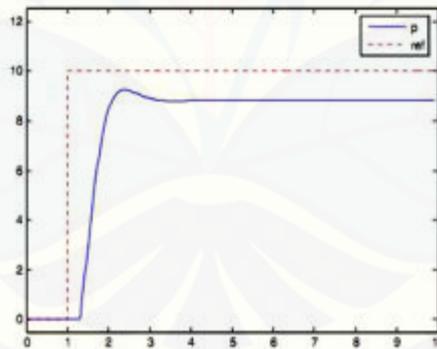
Pengontrol *proportional* memiliki keluaran yang sebanding atau *proportional* dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang

diinginkan dengan harga aktualnya). Selisih ini akan mempengaruhi pengontrol, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga *setting*) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan). Persamaan untuk kontrol *proportional* dapat ditulis sebagai berikut.

$$u(k) = K_p e(k) \quad (2.3)$$

Secara eksperimen, penggunaan pengontrol *proportional* harus memperhatikan ketentuan-ketentuan berikut ini :

1. Kalau nilai  $K_p$  kecil, pengontrol *proportional* hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat.
2. Kalau nilai  $K_p$  dinaikkan, respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai *setpoint* dan keadaan stabil.
3. Namun jika nilai  $K_p$  diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil, atau respon sistem akan berosilasi.



Gambar 2.11 Respon Kontrol P

(<https://wangready.wordpress.com/2012/06/25/kendali-pid/>)

### 2.8.2 Pengontrol *Integral*

Pengontrol *integral* berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan stabil nol. Jika sebuah *plant* tidak memiliki unsur *integrator*

(1/s), pengontrol *proportional* tidak akan mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan stabilnya nol. Dengan pengontrol *integral*, respon sistem dapat diperbaiki, yaitu mempunyai kesalahan keadaan stabilnya nol.

$$u(k) = K_i T_s \sum_{i=0}^k e(i) = K_i T_s [e(k-1) + e(k)] \quad (2.4)$$

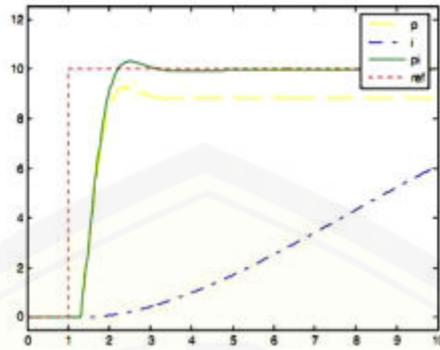
Keterangan :  $T_s$  = waktu sampling

Berdasarkan persamaan 2.4, variabel *error* ( $e$ ) *integral* sehingga dalam kawasan diskrit menjadi  $e(0)+e(1)+\dots+e(k-1)+e(k)$ , atau dengan kata lain *error* yang sebelumnya dijumlahkan dengan *error-error* yang sebelumnya hingga *error* yang sekarang.

Ketika digunakan, pengontrol *integral* mempunyai beberapa karakteristik seperti berikut ini :

1. Keluaran pengontrol membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol *integral* cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya dan jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai  $K_i$ .
3. Konstanta *integral*  $K_i$  yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Tetapi semakin besar nilai konstanta  $K_i$  akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengontrol.

berdasarkan gambar 2.12 di halaman 21 merupakan grafik perbandingan respon kontrol antara P, I dan PI.



Gambar 2.12 Respon Kontrol P, I dan PI

(<https://wangready.wordpress.com/2012/06/25/kendali-pid/>)

### 2.8.3 Pengontrol *Derivative*

Keluaran pengontrol *derivative* memiliki sifat seperti halnya suatu operasi differensial. Perubahan yang mendadak pada masukan pengontrol, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat.

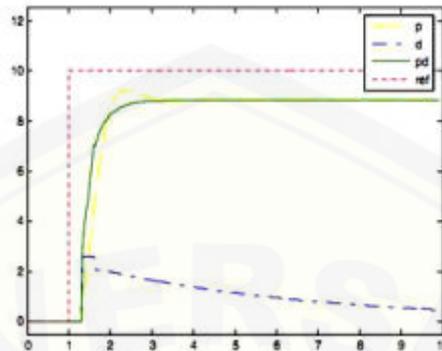
$$u(k) = Kd \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (2.5)$$

Keterangan :  $T_s$  = waktu sampling

Karakteristik pengontrol *derivative* adalah sebagai berikut:

1. Pengontrol ini tidak dapat menghasilkan keluaran bila tidak ada perubahan pada masukannya (berupa sinyal kesalahan).
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengontrol tergantung pada nilai  $T_d$  dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Pengontrol *derivative* mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga pengontrol ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi pengontrol *derivative* dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif, dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem.

Pada gambar 2.13 merupakan perbandingan respon kontrol antara P, D dan PD.



Gambar 2.13 Respon Kontrol P, D, dan PD

(<https://wangready.wordpress.com/2012/06/25/kendali-pid/>)

Berdasarkan penjelasan tentang karakteristik masing-masing parameter kontrol, efek dari setiap pengontrol *proportional*, *integral* dan *derivative* pada sistem *closed loop* dapat disimpulkan pada tabel 2.2 berikut ini :

Tabel 2.2 Efek dari Kontrol P, I dan D

Parameter	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Steady-state error</i>
<i>Proportional</i>	Menurunkan	Meningkatkan	Perubahan Kecil	Menurunkan/Mengurangi
<i>Integral</i>	Menurunkan	Meningkatkan	Meningkatkan	Mengeliminasi
<i>Derrivative</i>	Perubahan Kecil	Menurunkan	Menurunkan	Perubahan kecil

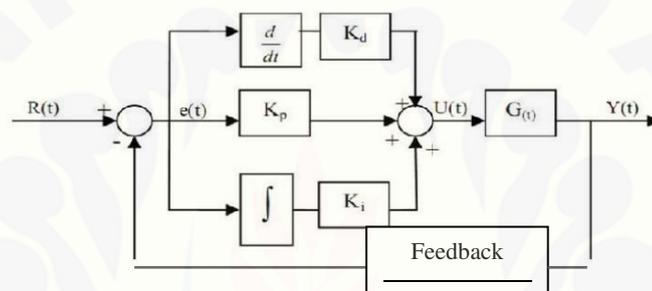
(Ali,2004)

#### 2.8.4 Pengontrol PID

Sistem kontrol dapat digolongkan menjadi dua bagian, yaitu sistem kontrol *loop* terbuka (*open loop*) dan sistem kontrol tertutup (*closed loop*). Perbedaan sistem kontrol *loop* terbuka dan sistem kontrol *loop* tertutup adalah pada ada tidaknya *feedback* pada sistem. Jika suatu sistem memiliki *feedback*,

maka *outputnya* akan berpengaruh pada proses kontrol. Kebanyakan sistem kontrol menggunakan istilah *error* sebagai *feedback* bagi sistem. *Error* adalah perbedaan dari nilai SP (*Setpoint*) dan PV (*Process Variable*). (Mauludin, 2013)

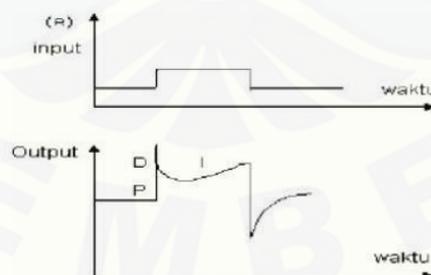
Kontroler adalah komponen yang berfungsi meminimalisir sinyal kesalahan. Tipe kontroler yang paling populer adalah kontroler PID. Elemen-elemen pengontrol P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Diagram blok pengendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Blok Diagram Kontroler PID

(Wicaksono, 2004)

Keluaran pengontrol PID merupakan penjumlahan dari keluaran pengontrol *proportional*, keluaran pengontrol *integral* dan akan ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Hubungan dalam Fungsi Waktu antara Sinyal Keluaran dengan Masukan untuk Pengontrol PID

(Ogata, 1994)

Karakteristik pengontrol PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Pengaturan konstanta  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari ketiga konstanta tersebut dapat diatur lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

Secara matematis, persamaan untuk pengendalian PID adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.6)$$

atau

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (2.7)$$

Keterangan :

$u(t)$  = sinyal *output* pengendali PID

$K_p$  = konstanta *proportional*

$T_i$  = waktu *integral*

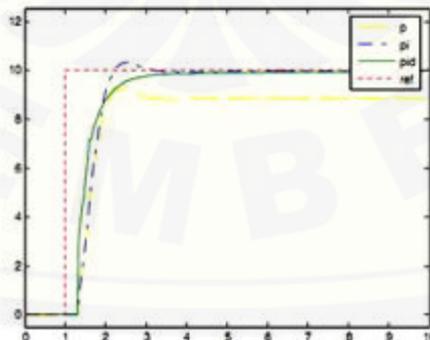
$T_d$  = waktu *derivative*

$K_i$  = konstanta *integral* ( $K_p/T_i$ )

$K_d$  = konstanta *derivative* ( $K_p.T_d$ )

$e(t)$  = sinyal *error* = referensi – keluaran *plant* = *setpoint* – nilai sensor

Berdasarkan gambar 2.16 adalah gambar perbandingan respon kontrol antara P, PI dan PID.

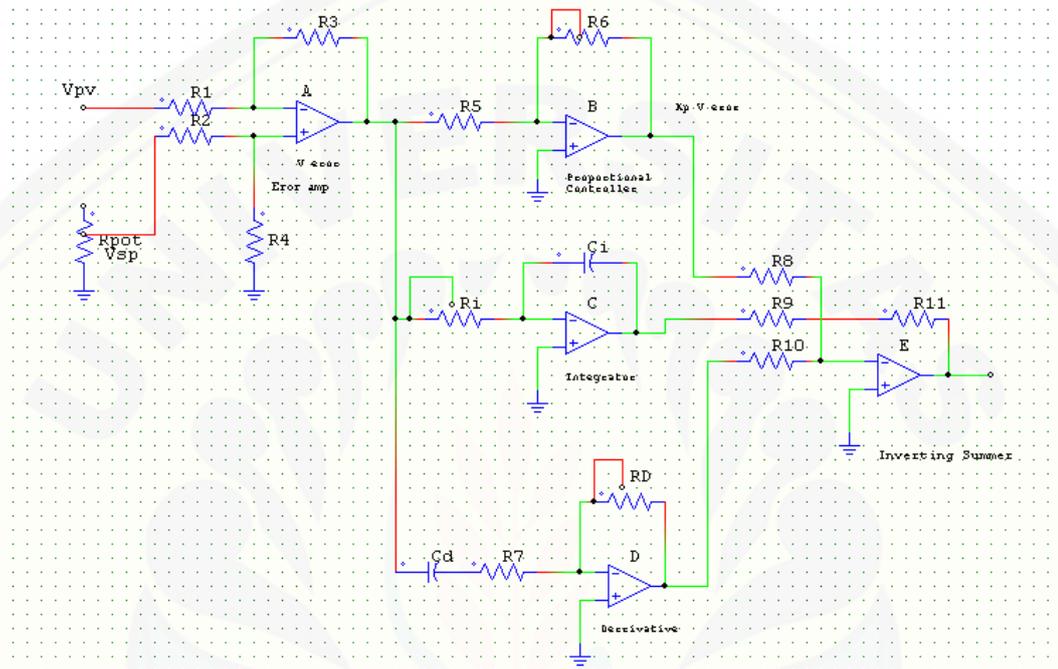


Gambar 2.16 Respon Kontrol P, PI dan PID

(<https://wangready.wordpress.com/2012/06/25/kendali-pid/>)

Kontrol PID akan memberikan aksi pengontrolan terhadap *plant* berupa motor BLDC 1000 watt. Kontrol analog PID menggunakan *op-amp*, yang dirancang untuk kontrol *proportional*, *integral*, dan *derivative*.

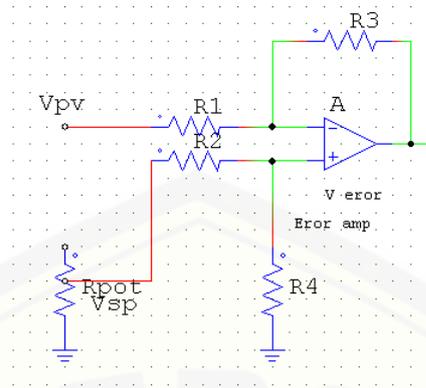
Berikut adalah rancangan kontroler PID analog op-amp



Gambar 2.17 Rangkaian Kontrol PID Analog  
( Ardiansyah, 2012)

Berdasarkan gambar 2.17 rangkaian kontrol terbagi atas beberapa rangkaian, yaitu rangkaian *error detector*, rangkaian kontrol *proportional*, rangkaian kontrol *integral*, dan rangkaian kontrol *derivative*.

Untuk rangkaian kontrol *error detector* yaitu rangkaian *difference amplifier*. *Error detector* berfungsi menghitung sinyal *error* terjadi.

Gambar 2.18 Rangkaian Kontrol *Error Detector*

(Ardiansyah,2012)

Pada rangkaian *error detector* diatas, op-amp akan mendapatkan dua *input* yaitu *setpoint* (SP) yang diperoleh dari rangkaian pembagi tegangan menggunakan potensiometer dengan *supply* tegangan sehingga mendapatkan tegangan yang nilainya dapat berubah sesuai dengan nilai tahanan potensiometer.

Untuk *input* yang kedua adalah nilai aktual yang diperoleh dari *output* tegangan dari sensor hall. Nilai *setpoint* (SP) akan diatur dengan mengubah potensiometer sehingga nilai yang sama dengan besaran nilai dari *process variable* (PV). Untuk menghitung *output* rangkaian diatas, maka rangkaian tersebut dianggap sebagai rangkaian *inverting* dan rangkaian *non inverting amplifier*. Dengan menjumlahkan tegangan *output* dari *inverting amplifier* dan *non inverting amplifier* akan didapatkan *output* dari rangkaian. (Ardiyansah, 2012)

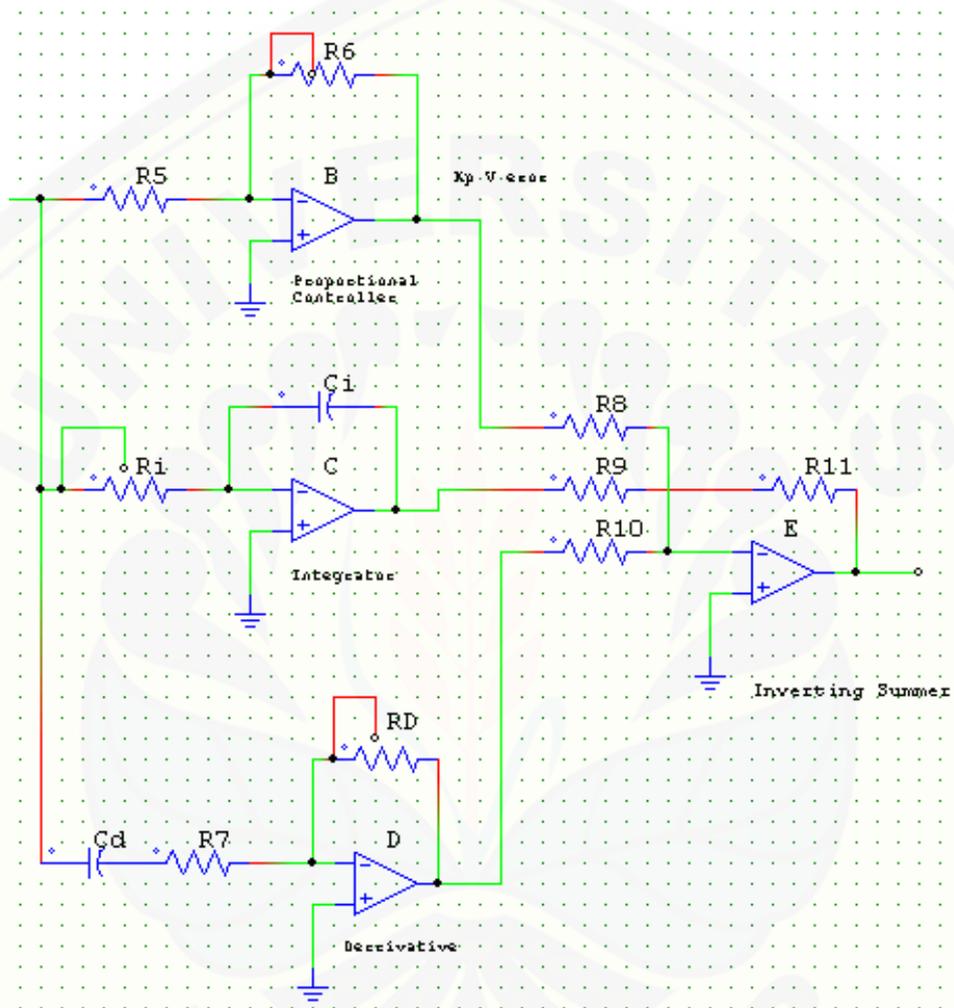
$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_i} V_{pv} + \left(\frac{R_f}{R_i} + 1\right) \left(\frac{R_2}{R_2+R_1} V_{sp}\right) \quad (2.8)$$

Dengan memberikan nilai yang sama pada masing-masing resistor  $R_f=R_i=R_1=R_2$ , maka nilai tegangan *output* akan menjadi  $V_{out}=V_{sp}-V_{pv}$ .

Tegangan *output* tersebut adalah sinyal *error* yang akan dimasukkan ke rangkaian kontrol *proportional*, *integrator*, dan *differentiator*, sehingga *error* tersebut akan mendapatkan aksi pengontrolan. Bagian lain dari kontroler yaitu kontroler itu sendiri yang terdiri dari rangkaian *proportional*, *integrator* dan

*differentiator*. Bagian ini akan mengolah sinyal *error* yang dihasilkan dari perbedaan nilai *setpoint* (SP) dan *process variable* (PV) sampai *error* bernilai nol.

Berikut ini adalah gambar rangkaian kontrol PID.



Gambar 2.19 Rangkaian Kontrol PID

(Ardiansyah, 2012)

Rangkaian pada gambar 2.19 akan mendapatkan tegangan *output* dari sinyal *error* yang berasal dari *error detector*. Sinyal *error* inilah yang merupakan selisih antara *setpoint* dan *process variable*. *Op-amp* pada E adalah rangkaian *inverting summer* yang berfungsi untuk menjumlahkan nilai *output* dari masing-masing kontroler *proportional*, *integral* dan *derivative*, juga membalikkan

tegangan *output* dari masing-masing kontroler, sehingga mendapatkan *output* secara keseluruhan yaitu :

$$V_{\text{out}} = K_p V_{\text{error}} + K_i \int V_{\text{error}} dt + K_p \frac{dV_{\text{error}}}{dt} + V_o \quad (2.9)$$

Dimana :

$$K_p = \frac{R_2}{R_1}, \text{ proportional band (gain)} \quad (2.10)$$

$$K_i = \frac{1}{R_i C_i}, \text{ integration constant} \quad (2.11)$$

$$K_D = R_D \cdot C_D, \text{ derivative constant} \quad (2.12)$$

Dari persamaan 2.9 tidak ada nilai minus karena op-amp U5 yang membalik nilai tersebut dengan rangkaian *inverting*.

