

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PERANCANGAN SISTEM MANAJEMEN DAYA PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* DENGAN  
PENGGERAK *HYBRID***

Muhammad Arie Salam  
NRP 0711154000111

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PERANCANGAN SISTEM MANAJEMEN DAYA PADA  
*UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* DENGAN  
PENGGERAK *HYBRID***

Muhammad Ariebo Salam  
NRP 07111540000111

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**FINAL PROJECT - EE 184801**

**POWER MANAGEMENT SYSTEM DESIGN ON  
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) WITH HYBRID  
DRIVER**

Muhammad Arie Salam  
NRP 0711154000111

*Supervisor*  
Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
Nurlita Gamayanti, ST., MT.

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2019**



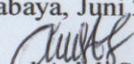
## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**Perancangan Sistem Manajemen Daya pada *Unmanned Surface Vehicle (USV) dengan Penggerak Hybrid***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan in tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni, 2019

  
Muhammad Arieb Salam

Nrp 07111540000111

LEMBAR PENGESAHAN



**PERANCANGAN SISTEM MANAJEMEN DAYA PADA  
UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) DENGAN  
PENGGERAK HYBRID**

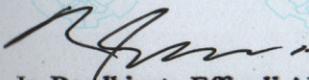
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

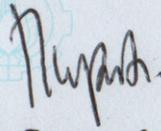
**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**



**Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.**  
**NIP. 19570424 198502 1001**



**Nurlita Gamayanti, ST., MT.**  
**NIP. 19781201 200212 2002**





# PERANCANGAN SISTEM MANAJEMEN DAYA PADA *UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV)* DENGAN PENGGERAK HYBRID

**Nama** : Muhammad Arie Salam  
**Pembimbing** : 1. Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.  
2. Nurlita Gamayanti, ST., MT.

## ABSTRAK

*Hybrid Electric Vehicle* adalah sebuah teknologi kendaraan listrik hibrida yang memanfaatkan dua jenis mesin yaitu mesin bakar dan motor listrik untuk mengurangi penggunaan bahan bakar. Teknologi ini merupakan salah satu rancangan sistem manajemen daya pada sebuah wahana untuk mengatasi permasalahan daya dan meningkatkan efisiensi dalam penggunaannya. Tujuan perancangan sistem manajemen daya pada penelitian ini agar kapal tanpa awak (USV) dapat bekerja dengan waktu yang lama (*long-lasting*) dan juga bekerja sesuai dengan misi yang telah ditentukan padanya tanpa ada masalah dalam suplai daya ke motor. Perancangan ini bertumpu pada model sistem pembangkitan energi, sistem penyimpanan energi, misi sebuah kapal tanpa awak dan sistem penggerak pada USV. Rancangan tersebut akan menggabungkan semua sistem untuk menjadi sebuah sistem manajemen daya pada USV sehingga kapal tanpa awak menjadi sebuah kendaraan listrik hibrida. Pengujian dilakukan pada setiap sub-sistem untuk memastikan respon yang baik. Uji pada generator dilakukan untuk melihat tegangan keluaran generator, pada sistem penyimpanan energi dilihat respon *charge* dan *discharge*-nya dan pada motor dilihat respon kecepatan linier kapal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berjalan sesuai dengan yang telah direncanakan dengan bisa melaksanakan misi yang diberikan kepada wahana dan mengikuti pengaturan sistem yang telah direncanakan.

**Kata Kunci:** *Hybrid Electric Vehicle*, Sistem Manajemen Daya, USV, *Long-lasting*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

***Power Management System Design on Unmanned Surface Vehicle  
(USV) with Hybrid Driver***

***Name*** : ***Muhammad Arieb Salam***

***Supervisor*** : ***1. Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT.***  
***2. Nurlita Gamayanti, ST., MT.***

**ABSTRACT**

*Hybrid Electric Vehicle is a technology that utilizes two type of engines, namely combustion engines and electric motors to reduce the fuel use. This technology is one of the design of the power management system in vehicle to overcome power problems and also increase efficiency in its use. The purpose of the design of the power management system in this study is that unmanned surface vehicle (USV) can work long-lasting and also work in accordance with the mission that has been determined without any problems in the supply of power to the motor of USV. This design rests on models of energy generation systems, energy storage systems, unmanned surface vehicle mission and driving systems at USV. Design will combine all systems to become power management system at USV so that it become hybrid electric vehicles. Tests are carried out on each sub-system to ensure a good response. Test on generators are carried out to see the generator output voltage, the energy storage system views the charge and discharge response and test the motor to see the linier speed response of the USV. The test results show that the system runs according to what has been planned by being able to carry out the mission given to the vehicle and follow the planned system.*

***Keyword: Hybrid Electric Vehicle, Power Management System, USV  
Long-lasting***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Segala Puji Syukur ke Hadirat Allah Subhaanahu Wa Ta'ala yang senantiasa memberikan ridha dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat serta Salam kepada junjungan kita Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wasallam serta para sahabat tabi' tabi'in, dengan ilmu pengetahuan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Perancangan Sistem Manajemen Daya pada *Unmanned Surface Vehicle* (USV) dengan Penggerak *Hybrid*”**.

Banyak pihak telah berperan dalam membantu selama proses studi maupun penelitian ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Keluarga serta orang tua penulis yang telah memberi dukungan waktu, pembelajaran dan doa kepada penulis.
2. Bapak Ir. Rusdhianto Effendi AK, MT. dan Ibu Nurlita Gamayanti, ST., MT. yang dengan baik dan sabar dalam mengarahkan dan membimbing selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. Teman-teman Sistem Pengaturan 2015 Reguler maupun Lintas Jalur.
4. Kepada seluruh anggota Lab AJ 104, B106, B105, serta AJ204 yang telah mendukung serta kerja samanya dalam proses studi maupun penelitian.
5. Kepada semua pihak, rekan, teman, para guru yang telah membantu penulis selama proses studi.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Elektro ITS pada khususnya. Saran dan kritik membangun selalu penulis harapkan untuk kelengkapan pengetahuan penulis terkait Tugas Akhir ini.

Surabaya, Mei 2019

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....</b>	<b>v</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	5
1.7 Relevansi .....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Unmanned Surface Vehicle [1] [2].....	7
2.2 Hybrid Electric Vehicle [3] [4].....	8
2.2.1 HEV Konfigurasi Paralel [4] .....	9
2.2.2 HEV Konfigurasi Seri [4] .....	10
2.2.3 HEV Konfigurasi Seri-Paralel [4] .....	10

2.3 Generator [5].....	12
2.4 Motor Listrik DC [4] [6].....	15
2.5 Sistem Penyimpanan Energi [7] [8] .....	22
2.6 Kontroler PID ( <i>Proportional – Integral – Derivative</i> ) [9] [10]...24	
2.6.1 <i>Gain Scheduling</i> PID [11].....	26
<b>BAB 3 PERANCANGAN SISTEM .....</b>	<b>29</b>
3.1 Gambaran Umum Sistem.....	29
3.2 Perancangan Simulasi Generator DC .....	30
3.2.1 Rancangan Pengendalian Kecepatan Putar Generator .....	32
3.2.2 Rancangan Pengendalian Tegangan Generator .....	33
3.2.3 Rancangan Simulasi Beban Generator .....	34
3.2.4 Rancangan Kontroler PID & <i>Gain Scheduling</i> PID.....	35
3.2.5 Rancangan Simulasi Generator DC .....	37
3.3 Perancangan Simulasi Motor Listrik DC.....	40
3.3.1 Model Matematika dari <i>Electrical Part</i> .....	41
3.3.2 Model Matematika dari <i>Mechanical Part</i> .....	42
3.3.3 Model Matematika dari Beban Kapal .....	43
3.4 Perancangan Mode dan Misi Sistem .....	43
3.5 Perancangan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi .....	45
3.6 Perancangan Keseluruhan Sistem .....	47
<b>BAB 4 HASIL DAN ANALISA .....</b>	<b>51</b>
4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem .....	51
4.2 Pengujian Model Generator DC.....	52
4.3 Pengujian Model Motor Listrik DC .....	59

4.4 Pengujian Sistem Penyimpanan Energi .....	64
4.5 Pengujian Sistem Mode dan Misi .....	68
4.6 Pengujian Sistem Manajemen Daya .....	73
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>79</b>
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	80
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>81</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>83</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>89</b>

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Unmanned Surface Vehicle [1] .....	7
<b>Gambar 2.2</b> HEV Konfigurasi Paralel [4] .....	9
<b>Gambar 2.3</b> HEV Konfigurasi Seri [4] .....	10
<b>Gambar 2.4</b> HEV Konfigurasi Seri-Paralel [4] .....	11
<b>Gambar 2.5</b> Planetary Gear [4] .....	11
<b>Gambar 2.6</b> Skema Bagian Generator DC .....	13
<b>Gambar 2.7</b> Grafik Tegangan Terbangkit Generator DC .....	14
<b>Gambar 2.8</b> Kaidah Tangan Kiri [4] .....	16
<b>Gambar 2.9</b> Gaya Lorentz Pada Motor DC [4] .....	17
<b>Gambar 2.10</b> Motor DC Sederhana [4] .....	19
<b>Gambar 2.11</b> Karakteristik Motor DC dan Konfigurasinya [4] ..	20
<b>Gambar 2.12</b> Cut-Off Voltage pada Baterai [8] .....	23
<b>Gambar 2.13</b> Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol P [9] ...	25
<b>Gambar 2.14</b> Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol PI [9] ..	25
<b>Gambar 2.15</b> Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol PID [9]	26
<b>Gambar 3.1</b> Gambaran Umum Sistem .....	30
<b>Gambar 3.2</b> Diagram Blok Generator DC.....	31
<b>Gambar 3.3</b> Diagram Blok Pengendalian Kecepatan Putar Generator.....	32
<b>Gambar 3.4</b> Diagram Blok Pengendalian Arus Medan .....	33
<b>Gambar 3.5</b> Model Simulasi Beban Generator DC .....	34
<b>Gambar 3.6</b> (a) Blok Penentuan Nilai Gain Scheduling (b) Blok Kontroler PI.....	37
<b>Gambar 3.7</b> Model Simulasi Generator.....	39
<b>Gambar 3.8</b> Diagram Simulasi Motor Listrik DC .....	40
<b>Gambar 3.9</b> Diagram Electrical Part Motor Listrik DC .....	42
<b>Gambar 3.10</b> Diagram Mechanical Part Motor Listrik DC .....	42
<b>Gambar 3.11</b> Rancangan Simulasi Mode dan Misi Sistem .....	44

<b>Gambar 3.12</b> Rancangan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi .....	45
<b>Gambar 3.13</b> Kontrol Charge dan Discharge Baterai .....	46
<b>Gambar 3.14</b> Rancangan Simulasi Keseluruhan Sistem.....	48
<b>Gambar 4.1</b> Kecepatan Putar Mesin Bakar tanpa Beban Luar ..	53
<b>Gambar 4.2</b> Arus Medan Generator tanpa Beban Luar .....	53
<b>Gambar 4.3</b> Tegangan Generator tanpa Beban Luar .....	54
<b>Gambar 4.4</b> Kecepatan Putar Mesin Bakar dengan Beban Motor .....	55
<b>Gambar 4.5</b> Arus Medan Generator dengan Beban Motor .....	55
<b>Gambar 4.6</b> Tegangan Generator dengan Beban Motor .....	56
<b>Gambar 4.7</b> Kecepatan Putar Mesin Bakar Beban Penuh .....	57
<b>Gambar 4.8</b> Arus Medan Generator Beban Penuh .....	57
<b>Gambar 4.9</b> Tegangan Generator Beban Penuh .....	58
<b>Gambar 4.10</b> Arus Motor Sumber Generator .....	60
<b>Gambar 4.11</b> Kecepatan Putar Motor Sumber Generator .....	60
<b>Gambar 4.12</b> Kecepatan Linier Kapal Sumber Generator .....	61
<b>Gambar 4.13</b> Arus Motor Sumber Baterai .....	62
<b>Gambar 4.14</b> Kecepatan Putar Motor Sumber Baterai .....	62
<b>Gambar 4.15</b> Kecepatan Linier Kapal Sumber Baterai .....	63
<b>Gambar 4.16</b> Arus Charging Baterai.....	64
<b>Gambar 4.17</b> Tegangan Baterai saat Charge .....	65
<b>Gambar 4.18</b> State of Charge Baterai saat Charge .....	65
<b>Gambar 4.19</b> Arus Discharge Baterai .....	66
<b>Gambar 4.20</b> Tegangan Baterai saat Discharge.....	67
<b>Gambar 4.21</b> State of Charge Baterai saat Discharge.....	67
<b>Gambar 4.22</b> Respon Waktu tempuh Kombinasi mode switch 1, 2 dan 3.....	70
<b>Gambar 4.23</b> Respon Waktu tempuh Kombinasi switch mode 1, 1 dan 1.....	71

<b>Gambar 4.24</b> Respon Waktu tempuh Kombinasi switch mode 2,3 dan 2.....	72
<b>Gambar 4.25</b> Respon Total Penggunaan Daya Kombinasi Switch 1,2,3 .....	74
<b>Gambar 4.26</b> Respon Kecepatan Linier Kapal Kombinasi Switch 1,2,3 .....	75
<b>Gambar 4.27</b> Respon Jarak Tempuh terhadap Waktu switch 1,2,3 .....	75
<b>Gambar 1</b> Rancangan Simulasi Keseluruhan Sistem .....	83
<b>Gambar 2</b> Source Code Penentuan Kombinasi Mode Switch Wahana .....	87

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Perbandingan Kapasitas Konfigurasi HEV [4].....	12
<b>Tabel 3.1</b> Nilai Parameter Kontroler PI .....	35
<b>Tabel 3.2</b> Nilai Parameter Gain Scheduling PID .....	36
<b>Tabel 3.3</b> Estimasi Parameter Generator DC .....	38
<b>Tabel 3.4</b> Estimasi Parameter Motor Listrik DC.....	41
<b>Tabel 3.5</b> Mode dan Misi Sistem pada Kapal tanpa Awak .....	44
<b>Tabel 3.6</b> Nilai Parameter Baterai.....	47
<b>Tabel 4.1</b> Kombinasi Switch mode pada kapal tanpa awak .....	69
<b>Tabel 4.2</b> Kombinasi Switch untuk Penentuan Misi dan Daya Minimum.....	73
<b>Tabel 4.3</b> Uji Manual Kombinasi Mode Switch pada Sistem ....	76

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini USV merupakan kapal tanpa awak yang sangat berkembang pesat di dunia industri, militer dan penelitian ilmiah. Kapal tanpa awak didesain sebagai sebuah platform cerdas, yang mana dapat beroperasi pada lingkungan kelautan dengan kemampuan yang bervariasi salah satunya dapat beroperasi secara otomatis penuh tanpa pantauan operator dan dapat melakukan berbagai tugas yang telah diberikan sebelumnya. Dalam studi perancangan ini, diperlukan sistem manajemen daya pada *unmanned surface vehicle* sehingga dapat melakukan berbagai macam tugas tersebut tanpa terkendala masalah daya ke penggerak di USV ini. Untuk mencapai berbagai macam misi pengguna, USV harus memiliki manajemen daya yang benar guna mengatur jumlah sumber energi yang diberikan ke motor agar efisien dan mencukupi sesuai jumlah energi yang dibutuhkan.

Untuk mengurangi jumlah penggunaan BBM yang boros, diperlukan sebuah manajemen daya agar dalam pengoperasian USV ini dapat menggunakan sumber baterai sebagai sumber primernya dan sumber *generator set* sebagai sumber tambahannya. Kapal tanpa awak ini dalam monitoring sebuah perairan pasti mengalami banyak kendala dari segi pengaturan kecepatan dan lainnya sehingga hal itu dapat menyebabkan penggunaan energi yang lebih besar dan akan memakan jumlah BBM lebih banyak atau berakibat motor penggerak tidak dapat bekerja secara maksimal karena kekurangan pasokan energi. Melihat dari permasalahan itu, maka memunculkan berbagai ide dan solusi salah satunya adalah manajemen daya pada kapal tanpa awak untuk mengatasi masalah pasokan energi ke motor penggerak dan mengurangi jumlah penggunaan BBM agar lebih efisien.

Penelitian sebelumnya mengenai perancangan manajemen daya hanya dilakukan pada mobil hibrida saja, belum pada kapal tanpa awak [13]. Untuk yang membahas perancangan sistem hibrida pada kapal tanpa awak ini hanya bertumpu pada model baterai dan generator saja serta model beban, bukan untuk menentukan perancangan penggunaan daya minimum pada wahana [12]. Sedangkan pada penelitian ini, akan diterapkan sistem manajemen daya pada kapal tanpa awak atau USV dengan penggerak *hybrid* sehingga USV dapat melakukan tugas di laut

tanpa mengalami kendala dalam pengaturan energi ke motor penggeraknya yaitu kekurangan daya pada penggerak atau penggunaan energi yang berlebihan.

Berdasarkan dari beberapa *paper* yang digunakan sebagai acuan dalam tugas akhir ini, didapat beberapa penelitian yang dilakukan mengenai USV maupun baterai dan *Generator set*, diantaranya adalah sistem *hybrid* pada mobil dengan generator dan *energy storage system*, serta hubungan sistem tersebut.

## 1.2 Permasalahan

USV atau *Unmanned Surface Vehicle* merupakan sebuah kapal tanpa awak yang banyak sekali digunakan di dunia industri maupun militer. USV sendiri memiliki sistem yang kompleks dengan keterkaitan hubungan energi, kecepatan dan misi yang dikerjakan sehingga diperlukan sebuah desain model sistem yang dapat mengatasi hal tersebut. Desain model sistem ini digunakan untuk mengatur penggunaan daya pada wahana sesuai misi yang diberikan agar mengurangi jumlah energi dan BBM yang digunakan dengan kombinasi penggunaan generator dan baterai. Kombinasi *switch* antara penggunaan sumber dari generator atau baterai ataupun keduanya merupakan hal yang perlu direncanakan sehingga penggunaan energi dan BBM minimum.

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam kondisi sebenarnya, masalah yang ada dalam manajemen daya pada USV ini sangat banyak. Untuk itu diperlukan beberapa batasan untuk mencari solusi yang tepat pada masalah yang akan dibahas. Batasan yang ditetapkan antara lain:

1. Pembahasan akan difokuskan pada model sistem *hybrid* yang telah disederhanakan.
2. Model generator merupakan model generator DC sederhana tanpa memperhitungkan efek *hysteresis*.
3. Model sistem penyimpanan energi (baterai) menggunakan blok *power systems* yang telah tersedia pada Mathwork di Simulink Matlab.
4. Pengaturan mode dan misi difokuskan pada jarak dan waktu yang diberikan pada sebuah wahana.

5. Metode penentuan mode dan misi menggunakan metode kombinatori.
6. Konfigurasi sistem *hybrid* hanya menggunakan konfigurasi seri.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah untuk mendapatkan hubungan antara motor atau penggerak pada kapal tanpa awak (USV) dengan sumber daya baterai dan generator serta kombinasi penggunaan sumber dalam sistem pengaturan manajemen daya agar kapal tanpa awak ini dapat bertugas tanpa mengalami kendala suplai daya dan penggunaan daya lebih efisien ke motor serta mengatur misi wahana sesuai yang ditentukan ditandai dengan penggunaan daya minimum.

Manfaat dari tugas akhir ini adalah mahasiswa dapat berkontribusi dalam pembuatan rancangan sistem manajemen daya pada kapal tanpa awak yang siap digunakan untuk penelitian ilmiah selanjutnya mengenai sistem *switching* sumber pada motor listrik DC dan pengaturan penggunaan daya pada USV dengan menggunakan baterai sebagai sistem penyimpanan energi dan generator.

## **1.5 Metodologi**

Metodologi yang akan diterapkan untuk penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **1.5.1. Studi Literatur**

Studi literatur akan berisi pengumpulan serta pengkajian teori, data dan penelitian yang dianggap relevan dan terpercaya untuk mendukung keabsahan tugas akhir ini. Literatur yang digunakan akan memiliki batasan-batasan tertentu. Yaitu, literatur yang digunakan harus bersumber dari paper, jurnal, buku, maupun artikel yang berasal dari badan pemerintahan atau institusi akademik terpercaya.

### **1.5.2. Pemodelan Komponen Sistem**

Merupakan tahap dimana dirancang model komponen-komponen kapal tanpa awak berdasarkan literatur yang sudah diperoleh. Adapun komponen yang akan dimodelkan adalah mesin pendorong atau thruster, *generator* dan baterai yang merupakan sumber daya utama untuk motor pada USV.

### **1.5.3. Pemodelan Sistem Keseluruhan**

Pada tahap ini dimana dirancang model keseluruhan meliputi komponen utama dalam penggunaan daya pada kapal tanpa awak berdasarkan literatur yang telah didapatkan sebelumnya. Komponen tersebut dihubungkan sedemikian rupa menjadi sebuah sistem manajemen daya pada kapal tanpa awak untuk membuat sebuah simulasi sistem mode *switching* pada USV dengan meminimalkan penggunaan energi pada saat menjalankan misi yang diberikan.

#### 1.5.4. Tahap Simulasi

Merupakan tahap pengujian per unit maupun keseluruhan sistem, apabila masih terdapat kesalahan pada sistem sehingga sistem tidak dapat berjalan dengan baik dan perlu revisi pada desain yang digunakan. Beberapa tahap pengujian berupa simulasi kinerja sistem manajemen daya terhadap *thruster* dalam penggunaan sumber mana yang lebih efisien, pemberian tugas yang menggunakan bermacam-macam daya yang dibutuhkan, dan dilanjutkan dengan pengujian sistem secara keseluruhan untuk menghasilkan data final, yang merupakan tujuan dari sistem ini.

#### 1.5.5. Analisa Data dan Evaluasi

Pada tahap ini, akan dilakukan Analisa terhadap data yang didapatkan. Sehingga didapatkan karakteristik dari strategi manajemen daya yang telah dirancang. Analisa dilakukan khususnya pada simulasi model sistem manajemen daya pada penggerak kapal tanpa awak, apakah sudah memenuhi kriteria karakteristik model yang sudah ditetapkan. Lalu dilakukan Analisa terhadap data yang dihasilkan oleh keseluruhan sistem, apakah sudah dianggap memuaskan atau tidak. Lalu dilakukan evaluasi serta revisi desain apabila diperlukan

#### 1.5.6. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan berdasarkan pengujian, analisis data dan referensi terkait. Pada hal ini menunjukkan hasil penelitian yang telah dilakukan berdasarkan rumusan masalah.

#### 1.5.7. Penyusunan Buku Tugas Akhir

Penyusunan laporan akan dilakukan seiring dengan tahap-tahap lainnya. Isinya berkaitan dengan tugas akhir yang dikerjakan, meliputi pendahuluan, studi literatur, perancangan dan pembuatan sistem, pengujian dan Analisa serta penutup. Penyusunan buku tugas akhir dilakukan sebagai bentuk laporan tertulis.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang diterapkan pada buku tugas akhir ini terbagi menjadi lima bab, yaitu:

- BAB I            PENDAHULUAN**  
Pada bab pendahuluan membahas tentang latar belakang, permasalahan yang ada, batasan masalah, tujuan pelaksanaan tugas akhir, metodologi pelaksanaan, sistematika penulisan laporan tugas akhir dan relevansi.
- BAB II            DASAR TEORI**  
Menjelaskan tentang tinjauan pustaka, konsep dasar dari manajemen daya pada sistem *hybrid*, hubungan sistem *hybrid* sebuah generator dan baterai, model *generator set*, model baterai (*lithium-ion*) yang merupakan acuan atau landasan untuk dapat melaksanakan penelitian ini.
- BAB III           PERANCANGAN SISTEM**  
Bab ini membahas tentang rancangan model dari sistem dari generator, baterai, motor listrik DC, dan keseluruhan sistem manajemen daya untuk dapat melakukan misi yang telah ditentukan.
- BAB IV           PENGUJIAN DAN ANALISIS**  
Bab ini berisi hasil simulasi dengan menggunakan model yang telah dibuat dan diterapkan pada sistem dan analisa terhadap hasil yang didapatkan secara simulasi tersebut.
- BAB V            PENUTUP**  
Kesimpulan dari seluruh pengerjaan tugas akhir dan saran untuk perbaikan dan pengembangan selanjutnya disajikan pada bab penutup.

## 1.7 Relevansi

Hal-hal yang dihasilkan dari tugas akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi atau acuan untuk pengembangan USV sistem *hybrid* dan dijadikan pembanding untuk beberapa desain model sistem yang diterapkan nantinya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menjelaskan mengenai dasar teori yang digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini, yaitu mengenai *Hybrid Electric Vehicle*, Motor listrik, Baterai dan *PID Gain Scheduling*.

#### **2.1 Unmanned Surface Vehicle [1] [2]**

*Unmanned Surface Vehicle* (USV) atau Kapal Tanpa Awak adalah kapal yang memiliki kemampuan untuk melaju tanpa ada nahkoda pada kapal tersebut. Kapal dapat berjalan secara manual dengan kendali jarak jauh. Kapal dapat melaju semi otomatis dalam pantauan operator atau dapat melaju secara otomatis penuh tanpa pantauan operator.

USV juga dikenal dengan nama ASV atau *autonomous surface vehicle*. Pada keadaan nyata, hanya semi otomatis yang normalnya digunakan dibandingkan dengan menggunakan otomatis penuh pada USV. Hal ini dikarenakan banyaknya tantangan yang akan dihadapi, seperti keterbatasan otonomi yang disebabkan oleh tantangan dalam fungsi petunjuk otomatis dan andal, navigasi dan kontrol untuk semua kondisi yang berbeda dalam menghadapi lingkungan yang canggih dan berbahaya dan juga kegagalan sensor, aktuator dan komunikasi.



**Gambar 2.1** *Unmanned Surface Vehicle* [1]

Istilah *Unmanned Surface Vehicle* (USV) atau *Autonomous Surface Vehicle* (ASV) dimaksudkan untuk wahana yang dioperasikan pada permukaan air tanpa awak. USV dikendalikan oleh sebuah pilot dengan kendali jarak jauh dengan memberikan perintah-perintah seperti *waypoint*, melalui *Ground Control Station* (GCS). USV dapat mengolah data-data dan pergerakan serta pengamatan lalu mengirimkan data tersebut ke GCS secara *real-time* melalui sistem tanpa kabel (*wireless*). USV sebenarnya sudah pernah di uji coba sejak perang dunia ke-II, tetapi belum dikenal karena kapal-kapal pengintai tanpa awak generasi awal masih diklasifikasikan sebagai *autonomous underwater vehicle* (AUV). USV sangat berguna dalam bidang pengamatan wilayah, pengintaian dan patroli karena memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan menggunakan radar dan lebih murah dibandingkan kapal komersial dan juga lebih fleksibel.

Beberapa jenis USV saat ini akan menjadi peralatan yang efisien untuk melakukan patroli, seperti patroli patok-patok perbatasan di laut, perairan dangkal dan di sekitar garis pantai. Sistem wahana ini dapat mengisi kekosongan data yang tidak dapat diperoleh oleh kapal patroli biasa.

## **2.2 Hybrid Electric Vehicle [3] [4]**

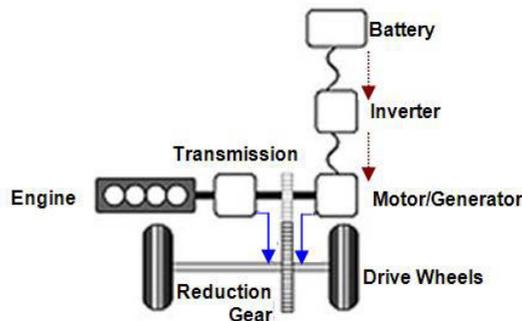
Kendaraan listrik *hybrid* sangat berkembang pesat pada era 1990-an. Diawali oleh Toyota dengan produknya yaitu Toyota Prius. Saat ini telah banyak perusahaan mobil yang memproduksi kendaraan listrik hibrida. Jenis kendaraan ini sangat disukai banyak kalangan dan sangat populer karena mampu untuk menghemat penggunaan bahan bakar alam dan menambah efisiensi dari penggunaan energi. Selain itu, saat ini pencegahan *global warming* marak dilakukan dengan mengurangi penggunaan gas buang CO<sup>2</sup>.