Op-amp B adalah rangkaian *proportional controller* karena pada dasarnya rangkaian ini adalah *inverting amplifier*, tetapi *output*nya dimasukkan ke op-amp E. Maka pada bagian ini sinyal *error* akan mendapatkan suatu penguatan (*gain*) sebesar :

$$K_p = \frac{R_6}{R_5} \quad (2.12)$$

Op-amp C merupakan rangkaian *integrator controller*, rangkaian tersebut akan menghasilkan suatu konstanta  $K_i$  yang disebut dengan *integration constant*. Nilai ini yang diatur sehingga menghasilkan suatu konstanta dengan nilai tertentu. Pengaturan dapat dilakukan dengan memberikan nilai pada resistor variabel  $R_i$  dan juga pada kapasitor  $C_i$ . *output* dari op-amp C akan dimasukkan pada op-amp E yang merupakan rangkaian *inverting summer* yang akan membalik hasil dari *integrator*, sehingga nilai konstanta  $K_i$  akan bernilai positif.

Perhitungan untuk menentukan harga konstanta  $K_i$  adalah sebagai berikut

$$K_i = \frac{1}{R_i C_i} \quad (2.13)$$

Op-amp D merupakan rangkaian *differentiator*, rangkaian tersebut akan menghasilkan suatu konstanta  $K_D$  yang disebut dengan *derivative constant*. Rangkaian ini pada dasarnya merupakan rangkaian *inverting amplifier* dan menghasilkan *output* yang bernilai negatif. Pengaturan dapat dilakukan dengan memberikan nilai pada resistor variabel  $R_D$  dan juga pada kapasitor  $C_D$ . *Output* dari op-amp D akan dimasukkan pada op-amp E yang merupakan rangkaian *inverting summer* yang akan membalik hasil *differentiator*, sehingga nilai konstanta  $K_D$  akan bernilai positif. Untuk perhitungan nilai konstanta  $K_d$  dapat dicari dengan :

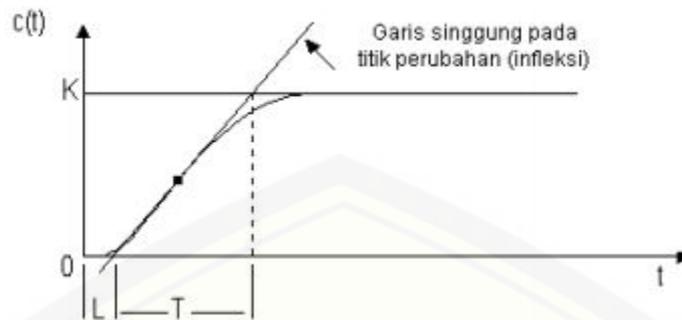
$$K_D = R_D \cdot C_D. \quad (2.14)$$

(Ardiansyah, 2012)

#### 2.8.5 Penalaan Paramater Pengontrol PID

Dalam kontroler PID, penalaan konstanta-konstanta  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  adalah suatu hal yang sangat penting. Penalaan parameter pengontrol PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*plant*). Dengan demikian betapapun rumitnya suatu *plant*, perilaku *plant* tersebut harus diketahui terlebih dahulu sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan. Dengan nilai-nilai dari konstanta-konstanta tersebutlah suatu kontroler PID terlihat kemampuannya. Nilai konstanta  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang tidak tepat akan mengakibatkan kontrol yang kurang sempurna, bahkan dapat membuat suatu sistem menjadi tidak stabil. Oleh karena itu, diperlukan keahlian khusus dalam mengamati respon kontrol terhadap *plant* untuk mendapatkan hasil yang paling optimal. Terdapat beberapa macam metode penalaan PID yang ada saat ini, namun pada penelitian ini hanya dibahas metode ziegler nichols saja.

Penalaan parameter PID didasarkan perolehan kedua konstanta yaitu waktu mati (dead time)  $L$  dan waktu tunda  $T$ . Untuk penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada gambar 2.20 di halaman 30.



Gambar 2.20 Kurva Respon Berbentuk S

(<https://wangready.wordpress.com/2012/06/25/kendali-pid/>)

Berdasarkan gambar 2.20 terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu  $L$ . Sedangkan waktu tunda menggambarkan perubahan kurva setelah mencapai 66% dari keadaan mantapnya. Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis singgung akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum. Perpotongan garis singgung dengan sumbu absis merupakan ukuran waktu mati, dan perpotongan dengan garis maksimum merupakan waktu tunda yang diukur dari titik waktu  $L$ .

Zeigler dan nichols melakukan eksperimen dan menyarankan parameter penyetelan nilai  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$  dengan didasarkan pada kedua parameter tersebut.

Tabel 2.4 Rumusan Penalaan Parameter PID Berdasarkan Cara Kurva Reaksi

Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\infty$	0
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2L$	$0,5L$

(Miftachul, 2014)

### 2.8.6 Pengontrolan PID berdasarkan pemodelan motor BLDC

Sebelum mencari pengontrolan PID terhadap motor BLDC, terlebih dahulu dicari bagaimana transformasi laplace dari kontrol PID. Kontroler PID ideal untuk domain waktu kontinyu proses SISO (*single input single output*) dinyatakan dalam domain laplace sebagai berikut :

$$C(s) = G_c(s) \cdot E(s) \quad (2.15)$$

Fungsi alih kontroler PID :

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.16)$$

$$G_c(s) = \frac{C(s)}{E(s)} = K_p \frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{T_i s} \quad (2.17)$$

Dimana :

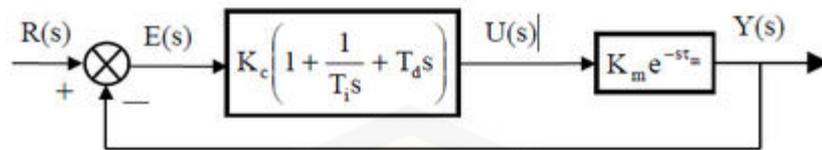
$K_p$  = konstanta penguatan *proportional*

$T_i$  = konstanta waktu *integral*

$T_d$  = konstanta waktu *derivative*

Jika  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$  (yaitu kontrol P) , maka jelas bahwa nilai y rangkaian tertutup terukur akan selalu lebih kecil dari nilai r yang diinginkan (tanpa proses integrasi, ketika kesalahan positif diperlukan untuk menjaga konstan nilai terukur, dan kurang dari nilai yang diinginkan). Pengenalan tindakan integrasi memfasilitasi tercapainya kesesuaian antara nilai terukur dan nilai yang diinginkan, ketika konstanta kesalahan menghasilkan *output* pengontrol meningkat. Pengenalan tindakan *derivative* berarti bahwa perubahan nilai yang diinginkan dapat diantisipasi dan dengan demikian koreksi yang tepat dapat ditambahkan sebelum perubahan yang sebenarnya.

Jadi, dalam bentuk yang disederhanakan, kontroler PID memungkinkan kontribusi penyelesaian dari kesalahan kontroler saat ini, saat lalu dan saat nanti.



Gambar 2.21 Kurva Kecepatan Putaran Motor Orde 2  
(Sumber : Nise, 2011, Control Systems Engineering)

## 2.9 Pulse Width Modulation (PWM)

### 2.9.1 Dasar Pembangkitan PWM

Metode PWM adalah metode yang cukup efektif untuk mengendalikan kecepatan motor. Cara kerjanya adalah mengatur persentase lebar pulsa *high* terhadap perioda dari suatu sinyal persegi dalam bentuk tegangan periodik yang diberikan ke motor sebagai sumber daya. Semakin besar perbandingan lama sinyal *high* dengan perioda sinyal maka semakin cepat motor berputar. Sinyal PWM dapat dibangun dengan menggunakan metode analog yakni dengan rangkaian op-amp atau dengan menggunakan metode digital.

### 2.9.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM

Pada pengaplikasiannya, *inverter* dikontrol oleh suatu modulasi PWM, yang berarti bahwa *inverter* tersebut dapat mengubah-ubah tegangan *output* dengan *duty cycle* yang berbeda, hal inilah yang digunakan untuk mengontrol kecepatan. (Sunplus, 2006).

## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian “Korelasi Konstanta Kontrol *Proportional Integral Derivative* Terhadap Kinerja Mobil Listrik Universitas Jember” dilaksanakan di Laboratorium Dasar Konversi Energi, Kampus Fakultas Teknik, Universitas Jember di Jl. Slamet Riyadi no.62 Patrang, Jember. Penelitian ini dilaksanakan mulai Bulan Oktober 2014 hingga Bulan Juli 2015.

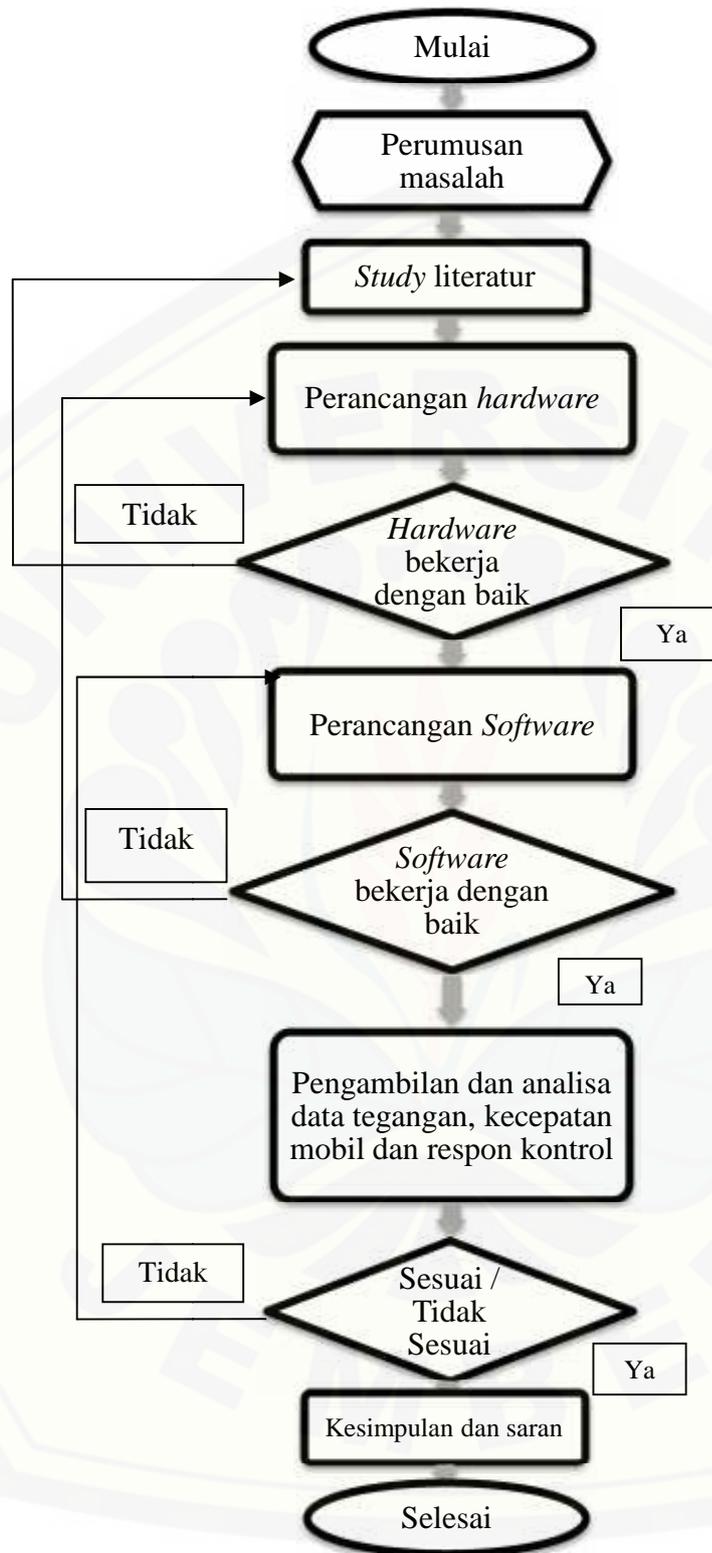
### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut

- a. Driver motor *brush less* DC
- b. Multimeter
- c. Mobil listrik ELTOB I UNEJ
- d. Motor *brush less* DC 1000 watt
- f. Alat ukur rpm (*tacho meter*)
- g. *Power supply*
- h. *Personal computer*
- i. *Software universal downlaoder G540*

### 3.3 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah jalannya proses dari diagram alir penelitian. Sehingga konsep penelitian akan dijelaskan pada diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.4 Prosedur Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan secara bertahap diuraikan sesuai langkah-langkah sebagai berikut :

a. Perumusan masalah

Merumuskan masalah dari beberapa masalah yang terdapat dalam kehidupan sehari-hari yang berhubungan dengan kontrol motor dengan penggerak BLDC yang akan dijadikan fokus masalah pada penelitian ini.

b. Studi literatur terhadap objek dan penelitian

Mengumpulkan dan mempelajari literatur tentang metode pengontrolan motor BLDC dan juga mempelajari tentang pengontrolan sebelumnya sehingga pada penelitian kali ini kekurangan tersebut dapat diatasi.

c. Merancang rangkaian kontrol analog *op-amp* PID terhadap kontrol motor BLDC dan pembuatan *hardware*

Pada tahap ini akan dilakukan beberapa hal yang meliputi:

1. Perancangan skematik

Tahap ini adalah tahap pendesainan skema rangkaian pada PCB rangkaian *power supply*, *driver* mosfet, *inverter* 3 fasa, kontrol analog *op-amp* PID.

2. Pembuatan *hardware*

Tahap ini adalah tahap penyablonan rangkaian sampai dengan penyolderan komponen-komponen PCB dan kemudian dilakukan pengujian

d. Pengambilan data

Pengambilan konstanta P, I, dan D yang mempunyai kinerja respon yang baik untuk diterapkan pada mobil listrik. Perbandingan nilai konstanta P,I dan D dilihat terhadap respon sistem yang akan diamati.

e. Analisis sistem

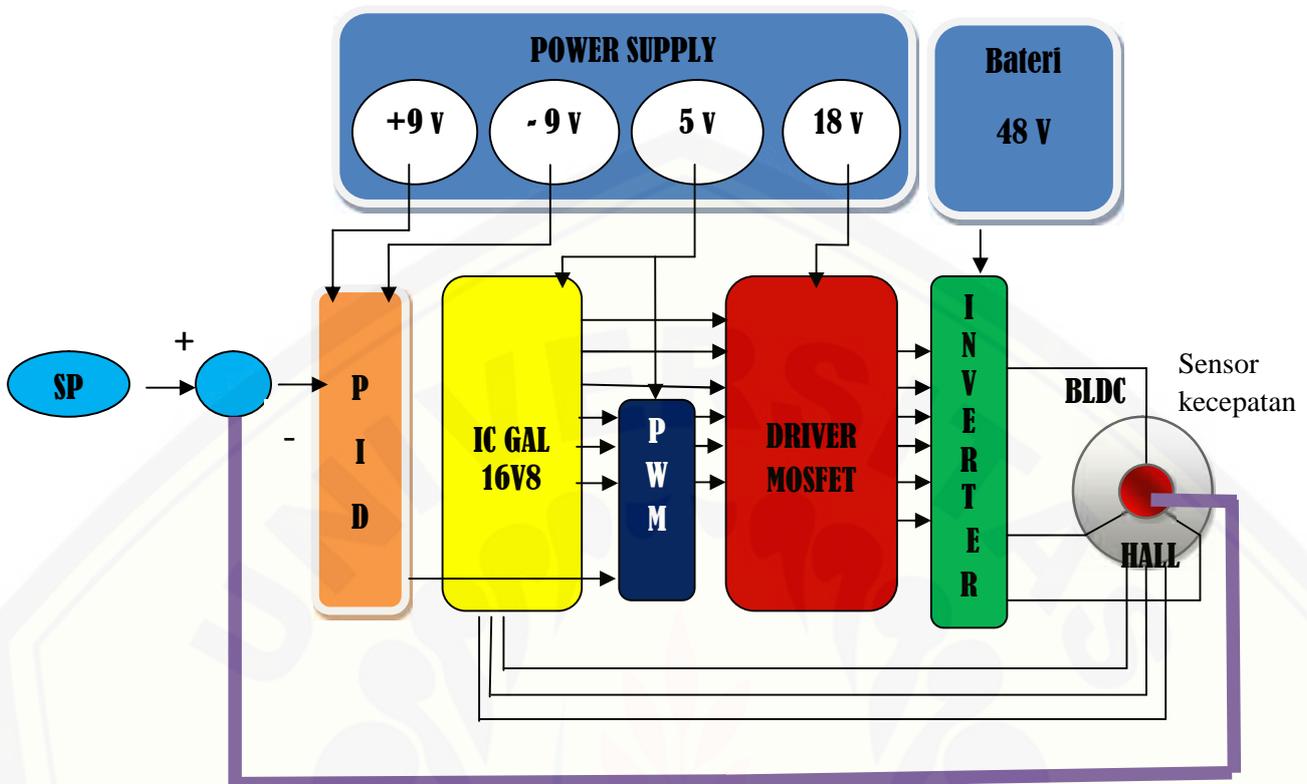
Menganalisa kinerja dari alat yang telah dibuat apakah sesuai dengan permintaan/ kehendak, dan akan dilakukan penyempurnaan ketika memiliki kekurangan.

f. Pengambilan kesimpulan dan saran

Pengambilan kesimpulan dari semua hasil analisis data yang telah didapat berdasarkan dasar teori yang telah dijelaskan.

### 3.5 Perancangan *Hardware*

Sistem terdiri dari bagian-bagian dengan konfigurasi seperti pada gambar 3.2 di halaman 37. Tampak pada gambar 3.2 sistem tersusun dari kontrol sensor kecepatan berupa motor DC yang difungsikan sebagai generator DC untuk *feedback* kontrol, motor BLDC sebagai penggerak mobil listrik, baterai sebesar 48V sebagai *supply* utama motor listrik, rangkaian *power supply* untuk mengaktifkan kerja dari masing-masing rangkaian, *inverter* 3 fasa yang merubah tegangan DC menjadi AC 3 fasa, rangkaian PWM yang digunakan untuk mengatur besar kecil *duty cycle* untuk merubah cepat lambat putaran motor, IC Gal 16V8 yang digunakan untuk *device* yang berisi program pembacaan sensor hall dan pengaturan PWM, dan rangkaian PID analog yang digunakan sebagai kontrol untuk sistem ini.