Pada dasarnya, kendaraan listrik hibrida bekerja dengan memanfaatkan dua jenis mesin yaitu mesin bakar dan motor listrik untuk mencapai penggunaan bahan bakar yang lebih minim dan ekonomis. Penggunaan motor listrik pada kendaraan ini diharapkan dapat menjaga temperatur dari mesin bakar agar tidak terlalu panas. Hal ini didapat dengan menjaga kecepatan dari mesin bakar relatif konstan. Selain itu, sistem pengereman regenerative yang ada pada kendaraan listrik hibrida dapat memberikan suplai energi listrik ke baterai sehingga energi yang tidak terpakai tidak terbuang sia-sia saat pengereman terjadi. Penggunaan

motor listrik terjadi ketika kendaraan ini mengalami percepatan dan menanjak. Saat kendaraan mulai berjalan, mesin bakar dinyalakan. Pada kecepatan tertentu, motor listrik dimatikan dan mesin bakar digunakan. Baterai akan mulai diisi ketika kendaraan berada di jalur menurun jika baterai belum terisi penuh sebelumnya. Ketika memerlukan percepatan atau pada tanjakan, motor listrik dan mesin bakar akan digunakan bersamaan.

### 2.2.1 HEV Konfigurasi Paralel [4]

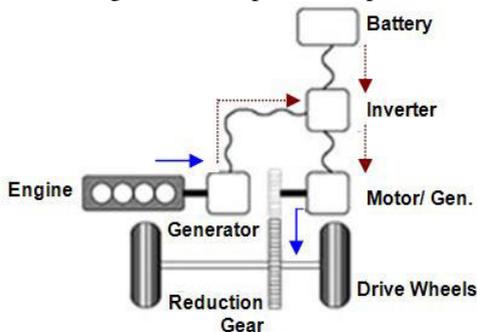
Konfigurasi paralel mempunyai dua jalur aliran daya yaitu jalur aliran daya mekanik dan elektrik. Dua jalur aliran daya tersebut bisa menjalankan kendaraan secara individu maupun bersamaan. Motor listrik disini bisa difungsikan sebagai motor maupun generator. Kerja motor listrik perlu diatur untuk mengurangi tingkat keborosan dari pemakaian energi. Konfigurasi ini memiliki kelemahan yaitu kapasitas *charge* pada baterai tidak besar dan kesulitannya menentukan kondisi kerja mesin bakar yang optimal karena langsung terhubung ke sistem transmisi. Namun di sisi lain, kecepatan yang dirasakan dapat setara dengan kendaraan konvensional. Konfigurasi paralel lebih cocok diterapkan pada kendaraan yang jarak tempuh yang jauh karena fluktuasi kecepatan relatif rendah atau yang membutuhkan daya yang besar karena efisiensi meningkat seiring dengan peningkatan daya. HEV konfigurasi paralel dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** HEV Konfigurasi Paralel [4]

### 2.2.2 HEV Konfigurasi Seri [4]

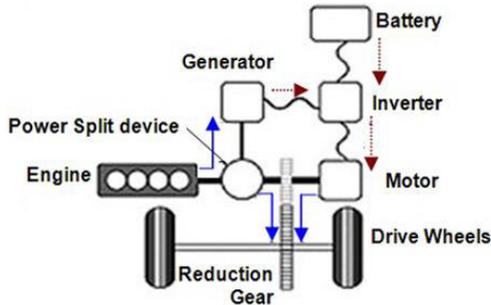
Konfigurasi seri hanya menggunakan motor listrik sebagai penggerak dalam sistemnya dimana langsung terhubung ke sistem transmisi sedangkan mesin bakar sebagai penggerak yang menyuplai energi ke motor. Energi penggerak dari mesin bakar akan selalu diubah ke dalam listrik oleh generator listrik sehingga efisiensinya bergantung pada generator dan motor listrik yang digunakan. Pada saat dibutuhkan, daya listrik hasil generator akan menyuplai motor listrik. Pada saat tidak dibutuhkan, maka akan mengisi baterai. Mesin bakar akan beroperasi dalam kondisi optimal karena pada konfigurasi ini mesin bakar tidak bergantung dari kecepatan kendaraan dan beban. Konfigurasi ini memiliki kekurangan pada respon yang kurang cepat jika akselerasi tiba-tiba dilakukan. Konfigurasi seri ini sangat cocok jika digunakan oleh kendaraan dengan frekuensi jalan dan berhenti yang tinggi seperti pada bis di perkotaan. Konfigurasi seri dapat dilihat pada Gambar 2.3.



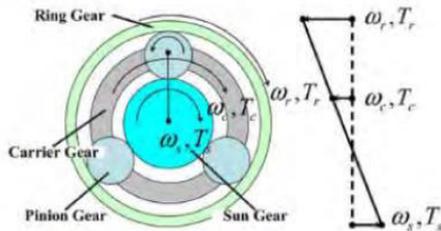
Gambar 2.3 HEV Konfigurasi Seri [4]

### 2.2.3 HEV Konfigurasi Seri-Paralel [4]

Konfigurasi seri-paralel pada HEV menggunakan *power split device* sehingga dapat disebut dengan konfigurasi *power split*. Konfigurasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.4. Kekurangan dari konfigurasi ini dapat teratasi karena adanya *power split device* ini. Sistem yang dikembangkan oleh Toyota pertama kalinya pada Toyota Prius di generasi pertamanya. Prinsip dasar dari *power split device* adalah menggunakan *planetary gear* seperti pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.4** HEV Konfigurasi Seri-Paralel [4]



**Gambar 2.5** Planetary Gear [4]

*Planetary gear* disusun oleh tiga komponen yaitu *sun gear* yang berada di pusat, *ring gear* pada posisi terluarnya, *pinion gear* yang merupakan penghubung *sun gear* dan *ring gear*, dan *carrier gear* sebagai penghubung semua *pinion gear*.

Jika diamati Gambar (2.5), *sun gear* terhubung ke generator sedangkan *planetary carrier* terhubung dengan motor bakar, dan *ring gear* terhubung ke motor listrik atau *shaft* utama. Desain ini memungkinkan pengisian baterai secara kontinyu dari ICE walaupun kendaraan sedang bergerak. Jika ada akselerasi tiba-tiba, respon kendaraan tetap cepat dan kebutuhan daya motor listrik tetap terjaga.

Berikut adalah perbandingan kapasitas konfigurasi paralel, seri dan *power split device* (seri-paralel) dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Perbandingan Kapasitas Konfigurasi HEV [4]

Tipe	Efisiensi bahan bakar			Performansi	
	<i>Idling Stop</i>	<i>Recovery Energy</i>	Efisiensi	Akselerasi	Kestabilan kecepatan
Seri	●	◎	●	○	○
Paralel	●	●	●	●	○
Seri-Paralel	◎	◎	◎	●	●

◎ Sangat baik    ○ Baik    ● Tidak Baik

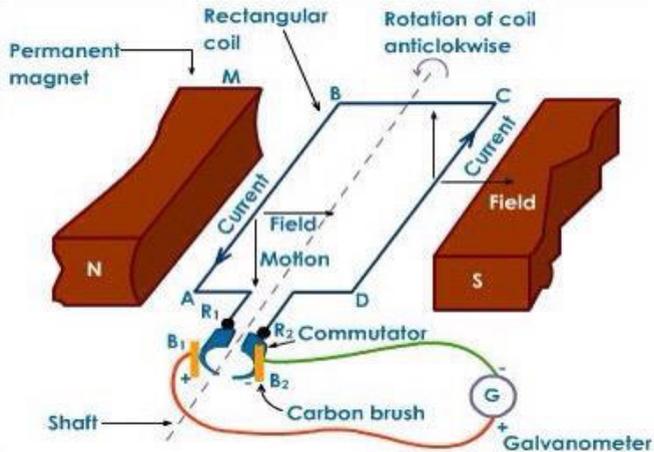
### 2.3 Generator [5]

Generator adalah sebuah alat yang mengubah gaya gerak (energi mekanik) menjadi tenaga listrik yang digunakan untuk beban luar. Sumber energi mekanik dari generator yaitu turbin uap, turbin gas, turbin air, dan ICE (*Internal Combustion Engine*). Generator menyediakan hampir semua daya untuk jaringan tenaga listrik. Jenis-jenis generator ada dua macam, yaitu generator DC atau generator AC. Generator DC akan menghasilkan arus searah sedangkan generator AC menghasilkan arus bolak-balik.

Seperti motor listrik, generator listrik juga menggunakan fenomena hukum Faraday mengenai induksi elektromagnetik. Hukum Faraday menyebutkan jika terjadi perubahan garis gaya magnet pada sebuah kumparan kawat, maka gaya gerak listrik (ggl) akan terbangkit di kawat tersebut. Jika kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan ada arus listrik yang lewat pada rangkaian.

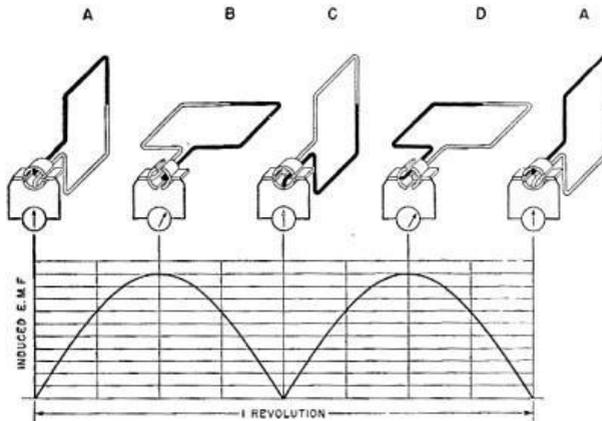
Generator DC memiliki komponen yang sama dengan motor listrik DC. Pada Gambar 2.6, *rotor* generator diskemakan dengan sebuah kawat jangkar penghantar listrik (*armature*) yang bentuknya menyerupai persegi panjang. Di kedua ujung kawat jangkar terpasang komutator berbentuk lingkaran yang terbelah menjadi dua, atau biasa disebut dengan cincin belah. Cincin ini termasuk bagian dari *rotor* sehingga ikut berputar bersama *rotor*. *Stator* generator tersusun dari dua magnet dengan kutub

yang berbeda dan saling berhadapan. Stator dilengkapi dengan sikat karbon yang fungsinya untuk menghubungkan arus listrik yang dibangkitkan kawat jangkar ke rangkaian luar generator.



**Gambar 2.6** Skema Bagian Generator DC  
(Sumber: <https://www.tutorvista.com>)

Pada Gambar 2.7, ditunjukkan besar tegangan gaya gerak listrik yang dibangkitkan oleh sebuah generator dengan satu lilitan kawat jangkar pada beberapa posisi lilitan. Grafik tersebut berbentuk setengah gelombang yang selalu berulang secara periodic. Nilai arus yang terbangkit akan selalu positif karena merupakan generator arus searah atau generator DC.



**Gambar 2.7** Grafik Tegangan Terbangkit Generator DC  
(Sumber: <http://www.rfcafe.com>)

Pada keadaan *real*, generator memiliki lebih dari satu kawat bahkan sangat banyak di dalamnya. Penggunaan banyak lilitan ini adalah untuk menghasilkan tegangan yang stabil di setiap waktu pembangkitan. Celah yang berada di tengah gelombang akan semakin tertutup seiring bertambah banyaknya kawat. (Sumber: <http://artikel-teknologi.com/prinsip-kerja-generator-dc/>)

Persamaan differensial yang berhubungan dengan DC generator akan diberikan dibawah ini:

$$E_g = k_g \omega_r \varphi \quad (2.3.1)$$

$$V_t = E_g - L_a \frac{di_a}{dt} - R_a I_a \quad (2.3.2)$$

$$T_L = k_L \varphi I_a \quad (2.3.3)$$

$$T_{shaft} = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r \quad (2.3.4)$$

$$V_t = I_a R_L \quad (2.3.5)$$

$$\varphi = BA \quad (2.3.6)$$

$$B = \frac{\mu_B N A I_f}{2\pi l} \quad (2.3.7)$$

Persamaan 2.3.6 dan 2.3.7 dihubungkan menjadi persamaan baru 2.3.8.

$$\varphi = \frac{\mu_B N A I_f}{2\pi l} \quad (2.3.8)$$

Dimana:  $V_t$  = Tegangan Terminal,  $E_g$  = Total tegangan generator,  $L_a$ =Induktansi Jangkar,  $R_a$ = Resistansi Jangkar,  $I_a$ = Arus Jangkar,  $k_g$ =Konstanta Tegangan,  $\varphi$ =Stator/Fluks Medan,  $\omega_r$ =Kecepatan Generator,  $R_L$ =Resistansi Beban,  $T_{shaft}$ =Torsi *Shaft*,  $T_L$ =Torsi Beban,  $J$ =Momen Inersia,  $B_m$ =*Viscous Friction*,  $k_L$ =Konstanta Torsi Beban,  $\mu_B$ =Konstanta Permeabilitas Bahan Inti,  $A$ =Luas,  $I_f$ =Arus Medan,  $l$ =Lebar Kumpanan Medan,  $N$ =Jumlah Kumpanan Medan.

Model yang digunakan untuk simulasi biasanya merupakan model yang sudah sederhana. Berikut persamaan 2.3.9 sampai 2.3.17 yang menjelaskan model simulasi untuk generator DC.

$$E_g = E_{ggl} - E_L \quad (2.3.9)$$

$$E_{ggl} = K_{ggl} * \omega_r * I_f \quad (2.3.10)$$

$$K_{ggl} = k_g \frac{\mu_B N A}{2\pi l} \quad (2.3.11)$$

$$\omega_r(s) = \left( \frac{1}{Js+B_m} \right) * (T_{shaft}(s) - T_L(s)) \quad (2.3.12)$$

$$T_L = K_{TL} * I_a \quad (2.3.13)$$

$$I_a(s) = \left( \frac{1}{Z_L(s)} \right) * E_L(s) \quad (2.3.14)$$

$$T_{shaft}(s) = \left( \frac{K_e \tau_d s}{\tau s + 1} \right) * Throttle \quad (2.3.15)$$

$$I_f(s) = \left( \frac{1}{L_f s + R_f} \right) * E_f(s) \quad (2.3.16)$$

$$E_f(s) = K_{AC} * Sinyal Kontrol \quad (2.3.17)$$

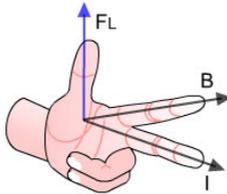
Dimana:  $E_g$ =Tegangan Terminal,  $E_{ggl}$ =Tegangan Generator,  $E_L$ =Tegangan Beban,  $K_{ggl}$ =Konstanta Generator,  $K_e$ =Konstanta Elektris,  $L_f$ =Induktansi Medan,  $R_f$ =Resistansi Medan,  $Z_L(s)$ =Impedansi Beban,  $K_{TL}$ =Konstanta Torsi *Load*,  $I_a$ =Arus Beban.

## 2.4 Motor Listrik DC [4] [6]

Mesin listrik merupakan alat yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau sebaliknya dari energi mekanik menjadi energi listrik. Mesin listrik disebut sebagai motor jika mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Sebaliknya, mesin listrik akan disebut sebagai generator jika mengubah energi mekanik menjadi listrik. Motor listrik memanfaatkan gaya magnet untuk bekerja. Jenis motor listrik

dibagi menjadi dua, yaitu motor searah (DC) dan motor arus bolak-balik (AC).

Motor DC menggunakan prinsip kerja bahwa apabila terdapat konduktor yang menghantarkan arus dan diletakkan pada medan magnet maka akan menghasilkan suatu gaya. Arah gaya tersebut ditentukan oleh kaidah tangan kiri dengan ibu jari diibaratkan sebagai arah dari gaya, jari telunjuk sebagai arah dari medan magnet dan jari tengah sebagai arah arus yang mengalir pada konduktor. Kaidah tangan kiri dapat dilihat pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** Kaidah Tangan Kiri [4]

Medan magnet menghasilkan magnet permanen yang nilainya konstan, sedangkan sikat dan komutator berfungsi untuk menyalurkan arus listrik dari sumber luar ke dalam kumparan jangkar.

Medan *stator* menghasilkan  $\phi$  dari kutub Utara ke kutub selatan (*U ke S*). Sikat arang menyentuh terminal kumparan *rotor* dibawah kutub. Jika sikat arang terhubung pada satu sumber DC atau arus searah di luar tegangan  $V$ , maka satu arus  $I$  masuk ke terminal kumparan *rotor* dibawah kutub utara dan keluar dari terminal di bawah kutub selatan. Fluks *stator* dan arus *rotor* tersebut akan menghasilkan sebuah gaya  $F$  yang bekerja pada kumparan yang dikenal dengan gaya Lorentz. Arah  $F$  yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 menghasilkan torsi yang memutar *rotor* ke arah yang berlawanan dengan arah jarum jam. Persamaan (2.4.1) menentukan nilai besar gaya Lorentz yang dihasilkan.

$$F = BIL \sin \theta \quad (2.4.1)$$

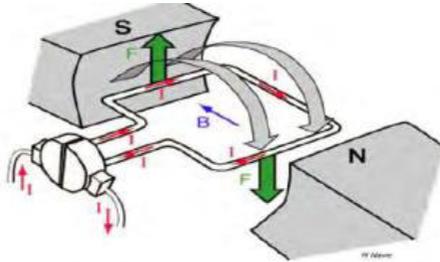
dengan,

- $F$  : Gaya Lorentz (N)
- $B$  : Kerapatan Fluks magnet (Weber/ $m^2$ )
- $I$  : Arus yang mengalir (A)

$L$  : Panjang kawat konduktor (m)

$\theta$  : Sudut yang terbentuk antara arah arus medan dengan arah arus yang mengalir pada kawat (derajat)

Arus yang mengalir melewati kawat dan memotong medan magnet, maka timbul gaya Lorentz seperti pada Gambar 2.9. Gaya Lorentz ini yang menimbulkan torsi pada motor.



**Gambar 2.9** Gaya Lorentz Pada Motor DC [4]

Fungsi komutator adalah untuk membalik polaritas, sehingga arus akan mengalir berlawanan dengan arah sebelumnya. Pada Gambar 2.9, saat kawat berputar sesuai arah gaya hingga pada posisi lurus, gaya yang bekerja tetap sama. Namun diperlukan gaya yang berlawanan agar kawat tetap berputar. Untuk membalik gaya tersebut, maka perlu untuk membalik polaritas dari kedua ujung kawat. Komutator akan terbalik dengan sendirinya setelah kawat berputar setengah putaran. Secara fisik, komutator berupa segmen-segmen dan biasanya terbuat dari tembaga dan terletak pada *rotor*. Sikat arang (*brushes*) terbuat dari karbon, ditekan pada komutator dengan menggunakan pegas. Sikat arang membawa arus listrik dari sumber menuju kumparan jangkar. Setiap segmen pada komutator akan dipisahkan oleh isolator seperti mika atau *polymer*.

Struktur fisik motor DC terdiri dari dua bagian utama yaitu bagian yang diam atau *stator* dan bagian yang berputar yang disebut *rotor*. Bagian *stator* merupakan tempat kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan fluks magnet sedangkan bagian *rotor* terdapat rangkaian jangkar yang menghasilkan gaya putar. Kumparan jangkar pada dasarnya merupakan kawat yang dialiri arus yang menimbulkan gaya Lorentz. Kawatnya yang banyak menyebabkan kawat ini disebut kumparan. Semakin banyak kawat pada suatu kumparan, maka gaya Lorentz yang

dihasilkan akan semakin besar dan kontinu. Torsi yang terbentuk mengikut Persamaan (2.4.2) berikut:

$$\tau = KI_a\phi \quad (2.4.2)$$

dengan,

$\tau$  : Torsi yang dibangkitkan (Nm)

$K$  : Konstanta mesin

$I_a$  : Arus jangkar (Ampere)

$\phi$  : Fluks Magnet (Weber)

Bila kumparan jangkar pada motor berputar dalam medan magnet dan memotong fluks utama, maka akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) induksi pada kumparan jangkar yang arahnya sesuai dengan kaidah tangan kanan, di mana arahnya berlawanan dengan tegangan yang diberikan kepada jangkar atau tegangan terminal. Arahnya yang berlawanan ini menyebabkan ggl induksi ini disebut dengan ggl lawan dengan Persamaan (2.4.3).

$$E_a = cn\phi \quad (2.4.3)$$

dengan,

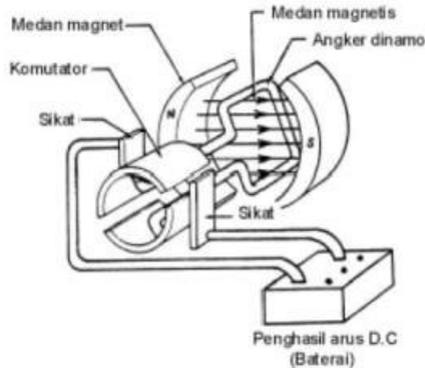
$E_a$  : Gaya gerak listrik induksi (Volt)

$n$  : Kecepatan putaran (rpm)

$\phi$  : Fluks setiap kutub (Weber)

$c$  : Konstanta

Motor DC dibedakan menjadi *brushed*, *brushless* dan *permanent magnet* berdasarkan konstruksinya. Bentuk paling sederhana dari motor DC adalah memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen seperti pada Gambar 2.10. Motor DC *brushed* paling sering digunakan oleh banyak orang karena konstruksinya yang sederhana, lebih murah dan juga memiliki kemampuan yang cukup baik. Motor DC *brushed* terdiri dari beberapa konfigurasi, yaitu seri, paralel dan *compound* (campuran) yang masing-masing punya karakteristik yang berbeda (dapat dilihat pada Gambar 2.11).



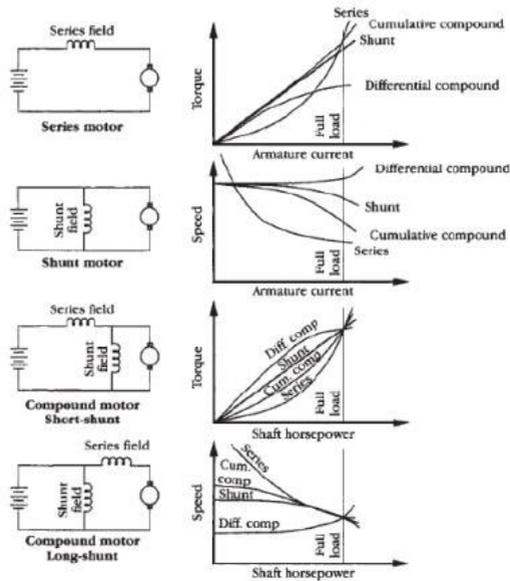
**Gambar 2.10** Motor DC Sederhana [4]

Untuk keperluan pengaturan kecepatan ataupun torsi pada motor DC, diperlukan pengetahuan mengenai karakteristik motor DC yang akan digunakan. Pada setiap konfigurasi motor DC, memiliki karakteristik dan penurunan persamaan model yang berbeda. Dalam memilih motor DC diperlukan juga konfigurasi dan karakteristik dari setiap konfigurasi yang ada.

Model yang dibutuhkan dalam simulasi biasanya menggunakan model yang sudah sederhana tapi mencerminkan keadaan dari motor DC tersebut. Jika sebuah motor diberi input tegangan ke kumparan motor, maka akan menghasilkan torsi di jangkar, torsi yang dibangkitkan motor yaitu  $T_m$  berhubungan dengan arus jangkar ( $I_a$ ) dan konstanta torsi ( $K_t$ ) seperti pada persamaan 2.4.4.

$$\text{Motor Torque} = T_m = K_t * I_a \quad (2.4.4)$$

*Back electromotive force* atau biasa disebut tegangan emf ( $e_a$ ) adalah tegangan yang disebabkan oleh rotasi dari jangkar pada medan magnet permanen. Polaritas dari tegangan emf ini berbanding terbalik dengan arus yang menghasilkan gerakan motor. Tegangan emf ini terkait dengan kecepatan angular motor ( $\omega_m$ ) dan konstantan emf ( $K_b$ ) seperti persamaan 2.4.5 berikut:



**Gambar 2.11** Karakteristik Motor DC dan Konfigurasinya [4]

$$e_a(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m \quad (2.4.5)$$

$$\Sigma E = E_{in} - E_R - E_L - e_a = 0 \quad (2.4.6)$$

Sesuai hukum Kirchoff, total tegangan dalam sebuah loop elektrik adalah sama dengan 0. Persamaan 2.4.6 dihubungkan dengan hukum Ohm, dimana substitusi dan disusun kembali untuk menjadi sebuah persamaan diferensial yang menjelaskan karakteristik elektrik dari sebuah motor DC seperti pada persamaan 2.4.7.

$$E_{in} = R_a * I_a + L_a \left( \frac{di_a}{dt} \right) + K_b \omega_m \quad (2.4.7)$$

Torsi yang dibangkitkan oleh motor akan menghasilkan kecepatan sudut ( $\omega_m$ ) sesuai dengan inersia( $J$ ) dan *damping friction*-nya( $b$ ) dari

motor dan beban. Jumlah torsi harus sama dengan nol sesuai keseimbangan energi, maka:

$$\Sigma T = J * \alpha = J * \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$T_m - T_\alpha - T_{\omega_m} - T_L = 0$$

$$K_t * i_a - T_L - J_m \left( \frac{d\omega_m}{dt} \right) - b_m \omega_m = 0 \quad (2.4.8)$$

Ubah dalam bentuk laplace menjadi,

$$K_t * I_a(s) - J_m s \omega_m(s) - b_m \omega_m(s) - T_L(s) = 0$$

$$K_t I_a(s) - T_L(s) = (J_m s + b_m) \omega_m(s)$$

$$\omega_m(s) = \left( \frac{1}{J_m s + b_m} \right) * (T_m(s) - T_L(s)) \quad (2.4.9)$$

Komponen elektrik dan mekanik dari motor DC merupakan dua komponen yang bergandengan satu sama lain melalui persamaan torsi. Persamaan yang menggambarkan karakteristik elektrik dan mekanik dari motor listrik adalah persamaan 2.4.4, 2.47 dan 2.4.9.

$$T_L(s) = (ms + b_k) * \frac{1}{K_{Prop}} * v(s) \quad (2.4.10)$$

$$v(s) = \left( \frac{1}{ms + b_k} \right) * K_{Prop} * \omega_m(s) \quad (2.4.11)$$

$$F_{thruster} = K_{Prop} * \omega_m \quad (2.4.12)$$

Kecepatan linier sebuah kapal diperoleh ketika motor penggerak pada kapal tersebut dipasang sebuah *propeller* dan diberi beban kapal berupa massa kapal dan damper kapal. Kecepatan linier ( $v$ ) ini juga menyebabkan torsi lawan ( $T_L$ ) kepada motor sehingga kecepatan putar motor akan berkurang akibat adanya torsi lawan ini. Persamaan tersebut seperti pada 2.4.10, 2.4.11 dan 2.4.12.

Keterangan:  $T_m$ =Torsi Motor,  $Kt$ =Konstanta Torsi,  $I_a$ =Arus jangkar,  $e_a$ =tegangan emf,  $K_b$ =Konstanta emf,  $\omega_m$ =Kecepatan putar motor,  $\theta_m$ =posisi motor,  $E_R$ =Tegangan beban resistansi,  $E_L$ =Tegangan beban induktansi,  $R_a$ =Resistansi jangkar,  $L_a$ =Induktansi Jangkar,  $\alpha$ =percepatan sudut,  $J_m$ =Inersia motor,  $b_m$ =damper motor,  $T_L$ =Torsi Beban,  $m$ =massa kapal,  $b_k$ =damper kapal,  $K_{Prop}$ =Konstanta *Propeller*,  $v$ =kecepatan linier kapal,  $F_{thruster}$ =Gaya *Thruster* kapal.

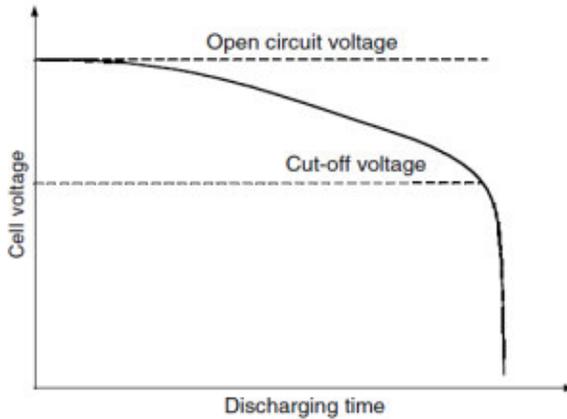
## 2.5 Sistem Penyimpanan Energi [7] [8]

Sistem penyimpanan energi adalah seperangkat metode dan teknologi yang digunakan untuk menyimpan berbagai macam bentuk energi. Bentuk penyimpanan energi memiliki berbagai macam yaitu *solid-state batteries*, *flow batteries*, *compressed air* dan lainnya. Teknologi penyimpanan energi ini dipilih tergantung aplikasi, ekonomi, integrasi dalam sistem, dan ketersediaan sumber daya. (Sumber: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-technologies>).