Gambar 3.2 Konfigurasi Sistem

Berdasarkan gambar 3.2 akan dijelaskan bagaimana alur kinerja alat secara keseluruhan. Pada rancangan penelitian ini terdapat beberapa blok rangkaian, yaitu *power supply*, PID, IC GAL 16V8, PWM, *driver* mosfet, *inverter* 3 fasa, motor BLDC, sensor kecepatan, dan juga baterai. *Power supply* digunakan untuk *supply* tegangan pada rangkaian PID, IC GAL 16V8, PWM, dan juga *driver* mosfet. Pada rangkaian PID menggunakan *supply* simetris yaitu membutuhkan *supply* (+) pada sisi tegangan maksimal dan (-) pada sisi tegangan minimal. Hal ini dikarenakan pada rangkaian PID menggunakan kontrol analog dari op-amp LM 741. Jalannya penelitian adalah ketika terdapat tegangan *setpoint* yang berasal dari *torle* mobil, tegangan tersebut akan masuk ke rangkaian PID untuk dibandingkan dengan tegangan *error* dari sensor kecepatan. Pada rangkaian PID akan masuk kedalam rangkaian pengurang dari proses pengurangan tegangan

*setpoint* dengan tegangan *error* dari sensor kecepatan. Setelah itu selisih tegangan akan masuk kedalam parameter kontrol PID. Pada kontrol PID terdapat 3 parameter kontrol, parameter P, I dan D. Ketiga parameter kontrol dapat diatur besar kecil  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  dengan mengatur besar kecil hambatan potensiometer seperti pada gambar 2.19 halaman 27. Tegangan hasil proses kontrol P, I dan D akan masuk kedalam rangkaian penjumlah dan akan menjadi tegangan keluaran kontrol. Tegangan keluaran kontrol masuk kedalam PWM untuk mengatur lebar pulsa PWM dengan mengatur besar kecil nilai *duty cycle*. Pada gambar 3.2 terdapat IC GAL 16V8, IC ini digunakan untuk mendeteksi bagian aktif dan tidak aktif dari sensor hall yang digunakan untuk proses komutasi. Pada sistem ini akan diketahui bagian aktif dengan logika *high* (1) dan bagian tidak aktif logika *low* (0). Selanjutnya akan dicocokkan dengan tabel 2.1 pada halaman 14 tentang *six-step commutation* untuk diketahui bagian switch yang aktif pada rangkaian *driver*, komutasi tersebut akan menentukan bagian fasa aktif dan tidak aktif pada rangkaian *inverter*. Rangkaian *inverter* 3 fasa akan merubah tegangan DC dari sumber baterai 48 V menjadi tegangan AC 48 V. Tegangan ini akan digunakan sebagai sumber utama motor BLDC untuk berputar. Ketika motor berputar, generator DC sebagai sensor kecepatan akan menghasilkan tegangan DC dan masuk ke rangkaian PID untuk dibandingkan dengan tegangan *setpoint*, selain itu ketika motor berputar sensor hall akan mendeteksi posisi dari *rotor* motor yang digunakan untuk proses komutasi pada rangkaian *driver*.

### 3.5.1 Sensor Kecepatan

Pada penelitian ini menggunakan sensor kecepatan berupa motor DC yang difungsikan menjadi generator DC yang akan menghasilkan tegangan ketika motor berputar. Generator ini terletak berimpit pada roda belakang mobil, sehingga ketika roda berputar maka generator DC akan ikut berputar dan menghasilkan tegangan yang akan dimasukkan kedalam *feedback* kontrol.

Berikut adalah gambar dari sensor kecepatan berupa motor DC yang difungsikan sebagai generator DC pada penelitian ini.



Gambar 3.3 Generator DC sebagai Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan tersebut akan dimasukkan kedalam *arduino uno* menggunakan data *logger* sehingga dapat terbaca nilai ADC yang akan dikonfigurasi menjadi satuan rpm untuk diketahui bagaimana respon kontrol terhadap sistem. *Arduino uno* adalah sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328 (*datasheet*). *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 sebuah tombol *reset*.



Gambar 3.4 Arduino uno

(<https://www.arduino.cc/en/Guide/Windows>)

Selanjutnya setelah diketahui perencanaan pengambilan data dengan arduino uno, maka akan dijelaskan bagaimana pengambilan dengan data *logger*. Data *logger* adalah proses otomatis pengumpulan dan perekaman data dari sensor untuk tujuan pengarsipan atau tujuan analisis. Sensor digunakan untuk mengkonversi besaran fisik menjadi sinyal listrik yang dapat diukur secara otomatis dan akhirnya dikirimkan ke komputer atau mikroprosesor untuk pengolahan. Berikut ini adalah *list* program dari data *logger* untuk mengambil data respon kontrol terhadap sistem.

```
Max_darna - Arduino 1.8.4
File Edit Sketch Tools Help
Max_darna
const int sensorPin = A0; // pin sensor yang digunakan
const int timeSampling = 1000; // ini berapa ms sampling yang diinginkan di antara
// ini berapa lama pengulangan sampling dalam sebuah detik
int data;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  if(Serial.available()) {
    data = Serial.read();
    Serial.println(data);
  }
  data = (Max * 1000) / timeSampling;
  Serial.println(data);
  delay(timeSampling);
}
```

Gambar 3.5 Daftar Program Data *Logger* Arduino Uno

Berdasarkan gambar 3.5 di halaman 40 dijelaskan bahwa tegangan DC yang dihasilkan generator akan diambil sebagai data ADC. Pencuplikan waktu dilakukan setiap 0,5 detik sampai dengan 15 detik, sehingga waktu pengambilan data respon kontrol hanya berlangsung 15 detik

### 3.5.2 Motor BLDC

Pada skripsi kali ini, spesifikasi motor BLDC yang digunakan adalah sebagai berikut.



Gambar 3.6 Motor BLDC

- Merk Motor : Kelly
- Tegangan : 48-60V V
- Daya : 1000 watt
- Putaran : 550-900 rpm
- *Limited Current* : 40-50 A
- *Max. Torqoe* : 80-90 N.m
- Jumlah kutub : 40

### 3.5.3 Baterai

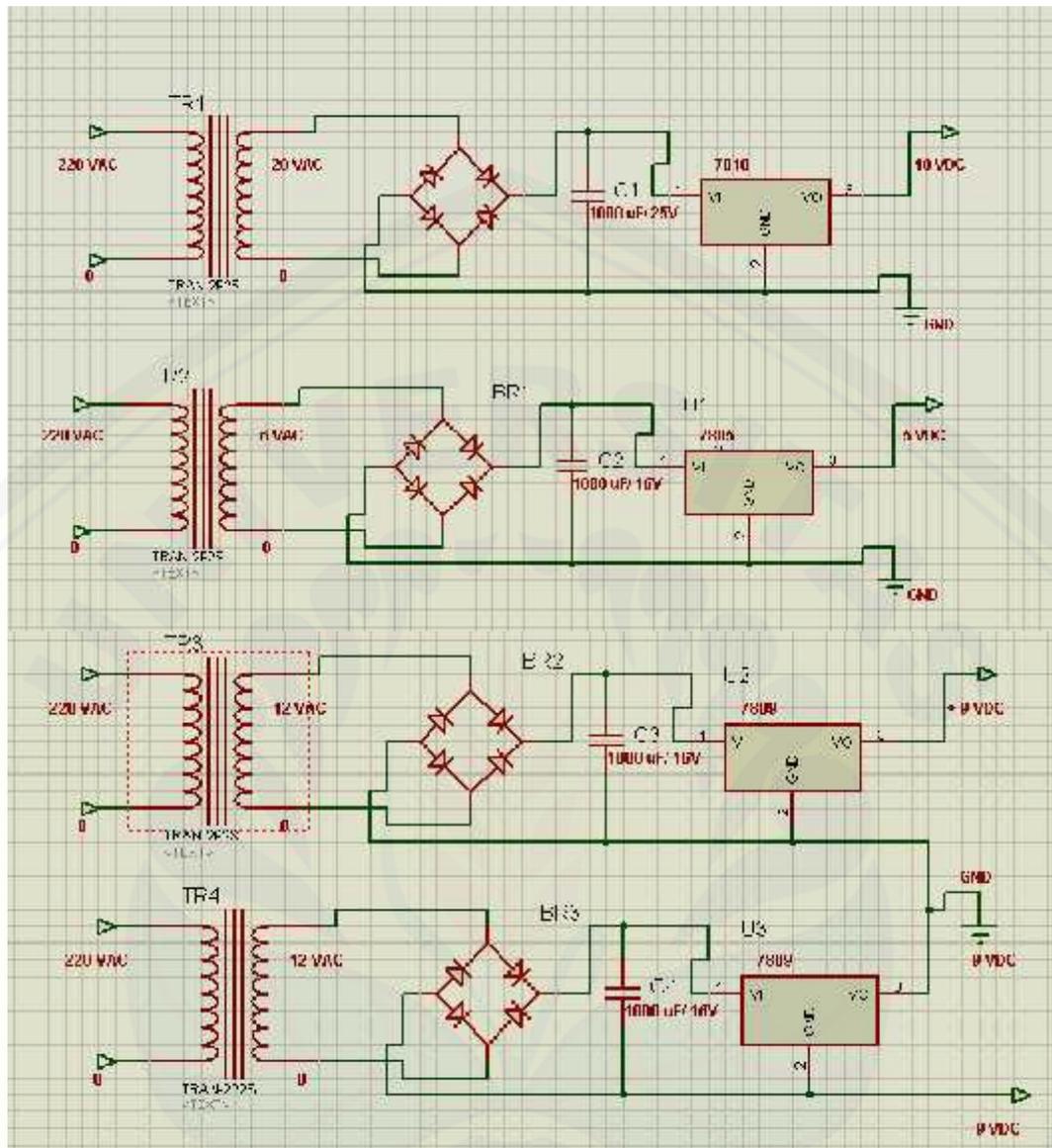
Baterai yang digunakan dalam penelitian ini adalah baterai kering / *Accu Free maintenance* 12 V 45 Ah berjumlah 4 yang disusun seri sehingga menghasilkan tegangan *supply* 48 V.



Gambar 3.7 Baterai 12V 45 Ah

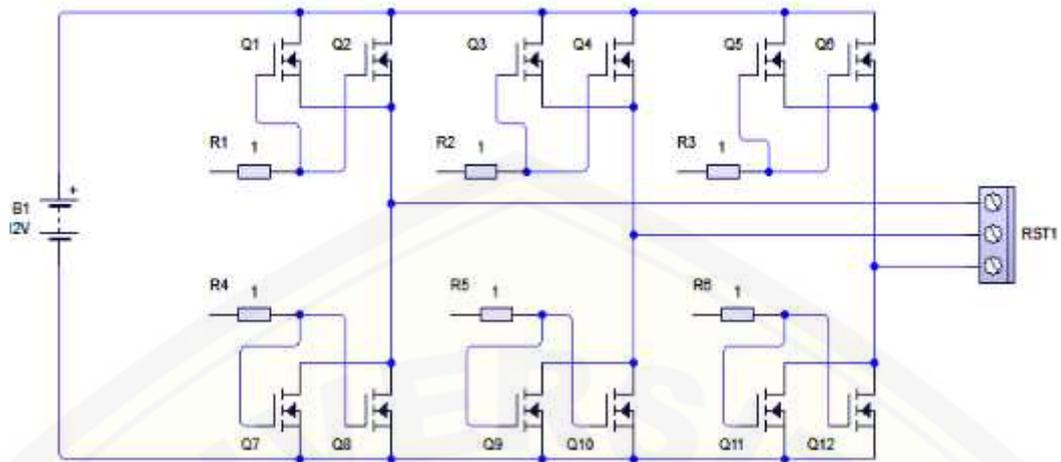
### 3.5.4 Power Supply

Pada penelitian ini digunakan 4 buah *power supply* yaitu digunakan untuk *supply* rangkaian *driver* sebesar 5V, untuk rangkaian *optocoupler* pentrigger mosfet adalah 18V, dan untuk *supply op-amp* PID adalah +9V dan -9V karena LM 741 menggunakan *double supply*. Keempat *supply* ini akan dihubungkan ke baterai 12 V yang menggunakan *inverter* sebagai pengubah tegangan 12 VDC menjadi 220 VAC.

Gambar 3.8 Rangkaian *Power Supply*

### 3.5.5 Inverter 3 Fasa

*Inverter* tiga fasa dirancang menggunakan enam buah saklar semikonduktor berupa MOSFET dengan tipe IRF540A, dimana masing-masing fasa menggunakan 5 buah MOSFET yang ditunjukkan pada gambar 3.9 di halaman 44.

Gambar 3.9 Rangkaian *Inverter* 3 Fasa

*Inverter* tersebut akan memberikan tegangan ke kumparan motor sesuai dengan data yang diterima dari sistem *trigger*. Karena *output* berupa sinyal tiga fasa maka daya *input* ke motor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_3 = 3 \times V_L \times I_L \times \cos \quad (3.1)$$

Dimana :

$P_3$  = daya tiga fasa (watt)

$V_L$  = tegangan fasa (volt)

$I_L$  = arus fasa

$\cos$  = faktor daya

### 3.5.6 Rangkaian *Driver* Mosfet

Fungsi utama rangkaian *driver* mosfet adalah sebagai pemisah antara rangkaian *power* dengan rangkaian kontrol atau *isolator* dari rangkaian tegangan rendah ke rangkaian tegangan tinggi karena terdapat *optocoupler*. Konfigurasi dari *optocoupler* dapat dilihat pada gambar 3.10 pada halaman 45.



### 3.5.8 IC GAL 16V8

*Generic Array Logic* (GAL) adalah keping rangkaian terintegrasi terdiri dari gerbang-gerbang *logic* dan flip-flop yang dapat di program untuk keperluan spesifik. Sel memori mendefinisikan dan mengkonfirmasi bagaimana fungsi *logic* dan gerbang *logic* berkerja saling dihubungkan. GAL selama ini hanya digunakan untuk mengganti rangkaian gerbang logika diskrit menjadi satu keping sehingga lebih sederhana, lengkap dan murah. GAL 16V8 total memiliki 20 pin dimana ada 16 *input*, 8 *output* (yang lain berupa VCC dan GND). Sedangkan untuk konfigurasi *chip* sebagai berikut:

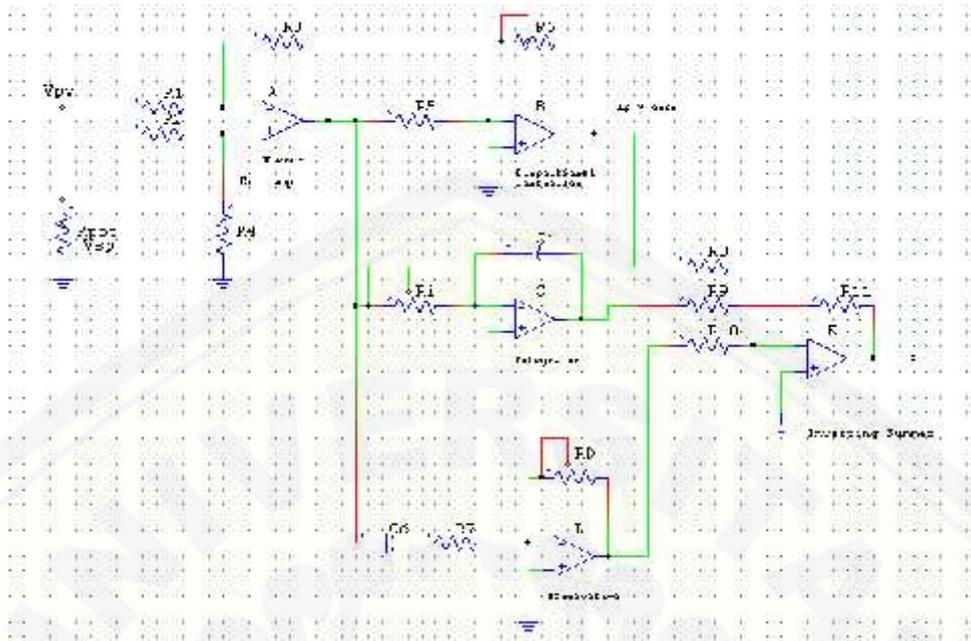
- 8 pin yaitu kaki no 2 s/d 9 adalah pin *IN*
- 8 pin yaitu kaki no 12 s/d 19 adalah pin *IN/OUT*
- 1 pin yaitu kaki no 1 adalah pin CLK
- 1 pin yaitu kaki no 11 adalah pin OE/ *Output Enable*
- 1 pin yaitu kaki no 20 adalah pin VCC
- 1 pin yaitu kaki no 10 adalah pin GND



Gambar 3.12 IC GAL 16V8

### 3.5.9 Kontrol PID

Kontrol PID pada penelitian ini menggunakan kontrol analog dengan cara mengubah besar kecilnya resistor untuk menentukan nilai KP, KI dan KD. Berikut adalah gambar rangkaian PID yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.13 Diagram Skematik Kontrol PID

(Ardiansyah, 2012)

Berdasarkan gambar 3.13 merupakan rangkaian skematik kontrol PID yang terdapat 5 buah *op-amp* LM 741 yaitu dari rangkaian *error detector* yang bekerja sebagai pengurang tegangan *setpoint* atau *tortle* dengan tegangan variabel atau tegangan *error* yang berasal dari generator DC yang berimpit pada roda belakang motor. Pada rangkaian kedua yaitu rangkaian kontrol *proportional* yaitu sebagai pengatur nilai  $K_p$  yang sesuai dengan performa motor dengan mengatur besar kecilnya nilai resistor. Pada rangkaian ketiga dan keempat yaitu rangkaian *integral* dan *derivative* yang dapat diatur nilai besar kecilnya nilai  $K_I$  dan  $K_d$  dengan mengatur nilai resitornya. Pada rangkaian kelima adalah rangkaian penjumlah dari ketiga rangkaian *proportional*, *integral*, dan *derivative* sebagai rangkaian keluaran rangkaian PID yang akan mengatur besar kecilnya nilai *duty cycle* pada rangkaian PWM.

Berdasarkan gambar 3.13 bahwa nilai  $R_p$  adalah 100 K, sehingga penguatan *proportional* yang terjadi adalah:

$$K_p = \frac{R}{R_1} = \frac{100 \text{ K}}{10 \text{ K}} = 10 \quad (3.2)$$

Sehingga nilai  $K_p$  akan beragam sari 1-10.

Sedangkan nilai  $R_i$  adalah juga 100K, namun terdapat  $C_i$  yaitu 200 uF sehingga penguatan integral adalah:

$$K_i = \frac{1}{R \cdot C} = \frac{1}{R \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \quad (3.3)$$

Untuk nilai  $R_d$  adalah 100K, namun  $C_d$  adalah 50 uF, sehingga penguatan differensial adalah:

$$K_d = R_d \cdot C_d \quad (3.4)$$

### 3.6 Perancangan *Software*

#### 3.6.1 Rangkaian *Integrated Circuit* (IC)

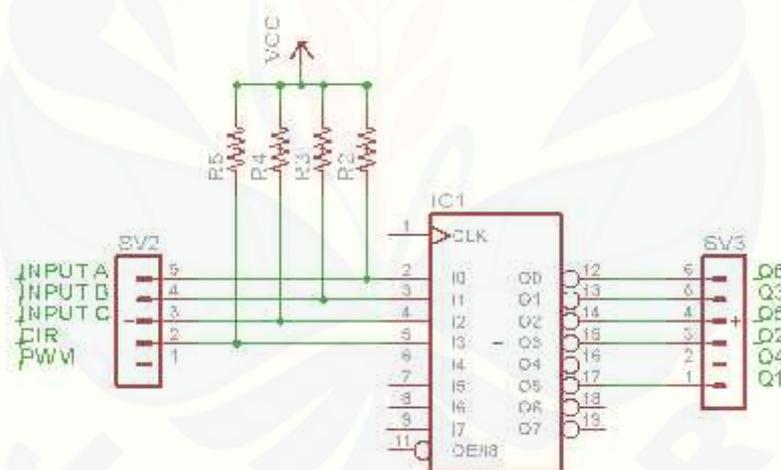
Pada penelitian ini menggunakan rangkaian IC GAL 16V8 yang berfungsi untuk pengimplementasian *array logic* dengan spesifikasi 8 pin *input* dan 8 pin *output* yang sudah mencakup pada penelitian ini.