Salah satu jenis teknologi penyimpanan energi listrik adalah dalam bentuk baterai. Baterai merupakan teknologi propulsi elektrik yang sangat penting. Sebagai media penyimpanan energi listrik, baterai memiliki densitas energi dan daya yang besar untuk memenuhi siklus operasi kendaraan. Baterai mengubah energi kimia ke energi listrik dan sebaliknya, pada proses pemakaian dan pengisian ulang.

Kapasitas baterai ditentukan oleh *coulometric capacity*nya yaitu *amp-hours*, yang dihasilkan baterai pada saat terisi penuh sampai pada *cut-off voltage*-nya seperti pada Gambar 2.12. Arus *discharge* dari baterai menentukan *amp-hours* baterai, dimana semakin besar arus *discharge*-nya semakin kecil kapasitas baterai sehingga produsen baterai menentukan kapasitas baterai berdasarkan arus yang mampu disimpannya.

Efisiensi baterai sangat penting dalam hal penghematan bahan bakar dalam sistem propulsi elektrik. Dengan perawatan yang tepat, baterai dapat mencapai 94%, namun apabila terjadi penurunan efisiensi dari baterai sebesar 1% saja dapat mengakibatkan peningkatan konsumsi bahan bakar sebesar 10%-40%. Jika efisiensi sudah turun sebanyak 3% maka sistem propulsi hibrida elektrik secara ekonomi sudah tidak layak digunakan lagi.



**Gambar 2.12** *Cut-Off Voltage* pada Baterai [8]

*State of Charge* (SOC) adalah parameter yang ada di dalam baterai yang didefinisikan sebagai perbandingan kapasitas tersisa dengan penuh. Keadaan penuh adalah 100% dan keadaan kosong adalah 0%, tetapi kapasitas baterai dapat berubah sesuai arus *discharge* nya dan *cut-off voltagenya* yang berada tidak di SOC 0%.

Perubahan SOC berdasarkan interval waktu,  $dt$ , dibandingkan dengan arus  $i$  dapat dirumuskan sebagai:

$$\Delta SOC = \frac{i dt}{Q(i)} \quad (2.5a)$$

dimana  $Q(i)$  adalah kapasitas *amp-hour* pada arus tertentu. Ketika *discharge*,  $i$  adalah positif dan sebaliknya ketika *charge*, sehingga SOC dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{i dt}{Q(i)} \quad (2.5b)$$

dimana  $SOC_0$  adalah nilai awal dari *SOC*.

Pada kendaraan energi listrik atau kendaraan hibrida (EV&HEV), kapasitas energi lebih penting daripada kapasitas *coulometric* (AHs), karena pengaruhnya langsung pada operasional kendaraan. Energi yang dihantarkan oleh baterai dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$EC = \int_0^t V(i, SOC) i(t) dt \quad (2.5c)$$

dimana  $V(i, SOC)$  adalah tegangan terminal baterai, yang merupakan fungsi dari arus baterai dan SOC.

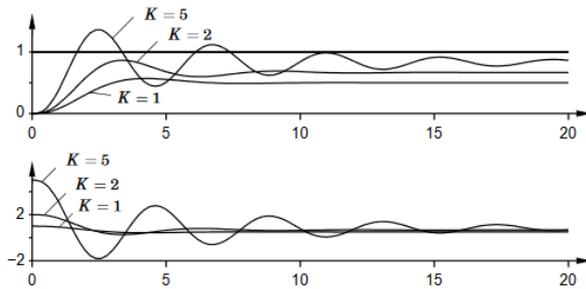
Baterai perlu dijaga pada kondisi 100% sampai 20% SOC untuk menjaga efisiensi dari baterai serta untuk melakukan pengaturan beban optimal. Baterai dikatakan perlu diisi ulang dayanya ketika kondisi SOC sudah turun mencapai titik 50%. Baterai disebut mencapai 100% ketika arus sudah sangat rendah (*ultra-low current*).

## 2.6 Kontroler PID (*Proportional – Integral – Derivative*) [9] [10]

Kontroler PID (*proportional – integral – derivative*) adalah bentuk umpan balik yang paling umum dan sering digunakan. Kontroler ini elemen yang sangat penting pada kontrol proses mulai muncul tahun 1940-an. Kontrol proses saat ini hampir 95% dari loop kontrol adalah PID dan kebanyakan dari kontroler tersebut berbentuk kontroler PI. Kontroler PID adalah unsur penting dalam *distributed control system* (DCS) saat ini. Kontroler ini juga banyak tertanam dalam sistem kontrol yang memiliki tujuan khusus. Kontroler PID ini sering dikombinasikan dengan logika, fungsi sekuen, maupun blok fungsi sederhana untuk membentuk sistem otomasi yang lebih rumit yang digunakan untuk produksi energi, transportasi dan manufaktur. Kontroler PID dikatakan sebagai “*Bread and Butter*” dari teknik kontrol yang artinya kontroler ini merupakan komponen penting yang perlu dimiliki oleh setiap *control engineer*. Persamaan dari algoritma PID adalah sebagai berikut;

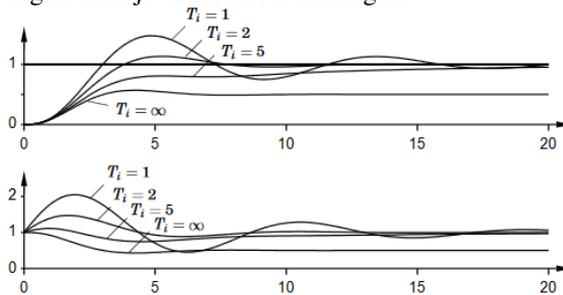
$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(T) dT + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.6.1)$$

Dari persamaan (2.6.1), diketahui bahwa  $y$  adalah variabel proses terukur,  $r$  adalah variabel referensi,  $u$  adalah sinyal kontrol dan  $e$  adalah eror kontrol ( $e = y_{sp} - y$ ). Variabel referensi biasa disebut *set point*. Sinyal kontrol dengan demikian adalah jumlah dari tiga istilah: P (sebanding dengan eror), I (sebanding dengan integral eror) dan D (sebanding dengan turunan eror). Parameter kontroler adalah *gain*  $K$ , waktu *integral* ( $T_i$ ) dan waktu *derivative* ( $T_d$ ). Bagian *integral*, *proportional* dan *derivative* dapat diartikan sebagai kontrol berdasarkan masa lalu, masa sekarang dan masa depan.



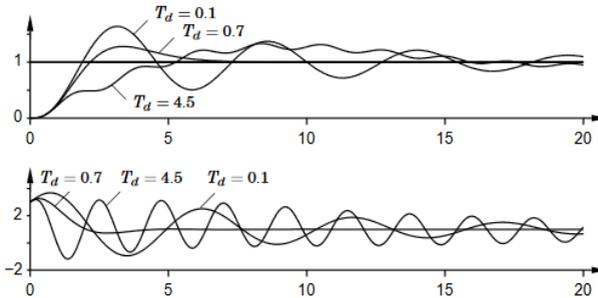
**Gambar 2.13** Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol P [9]

Gambar 2.13 menunjukkan hasil kontrol *proportional*. Kontroler yang diberikan pada gambar tersebut dengan nilai  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Gambar tersebut menunjukkan bahwa selalu ada eror *steady-state* pada kontroler P. Eror akan berkurang dengan kenaikan nilai pengali  $K$ , tetapi kecenderungan menuju osilasi lebih meningkat.



**Gambar 2.14** Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol PI [9]

Gambar 2.14 menunjukkan efek penambahan kontroler I pada sistem. Aksi integral akan meningkat seiring berkurangnya waktu integral  $T_i$ . Gambar 2.14 menunjukkan bahwa eror *steady-state* menghilang ketika aksi integral ditambahkan. Kecenderungan untuk menuju osilasi akan meningkat dengan berkurangnya  $T_i$ . Sifat-sifat kontroler *derivative* akan diilustrasikan pada Gambar 2.15.



**Gambar 2.15** Grafik Simulasi Sistem Tertutup Kontrol PID [9]

Gambar 2.15 menunjukkan efek penambahan kontroler D pada sistem sebelumnya. Parameter  $K$  dan  $T_i$  dipilih sedemikian sehingga sistem tertutup mengalami osilasi. Redaman bertambah seiring dengan bertambahnya waktu *derivative*, tetapi berkurang ketika waktu *derivative* terlalu besar. Tindakan *derivative* dapat diartikan sebagai prediksi dengan ekstrapolasi linier selama waktu  $T_d$ . Dengan menggunakan interpretasi ini, mudah dipahami bahwa aksi *derivative* tidak membantu jika waktu prediksi terlalu besar. Pada gambar 2.15, periode osilasi adalah sekitar 6 detik untuk sistem tanpa aksi *derivative*. Aksi *derivative* tidak efektif lagi jika  $T_d$  lebih besar dari 1 detik ( $1/6$  dari periode).

### 2.6.1 Gain Scheduling PID [11]

*Gain Scheduling* adalah metode yang bagus dan praktis untuk mengendalikan sistem nonlinier. Kontroler *gain-scheduled* ini terbentuk dengan menginterpolasi antara satu set kontroler linier yang diturunkan untuk serangkaian linierisasi *plant* yang terkait dengan beberapa titik operasi. Interpolasi didasarkan pada parameter penjadwalan eksogen yang variasinya lambat dan menangkap nonlinieritas dari *plant*. Kontroler yang dihasilkan adalah sistem linier yang parameter (*gain*) disesuaikan (*scheduled*) sebagai fungsi dari variabel penjadwalan eksogen.

*Gain scheduling* ini sangat menarik karena memanfaatkan metode desain kontrol linier yang matang secara teori, mudah dipahami, dan melibatkan prosedur sistesis yang efisien secara komputasi. Karena desain kontrol didasarkan pada pendekatan linier pada *plant*, perancang dapat menjamin bahwa pada setiap titik operasi, sistem umpan balik memiliki stabilitas dan kinerja sesuai yang diinginkan. Selain itu, karena

kontroler *gain* disesuaikan agar dapat mencerminkan kondisi operasi dari *plant*, sistem kontrol *gain-scheduled* ini berpotensi merespon dengan cepat terhadap perubahan kondisi operasi. Metode *gain scheduling* telah terbukti baik oleh aplikasi yang sukses di seluruh industri.

Meskipun pendekatan *gain scheduling* adalah peningkatan sederhana dari metode desain kontrol linier, teknik ini dapat menjamin stabilitas dan kinerja loop tertutup hanya dalam *local sense*. Stabilitas dan sifat kinerja dari desain *gain-scheduled* harus disesuaikan dari studi simulasi. Wilayah operasi dimana stabilitas dan kinerja dipastikan sulit untuk diukur. Selain itu, perancang biasanya harus menggunakan metode heuristik untuk mendapatkan hukum *schedule* nya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 3**

### **PERANCANGAN SISTEM**

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan sistem yang dibagi menjadi enam tahap. Tahap pertama adalah mengenai gambaran umum sistem yang akan dibuat yang berupa penjelasan sistem keseluruhan. Tahap kedua yaitu perancangan model simulasi Generator DC sederhana yang berupa model simulasi mesin bakar dan beban pada *software* Matlab. Tahap ketiga yaitu perancangan model simulasi motor listrik DC sebagai representasi penggerak sebuah wahana. Tahap ke-empat merupakan perancangan mode dan penentuan misi dari wahana. Tahap kelima yaitu perancangan model simulasi baterai *lithium-ion* sebagai tempat penyimpanan energi listrik dalam sistem. Tahap terakhir adalah perancangan sistem keseluruhan berupa manajemen daya dengan *switching* antara generator dan baterai untuk suplai energi ke motor listrik DC sekaligus *charging* baterai jika tidak penuh dengan misi yang diberikan.

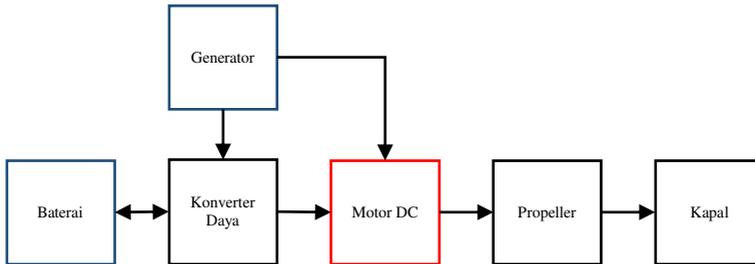
#### **3.1 Gambaran Umum Sistem**

Perancangan manajemen daya pada penggerak *hybrid* merupakan manajemen daya untuk wahana listrik hibrida yang bekerja dengan mengkombinasikan pemanfaatan mesin bakar dan motor listrik sebagai tenaga penggerak. Sistem ini memiliki beberapa konfigurasi yaitu konfigurasi seri, konfigurasi paralel, dan konfigurasi seri-paralel.

Pada Tugas Akhir ini dibuat sebuah Simulasi mengenai Rancangan manajemen daya dengan konfigurasi seri. Prinsip kerja sistem ini sama seperti prinsip kerja kendaraan listrik hibrida konfigurasi seri yaitu mesin bakar dari generator dan baterai dapat berfungsi secara bersamaan untuk menjalankan motor listrik dan generator juga dapat menyuplai energi listrik ke baterai jika baterai belum terisi penuh. Pada konfigurasi seri ini, peran generator sangat penting karena merupakan sumber untuk mengisi baterai dan menjalankan motor listrik.

Pada saat awal, motor listrik akan disuplai oleh baterai sedangkan generator mulai dinyalakan agar dalam posisi siap pakai. Ketika dibutuhkan percepatan atau kecepatan tinggi, maka generator dan motor harus menyuplai bersamaan ke arah motor listrik DC. Simulasi ini

dilakukan untuk meminimalkan penggunaan bahan bakar dan melakukan berbagai macam misi dengan ketahanan yang lebih lama (*Long-lasting*).