Berikut adalah spesifikasi IC GAL 16V8:

- **HIGH PERFORMANCE  $E^2$ CMOS\* TECHNOLOGY**
  - 5 ns maximum propagation delay
  - $F_{max} = 166$  Mhz
  - 4 ns maximum fro clock input to data output
  - UltraMOS\* advanced CMOS Technology
- **80% TO 75 % REDUCTION IN POWER FROM BIPOLAR**
  - 75mA typ icc on low power devices
  - 45 mA typ ic on quarter power device
- **ACTIVE PULL-UPS ON ALL PINS**
- **E'CELL TECHONOLOGY**
  - Reconfigurable logic
  - Reprogrammable cell
  - 100% tested/guaranted 100% yields
  - High speed electrical erasure (<100ms)\

- 20 years data retention
- **EIGHT OUTPUT LOGIC MACROCELL**
- Maximum flexibility for complex logic designs
- Programmable output polarity
- Also emulates 20-pin PAL \*Devic with full function/fuse map
- **PRELOAD AND POWER ON RESET OF ALL REGISTER**
- 100% functional testability
- **APPLICATION INCLUDE**
- DMA control
- State machine control
- High speed graphic processing
- Standard logic speed upgrade

Gambar skematis IC akan ditunjukkan dalam *function block* diagram untuk menentukan menggunakan pin *input* dan *output* pada gambar 3.14.



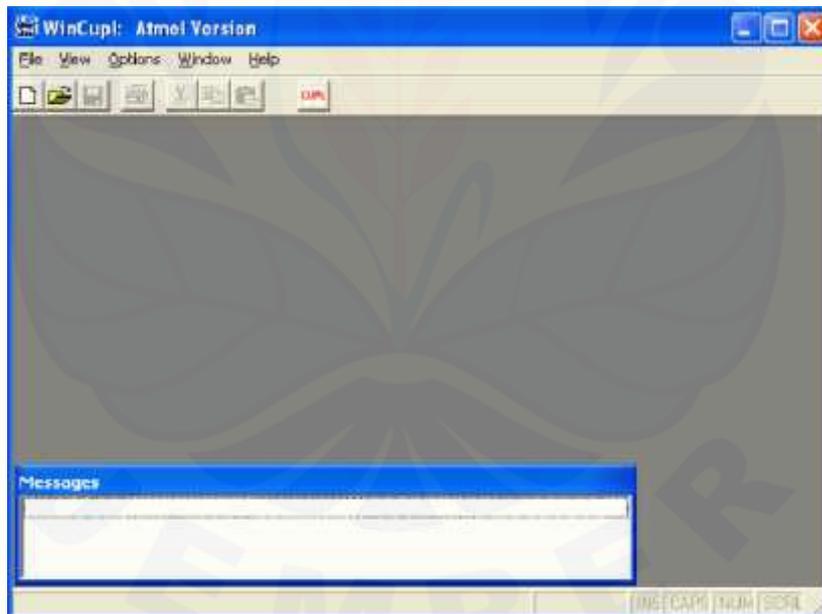
Gambar 3.14 *Function* Blok Diagram IC GAL 16V8

### 3.6.2 Pemrograman Rangkaian Terintegrasi (IC)

Pemrograman dan uji coba menggunakan *software* pada komputer. *Software* yang digunakan pada penelitian ini adalah WinCUPL yang diambil referensi dari penelitian Mahadian Dewangga pada tahun 2014. Dengan

menggunakan *software* WinCUPL dapat dimasukkan fungsi logika yang dikehendaki. Keluaran yang dihasilkan adalah berupa fungsi logika dan *fuse map* kedalam *Programmable Logic Device* (PLD).

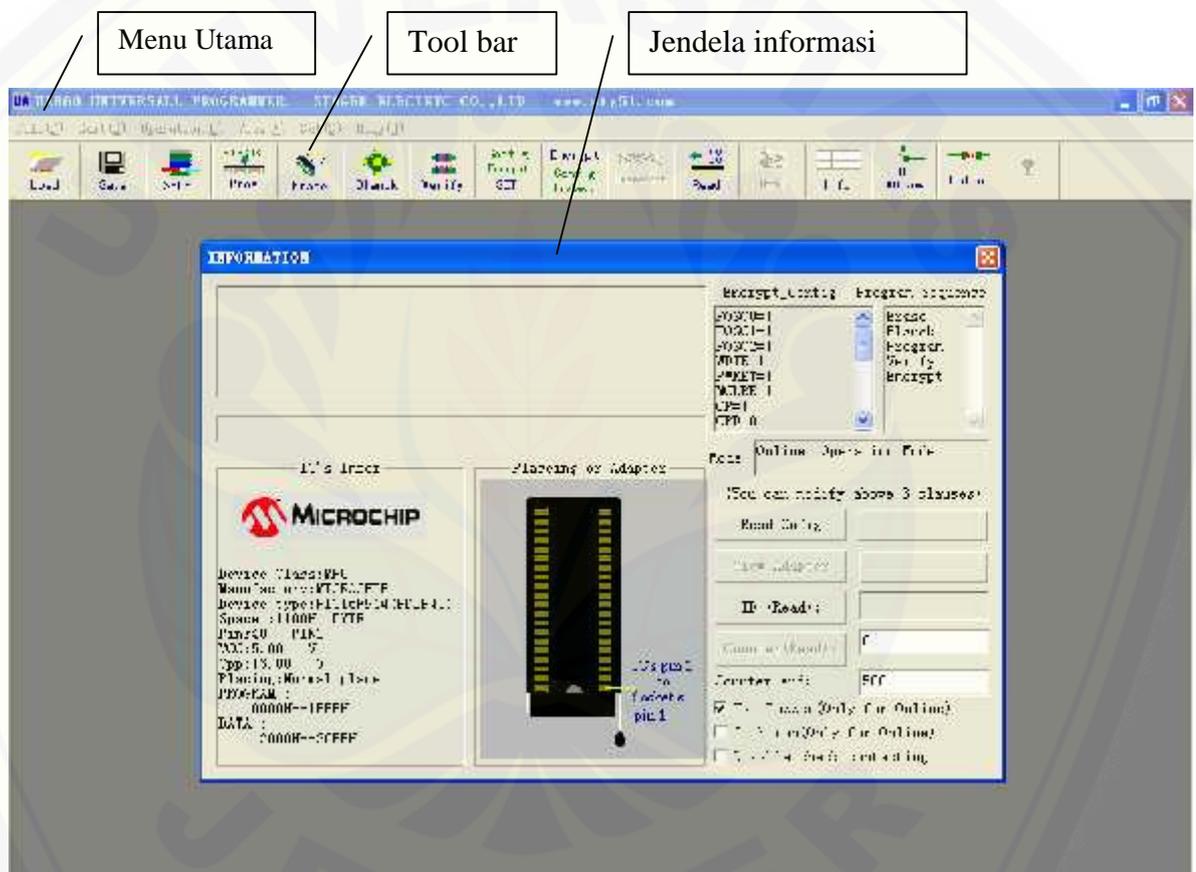
Tahap awal dimulai dengan penyederhanaan persamaan fungsi logika. Setelah persamaan fungsi logika didapatkan maka dapat dilanjutkan dengan menjalankan *development software*. Hasil dari *development software* tersebut merupakan *fuse map* dan data tes yang digunakan untuk pemrograman PLD. Kemudian dilanjutkan dengan tahap pengujian, apabila berhasil maka dapat dilakukan pengujian pada rangkaian yang sesungguhnya, akan tetapi apabila pengujian tidak berhasil maka harus dilakukan pengecekan persamaan logika dalam mengulangi tahapan pemrograman dari penyederhanaan persamaan logika. Pada tahap pengujian pada rangkaian apabila tidak berhasil maka harus dilakukan pengecekan *hardware*. Dalam penelitian ini pemrograman dilakukan menggunakan *Compiler Universal for Programmable Logic* (CUPL).



Gambar 3.15 Tampilan Awal *Software* WinCUPL

Perancangan rangkaian logika yang akan diterapkan pada *hardware* adalah berdasarkan referensi penelitian sebelumnya, dengan menuliskan pada *software* CUPL maka selanjutnya dicocokkan dengan simulasi terlebih dahulu. Apabila

simulasi telah cocok dengan tabel kebenaran maka dilakukan penyimpanan *file* dengan cara *compile* yang nantinya akan menghasilkan *file* bentuk *jedec* (.jed) yang akan diterapkan pada IC GAL 16V8. Setelah itu program (.jed) yang telah didapatkan akan diterapkan pada *hardware* dengan menggunakan *universal downloader*. *Universal downloader* memiliki banyak kegunaan selain untuk pemrograman PLD, juga untuk memprogram EPROM, EEPROM, MPU, dan lain-lain. Pada penelitian ini *universal downloader* yang digunakan adalah tipe G540.



Gambar 3.16 Tampilan Awal *Universal Programmer* G540

Pada penelitian ini digunakan *software* untuk memprogram dan juga *USB downloader* untuk memasukan program kedalam IC GAL 16V8. *Software* yang digunakan adalah WinCUPL, Aplikasi ini dipilih karena penggunaan yang lebih mudah dari aplikasi lainnya, seperti Warp, PALSAM dan lain-lain. Aplikasi ini menggunakan bahasa C namun lebih sederhana. Program yang diterapkan pada IC

GAL 16V8 adalah berdasarkan referensi penelitian Bayu Sovan P. (Bayu, 2014).

Program yang dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.17.

```

Name      ATF ;
PartNo    00 ;
Date      8/22/2014 ;
Revision  01 ;
Designer  Engineer ;
Company   unej ;
Assembly  None ;
Location  ;
Device    virtual ;

/* ***** INPUT PINS ***** */
PIN 2 = A; /* Input Sensor Hall A */
PIN 3 = B; /* Input Sensor Hall B */
PIN 4 = C; /* Input Sensor Hall C */
PIN 5 = D; /* Input Direction */
PIN 6 = P; /* Input PWM */

/* ***** OUTPUT PINS ***** */
PIN 12 = Q6; /* Output swicth 1 */
PIN 13 = Q3; /* Output swicth 2 */
PIN 14 = Q5; /* Output swicth 3 */
PIN 15 = Q2; /* Output swicth 4 */
PIN 16 = Q4; /* Output swicth 5 */
PIN 17 = Q1; /* Output swicth 6 */

/* ***** FUNGSI SIX STEP ***** */

Q1=(!D & B & !A # D & !B & A);
Q2=(!D & C & !B # D & !C & B);
Q3=(!D & !C & A # D & C & !A);
Q4=(!D & !B & A # D & B & !A & P);
Q5=(!D & !C & B # D & C & !B & P);
Q6=(!D & C & !A # D & !C & A & P);

```

Gambar 3.17 Program Rangkaian Logika

Setelah dituliskan program pada *software* WinCUPL maka akan disimpan dalam bentuk *file jedec* (.jed), format *file* ini adalah *file* yang akan dimasukkan ke dalam IC GAL 16V8. Untuk memasukkan format *file* kedalam IC pada penelitian ini digunakan USB *downloader* G540, yaitu *universal downloader* yang dapat digunakan sebagai media memasukkan program kedalam IC keluarga ATMEL maupun selain ATMEL, seperti yang digunakan dalam penelitian ini yaitu PLD.

### 3.7 Pengujian Sistem

Pengujian penelitian ini dengan menerapkan kontrol pada mobil listrik tanpa beban, setelah diperoleh konstanta kontrol yang sesuai maka akan diterapkan pada mobil listrik dengan 1 orang pengemudi, sehingga beban akan terjadi dari jumlah berat mobil dan pengemudi juga dari lintasan akibat gesekan roda dengan jalan. Berat beban total adalah 225 Kg.



## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Sensor Kecepatan

Pada pengujian ini akan dibahas tentang bagaimana hubungan nilai kecepatan motor dalam satuan rpm dan juga dengan tegangan DC *output* dari generator DC sebagai *feedback* kontrol yang akan dirubah menjadi data ADC yang dimasukkan dalam data *logger* ketika menganalisa respon kontrol. Pada tahap ini sistem masih dalam keadaan *loop* terbuka sehingga tidak ada kontrol PID didalamnya. Berikut hasil data dari penelitian ini pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengujian Konfigurasi Kecepatan Motor, Tegangan dan juga Data ADC

V. <i>Setpoint</i> (V)	V. <i>Feedback</i> Generator DC (V)	Data pembacaan ADC	Kecepatan Motor (rpm)	Error persen kecepatan (%)
1,6	1,4	250	250	-
1,8	1,7	281,25	281	0,1
2,4	2,3	375	375	-
2,8	2,7	437,5	438	0,11
3	2,9	468,75	468	0,16
3,5	3,3	547,5	550	0,45

Berdasarkan data pada tabel 4.1 bahwa konfigurasi kecepatan motor dalam tegangan. Hal ini dimaksudkan bahwa ketika kecepatan motor diatur pada *setpoint* tegangan tertentu, maka akan menghasilkan kecepatan generator DC yang dirubah menjadi besaran tegangan dan digunakan sebagai *feedback* yang akan masuk ke kontrol. Selain itu juga terdapat data ADC, data ini adalah data yang diambil menggunakan perangkat arduino uno dalam program data *logger* agar dapat diketahui bagaimana data yang dihasilkan pada saat waktu transien sehingga kumpulan data tersebut dapat digambarkan dalam bentuk grafik untuk kinerja respon kontrol. Tegangan *turtle* sebagai *setpoint* dihubungkan pada saklar, sehingga *setpoint* tidak akan berubah nilai tegangan karena *setpoint* sudah diatur mulai awal. Pada penelitian ini menggunakan 3 buah *setpoint* yaitu ketika 1,2 V

dengan data ADC 250 kecepatan motor 250 rpm, juga tegangan 2,4 V pada data ADC 375 kecepatan motor 375 rpm, dan tegangan 3,6 V data ADC 547,5, kecepatan motor 550 rpm.. Tegangan *feedback* dari generator DC yaitu ketika motor berjalan semakin cepat maka tegangan yang dihasilkan akan semakin besar. Dari data pada tabel 4.1 pada halaman 54 maka dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem akan berjalan baik karena tegangan *setpoint* dan tegangan *feedback* mempunyai nilai yang relatif sama. Selain itu ditunjukkan bahwa kecepatan yang terbaca oleh ADC dan tachometer memiliki nilai yang hampir sama dan dapat digunakan sebagai data percobaan.

#### 4.2 Metode Sixstep Commutation dengan IC GAL 16V8

Pengujian pada rangkaian terintegrasi adalah dilihat bagaimana keluaran yang dihasilkan IC GAL 16V8 setelah diprogram, karena dalam pemrograman IC GAL *switch* dibakar sehingga pada jenis IC PLD tidak dapat diprogram lebih dari 1 kali. Selanjutnya dilihat bagaimana hasil rangkaian logika yang diterapkan dalam program, rangkaian pada pengujian ini ada 5 *input* berupa sensor hall A, sensor hall B, sensor hall C, *direction*, dan juga PWM. Sedangkan *output* adalah 6 buah *switch* Q1-Q6 pengujian ini adalah dengan memberikan logika *high* dan *low* pada *sensor hall* dan hasilnya akan didapatkan dua buah LED yang nyala, LED tersebut menandakan *switch* Q1-Q6 lalu hasil akan dicocokkan dengan tabel 2.1 halaman 14 tentang rangkaian logika berdasarkan penelitian Bayu Sovan P (Bayu, 2014). Hasil *switch* harus sama dengan tabel 2.1 yang telah dibuat, berikut ini adalah hasil pengujian tegangan *logic input* dan *output* pada IC GAL 16V8.

Tabel 4.2 Pengujian Tegangan *Logic Input* dan *Output*

	Hall C	Hall B	Hall A	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	
C	4,42V	4,41V	10,04Mv	4,42V	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	1,4mV
	4,41V	4,42V	10,04mV	10,04mV	1,3mV	1,5mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,4mV
	4,42V	4,41V	4,42V	10,04mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	2,796V	1,5mV	1,3mV
W	4,43V	10,04mV	4,41V	4,41V	1,4mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV
	4,42V	10,04mV	4,42V	4,42V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,3mV	2,796V
	4,42V	10,03mV	10,04mV	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V
C	10,04mV	10,03mV	10,04mV	4,41V	1,4mV	1,4mV	2,796V	2,796V	1,5mV	1,3mV
	10,04mV	10,04mV	4,42V	4,42V	1,5mV	1,34mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,5mV
C	10,04mV	10,04mV	4,42V	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	1,4mV
	10,04mV	4,41V	4,41V	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,3mV	1,4mV	2,796V
W	10,04mV	4,41V	10,04mV	10,04mV	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,5mV	2,796V
	10,04mV	4,41V	10,04mV	4,41V	1,4mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV

Berdasarkan tabel 4.2 di halaman 55 diketahui bahwa pada saat *input low* ( $V_{IL}$ ) tegangan sebesar 10,3 mV sampai 10,4 mV sedangkan pada *datasheet* membutuhkan tegangan *input low* ( $V_{IL}$ ) sebesar -0,5 V sampai 0,8 V agar memberikan *logic low* (0) dan pada saat tegangan *input high* ( $V_{IH}$ ) tegangan sebesar 4,41-4,42 V, ini dikarenakan pada pin *input* diberi resistor *pull-up* untuk menghindari kondisi tegangan ambang, sedangkan pada *datasheet* membutuhkan tegangan  $V_{IH}$  sebesar 2 V sampai  $V_{CC} + 0,75$  atau  $4,42+0,75=5,17$  V agar mampu memberikan logika *high*. Kemudian pada pin *output*, tegangan *output low* ( $V_{OL}$ ) sebesar 1,3 mV sampai 1,5 mV pada saat *low* dan  $V_{OH}$  sebesar 2,796 V pada saat *high*. Sedangkan nilai  $V_{OL}$  pada *datasheet* maksimum 0,5 V dan  $V_{OH}$  minimal 2,4 V Sehingga hanya akan didapat logika *low* dan *high* pada masing-masing *input* dan *output*. Dari hasil pengujian didapat data *high* (1) dan *low* (0) yang sesuai dengan rangkaian *logic* yang telah dibuat sebelumnya. Berdasarkan pengujian juga didapatkan, bahwa IC GAL16V8 ini mampu beroperasi pada tegangan minimum sebesar 2,4 V diaman tegangan normal adalah 5 volt. Sehingga apabila diaplikasikan ke mobil listrik pada saat tegangan baterai turun masih ada toleransi tegangan sebesar 2,6 V dari tegangan normal, sehingga IC masih tetap bekerja hingga batas tegangan 2,4 V.

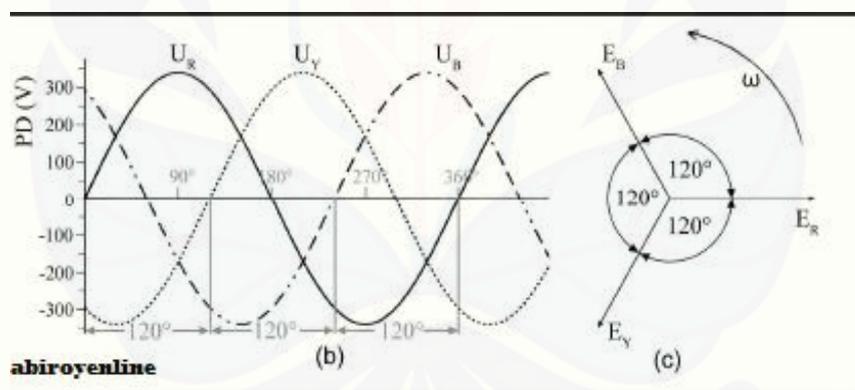
### 4.3 Rangkaian *Inverter*

Setelah dilakukan proses pengujian logika *high* dan *low*, selanjutnya dilakukan pengujian besar tegangan fasa R,S dan T keluaran *inverter* terhadap besar tegangan baterai yang dirangkai pada kondisi *open* / tidak berbeban motor. Berikut pada tabel 4.3 di halaman 57 akan dijelaskan hubungan metode *sixstep commutation* dengan tegangan pada fasa R,S, dan T *inverter*. Pada saat proses pengujian digunakan tegangan baterai sebesar 12 volt.

Tabel 4.3 Hubungan Metode *Sixstep Commutation* dengan Tegangan Fasa R,S dan T

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	VRS	VST	VRT
0	0	1	1	0	0	-11,00 V	-0,75 V	-11,75V
0	0	1	0	1	0	12,28 V	-11,75 V	0,5 V
1	0	0	0	1	0	11,75 V	-11,01 V	0,75 V
1	0	0	0	0	1	0,75 V	11,01 V	11,75 V
0	1	0	0	0	1	0,525 V	11,75 V	12,2 V
0	1	0	1	0	0	-11,76 V	0,745 V	-11,02 V

Berdasarkan tabel 4.3 dijelaskan bahwa metode *sixstep* yang ditunjukkan dengan angka 0 adalah kondisi *low* atau tidak aktif sedangkan untuk angka 1 tersebut pada kondisi *high* atau aktif. Pada setiap keadaan pada metode *sixstep* diperoleh tegangan antar fasa yang selalu mempunyai kondisi *high* atau sama dengan tegangan sumber, dan satu tegangan fasa ke fasa pada kondisi *low*. Pada setiap keadaan tersebut adalah hasil pengurangan dari satu buah tegangan antar fasa terhadap tegangan antar fasa yang lain. Hal ini seperti yang tertera pada teori yaitu jumlah ketiga buah tegangan fasa adalah sama dengan nol



Gambar 4.1 Gelombang Tiga Fasa

(Abi, 2014)

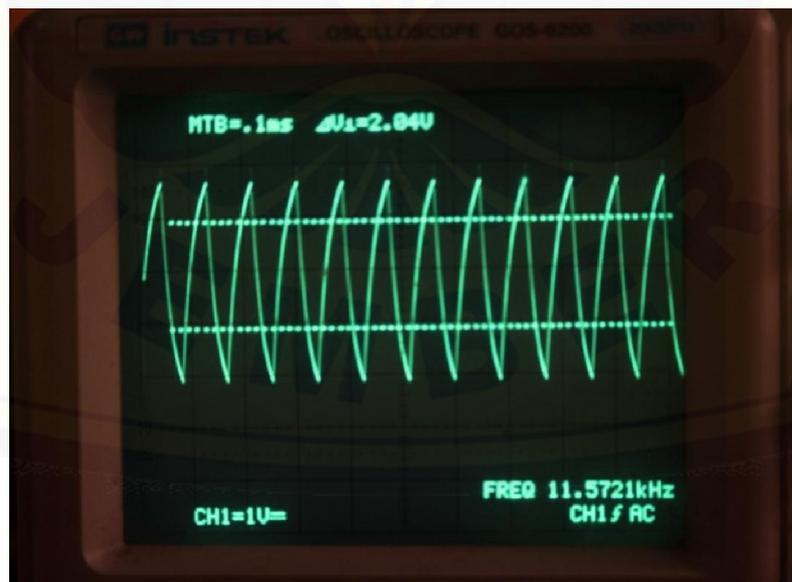
Berdasarkan data tegangan antar fasa R, S dan T pada tabel 4.3 bahwa dalam setiap *step* terdapat 2 buah kondisi *high* dan 1 buah kondisi *low*, hal ini terbukti seperti teori bahwa tegangan 3 fasa akan terdapat 2 buah fasa yang aktif atau pada kondisi *high* dan 1 buah kondisi *low*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1. sedangkan tanda negatif pada tabel data 4.3 menunjukkan bahwa

tegangan pada saat pengambilan data adalah searah dengan jarum jam, sehingga tanda negatif menunjukkan perbedaan arah fasa ketika pengambilan data. Dari data yang diperoleh dibandingkan dengan teori terbukti, sehingga penelitian ini adalah benar.

#### 4.4 Rangkaian PWM

Pada pengujian rangkaian PWM terdiri dari 3 buah pengujian yaitu pengujian tegangan DC, rangkaian segitiga dan juga sebuah komparator. Pengujian ini menggunakan *oscilloscope* sebagai media uji yang diharapkan akan menampilkan bentuk gelombang sesuai dengan yang diharapkan. Data yang diuji antara lain gelombang segitiga adalah membandingkan keluaran frekuensi hasil *oscilloscope* dan juga hasil perhitungan. Pada pembangkit segitiga digunakan IC 555. Sementara uji gelombang komparator dan juga pembagi tegangan adalah menjadi satu pengujian pada kaki IC LM324 yang digunakan sebagai masukan rangkaian *inverting* maupun *non inverting*.

Pada gambar 4.2 akan dijelaskan gambar gelombang segitiga dari *oscilloscope* dan dapat diperoleh hasil bahwa gelombang segitiga telah terbentuk dengan benar karena berbentuk segitiga dan titik bawah di bawah 0 volt.



Gambar 4.2 Bentuk Gelombang Segitiga

Pada gambar 4.2 di halaman 58 diperlihatkan salah satu hasil pengamatan bentuk gelombang pembangkit segitiga. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan telah sesuai dengan yang diharapkan, yaitu berbentuk segitiga dengan titik bawah berada pada titik 0 V. Sedangkan frekuensi yang dihasilkan juga sudah sesuai dengan yang diharapkan, karena memiliki frekuensi di atas 7 KHz. Frekuensi tersebut dihasilkan oleh kombinasi komponen yang berupa:

$$C = 0.1 \mu\text{F}$$

$$R1 = 2,2 \text{ K}, R2 = 100 \text{ K}$$

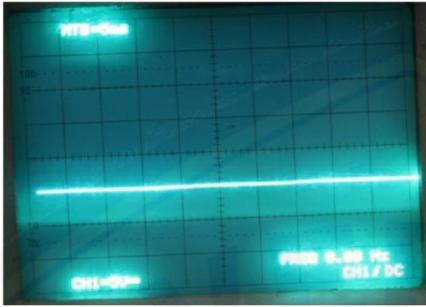
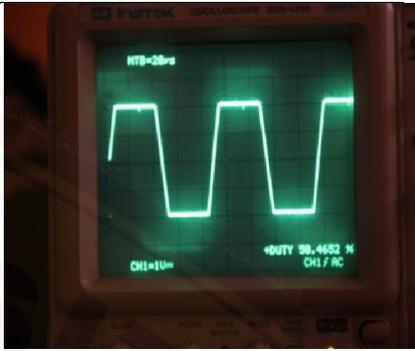
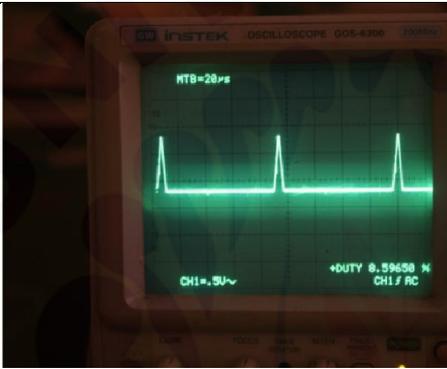
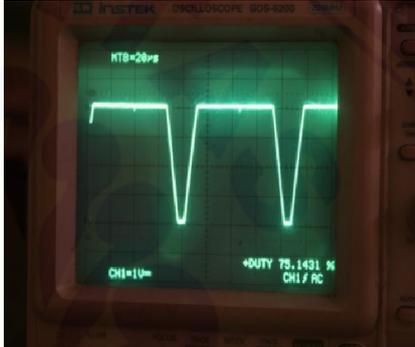
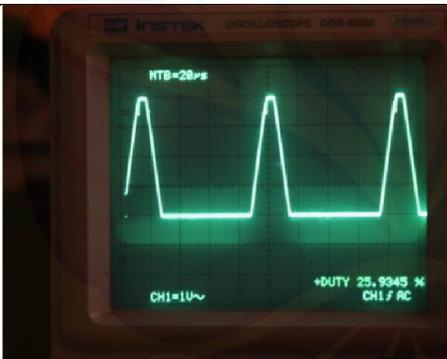
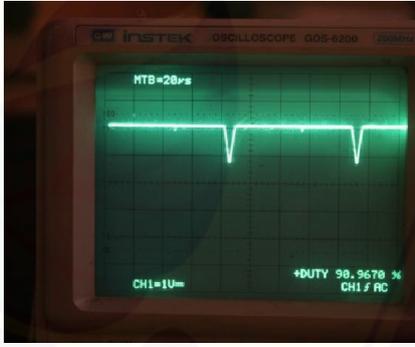
$$R3 = 12 \text{ K}$$

Jika dihitung dengan rumus frekuensi pembangkit segitiga, maka komponen komponen tersebut akan menghasilkan frekuensi sebesar:

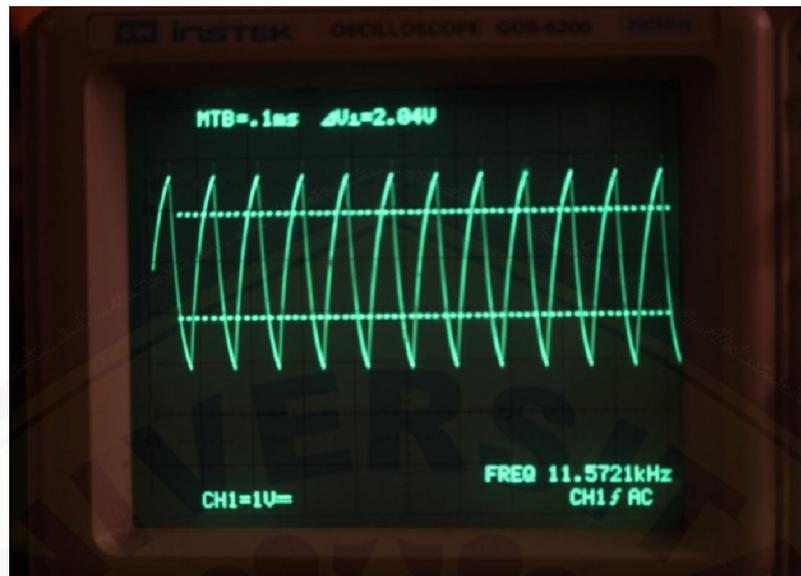
$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{4 C R1} \left( \frac{R2}{R3} \right) && (4.1) \\ &= \frac{1}{4 * 0,1 * 2,2} \left( \frac{100}{12} \right) \\ &= \frac{1}{0,88} \left( \frac{100}{12} \right) \\ &= 1,136 * 8,3 \\ &= 9,4 \text{ KHz} \end{aligned}$$

Dengan demikian besar frekuensi hasil pengamatan dengan hasil perhitungan memiliki selisih 2.17 KHz atau eror persen 23,17 %. Selisih tersebut wajar terjadi akibat adanya toleransi pada nilai komponen.

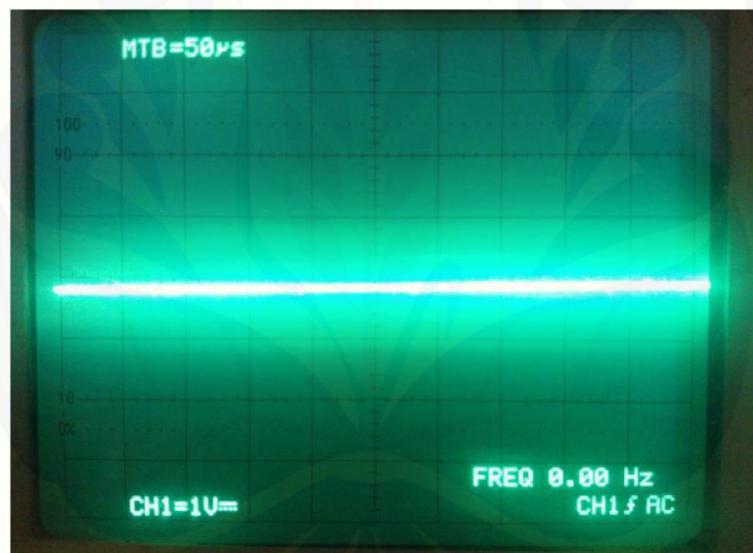
Tabel 4.4 Bentuk Perubahan Sinyal PWM

D(%)	Bentuk Sinyal	D(%)	Bentuk Sinyal
0		50,465	
8,596		75,143	
25,93		90,967	

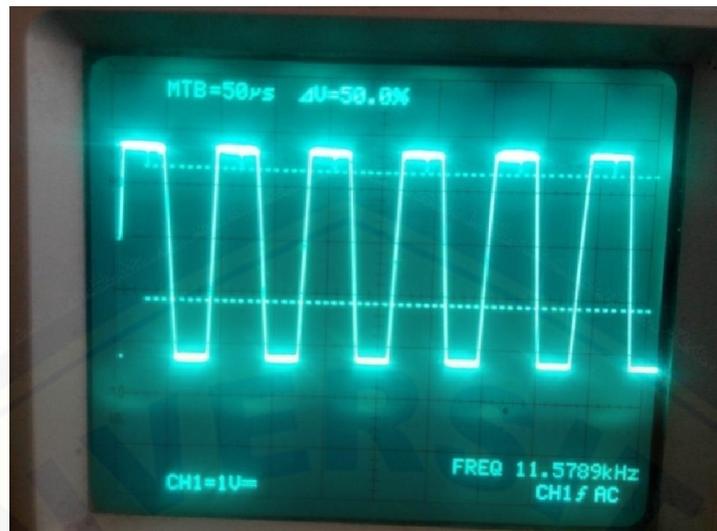
Pengujian pembagi tegangan dan komparator dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang masukan dan keluaran komparator pada kaki IC LM 324 . Gambar 4.3.(a) adalah bentuk gelombang pada kaki *non inverting* komparator, gambar 4.3.(b) adalah bentuk gelombang pada kaki *inverting* komparator, sedangkan pada gambar 4.3.(c) adalah bentuk gelombang keluaran komparator.



a. Bentuk Gelombang pada Kaki *Non Inverting* Komparator



b. Bentuk Gelombang pada Kaki *Inverting* Komparator



c. Bentuk Gelombang pada Keluaran Komparator

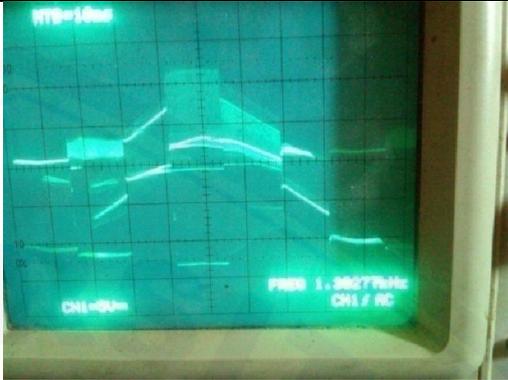
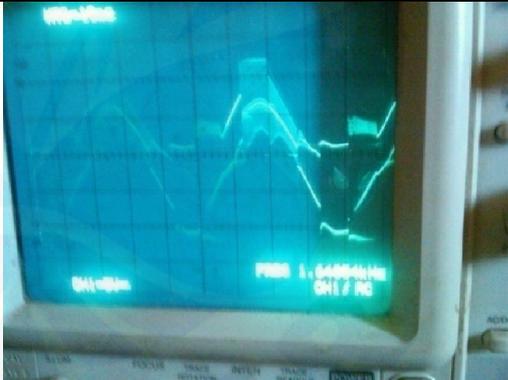
Gambar 4.3 Bentuk Gelombang pada Kaki Komparator *Duty Cycle* 50 %

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap bentuk gelombang pada komparator dapat disimpulkan bahwa rangkaian *pulse width modulation* telah benar dan sesuai dengan yang diharapkan.

#### 4.5 Hubungan *Duty Cycle* PWM dan Kecepatan Motor

Pada pengujian ini akan dicari hubungan nilai PWM terhadap kecepatan motor. Sehingga nanti dapat diketahui karakteristik motor yang dipakai yakni berupa *linear* atau tidak perubahan PWM terhadap kecepatan motor dan batas kecepatan maksimumnya. Sedangkan grafik hubungan antara PWM terhadap *speed* ditunjukkan pada tabel 4.4 pada halaman 63.

Tabel 4.4 Pengujian pada fasa motor

<i>Duty Cycle (%)</i>	<i>Speed (rpm)</i>	Bentuk Sinyal pada Fasa Motor
20,436	32,1	
40,397	62,0	
60,775	89,4	
80,418	113,2	

Dari gambar pada tabel 4.4 pada halaman 63 bahwa semakin besar nilai PWM (*duty cycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai PWM (*duty cycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Dan didapat kecepatan maksimumnya saat tegangan input 12,2 volt sebesar 113,2 rpm. Alasan bagaimana PWM dapat mengatur kecepatan motor adalah mengatur berapa persen tegangan *input* yang dialirkan ke motor yakni dengan mengatur lama waktu saat sinyal *high* terhadap *periode* PWM atau yang biasa disebut dengan *duty cycle* secara matematis dapat ditulis pada persamaan berikut.

$$V_{out} = Duty\ Cycle * V_{in} \quad (4.2)$$

Dimana  $V_{out}$  merupakan tegangan *output* dari *inverter* atau tegangan *input* yang masuk ke motor, sedangkan  $V_{in}$  adalah tegangan baterai sebesar 12,2 volt. Sehingga untuk data pada Tabel 4.4 pada halaman 63 dapat dihitung tegangan *input* motornya.

Selain itu, dapat dilihat pada *osiloscope* yaitu sinyal dari salah satu fasa motor dimana metode *sixstep* menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square* karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk *square* atau *trapezoid* timbul gelombang harmonik. Gelombang harmonik inilah yang menyebabkan motor “bising” ketika berputar. Gelombang harmonik tersebut sangat jelas terlihat pada saat motor berputar pelan atau saat frekuensi rendah yang dibuktikan dengan bentuk gelombang *trapezoid* tidak beraturan dan belum sempurna. Namun, saat motor berputar cepat atau saat frekuensi bertambah besar tepatnya saat *duty cycle* PWM diatas 60%.

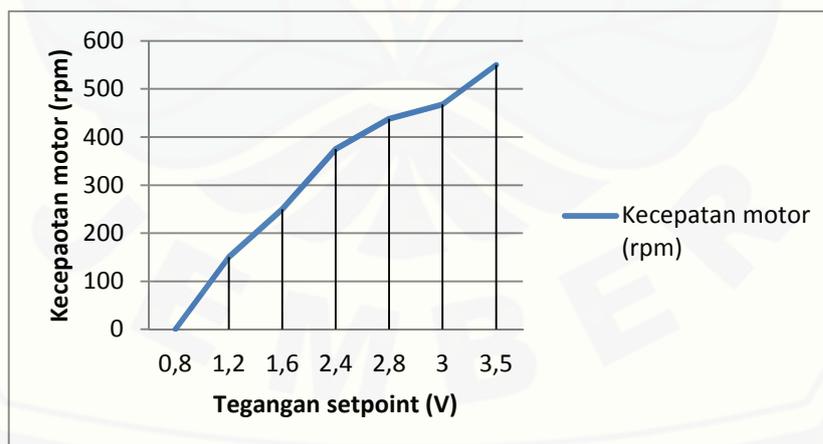
#### 4.6 Detector Error Kecepatan

##### 4.6.1 Pengujian Rangkaian *Detector Error*

Pengujian rangkaian *error* adalah mengetahui bagaimana hubungan tegangan *tortle* sebagai *setpoint* dan tegangan *output* generator DC sebagai *feedback*. Tegangan *error detector* adalah tegangan yang dihasilkan generator DC ketika motor berputar, jadi bukan tegangan selisih antara *setpoint* dengan *proses variable*. Berikut akan ditunjukkan hubungan nilai tegangan *setpoint* dari *tortle* dan juga tegangan *feedback* sistem dari generator DC.