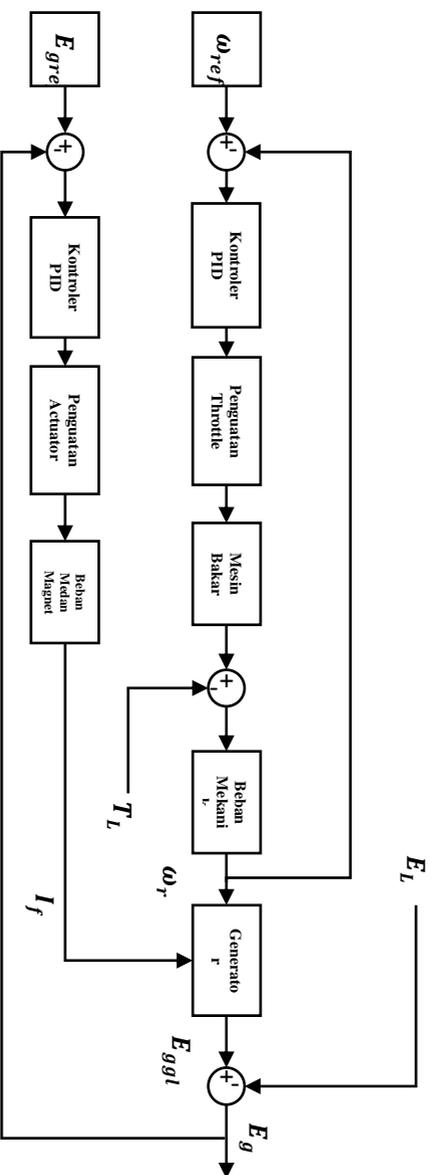
**Gambar 3.1** Gambaran Umum Sistem

### 3.2 Perancangan Simulasi Generator DC

Pada tahap perancangan simulasi generator DC, dilakukan suatu analisa untuk memodelkan generator DC. Dalam memodelkan generator DC terdapat beberapa komponen yang perlu dipertimbangkan terlebih dahulu. Komponen tersebut adalah mesin bakar dan medan pada generator. Komponen yang termasuk dalam pertimbangan mesin bakar adalah parameter sederhana yang diperlukan oleh generator seperti inersia, damper dan konstanta elektrik. Komponen dari beban pada generator adalah beban medan dan beban luar yang menyebabkan beban torsi pada generator. Generator DC digunakan untuk menghasilkan sebuah daya yang digunakan untuk menggerakkan motor DC pada kapal tanpa awak. Model tersebut akan direpresentasikan pada *software* Matlab. Secara umum susunan blok diagram dari generator DC ini seperti yang terlihat pada Gambar 3.2.

Dari Gambar 3.2, dapat dilihat bahwa keluaran generator DC berasal dari hubungan mekanik dan elektrik antara kecepatan putar generator ( $\omega_r$ ) dan arus medan ( $I_F$ ). Model generator DC merupakan model yang menjelaskan hubungan antara input dalam bentuk kecepatan putar dari generator dan output berupa tegangan generator.

Generator terbagi menjadi dua bagian dasar, pertama merupakan bagian yang mengatur kecepatan putar dari generator tersebut. Di dalam bagian tersebut terdapat komponen seperti mesin bakar, inersia dan damper generator. Bagian kedua merupakan bagian medan permanen magnet yang mengatur output generator yaitu tegangan generator. Bagian



$E_g$

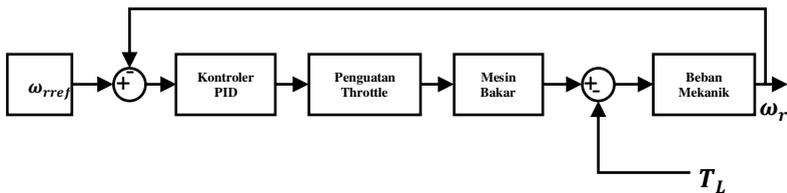
Gambar 3.2 Diagram Blok Generator DC

ini mengatur tegangan output dengan mengatur arus beban medan yang terdapat di dalam generator.

Rancangan simulasi generator DC ini bertujuan untuk menghasilkan output tegangan generator yang mana output nya akan digunakan untuk menyuplai motor listrik DC dan *charging* baterai dalam sebuah sistem.

### 3.2.1 Rancangan Pengendalian Kecepatan Putar Generator

Bagian pada mesin bakar adalah bagian yang menghasilkan torsi pada rotor dan menghasilkan kecepatan putar pada generator DC. Model rancangan simulasi ini menjelaskan bagaimana menghasilkan kecepatan putar yang konstan dengan mesin bakar dan dengan adanya beban inersia dan damper pada generator tersebut. Model diagram blok tersebut dinyatakan dalam Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Diagram Blok Pengendalian Kecepatan Putar Generator

Dilihat dari gambar 3.3, hasil yang diinginkan pada bagian rotor ini adalah kecepatan putar ( $\omega_r$ ). Sinyal kontrol keluaran dari kontroler akan dikalikan oleh pengali *throttle* dan akan masuk ke fungsi alih mesin bakar yang akan menghasilkan torsi listrik. Torsi listrik akan berkurang akibat adanya torsi lawan ( $T_{Load}$ ) dan menjadi torsi mekanik ( $T_m$ ). Kecepatan putar adalah hasil torsi mekanik dikurangi efek beban inersia dan damper. Persamaan yang menjelaskan diagram tersebut adalah persamaan 2.3.11 dan 2.3.12.

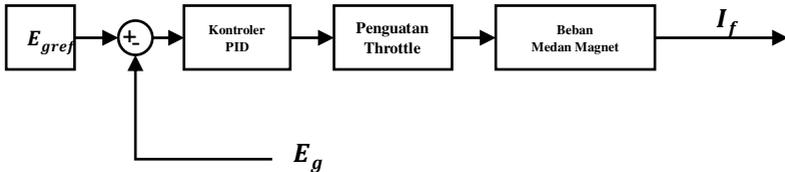
Kecepatan putar generator didapat dari torsi listrik generator dikurangi oleh torsi lawan pada generator dan dikali dengan fungsi alih beban inersia dan damper. Inersia adalah suatu parameter kelembaman yang menyebabkan benda menolak berubah dari keadaannya.

Rancangan simulasi pengendalian kecepatan putar mesin bakar pada generator dapat dilihat pada gambar 3.3, dimana output dari blok ini

adalah kecepatan putarnya. Karena output yang dipertahankan adalah kecepatan putar, maka *setpoint* yang diinginkan adalah kecepatan putar itu sendiri. Hasil kecepatan putar ini akan dihubungkan dengan bagian medan permanen magnet sehingga menghasilkan tegangan generator.

### 3.2.2 Rancangan Pengendalian Tegangan Generator

Rancangan pengendalian tegangan generator adalah rancangan pada bagian medan magnet yang menghasilkan arus medan pada generator DC untuk mengendalikan tegangan keluaran generator. Model rancangan simulasi bagian medan ini menghasilkan arus medan ( $I_f$ ) sebagai keluaran dan pengontrolan  $E_g$  untuk keluaran generator keseluruhan. Model diagram blok tersebut dinyatakan dalam Gambar 3.4.



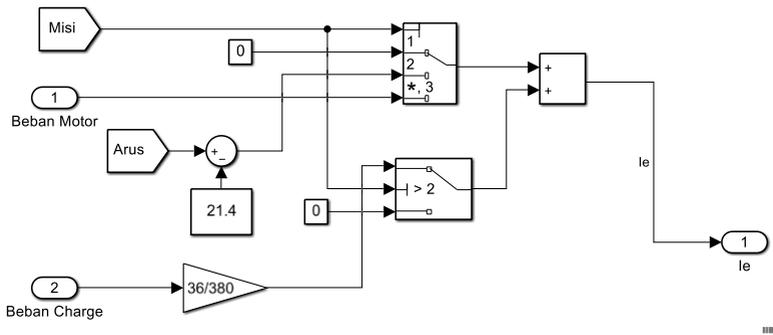
**Gambar 3.4** Diagram Blok Pengendalian Arus Medan

Gambar 3.4 menunjukkan bahwa sesuatu yang ingin dikontrol adalah tegangan keluaran generator dengan cara mengatur keluaran arus medannya. Tegangan keluaran generator akan dibandingkan dengan *setpoint* yang diinginkan. *Error* hasil pengurangan akan dimasukkan ke dalam blok kontroler sehingga menghasilkan sinyal kontrol. Sinyal kontrol tersebut akan dikuatkan oleh penguatan aktuator menjadi tegangan medan dan masuk ke dalam blok fungsi alih beban medan magnet. Keluaran dari bagian ini adalah arus medan pada generator. Persamaan yang menjelaskan bagian ini adalah persamaan 2.3.16 dan 2.3.17.

Arus medan terbangkit karena adanya tegangan medan masuk ke beban medan. Arus medan yang dihasilkan merupakan keluaran yang diinginkan pada blok ini. Arus ini digunakan oleh generator untuk mengendalikan tegangan keluaran generator agar tetap sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan.

### 3.2.3 Rancangan Simulasi Beban Generator

Beban generator DC adalah beban-beban arus yang diterima oleh generator DC untuk menyuplai motor listrik DC dan baterai saat *charge*. Beban ini menyebabkan adanya *drop* tegangan karena ada perubahan beban setiap perbedaan mode. Rancangan simulasi ini membentuk sebuah blok fungsi yang di dalamnya ada pengatur beban yang akan masuk ke generator sesuai mode yang dilakukan. Untuk rancangan simulasi beban generator, dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Model Simulasi Beban Generator DC

Dari gambar 3.5, untuk mengatur beban yang masuk generator yang sesuai, digunakan blok *switch* yang dikontrol berdasarkan mode yang akan dikerjakan oleh generator. Pada mode pertama, generator tidak mendapatkan beban luar sama sekali, sehingga tidak ada arus beban yang lewat membebani generator. Pada mode kedua yaitu mode *fullspeed*, arus beban yang masuk ke generator meliputi arus beban motor listrik DC yang diatur agar dapat menghasilkan kecepatan maksimal. Pada mode ini generator mengalami perubahan beban yang cukup besar sehingga *drop* tegangannya lumayan besar untuk sesaat sebelum kembali menuju tegangan referensinya lagi. Pada mode ketiga yaitu mode *generator*, arus beban sebelumnya diterima oleh generator yaitu motor listrik DC bertambah dengan adanya beban arus *charge* baterai. Beban pada mode ini sangat besar sehingga menyebabkan tegangan *drop* yang tidak bisa diatasi lagi oleh generator. Pada mode ini tegangan akan turun sehingga tegangan untuk input akan berkurang.

Arus beban luar ini akan masuk ke dalam blok beban jangkar yang ada di dalam generator DC. Efek arus beban dan beban jangkar inilah

yang mengakibatkan penurunan tegangan keluaran generator yang berakibat *drop* tegangan sesaat. Arus beban luar juga mengakibatkan adanya torsi lawan pada mesin bakar sehingga terjadi penurunan kecepatan untuk beberapa detik sebelum menuju kecepatan putar referensi oleh pengatur kecepatan mesin bakar. Pengaruh beban ini akan menyebabkan kenaikan pada arus medan pada generator DC karena untuk membuat tegangan keluaran dari generator menghasilkan tegangan yang konstan pada nilai 380 Volt DC. Tapi arus medan memiliki batas atasnya, jika beban melebihi batas atasnya maka tegangan keluaran akan berkurang.

### 3.2.4 Rancangan Kontroler PID & Gain Scheduling PID

Pada tahap rancangan kontroler ini, dibuat sebuah kontroler yang mengatur keluaran dari generator DC. Dalam simulasi ini terdapat dua macam kontroler yang dipakai, yaitu Kontroler PID dan Kontroler *Gain Scheduling* PID dimana penggunaan dua kontroler ini berbeda. Kontroler PID digunakan untuk mengontrol keluaran dari mesin bakar yaitu kecepatan putarnya. Kontroler ini mengatur agar kecepatan putar dari generator tetap konstan sesuai dengan kecepatan putar referensi yang diinginkan. Kontroler PID ini hanya menggunakan unsur *Proportional* dan *Integral* karena dengan kontroler PI ini sistem mesin bakar sudah dapat bekerja sesuai yang diinginkan. Nilai parameter kontroler PI ini akan ditunjukkan seperti pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Nilai Parameter Kontroler PI

Kontroler PI	
Parameter	Nilai
<i>Proporsional</i> (P)	0.8
<i>Integral</i> (I)	0.4
<i>Derivative</i> (D)	0

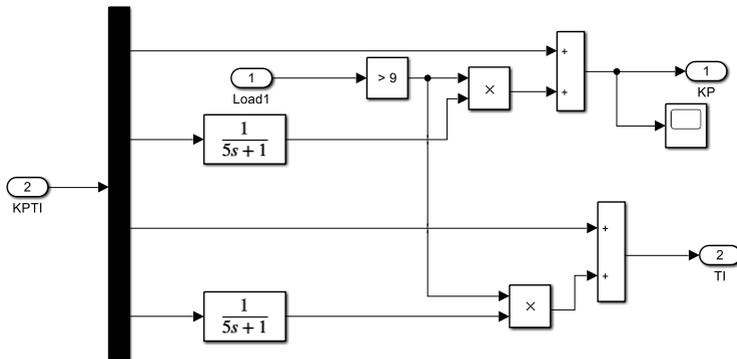
Bagian medan magnet generator menggunakan kontroler *Gain Scheduling* PID yang artinya nilai gain yang telah terjadwal. Penggunaan kontroler ini adalah karena sistem yang ada pada bagian ini bersifat non-linier sehingga tidak bisa menggunakan kontroler PID biasa. Kontroler ini memberikan nilai PID yang berubah-ubah sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Kontroler ini berubah sesuai dengan beban yang

diterima oleh generator. Nilai parameter kontroler *gain scheduling* PID ini akan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

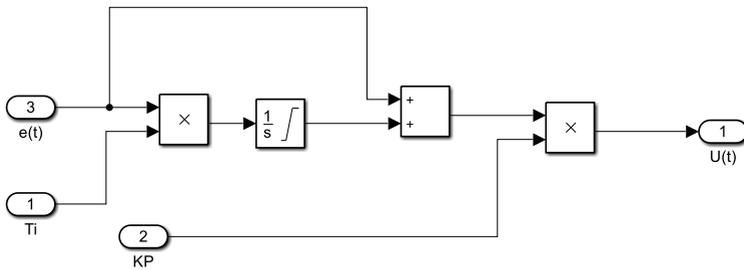
**Tabel 3.2** Nilai Parameter Gain Scheduling PID

<b>Kontroler <i>Gain Scheduling</i> PID</b>		
<b>Parameter</b>	Beban Luar (A)	Nilai
<b>Proporsional (P)</b>	Kurang dari 9A	0.7
<b>Integral (I)</b>		0.3
<b>Proporsional (P)</b>	Lebih dari 9A	15.7
<b>Integral (I)</b>		0.31

Pada tabel 3.2 ditunjukkan bahwa nilai penguatan kontroler akan berubah sesuai dengan beban luar yang diterima oleh generator. Ketika beban yang diterima generator kecil atau tanpa beban, maka nilai kontroler PID nya akan kecil sesuai jadwal. Ketika beban yang diterima generator mulai besar, seperti beban motor dan *charge* baterai, maka nilai penguatannya juga semakin besar.