Tabel 4.5 Pengujian Besar Tegangan *Setpoint* dari *Tortle* dan juga Tegangan *Feedback* Sistem dari Generator DC Terhadap Kecepatan Motor

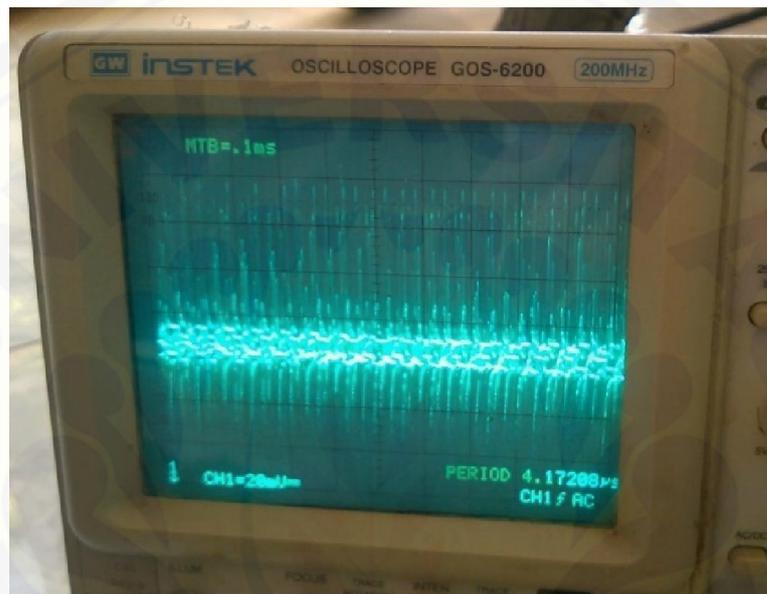
Teg. <i>Setpoint</i> (V)	Teg. Generator DC (V)	Tegangan eror (V)	Kec. Motor (rpm)
0,8	0	0,8	0
1,2	1,1	0,1	150
1,6	1,4	0,2	250
2,4	2,3	0,1	375
2,8	2,7	0,1	338
3	2,9	0,1	468
3,5	3,3	0,2	550



Gambar 4.4 Hubungan Tegangan *Setpoint* Generator DC dan juga Kecepatan Motor

Dari data pada tabel 4.5 ditunjukkan bahwa tegangan *tortle* sebagai *setpoint* berjalan *linear*, yaitu ketika *tortle* diinjak semakin kuat maka tegangan

yang dihasilkan semakin besar, hal ini menunjukkan bahwa motor akan berjalan lebih cepat, sedangkan pada tegangan *feedback* dari generator DC yaitu ketika motor berjalan semakin cepat maka tegangan yang dihasilkan akan semakin besar. Dari data tabel 4.5 di halaman 65 maka dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem akan berjalan baik karena tegangan *setpoint* dan tegangan *feedback* mempunyai nilai yang relatif sama.



Gambar 4.5 Gelombang Tegangan *Feedback* Sebelum Filterasi



Gambar 4.6 Gelombang Tegangan *Feedback* Setelah Filterasi

Dari gambar 4.5 dan 4.6 di halaman 66 pengujian bentuk gelombang tegangan *feedback* telah diketahui, tegangan *feedback* dari generator DC telah difilterasi oleh kapasitor sebesar 3,3 uF untuk memperhalus bentuk gelombang sehingga ketika diterapkan pada kontrol sudah berbentuk halus.

#### 4.7 Pengujian Tanpa Beban

Pada pengujian ini, sistem diatur pada *loop* terbuka, sehingga tidak ada *feedback* yang masuk ke kontrol, kecepatan motor diatur dengan menggunakan lebar pulsa PWM. Pada pengujian ini akan diketahui bagaimana respon sistem pada *loop* terbuka tanpa beban saat tegangan *setpoint* 1,6 V, 2,4 V dan 3,5 V.

##### 4.7.1 Pengujian Tanpa Kontrol

Berikut akan ditunjukkan data hasil pengamatan pada saat tanpa kontrol atau *loop* terbuka tanpa menggunakan beban.

Tabel 4.6 Data Pengujian Tanpa Kontrol

Teg. <i>Setpoint</i> (V)	Teg. <i>Feedback</i> (V)	Kec. Motor (rpm)	<i>Settling Time</i> (s)
1,6	1,4	250	7,4
2,4	2,8	375	7,6
3,5	3,3	550	8

Dari data pengujian tanpa kontrol dan tanpa beban menunjukkan bahwa dengan menggunakan tegangan *setpoint* 1,6 V akan diperoleh kecepatan 250 rpm, dengan tegangan *setpoint* 2,4 V akan diperoleh kecepatan 375 rpm, dan dengan tegangan *setpoint* 3,5 V akan diperoleh kecepatan 550 rpm. Selain itu dengan tidak adanya kontrol sistem akan membutuhkan waktu yang lama untuk mencapai kecepatan berdasarkan tegangan *setpoint* yang diberikan. Hal ini dikarenakan dengan tidak adanya umpan balik dari sistem maka motor akan berputar sesuai dengan lebar pulsa PWM yang diberikan untuk mengalirkan besar tegangan untuk sistem. Seperti pada tabel 4.6 dengan menggunakan tegangan 1,6 V diperoleh

kecepatan 250 rpm namun pencapaian waktunya selama 7,4 detik, lalu dengan tegangan 2,4 V diperoleh kecepatan 375 rpm namun pencapaian waktunya selama 7,6 detik, lalu dengan menggunakan tegangan 3,5 V diperoleh kecepatan 550 rpm namun pencapaian waktunya selama 8 detik, hal ini merupakan respon yang buruk untuk kinerja sebuah sistem.

#### 4.7.2 Kontrol P

Pada kontrol ini hanya parameter kontrol *proportional* yang dipakai. Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan bagaimana respon ketika hanya ada parameter kontrol P yang diterapkan dengan nilai yang bervariasi. Nilai  $K_p$  yang diterapkan berdasarkan pada pembagian *range* pada nilai  $K_p$ , yaitu karena  $K_p$  berkisar 1-10 dari potensiometer sebesar 100K $\Omega$  maka dipilih dari *range* rendah, tengah dan tinggi yaitu  $K_p = 1,6$ ,  $K_p = 5,5$ , dan  $K_p = 7,3$ . Berikut akan dijelaskan bagaimana penentuan nilai  $K_p$  dengan perhitungan:

- Potensiometer konstanta P ( $R_p$ ) = 100 K $\Omega$

$$R_i = 10 \text{ K}\Omega$$

$$\text{➤ } K_p = \frac{R_p}{R_1} \quad (4.3)$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_1} = \frac{16K}{10K} = 1,6$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_1} = \frac{55K}{10K} = 5,5$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_1} = \frac{73K}{10K} = 7,3$$

Sehingga besar hambatan (R) yang dipakai adalah sebesar 16K $\Omega$ , 55 K $\Omega$ , 73 K $\Omega$ .

Tabel 4.7 Pengujian Kontrol P dengan Nilai Kp Bervariasi

Kp	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Kecepatan Steady Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	Rise Time (s)	overshoot (%)
1,6	1,6	1,4	239	480	0,9	92
5,5	1,6	1,4	240	900	0,6	260
7,3	1,6	1,4	245	900	0,4	260
1,6	2,4	2,3	342	752	1	100,5
5,5	2,4	2,3	365	900	0,6	140
7,3	2,4	2,3	367	900	0,4	140
1,6	3,5	3,3	500	900	0,9	63,6
5,5	3,5	3,3	536	900	0,6	63,6
7,3	3,5	3,3	538	900	0,4	63,6

➤ Ketika *setpoint* tegangan 1,6 V atau 250 rpm

$$\%MOKp1,6 = \frac{480-250}{250} \times 100\% = 92 \%$$

$$\%MOKp5,5 = \frac{900-250}{250} \times 100\% = 260 \%$$

$$\%MOKp7,3 = \frac{900-250}{250} \times 100\% = 260 \%$$

➤ Ketika *setpoint* tegangan 2,4 V atau 375 rpm

$$\%MOKp1,6 = \frac{752-375}{375} \times 100\% = 100,5\%$$

$$\%MOKp5,5 = \frac{900-375}{375} \times 100\% = 140\%$$

$$\%MOKp7,3 = \frac{900-375}{375} \times 100\% = 140\%$$

➤ Ketika *setpoint* tegangan 3,5 V atau 550 rpm

$$\%MOKp1,6 = \frac{900-550}{550} \times 100\% = 63,6\%$$

$$\%MOKp5,5 = \frac{900-550}{550} \times 100\% = 63,6\%$$

$$\%MOKp7,3 = \frac{900-550}{550} \times 100\% = 63,6\%$$

Berdasarkan tabel 4.7 ditunjukkan bahwa respon dari kontrol P dengan variasi nilai Kp 1,6, Kp 5,5 dan Kp 7,3. Untuk tegangan *setpoint* 1,6 V atau 250 rpm dengan menggunakan Kp 1,6 nilai *rise time* adalah 0,9 detik dengan nilai *overshoot* 92% pada Kp 5,5 nilai *rise time* adalah 0,6 detik dengan *overshoot* 260%, pada Kp 7,3 nilai *rise time* adalah 0,4 dengan *overshoot* 260%. *Rise time*

adalah waktu yang dibutuhkan sistem pada awal respon ketika diterapkan kontrol didalamnya. Dari data yang dijabarkan bahwa semakin besar nilai  $K_p$  yang diterapkan untuk kontrol P mempengaruhi nilai *rise time* dan juga besar *overshoot* yang ditimbulkan. Semakin besar nilai  $K_p$  yang diterapkan maka *overshoot* yang ditimbulkan semakin besar namun nilai *rise time* semakin cepat, namun pada nilai  $K_p$  5,5 dan  $K_p$  7,3 memiliki nilai *overshoot* yang sama, karena penguatan mencapai batas kecepatan maksimal motor dalam berputar, yaitu pada kecepatan 900 rpm. Sedangkan perhitungan nilai *overshoot* didasarkan pada kecepatan motor tanpa kontrol sebagai acuan, yaitu ketika tegangan 1,6 V maka kecepatan acuan perhitungan *overshoot* adalah 250 rpm. Hal ini juga terdapat pada tegangan *setpoint* 2,4 V atau 375 rpm dan 3,5 V atau 550 rpm.

#### 4.7.3 Kontrol PI

Pada pengujian ini akan digunakan dua parameter konstanta kontrol yaitu *proportional* dan *integral*. Penentuan nilai konstanta *proportional* sama seperti pada subbab 4.7.2 halaman 68 yaitu  $K_p$  1,6,  $K_p$  5,5 dan  $K_p$  7,3. Pada penentuan nilai konstanta *integral* dengan membuat 3 *range* dari hambatan potensiometer dengan mengambil nilai rendah, tengah juga tinggi dan diperoleh *range*  $K_i$  0,055,  $K_i$  0,1 dan  $K_i$  0,31. Berikut akan dijelaskan bagaimana penentuan nilai  $K_i$  dengan perhitungan:

➤ Potensiometer konstanta I ( $R_i$ ) = 100 K $\Omega$

$$C_i = 200 \text{ uF}$$

$$\text{➤ } K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} \quad (4.4)$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{16 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,31$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{50 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,1$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{90,9 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,055$$

Sehingga nilai resistor parameter *integral* ( $R_i$ ) adalah 16 K $\Omega$ , 50 K $\Omega$ , 90,9 K $\Omega$ .

Tabel 4.8 Pengujian Kontrol PI pada Kp dan Ki Bervariasi

Kp	Ki	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Kecepatan Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)
1,6	0,055	1,6	1,4	250	275	0,4	4	10
5,5	0,055	1,6	1,4	250	280	0,5	4,2	12
7,3	0,055	1,6	1,4	250	295	0,5	4,4	18
1,6	0,1	1,6	1,4	250	275	0,4	4,2	10
5,5	0,1	1,6	1,4	250	281	0,5	4,2	12,4
7,3	0,1	1,6	1,4	250	293	0,4	4	17,2
1,6	0,31	1,6	1,4	250	276	0,5	4,6	10,4
5,5	0,31	1,6	1,4	250	285	0,5	4,2	14
7,3	0,31	1,6	1,4	250	292	0,5	4,2	16,8
1,6	0,055	2,4	2,3	375	405	0,4	4,8	8
5,5	0,055	2,4	2,3	375	412	0,5	4,8	9,87
7,3	0,055	2,4	2,3	375	421	0,5	4,6	12,27
1,6	0,1	2,4	2,3	375	406	0,4	4,4	8,27
5,5	0,1	2,4	2,3	375	418	0,5	4,6	11,47
7,3	0,1	2,4	2,3	375	425	0,4	4,2	13,33
1,6	0,31	2,4	2,3	375	403	0,5	4,4	7,47
5,5	0,31	2,4	2,3	375	412	0,5	4,2	9,87
7,3	0,31	2,4	2,3	375	422	0,5	4,2	12,53
1,6	0,055	3,5	3,3	550	595	0,4	4,6	8,18
5,5	0,055	3,5	3,3	550	600	0,5	4,8	9,09
7,3	0,055	3,5	3,3	550	613	0,5	4,2	11,45
1,6	0,1	3,5	3,3	550	591	0,4	4,4	7,45
5,5	0,1	3,5	3,3	550	596	0,5	4,2	8,36
7,3	0,1	3,5	3,3	550	611	0,4	4,8	11,09
1,6	0,31	3,5	3,3	550	599	0,5	4,6	8,91
5,5	0,31	3,5	3,3	550	601	0,5	4,6	9,27
7,3	0,31	3,5	3,3	550	613	0,5	4,4	11,45

Berdasarkan tabel 4.8 dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kontrol PI maka sistem cenderung mengejar kestabilan sedekat mungkin, karena terdapat kontrol *integral* yang cenderung mengeliminasi *steady state error*. Pada kontrol PI terdapat nilai *settling time* yaitu waktu yang diperlukan sistem dalam mencapai kestabilan juga menurunkan *overshoot* daripada pada kontrol P. Dibandingkan dengan kontrol P yang hanya meningkatkan *rise time* sistem dan semakin lama mencapai kestabilan/*steady state*. Pada pengujian ini dengan menggunakan *setpoint* yang semakin besar nilai *settling time* yang dicapai semakin lama. Hal ini dapat disebabkan karena metode yang digunakan adalah *trial* dan *error* sehingga

masih belum terdapat hasil yang optimal. Dari pengujian tersebut akan dicari konstanta yang mempunyai nilai paling optimal, yaitu yang mempunyai nilai *settling time* paling cepat dalam mencapai kestabilan sistem. Berdasarkan data pada tabel 4.8 diperoleh nilai konstanta yang mempunyai respon paling optimal adalah  $K_p$  1,6  $K_i$  0,0055 dan  $K_d$  7,3  $K_i$  0,1. Konstanta ini akan diterapkan pada mobil untuk aplikasinya sebagai perbandingan.

#### 4.7.4 Kontrol PID

Pada pengujian ini menggabungkan ketiga parameter kontrol *proportional*, *integral* dan *derivative* untuk mengetahui respon sistem tanpa menggunakan beban. Nilai konstanta P, I sama seperti pada subbab 4.7.2 halaman 68 dan 4.7.3 halaman 70, sedangkan untuk parameter  $K_d$  adalah dengan membagi menjadi 3 *range*, rendah, tengah dan tinggi dari nilai maksimal potensiometer yang dipakai. Karena menggunakan nilai hambatan potensiometer sebesar 100 K $\Omega$ . Berikut adalah perhitungan nilai  $K_d$  yang dipakai.

- Potensiometer konstanta D ( $R_d$ ) = 100 K $\Omega$   
 $C_d = 50 \text{ uF}$
- $K_d = R_d \cdot C_d$  (4.6)  
 $K_d = R_d \cdot C_d = 10,6 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 0,53$
- $K_d = R_d \cdot C_d = 44,2 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 2,21$
- $K_d = R_d \cdot C_d = 88,2 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 4,41$

Jadi resistor potensio pada penelitian ini untuk ketiga parameter masing-masing adalah  $R_p$  10,6 K $\Omega$ , 44,2 K $\Omega$ , 88,2 K $\Omega$ . Berikut ini adalah hasil pengujian dengan menggunakan kontrol PID tanpa beban yang diterapkan pada sistem.

Tabel 4.9 Pengujian Kontrol PID pada  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  Bervariasi

$K_p$	$K_i$	$K_d$	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Kecepatan Motor (Rpm)	Kecepatan Puncak (Rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)
1,6	0,055	0,53	1,6	1,4	250	260	0,9	4	4
5,5	0,055	2,21	1,6	1,4	250	266	0,5	4	6,4
7,3	0,055	4,4	1,6	1,4	250	255	0,5	3,3	2
1,6	0,1	0,53	1,6	1,4	250	285	0,4	5	14
5,5	0,1	2,21	1,6	1,4	250	276	0,5	2	10,4
7,3	0,1	4,4	1,6	1,4	250	266	0,7	5	6,4
1,6	0,31	0,53	1,6	1,4	250	267	0,5	2,6	6,8
5,5	0,31	2,21	1,6	1,4	250	265	0,5	2	6
7,3	0,31	4,4	1,6	1,4	250	282	0,9	5	12,8
1,6	0,055	0,53	2,4	2,3	375	405	0,4	2,6	8
5,5	0,055	2,21	2,4	2,3	375	410	0,8	5	9,33
7,3	0,055	4,4	2,4	2,3	375	415	0,7	3	10,67
1,6	0,1	0,53	2,4	2,3	375	406	0,4	2,6	8,27
5,5	0,1	2,21	2,4	2,3	375	417	0,5	2,4	11,2
7,3	0,1	4,4	2,4	2,3	375	413	0,5	4	10,13
1,6	0,31	0,53	2,4	2,3	375	403	1	4,4	7,47
5,5	0,31	2,21	2,4	2,3	375	412	0,8	3,5	9,87
7,3	0,31	4,4	2,4	2,3	375	412	0,8	3	9,87
1,6	0,055	0,53	3,5	3,3	550	575	0,6	3	4,55
5,5	0,055	2,21	3,5	3,3	550	580	0,7	8,7	5,45
7,3	0,055	4,4	3,5	3,3	550	563	0,8	8,8	2,36
1,6	0,1	0,53	3,5	3,3	550	571	0,7	6,5	3,82
5,5	0,1	2,21	3,5	3,3	550	586	0,7	6	6,55
7,3	0,1	4,4	3,5	3,3	550	567	0,4	8	3,09
1,6	0,31	0,53	3,5	3,3	550	579	0,4	7,1	5,27
5,5	0,31	2,21	3,5	3,3	550	562	0,6	8,6	2,18
7,3	0,31	4,4	3,5	3,3	550	570	0,8	5	3,64

Berdasarkan tabel 4.9 pengujian dengan menggunakan ketiga parameter kontrol yaitu P, I dan D menunjukkan bahwa sistem lebih cepat mencapai kestabilan dan juga nilai *overshoot* lebih rendah daripada kontrol P dan PI. Namun masih terjadi *overshoot* pada sistem ini, kelemahan dari pengujian ini adalah waktu *settling time* yang lama sedangkan dalam kontrol adalah waktu transien yang dianalisa juga dalam kontrol PID sebenarnya sudah tidak terjadi *overshoot* pada pengujiannya, sehingga hal tersebut dapat diakibatkan karena penentuan parameter PID yang masih menggunakan *trial* dan *error*. Berdasarkan

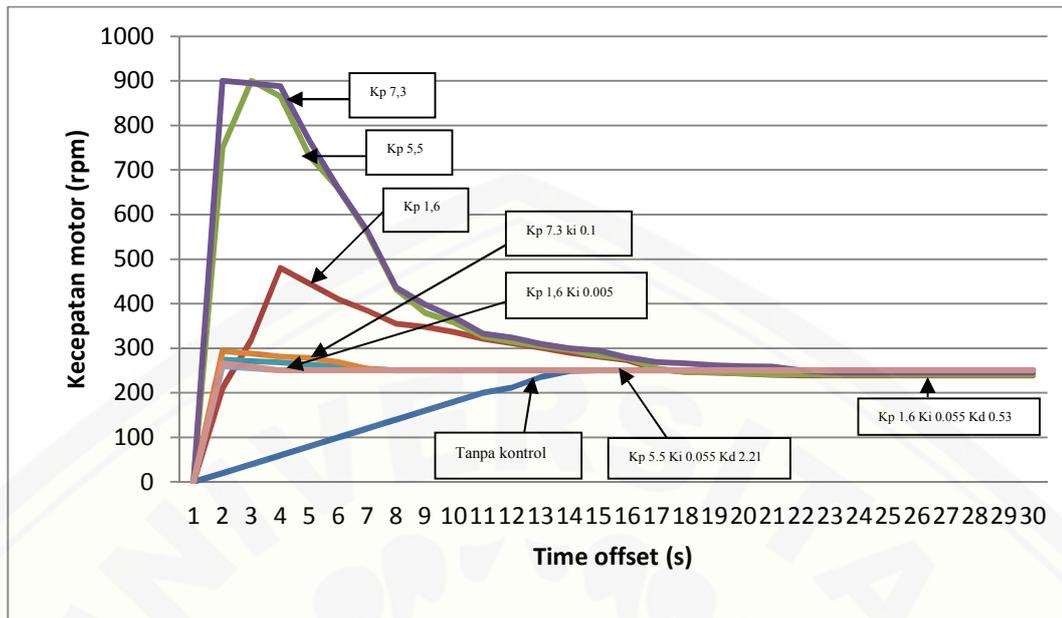
data pengujian pada tabel 4.9 pada halaman 73 akan dicari nilai konstanta kontrol yang paling optimal untuk diterapkan pada pengujian dengan beban di mobil listrik, dan diperoleh nilai konstanta yang paling optimal adalah Kp 5,5 Ki 0,1 Kd 2,21 lalu Kp 5,5 Ki 0,31 dan Kd 2,21 dan Kp 1,6 Ki 0,1 Kd 2,21. Nilai parameter ini akan diterapkan pada kondisi berbeban di mobil listrik untuk dilihat bagaimana perbedaannya.

#### 4.7.5 Perbandingan Pengujian Tanpa Beban

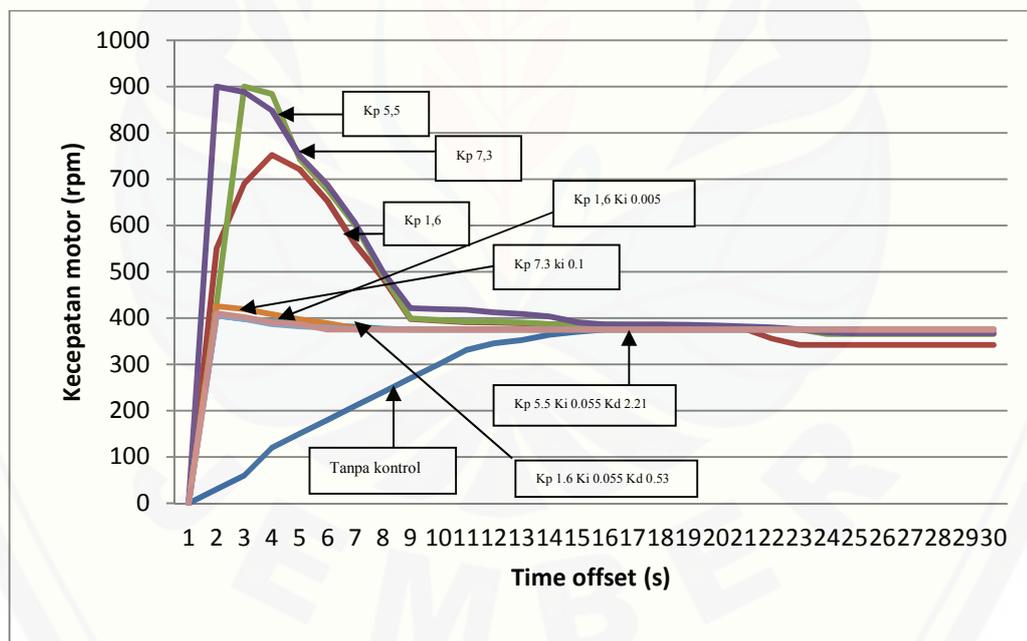
Berikut akan ditunjukkan bagaimana perbandingan respon tanpa kontrol, kontrol P, kontrol PI, kontrol PID pada saat tanpa beban dengan tegangan *setpoint* 1,6 V pada kecepatan motor 250 rpm dan tegangan *setpoint* 2,4 V pada kecepatan motor 375 rpm.

Tabel 4.10 Pengujian Respon Tanpa Beban

Kp	Ki	Kd	Teg. <i>Setpoint</i> (V)	Teg. <i>feedback</i> (V)	Kecepatan Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	<i>Rise Time</i> (s)	<i>Settling Time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)
-	-	-	1,6	1,4	250	250	-	7,4	-
-	-	-	2,4	2,3	375	375	-	7,6	-
1,6	0	0	1,6	1,4	239	480	0,9	-	92
5,5	0	0	1,6	1,4	240	900	0,6	-	260
7,3	0	0	1,6	1,4	245	900	0,4	-	260
1,6	0	0	2,4	2,3	342	752	1	-	100,5
5,5	0	0	2,4	2,3	365	900	0,6	-	140
7,3	0	0	2,4	2,3	367	900	0,4	-	140
1,6	0,055	0	1,6	1,4	250	275	1,4	4	10
7,3	0,1	0	1,6	1,4	250	293	1,2	4,2	17,2
1,6	0,055	0	2,4	2,3	375	405	1,4	4,2	8
7,3	0,1	0	2,4	2,3	375	425	1,4	4,2	13,33
1,6	0,055	0,53	1,6	1,4	250	260	1,6	2	4
5,5	0,055	2,21	1,6	1,4	250	266	1,4	2	6,4
1,6	0,055	0,53	2,4	2,3	375	405	1,4	5,5	8
5,5	0,055	2,21	2,4	2,3	375	410	1,4	3	9,33



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID pada saat Tanpa Beban dengan *Setpoint* 250 rpm



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kontrol P, Kontrol PI, Kontrol PID pada saat Tanpa Beban dengan *Setpoint* 375 rpm

Berdasarkan gambar 4.7 dan 4.8 di halaman 75 tentang grafik perbandingan pengujian respon tanpa kontrol maupun dengan kontrol menunjukkan bahwa pada tegangan *setpoint* 1,6 V atau pada kecepatan motor 250 rpm dan 2,4 V pada kecepatan motor 375 rpm dengan menggunakan kontrol P hanya meningkatkan *rise time* sistem dan juga menimbulkan *overshoot* yang tinggi karena faktor pengali P sehingga selisih tegangan *setpoint* dan juga *feedback* akan dikalikan sesuai besaran  $K_p$  yang diterapkan, untuk kontrol PI nilai *overshoot* masih tinggi mempunyai nilai *settling time* yang lebih lambat namun memiliki *rise time* yang lebih cepat daripada kontrol PID. Pada kontrol PID *overshoot* lebih rendah bahkan hilang daripada kontrol P atau PI karena terdapat parameter *derivative* yang mengurangi *overshoot* dan mengurangi *error* maka dari itu sistem lebih stabil.

#### 4.8 Pengujian Dengan Beban

Pada pengujian ini, akan dibahas tentang bagaimana respon ketika sistem diberi beban mobil listrik + 1 orang kemudi dengan berat total  $\pm 225$  Kg atau ketika dikonversi menjadi 45,72 Newton meter pada *setpoint* 250 rpm, 375 rpm dan 550 rpm.

Berikut adalah perhitungan torsi mobil listrik + 1 kemudi :

Diketahui : Berat beban total = 225 N

Jari-Jari roda ( $r$ ) = 20,32 cm = 0,232 m

Ditanya : Torsi beban mobil ? (T)

Jawab :  $T = \text{berat gaya berat} \cdot r$  (4.7)  
 $= 225 \text{ N} \cdot 0,232 \text{ m}$   
 $= 45,72 \text{ N.m}$

Nilai berat total sudah dikonversikan menjadi satuan newton karena neraca pegas yang digunakan untuk pengukuran.

#### 4.8.1 Pengujian Tanpa Kontrol

Berikut akan ditunjukkan data hasil pengamatan pada saat tanpa kontrol atau *loop* terbuka dengan menggunakan beban.

Tabel 4.11 Data Pengujian Tanpa Kontrol dengan Beban

Teg. <i>Setpoint</i> (V)	Teg. <i>Feedback</i> (V)	Kec. Motor (Rpm)	<i>Settling Time</i> (s)
1,6	1,4	250	13
2,4	2,8	375	13,2
3,5	3,3	550	13

Dari data pada tabel 4.11 menunjukkan bahwa dengan tidak adanya kontrol sistem akan membutuhkan waktu yang lama. Hal ini dikarenakan dengan tidak adanya umpan balik dari sistem maka motor akan berputar sesuai dengan lebar pulsa PWM yang diberikan untuk mengalirkan besar tegangan untuk sistem. Seperti yang terlihat pada tabel 4.11 dengan menggunakan tegangan 1,6 V diperoleh kecepatan 250 rpm namun pencapaian waktunya yaitu selama 13 detik, lalu dengan tegangan 2,4 V diperoleh kecepatan 375 rpm namun pencapaian waktunya yaitu selama 13,2 detik, lalu dengan menggunakan tegangan 3,5 V diperoleh kecepatan 550 rpm namun pencapaian waktunya yaitu selama 14 detik hal ini merupakan respon yang buruk untuk kinerja sebuah kontrol. Pada pengujian beban dengan tegangan *setpoint* yang sama pada kondisi tanpa beban kecepatan motor sama, karena meskipun terdapat beban, maka *feedback* yang keluar adalah tegangan yang lebih kecil namun ketika memasuki rangkaian pengurang akan kembali lagi menjadi tegangan yang besar sehingga motor juga akan berputar dengan kecepatan seperti tanpa beban.

#### 4.8.2 Kontrol P

Pada kontrol ini hanya parameter kontrol *proportional* yang dipakai. Pengujian ini dilakukan untuk membandingkan bagaimana respon ketika hanya ada parameter kontrol P yang diterapkan dengan nilai yang bervariasi. Nilai  $K_p$

yang diterapkan berdasarkan pada pembagian *range* pada nilai  $K_p$ , yaitu karena  $K_p$  berkisar 1-10 dari potensiometer sebesar 100  $K\Omega$  maka dipilih dari *range* rendah, tengah dan tinggi yaitu  $K_p = 1,6$ ,  $K_p = 5,5$ , dan  $K_p = 7,3$ . Berikut akan dijelaskan bagaimana penentuan nilai  $K_p$  dengan perhitungan:

➤ Potensiometer konstanta P ( $R_p$ ) = 100  $K\Omega$

$$R_i = 10 \text{ K}\Omega$$

$$\text{➤ } K_p = \frac{R_p}{R_i} \quad (4.8)$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_i} = \frac{16K}{10K} = 1,6$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_i} = \frac{55K}{10K} = 5,5$$

$$K_p = \frac{R_p}{R_i} = \frac{73K}{10K} = 7,3$$

Sehingga besar R yang dipakai adalah sebesar 16 $K\Omega$ , 55  $K\Omega$ , 73  $K\Omega$ .

Tabel 4.12 Pengujian Kontrol P dengan Beban saat nilai  $K_p$  Bervariasi

$K_p$	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Kecepatan Motor (rpm)	Beban (N.m)	Kecepatan Puncak (rpm)	Rise Time (s)	Overshoot (%)
1,6	1,6	1,4	250	45,72	-	1,2	-
5,5	1,6	1,4	250	45,72	-	0,8	-
7,3	1,6	1,4	250	45,72	-	0,8	-
1,6	2,4	2,3	375	45,72	-	1,4	-
5,5	2,4	2,3	375	45,72	-	1,2	-
7,3	2,4	2,3	375	45,72	-	1	-
1,6	3,5	3,3	550	45,72	-	1,2	-
5,5	3,5	3,3	550	45,72	-	1	-
7,3	3,5	3,3	550	45,72	-	1	-

Berdasarkan tabel 4.12 terlihat bahwa respon dari kontrol P dengan variasi nilai  $K_p$  1,6,  $K_p$  5,5 dan  $K_p$  7,3 menunjukkan bahwa sistem setelah diterapkan beban dengan tegangan yang sama dapat berputar seperti kondisi tidak berbeban, hal ini dikarenakan beban mobil yang berat sehingga tegangan *feedback* akan keluar lebih kecil namun dengan masuk kepada rangkaian pengurang maka tegangan *error* akan besar dan akan menjaga putaran motor seperti kecepatan tanpa beban. Dengan menggunakan variasi nilai  $K_p$ , semakin besar nilai  $K_p$  akan mempercepat waktu *rise time* sistem. *Overshoot* pada pengujian ini tidak terjadi, karena terdapat beban mobil sebagai penghambat sehingga tidak terjadi *overshoot*.

### 4.8.3 Kontrol PI

Pada pengujian ini akan digunakan dua parameter konstanta kontrol yaitu *proportional* dan *integral*. Penentuan nilai konstanta *proportional* sama seperti pada subbab 4.8.1 halaman 77 yaitu  $K_p$  1,6,  $K_p$  5,5 dan  $K_p$  7,3. Pada penentuan nilai konstanta *integral* dengan membuat 3 *range* dari hambatan potensiometer dan diperoleh range  $K_i$  0,055,  $K_i$  0,1 dan  $K_i$  0,31. Berikut akan dijelaskan bagaimana penentuan nilai  $K_i$  dengan perhitungan:

➤ Potensiometer konstanta I ( $R_i$ ) = 100 K $\Omega$

$$C_i = 200 \text{ uF}$$

$$\text{➤ } K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} \quad (4.9)$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{16 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,31$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{50 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,1$$

$$K_i = \frac{1}{R_i \cdot C_i} = \frac{1}{90,9 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 0,055$$

Sehingga nilai  $R_i$  adalah 16 K $\Omega$ , 50 K $\Omega$ , 90,9 K $\Omega$ .

Pada pengujian ini akan dilihat bagaimana respon kontrol PI dengan  $K_p$  1,6  $K_i$  0,0055 dan juga  $K_p$  7,3  $K_i$  0,1 pada *setpoint* 1,6 V atau pada kecepatan motor 250 rpm dan 2,4 V pada kecepatan motor 375 rpm. Nilai parameter ini diambil dari hasil pengujian kontrol PI tanpa beban pada subbab 4.7.3 di halaman 70.

Tabel 4.13 Pengujian Kontrol PI dengan Beban saat  $K_p$  dan  $K_i$  Bervariasi

$K_p$	$K_i$	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Beban (N.m)	Kecepatan Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)
1,6	0,055	1,6	1,4	45,72	250	-	1,4	7	-
7,3	0,1	1,6	1,4	45,72	250	-	1,2	7,2	-
1,6	0,055	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	7	-
7,3	0,1	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	6,4	-

Berdasarkan tabel 4.13 pengujian dengan beban dengan menggunakan parameter konstanta kontrol yang telah diuji tanpa menggunakan beban dan

dilihat respon yang paling optimal, setelah dilakukan pengujian dengan menggunakan parameter tersebut diperoleh bahwa kecepatan motor saat mencapai *steady state* sama dengan kecepatan pada tegangan *setpoint* yang sama ketika tanpa beban, hal ini karena beban motor mempengaruhi besar kecilnya tegangan *feedback* kontrol sehingga ketika masuk ke dalam rangkaian pengurang maka kecepatan motor akan berputar lebih cepat seperti ketika tanpa beban. Selain itu dengan adanya kontrol PI memberikan pengaruh bahwa sistem akan mencapai kestabilan pada kondisi dengan beban. Pada pengujian ini juga tidak terdapat *overshoot* karena pengaruh PI hanya mempercepat respon awal sistem atau *rise time* dan *settling time* daripada tanpa menggunakan kontrol.

#### 4.8.4 Kontrol PID

Pada pengujian ini menggabungkan ketiga parameter kontrol *proportional*, *integral* dan *derivative* untuk melihat respon sistem dengan menggunakan beban. Nilai konstanta P, I sama seperti pada subbab 4.8.2 di halaman 77 dan 4.8.3 di halaman 79, sedangkan untuk parameter Kd adalah dengan membagi menjadi 3 *range* rendah, tengah dan tinggi dari nilai maksimal potensiometer yang dipakai. Berikut adalah perhitungan nilai Kd yang dipakai.

- Potensiometer konstanta D (Rd) = 100 K $\Omega$   
Cd = 50 uF
- $K_d = R_d \cdot C_d$  (4.10)  
 $K_d = R_d \cdot C_d = 10,6 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 0,53$   
 $K_d = R_d \cdot C_d = 44,2 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 2,21$   
 $K_d = R_d \cdot C_d = 88,2 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-6}$   
 $K_d = 4,41$

Jadi resistor potensio pada penelitian ini untuk ketiga parameter masing-masing adalah Rp 10,6 K $\Omega$ , 44,2 K $\Omega$ , 88,2 K $\Omega$ .

Pada pengujian ini akan dilihat bagaimana respon kontrol PID dengan Kp 1,6 Ki 0,0055 Kd 0,53 dan juga Kp 5,5 Ki 0,055 Kd 2,21 pada tegangan *setpoint* 1,6 V dan 2,4 V. Nilai parameter ini diambil dari hasil pengujian kontrol PID tanpa beban pada subbab 4.7.4 di halaman 72.