(a)



(b)

**Gambar 3.6** (a) Blok Penentuan Nilai *Gain Scheduling* (b) Blok Kontroler PI

Rancangan simulasi kontroler *gain scheduling* PID ini dibuat menggunakan blok-blok pada Simulink. Nilai penguatan proporsional akan diatur pada blok fungsi *gain scheduling* pada gambar (3.6a). Nilai beban akan dibandingkan dengan nilai konstanta 9. Perbandingan tersebut menggunakan nilai Boolean sehingga hanya mengeluarkan nilai 0 dan 1. Jika nilai beban kurang dari 9 maka nilai gain proporsional hanya 0.7. Pada beban yang lebih besar yaitu lebih dari 9, nilai gain proporsional akan naik menjadi 15.7 dimana nilai tersebut berasal dari 0.7 penguatan pertama dan 15 penguatan kedua lalu dijumlahkan. Untuk parameter gain integral juga menggunakan perbandingan nilai beban luar dengan konstanta. Parameter gain integral akan bernilai 0.3 jika beban kurang dari 9 dan menjadi 0.31 jika lebih dari 9. Untuk beban yang melebihi kapasitas diatur dengan memberikan batas atas saturasi dari kontroler integral yaitu sebesar 96.5.

### 3.2.5 Rancangan Simulasi Generator DC

Rancangan simulasi ini merupakan rancangan keseluruhan dari sistem generator yang akan dibuat. Simulasi keseluruhan ini meliputi bagian pengendalian kecepatan putar mesin bakar dan bagian pengendalian arus medan hingga menghasilkan tegangan keluaran yang diinginkan. Bagian rancangan sebelumnya akan digabungkan dan dirangkai agar menjadi sebuah simulasi utuh generator. Model rancangan

simulasi ini akan direpresentasikan pada *software* Matlab seperti pada Gambar 3.7.

Simulasi ini bertujuan untuk merepresentasikan generator sederhana dalam menghasilkan tegangan keluaran. Dimulai dengan adanya putaran pada rotor yang berasal dari mesin bakar dan adanya arus medan akibat tegangan medan pada generator sehingga menghasilkan tegangan keluaran DC. Tegangan keluaran yang diinginkan adalah konstan pada nilai 380 Volt. Untuk menjaga nilai keluaran tetap pada nilai tersebut, maka diperlukan kontroler. Kontroler terdapat pada bagian rotor untuk menjaga kecepatan putar yang konstan dan pada bagian stator agar arus medan keluaran sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan.

Pada tugas akhir ini, parameter yang digunakan adalah parameter hasil percobaan yang digunakan pada generator DC dengan nilai tegangan keluaran yang diinginkan adalah 380 Volt dan kecepatan putar rotor adalah 314 *rad/s*. Parameter tersebut akan diperlihatkan pada Tabel 3.3 dibawah ini:

**Tabel 3.3** Estimasi Parameter Generator DC

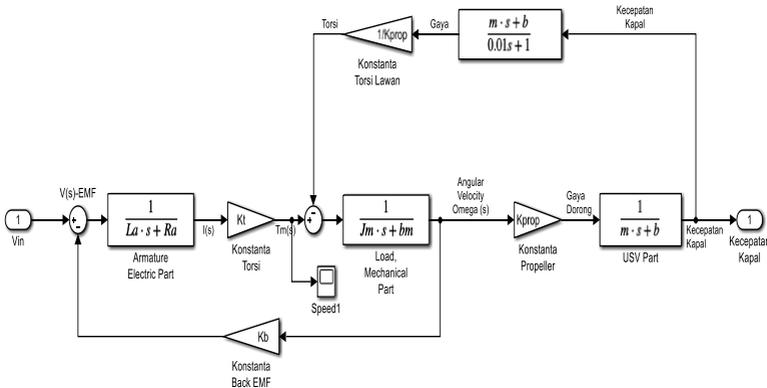
<b>Keterangan</b>	<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>
Konstanta <i>Throttle</i>	$K_{throttle}$	0.8
Konstanta Elektris	$K_e$	93.6275
Waktu Transien Mesin Bakar	$\tau$	0.2
Inersia	$J$	3.375
Damper	$B$	2
Konstanta Torsi Lawan	$K_{TL}$	1.2102
Induktansi Jangkar	$L_a$	0.1
Resistansi Jangkar	$R_a$	0.1
Konstanta Aktuator	$K_{AC}$	8
Induktansi Medan	$L_f$	0.1
Resistansi Medan	$R_f$	8
Batas Atas Saturasi Beban		114.31589



### 3.3 Perancangan Simulasi Motor Listrik DC

Pada tahap perancangan motor listrik DC dilakukan suatu analisa untuk memodelkan motor listrik DC. Model matematis motor listrik DC menjelaskan hubungan antara tegangan input sebagai input aktuator dengan kecepatan sudut ataupun torsi. Motor listrik DC digunakan untuk menggerakkan suatu kapal dan diperlukan suatu model yang menjelaskan motor listrik DC ini dari awalnya yang merupakan tegangan input sampai menjadi sebuah kecepatan kapal. Model tersebut akan direpresentasikan pada *software* Matlab.

Motor listrik DC merupakan sistem elektro-mekanik sehingga mempunyai dua bagian penting yaitu bagian elektrik dan bagian mekanik. Dua bagian ini perlu dijelaskan dan digabungkan untuk membentuk sistem motor listrik DC pada umumnya. Secara umum, diagram simulasi untuk motor listrik DC adalah seperti pada Gambar 3.8. Diagram tersebut merupakan gabungan antara bagian elektrik dengan bagian mekanik dari motor listrik DC dan ditambahkan parameter kapal yang akan direncanakan untuk digunakan. Parameter kapal tersebut digunakan untuk menghitung kecepatan kapal dan torsi lawan yang masuk ke motor.



**Gambar 3.8** Diagram Simulasi Motor Listrik DC

Pada tugas akhir ini, dipakai parameter dari motor listrik DC yang ditentukan berasal dari hasil percobaan sesuai dengan keadaan motor pada

kapal USV. Parameter tersebut akan ditampilkan pada Tabel 3.4 dibawah ini:

**Tabel 3.4** Estimasi Parameter Motor Listrik DC

<b>Keterangan</b>	<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>
Tegangan Input	$V_{in}$	~380 V
Resistansi Jangkar	$R_a$	0.3 $\Omega$
Induktansi Jangkar	$L_a$	0.23 H
Konstanta Torsi	$K_t$	3.65924
Konstanta <i>Back</i> EMF	$K_b$	1.112
Inersia Motor	$J_m$	1.25 Kg-m <sup>2</sup>
<i>Damper</i> Motor	$b_m$	0.1625
Konstanta <i>Propeller</i>	$K_{prop}$	57.325
Massa Kapal	$m$	2000 Kg
<i>Damper</i> Kapal	$b$	500 N/ms

Rancangan simulasi motor listrik DC bertujuan untuk menghasilkan output kecepatan kapal dengan input berupa tegangan sumber. Rancangan ini diharapkan menghasilkan rancangan yang cocok dengan dinamika motor pada kapal tanpa awak yang ingin di buat.

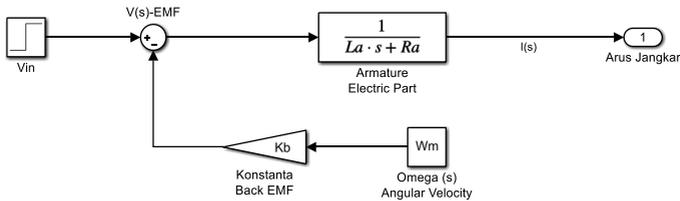
### 3.3.1 Model Matematika dari *Electrical Part*

Model matematis bagian elektrik merupakan salah satu bagian dari keseluruhan model pada motor listrik DC. Bagian ini berisi tentang hubungan elektrik dari motor listrik DC yaitu hubungan tegangan input dengan torsi. Model tersebut dinyatakan dalam persamaan 2.4.4, 2.4.5 dan 2.4.7.

Torsi terbangkit karena adanya arus pada jangkar di dalam motor dimana arus tersebut berasal dari tegangan yang masuk pada *coil*. Ketika motor sudah berputar, maka akan ada *back electromotive force* dalam bentuk tegangan emf disebabkan oleh belitan jangkar yang berotasi pada medan magnet. Polaritas tegangan emf berbanding terbalik dari polaritas tegangan input sehingga mengurangi tegangan input.

Rancangan diagram bagian elektrik dari motor listrik DC dapat dilihat pada Gambar 3.9, di mana output yang dihasilkan adalah arus yang berasal dari hubungan tegangan input, *back* EMF, resistansi dan induktansi motor. Arus yang dihasilkan akan digunakan oleh bagian

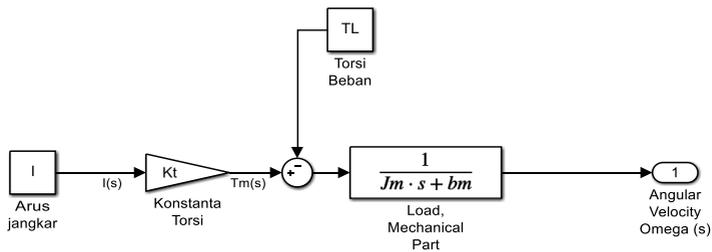
mekanik untuk menghasilkan kecepatan sudut yang merupakan keluaran utama yang ingin dihasilkan oleh motor listrik DC.



**Gambar 3.9** Diagram Electrical Part Motor Listrik DC

### 3.3.2 Model Matematika dari *Mechanical Part*

Pada motor listrik DC, terdapat bagian mekanik yang menjelaskan tentang berbagai macam hubungan mekanik dari motor listrik DC. Model matematis dari bagian mekanik menjelaskan hubungan antara torsi dengan kecepatan sudut sesuai dengan beban inersia dan redaman *damp* dari motor. Model ini dinyatakan dalam persamaan 2.4.8 dan 2.4.9:



**Gambar 3.10** Diagram *Mechanical Part* Motor Listrik DC

Berdasarkan 2.4.8, jumlah torsi pada motor listrik DC adalah nol. Output kecepatan sudut pada motor listrik DC didapat dari hubungan antara arus dengan konstanta torsi, torsi beban, inersia dan *damp friction*. Model matematika bagian mekanik akan dibuat di dalam Matlab *Simulink* dengan memasukkan beberapa parameter. Parameter tersebut

adalah konstanta torsi, inersia, dan konstanta redaman. Keluaran yang dihasilkan berupa kecepatan sudut dari motor listrik DC.

Rancangan diagram bagian mekanik dari motor listrik DC dapat dilihat pada Gambar 3.10, di mana arus jangkar akan masuk ke blok gain konstanta torsi dan menghasilkan torsi pada motor dan akan dikurangkan dengan torsi beban. Hasil output torsi akan masuk ke fungsi alih *load* yang di dalamnya terdapat inersia dan *damp friction* menghasilkan Kecepatan sudut pada motor listrik DC.

### 3.3.3 Model Matematika dari Beban Kapal

Pada motor listrik DC yang akan di simulasikan, terdapat parameter kapal yang memengaruhi kinerja motor. Model matematis bagian kapal menjelaskan hubungan kecepatan sudut hasil motor listrik DC dengan kecepatan linier kapal (*Velocity*). Model ini juga menghasilkan keluaran torsi beban (*Load Torque*) yang mengurangi torsi mekanik motor pada kapal. Model ini dinyatakan dalam persamaan 2.4.10 dan 2.4.11:

Kapal yang dipasang *propeller* akan menghasilkan gaya *thrust* untuk menggerakkan kapal. Gaya *thrust* ini didapatkan ketika adanya putaran motor dan *propeller* kapal. Kapal akan berjalan ketika berada di air dimana akan ada pengaruh massa kapal dan dampernya. Kecepatan linier ini merupakan keluaran dari sistem motor listrik DC dalam kapal tanpa awak.

### 3.4 Perancangan Mode dan Misi Sistem

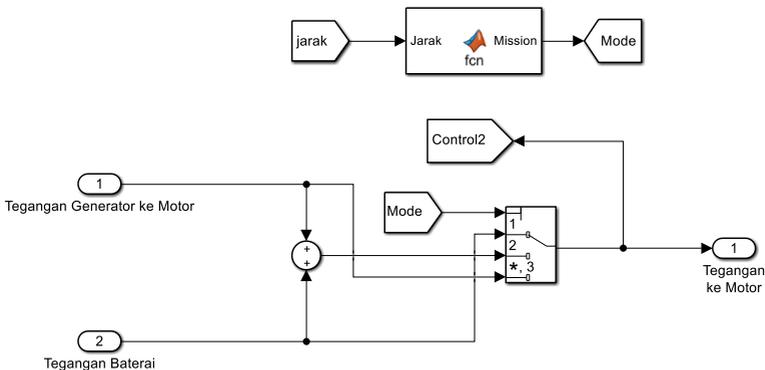
Perancangan mode dan misi sistem adalah suatu rencana misi yang akan dimasukkan ke dalam wahana kapal tanpa awak untuk melihat kinerja sistem hibrida pada wahana. Rancangan misi sistem ini berupa hal-hal yang akan dikerjakan pada waktu dan jarak yang telah ditentukan. Mode yang ditentukan ini dalam bentuk kecepatan linier dari motor listrik DC yang berasal dari sumber energinya. Pada tabel 3.5 dibawah ini ditunjukkan mode yang akan dikerjakan oleh wahana kapal tanpa awak:

**Tabel 3.5** Mode dan Misi Sistem pada Kapal tanpa Awak

Mode	Deskripsi
<i>Silence</i>	Kecepatan rendah, mode tanpa suara, suplai daya hanya dari baterai
<i>Fullspeed</i>	Kecepatan tinggi, suplai daya berasal dari baterai dan generator
<i>Generator</i>	Kecepatan normal, suplai daya berasal dari generator, generator <i>charging</i> baterai jika belum penuh

Mode sistem disini bertujuan untuk mendesain rancangan konfigurasi *hybrid electric vehicle* pada kapal tanpa awak. Konfigurasi yang digunakan adalah seri dimana suplai untuk motor listrik DC bisa berasal dari generator, baterai atau keduanya. Selain itu, konfigurasi ini membuat baterai dapat di-charge jika baterai dalam keadaan tidak penuh. Konfigurasi seri ini seperti yang diilustrasikan diagram blok pada gambar 3.1.