Tabel 4.14 Pengujian Kontrol PID dengan Beban saat Kp, Ki dan Kd Bervariasi

Kp	Ki	Kd	Teg. <i>Setpoint</i> (V)	Beban (N.m)	Teg. <i>Feedback</i> (V)	Kecepatan Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	<i>Rise Time</i> (s)	<i>Settling Time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)
1,6	0,055	0,53	1,6	45,72	1,4	250	-	1,6	6,8	-
5,5	0,055	2,21	1,6	45,72	1,4	250	-	1,4	6,8	-
1,6	0,055	0,53	2,4	45,72	2,3	375	-	1,4	6,6	-
5,5	0,055	2,21	2,4	45,72	2,3	375	-	1,4	6,2	-

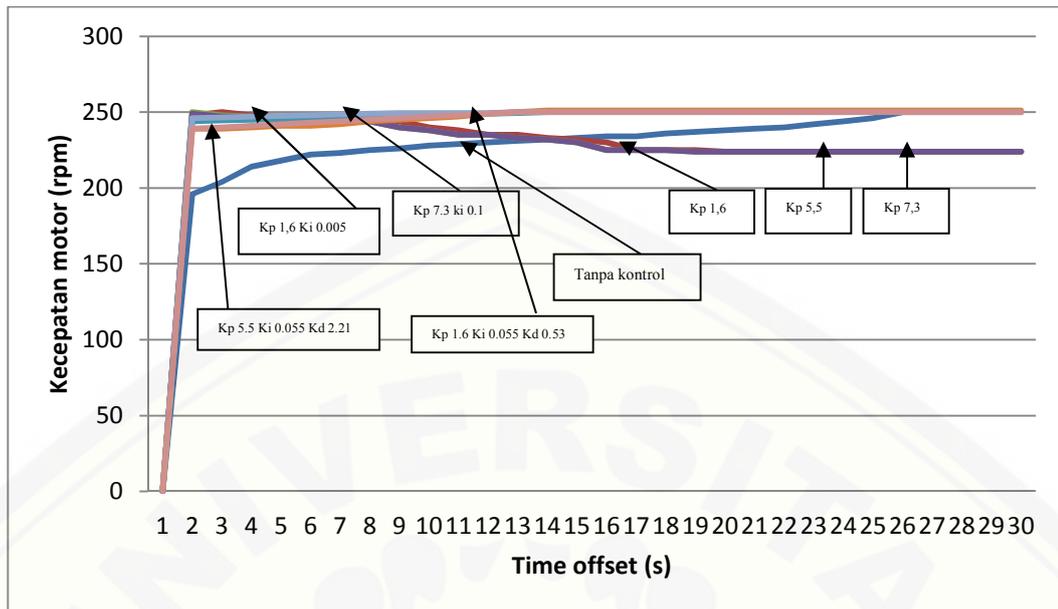
Berdasarkan tabel 4.14 adalah data pengujian dengan beban menggunakan parameter konstanta kontrol PID yang telah diuji tanpa menggunakan beban dan dilihat respon yang paling optimal pada subbab 4.7.4 di halaman 72, setelah dilakukan pengujian dengan menggunakan parameter tersebut diperoleh bahwa kecepatan motor saat mencapai *steady state* sama dengan kecepatan pada tegangan *setpoint* yang sama ketika tanpa beban, hal ini karena beban motor mempengaruhi besar kecilnya tegangan *feedback* kontrol sehingga ketika masuk ke dalam rangkaian pengurang maka kecepatan motor akan berputar lebih cepat seperti ketika tanpa beban. Selain itu dengan adanya kontrol PID memberikan pengaruh bahwa sistem akan lebih cepat mencapai kestabilan daripada tanpa kontrol pada kondisi dengan beban. Pada pengujian ini juga tidak terdapat *overshoot* karena pengaruh PID hanya mempercepat dalam mencapai kecepatan *steady state* setelah diberikan beban daripada kontrol P dan PI. Pada kontrol PID nilai *rise time* lebih lama dari pada kontrol P dan PI karena terdapat parameter *derivative* yang berfungsi menghilangkan *error* namun membutuhkan waktu yang lebih lama.

#### 4.8.4 Perbandingan Pengujian Dengan Beban

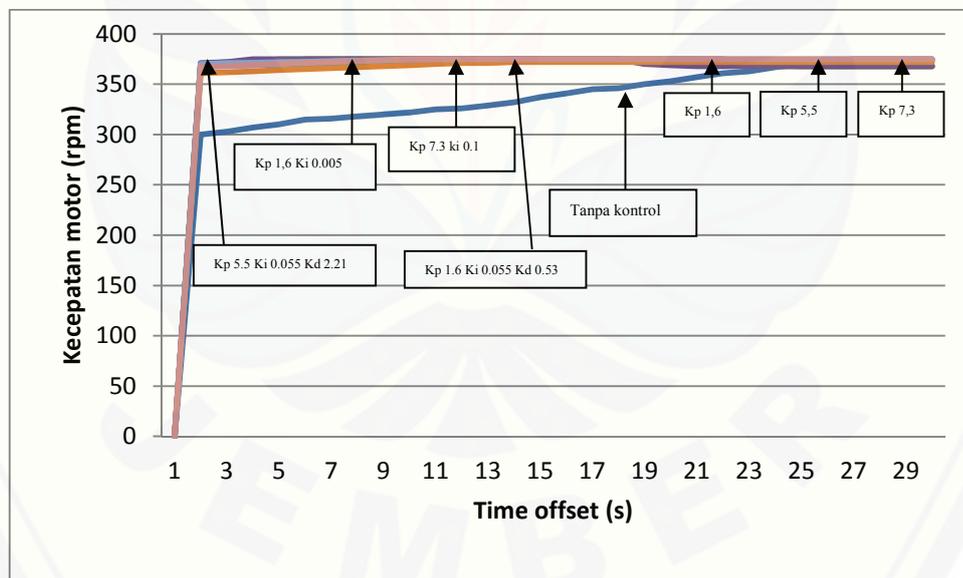
Berikut akan ditunjukkan bagaimana perbandingan respon kontrol P, kontrol PI, kontrol PID dengan beban saat tegangan *setpoint* 1,6 V atau pada kecepatan motor 250 rpm dan 2,4 V pada kecepatan motor 375 rpm.

Tabel 4.15 Pengujian Kontrol Pada saat dengan Beban

Kp	Ki	Kd	Teg. Setpoint (V)	Teg. Feedback (V)	Beban (N.m)	Kecepatan Motor (rpm)	Kecepatan Puncak (rpm)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)
-	-	-	1,6	1,4	45,72	250	-	-	13	-
-	-	-	2,4	2,3	45,72	375	-	-	13,2	-
1,6	0	0	1,6	1,4	45,72	250	-	1,2	-	-
5,5	0	0	1,6	1,4	45,72	250	-	0,8	-	-
7,3	0	0	1,6	1,4	45,72	250	-	0,8	-	-
1,6	0	0	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	-	-
5,5	0	0	2,4	2,3	45,72	375	-	1,2	-	-
7,3	0	0	2,4	2,3	45,72	375	-	1,0	-	-
1,6	0	0	3,5	3,3	45,72	550	-	1,2	-	-
5,5	0	0	3,5	3,3	45,72	550	-	1,0	-	-
7,3	0	0	3,5	3,3	45,72	550	-	1,0	-	-
1,6	0,055	0	1,6	1,4	45,72	250	-	1,4	7	-
7,3	0,1	0	1,6	1,4	45,72	250	-	1,2	7,2	-
1,6	0,055	0	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	7	-
7,3	0,1	0	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	6,4	-
1,6	0,055	0,53	1,6	1,4	45,72	250	-	1,6	6,8	-
5,5	0,055	2,21	1,6	1,4	45,72	250	-	1,4	6,8	-
1,6	0,055	0,53	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	6,6	-
5,5	0,055	2,21	2,4	2,3	45,72	375	-	1,4	6,2	-



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kntrol P, Kontrol PI, Kontrol PID dengan Beban saat *Setpoint* 250 rpm



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Respon Tanpa Kontrol, Kntrol P, Kontrol PI, Kontrol PID dengan Beban saat *Setpoint* 375 rpm

Berdasarkan gambar 4.9 dan 4.10 di halaman 83 dapat dijelaskan bahwa pada kondisi sistem mendapat beban yang dikonversi kedalam besaran torsi sebesar 45,72 N.m dengan tanpa kontrol sistem akan lama mencapai kestabilan daripada kontrol PI dan PID. Sedangkan waktu mencapai kestabilan paling baik adalah dengan menggunakan kontrol PID, namun nilai *rise time* PI lebih cepat daripada PID. Pada pengujian dengan beban kecepatan motor saat mencapai *steady state* sama dengan kecepatan pada tegangan *setpoint* yang sama ketika tanpa beban, hal ini karena beban motor mempengaruhi besar kecilnya tegangan *feedback* kontrol sehingga ketika masuk ke dalam rangkaian pengurang maka kecepatan motor akan berputar lebih cepat seperti ketika tanpa beban. Kontrol P, PI, maupun PID tidak dapat mengatur putaran motor saat dengan beban sama seperti pada saat kondisi tanpa beban meskipun tegangan *setpoint* yang sama, namun pengaruh kontrol pada pengujian mempercepat respon sistem dalam *rise time* atau waktu awal respon sistem dan juga waktu mencapai kestabilan *settling time* daripada tanpa menggunakan kontrol.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian alat yang telah dilakukan dari penelitian yang berjudul Korelasi kontrol *Proportional*, *Integral* dan *Derivative* terhadap performa Mobil Listrik Universitas Jember maka diperoleh kesimpulan bahwa:

1. a. Pengujian kontrol P pada tabel 4.7 di halaman 69 yaitu *overshoot* 260% karena aksi kontrol P adalah mengalikan besaran *error* dengan faktor pengali dari variabel  $K_p$  7,3.  
b. Pengujian kontrol PI pada tabel 4.8 di halaman 71 yaitu *overshoot* menurun dari pada kontrol P yaitu menjadi 13,3% karena kontrol I menghilangkan *steady state error* dan kestabilan dicapai pada waktu 4 detik karena *output* sistem mengejar *setpoint* sedekat mungkin.  
c. Aksi kontrol D mampu mengantisipasi *error*, mempercepat respon sistem dan meningkatkan stabilitas sistem seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9 di halaman 73 dengan *overshoot* menjadi 10,67 % pada angka tertinggi dan kestabilan dicapai pada waktu 2 detik.  
d. Kontrol PID mempunyai karakteristik *reset control* dan *rate control* yaitu meningkatkan respon dan stabilitas sistem serta mengeliminasi *steady state error* seperti pada tabel 4.10 di halaman 74 dalam kondisi tanpa beban yaitu *overshoot* menurun menjadi 10,67% dan *settling time* menjadi 2 detik.
2. Berdasarkan metode *trial* dan *error* yang mempunyai respon paling optimal yaitu yang mempunyai nilai *settling time* paling cepat dalam mencapai kestabilan adalah  $K_p$  1,6,  $K_i$  0,0055,  $K_d$  0,53 yaitu dengan waktu 2 detik.
3. Kontrol PID mempunyai kestabilan sistem yang tinggi dengan *settling time* lebih cepat yaitu selama 2 detik dibandingkan kontrol PI selama 4 detik, namun memiliki nilai *rise time* yang lebih lama yaitu 1,6 detik

sedangkan *rise rime* kontrol PI 1,4 detik seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.10 di halaman 74.



## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk lebih menyempurnakan hasil penelitian ini atau untuk dikembangkan lebih lanjut yakni antara lain :

1. Kelemahan dari kontrol P adalah keluaran mempunyai selisih terhadap *setpoint*, selain itu kelemahan kontrol I adalah *oscilasi* yang mengurangi kestabilan sistem, sedangkan kelemahan kontrol D adalah *error* yang konstan sehingga akan memperlambat waktu dalam mencapai kestabilan sehingga diperlukan korelasi dari ketiga kontrol P, I dan D menjadi kontrol PID yang dapat meningkatkan respon dan stabilitas sistem serta mengeliminasi *steady state error*.
2. Kontrol PID analog mempunyai respon yang lebih lambat daripada kontrol PID digital, sehingga diharapkan pada penelitian selanjutnya digantikan oleh PID digital.
3. *Feedback* kontrol menggunakan generator DC rawan akan ketidakpresisian karena pada kecepatan tinggi tegangan yang dihasilkan tidak stabil dan juga karena generator DC tidak bisa bekerja pada lingkungan yang berdebu, sehingga dengan kontrol digital maka *feedback* akan lebih baik karena *feedback* akan mempengaruhi kinerja kontrol.
4. Kontrol PID yang menggunakan beban mobil sebagai aplikasinya terdapat kendala dalam mencapai *setpoint* karena beban yang besar.
5. Beban yang akan digunakan sebaiknya diatur secara bertahap, hal ini digunakan untuk mengetahui berapa kekuatan maksimal kontrol yang dapat bekerja dengan suatu beban.
6. Pengamatan respon kontrol dengan menggunakan beban sebaiknya dilakukan dengan waktu yang lebih lama, hal ini dimungkinkan dengan beban yang besar maka pencapaian kecepatan *steady state* akan membutuhkan waktu yang lebih lama.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Ardiansyah, Irvan. *Rancang bangun pengendali kecepatan motor DC, 0,75 KW 160 Volt, Dengan Kontroler PID analog*. Universitas Pendidikan Indonesia.
- Dharmawan, Abe. 2009. *Pengendali Motor DC Brushless dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega16*. Yogyakarta: Elex Media Komputindo
- Mauludin, S., Kurniawan, Andi. 2013. *Perancangan Trainer Pid Analog Untuk Mengatur Kecepatan Putaran Motor DC*. Universitas Wahid Hasyim Semarang
- Miftachul, M.A . 2014. *Kontrol Motor Bldc Berbasis Mikrokontroler Dengan Metode Six Step Commutation* . Universitas Jember
- Nugrahatama, Sedy. 2013. *Sistem Kendali Proportional Integral Derivative Kecepatan Motor Brushless DC Dengan Sensorkecepatan Putar*. Universitas Jember.
- Ogata, Katsuhiko. 1997. *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 2*. Jakarta : Erlangga
- Oguntoyinbo, Oludayo. 2009. *PID control pf brushless DC motor and robot trajectory planning and simulation with matlab/simulink*. Degree programme og information technology.
- Publikasi Kontes Mobil Listrik Indonesia. 2014. *Panduan Lomba Kontes Mobil Listrik Indonesia VI*. Bandung.
- Tarigan, Agussanta. 2000. *Pengendali Kecepatan Motor DC dengan memanfaatkan tachogenerator statis*. Universitas Katolik Soegijapranata. Semarang
- Singh Patel, Vinod KR., A.K.Pandey. 2013. *Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM*

*Controlled BLDC Motor*. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3

Sovan, Bayu. 2013. *Rancang Bangun Sistem Pengendali Motor Brushless DC Untuk Aplikasi Pada Mobil Listrik*. Universitas Jember.

Sujanarko, Bambang. 2012. *BLDC Controller Using Digital Logic For Electric Vehicle*. University Of Jember, Seminar Retii, Yogyakarta, 2012.

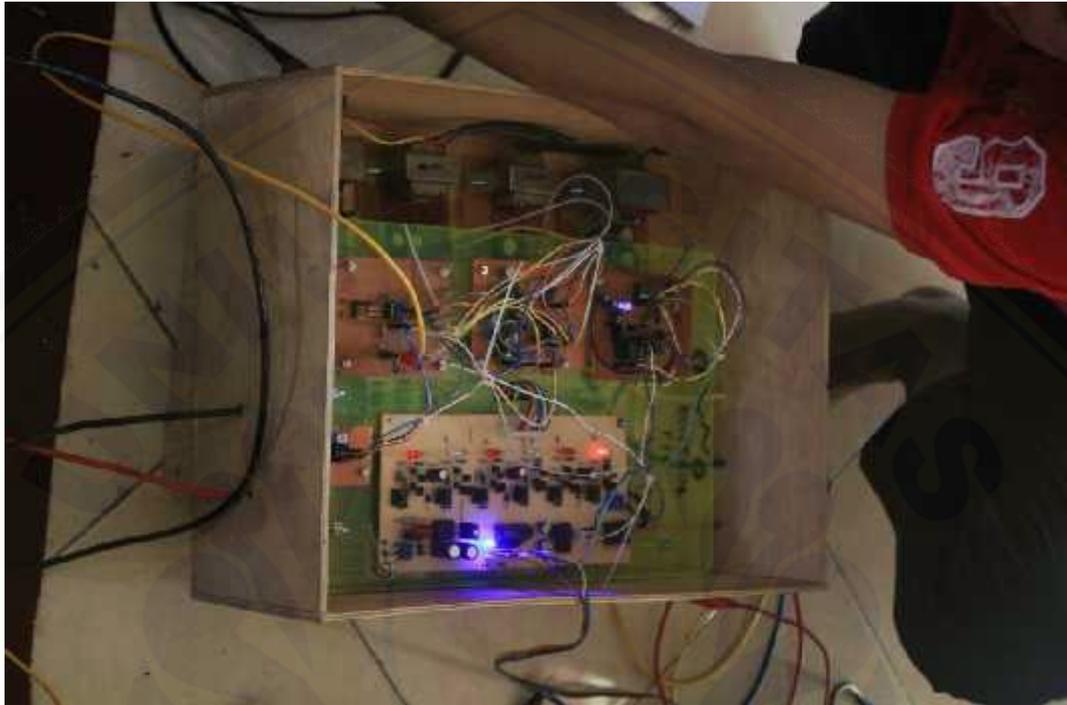
<http://www.vedcmalang.com/pppptkboemlg/index.php/artikel-coba-2/listrik-electro/1035-aer>. (diakses pada tanggal 29 Agustus 2014)

<https://www.scribd.com/doc/57277096/Artikel-Programmable-Logic-Devices-KII-Hhhhhhhhhh> (diakses pada tanggal 20 April 2015)

(<http://nisha-khoerunnisya.blogspot.com/2013/10/aki-kering-dan-baterai-kering.html> . 19/04/2015 , pkl. 21:45 WIB.)

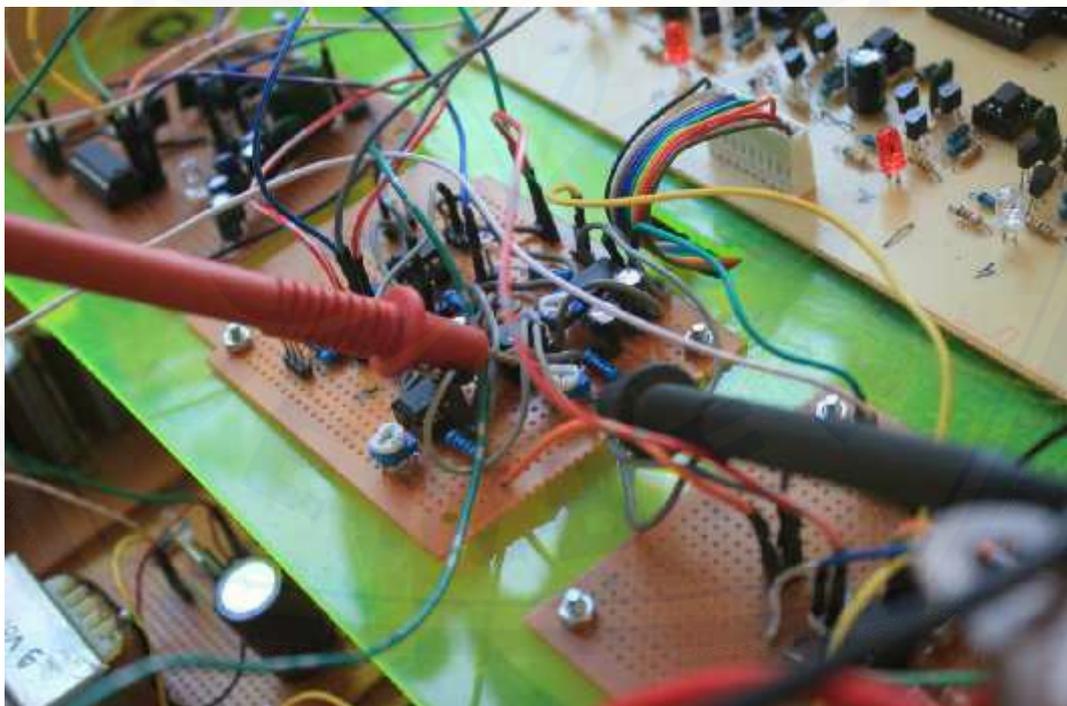
**LAMPIRAN**

**Lampiran A. Dokumentasi Alat**



**Lampiran B. Dokumentasi Pengujian**

**B.1 Pengukuran nilai Resistor potensio untuk konstanta kontrol P, I dan D**





B.2 Pengujian kontrol motor BLDC dengan PWM



B.3 Pengujian kontrol PID pada mobil listrik



B.4 Pengujian Aplikasi Kontrol PID pada Mobil Listrik