Rancangan simulasi untuk mode dan misi sistem menggunakan batasan waktu dan jarak tempuh wahana. Jarak yang perlu ditempuh wahana dalam pengerjaan 1 misi adalah 18 km dengan dibagi menjadi 3 bagian berjarak 6 km per bagian. Batas waktu untuk pengerjaan misi ini adalah 2600 detik. Pengujian dilakukan dengan mencari kombinasi mode *switch* apa saja yang memenuhi misi tersebut.

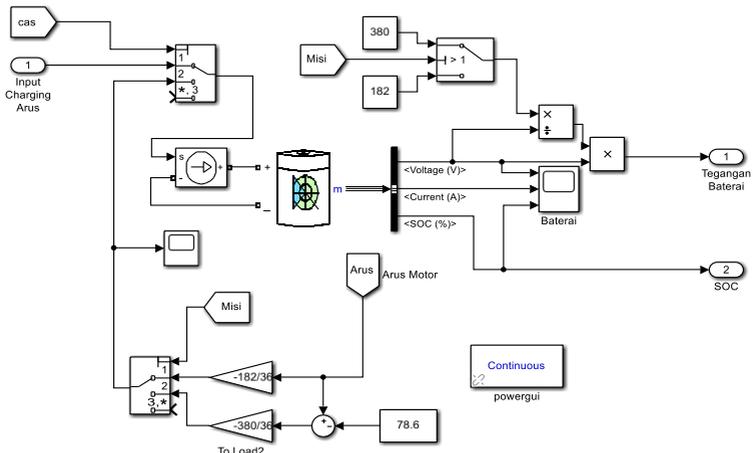


**Gambar 3.11** Rancangan Simulasi Mode dan Misi Sistem

Simulasi seperti pada gambar 3.11 menggunakan mode *switching* untuk mengatur misi yang akan dikerjakan. Pengatur mode dan misi ini bekerja sesuai jarak tempuh yang diberikan (per 6km). Pada bagian jarak pertama dilakukan sebuah pergerakan dengan menggunakan salah satu dari 3 mode tersebut. Bagian kedua dan ketiga dilaksanakan seperti yang pertama, sehingga menghasilkan 27 kombinasi *switching* untuk 3 bagian jarak ini. Semua kombinasi tersebut akan diseleksi terlebih dahulu dengan metode seleksi kombinatorial untuk melihat hasil mana yang memenuhi misi tersebut. Program Matlab untuk menentukan kombinasi *switch* yang cocok untuk mengerjakan misi yang diberikan dapat dilihat pada lampiran.

### 3.5 Perancangan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi

Tahap perancangan simulasi sistem penyimpanan energi ini adalah tahap membuat simulasi sistem penyimpanan energi dalam bentuk baterai *lithium-ion* untuk menyimpan energi dari generator. Simulasi ini menggunakan Simulink dari Matlab dan menggunakan blok *Simscape Power Systems*. Energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk memberikan suplai daya ke motor listrik DC ketika mode *silence* dan *fullspeed*. Hasil rancangan simulasi sistem penyimpanan energi ini ditunjukkan pada gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Rancangan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi

Gambar 3.12 menunjukkan sistem penyimpanan energi (baterai) dimana baterai tersebut akan menyimpan energi hasil dari generator DC dan digunakan untuk menggerakkan motor listrik DC. Simulasi tersebut dimulai dalam keadaan baterai penuh atau SOC (*State of Charge*) nya 100%. Baterai akan menyuplai energi ke motor listrik DC dalam mode *silence* berarti hanya baterai yang menyuplai motor. Ketika pada suatu waktu, mode dari kapal tanpa awak akan berubah menjadi mode *fullspeed* berarti suplai ke motor listrik DC berasal dari baterai dan generator. Pada saat mode berubah ke mode generator, baterai tidak menyuplai lagi ke motor listrik DC dan jika baterai tidak dalam keadaan penuh maka baterai akan diisi ulang hasil keluaran dari generator.

Rancangan simulasi ini mengilustrasikan bagaimana peran sistem penyimpanan energi dalam sistem *hybrid electric vehicle* pada wahana kapal tanpa awak. Baterai akan berkurang seiring dengan pemakaian daya nya ke motor listrik DC dan akan bertambah ketika diisi kembali oleh generator. *Discharging* baterai dimisalkan menggunakan arus negatif yang nilainya diambil dari arus pada motor listrik DC dikali dengan perbandingan tegangan masuk generator oleh baterai dengan tegangan kerja baterai.

Kontrol *Charge* dan *Discharge* baterai diatur oleh blok Matlab *Function*. Kontrol ini didasarkan pada tegangan yang masuk ke motor listrik DC dan SOC dari baterai. Program untuk mengatur *charge* dan *discharge* baterai akan ditunjukkan pada gambar 3.13

```
function [discas,cas] = fcn(Control,SOC)
%#codegen
discas=0;
cas=2;
if (Control==1 && SOC>30)
    cas=2;
    discas=1;
elseif (Control==3 && SOC<100)
    cas=1;
    discas=0;
elseif (Control==2 && SOC>30)
    cas=2;
    discas=1;
elseif (Control==3 && SOC==100)
    cas=3;
    discas=1;
end
```

**Gambar 3.13** Kontrol *Charge* dan *Discharge* Baterai

Yang dimaksud *Control* pada gambar 3.13 adalah mode yang digunakan oleh sistem. Jika menggunakan mode *silence* atau *fullspeed*, maka baterai akan *discharge*. Selanjutnya, jika baterai menggunakan mode *generator*, maka baterai akan mulai diisi ulang (*charge*). Tetapi untuk pengisian ulang pada baterai perlu dilihat SOC dari baterai. Jika baterai dalam keadaan penuh yaitu 100% SOC, maka baterai tidak akan di-charge, sebaliknya jika baterai belum penuh maka akan di-charge sampai penuh. Pengisian ulang baterai akan dihentikan apabila baterai sudah penuh. Parameter baterai yang digunakan pada simulasi ini seperti pada Tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Nilai Parameter Baterai

<b>Jenis Baterai: <i>Lithium-Ion</i></b>	
Parameter	Nilai
Tegangan <i>Full-Charge</i>	36.0836 V
Kapasitas	200 Ah
Tegangan <i>Cut-Off</i>	23.25 V
Tegangan Nominal	31 V
Kapasitas saat Tegangan Nominal	180.8696 Ah

### 3.6 Perancangan Keseluruhan Sistem

Pada perancangan keseluruhan sistem ini, dirangkai gabungan dari beberapa sistem yang telah dirancang sebelumnya. Rancangan simulasi generator DC, motor listrik DC, baterai dan lainnya dirangkai menjadi sebuah sistem manajemen daya dengan penggerak hibrida menggunakan mode *switching* yang ditentukan. Sistem yang diinginkan dari rancangan ini adalah sistem *switching* yang cocok pada wahana untuk meminimumkan suplai energi ke motor listrik DC dari baterai dan meminimumkan penggunaan BBM dari generator agar menjadi lebih efisien. Sistem ini memasukkan sistem mode dari wahana yaitu *silence*, *fullspeed* dan *generator* dan mengatur *switching* sistemnya agar dapat memenuhi misi yang diberikan pada wahana. Rancangan simulasi keseluruhan sistem ini ditunjukkan oleh Gambar 3.14 dan pada lampiran.



Rancangan tersebut terbagi menjadi 4 bagian besar yaitu generator DC, sistem penyimpanan energi (baterai), sistem mode dan misi, dan motor listrik DC. Generator bertindak sebagai suplai daya untuk motor listrik DC dan baterai, sistem penyimpanan energi merupakan sistem untuk menyimpan energi jika dalam keadaan tidak penuh, sistem mode dan misi merupakan sebuah sistem untuk mengatur kombinasi mode *switch* yang digunakan untuk memenuhi misi yang akan dikerjakan wahana dan motor listrik DC sebagai penggerak kapal.

Rancangan ini bertujuan untuk mengetahui respon tiap sistem dengan berbagai kombinasi *switch* dan untuk mengukur penggunaan daya pada sistem untuk memenuhi misi yang telah ditentukan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN ANALISA**

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil yang didapatkan dari pengujian simulasi sistem manajemen daya yang telah dirancang pada Bab 3 yaitu respon dan hasil simulasi generator DC menggunakan kontroler PID dan *gain scheduling* PID, motor listrik DC untuk menjadi kecepatan linier kapal, Sistem mode dan misi untuk wahana, Sistem penyimpanan energi (baterai).

#### **4.1 Gambaran Umum Pengujian Sistem**

Sebelum melakukan simulasi total sistem manajemen daya pada USV dengan penggerak *hybrid* ini, komponen yang telah dirancang sebelumnya harus dilakukan validasi atau pengujian terlebih dahulu. Tahapan pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Pengujian Model Generator DC  
Pengujian model ini dilakukan dengan memberikan input beban luar generator untuk masing-masing berupa representasi nilai input beban generator yaitu tanpa beban, beban motor listrik DC dan beban penuh untuk melihat respon keluaran generator berupa tegangan generator, kecepatan putar mesin bakar, arus medan pada generator dengan berdasarkan kecepatan mesin bakar referensi dan tegangan referensi yang telah ditentukan sebelumnya.
2. Pengujian Model Motor Listrik DC  
Pada pengujian ini dilakukan simulasi motor listrik DC yang telah dibuat sebelumnya dengan input berdasar nilai tegangan generator DC dan baterai untuk melihat hasil respon arus motor, kecepatan putar motor dan kecepatan linier kapal.
3. Pengujian Sistem Penyimpanan Energi  
Pada pengujian ini dilakukan simulasi sistem penyimpanan energi yang telah dibuat sebelumnya dengan input generator untuk *charging* baterai dan *discharging* baterai menggunakan beban motor listrik DC untuk melihat respon tegangan, arus dan *state of charge* dari baterai yang mana baterai merupakan komponen utama sistem ini.
4. Pengujian Sistem Mode dan Misi

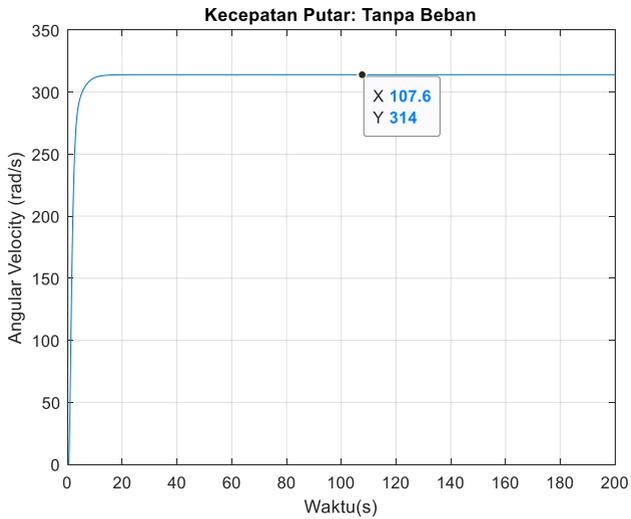
Pada pengujian ini dilakukan penentuan kombinasi mode mana yang sesuai dengan misi yang diberikan dan melakukan beberapa simulasi kombinasi *switching* tersebut untuk mengetahui apakah mode *switch* tersebut sudah cocok sesuai misi yang diberikan dengan melihat respon keluarannya berupa waktu tempuh dari jarak tempuh yang ditentukan dalam satu kali pengerjaan misi.

5. Pengujian Sistem Manajemen Daya

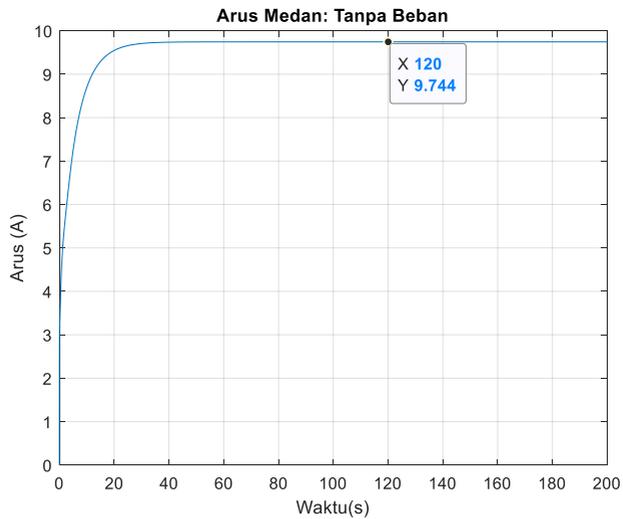
Setelah dilakukan validasi terhadap seluruh parameter yang dibutuhkan maka dilakukan simulasi total untuk sistem manajemen daya pada USV untuk melihat daya yang digunakan oleh keseluruhan sistem dengan menerapkan mode dan misi yang diberikan.

#### **4.2 Pengujian Model Generator DC**

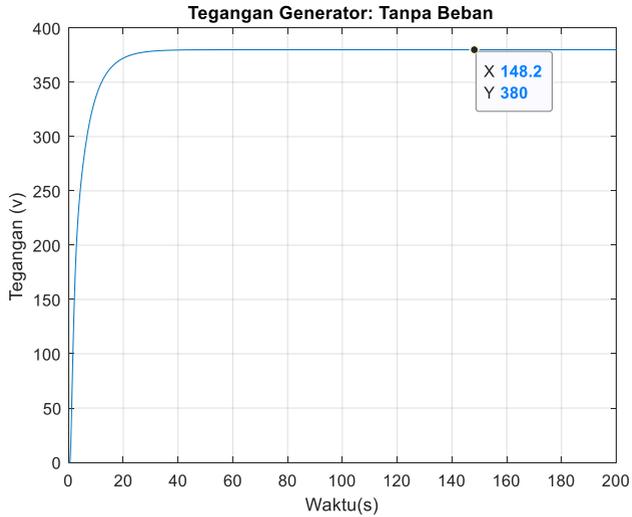
Pengujian model generator dilakukan dengan memberikan input beban luar generator berupa beban motor listrik DC, beban *charging* baterai atau tanpa beban untuk melihat respon keluaran dari generator yaitu tegangan generator DC. Pada pengujian pertama ini, dilakukan simulasi pada generator DC untuk melihat respon yang dihasilkan tanpa beban. Nilai kecepatan putar referensi adalah 314 rad/s dan tegangan keluaran referensi adalah 380 Volt. Hasil respon simulasi untuk model generator tanpa beban ini berupa tegangan keluaran generator, kecepatan putar mesin bakar, arus medan generator yang dapat dilihat pada Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3.



**Gambar 4.1** Kecepatan Putar Mesin Bakar tanpa Beban Luar

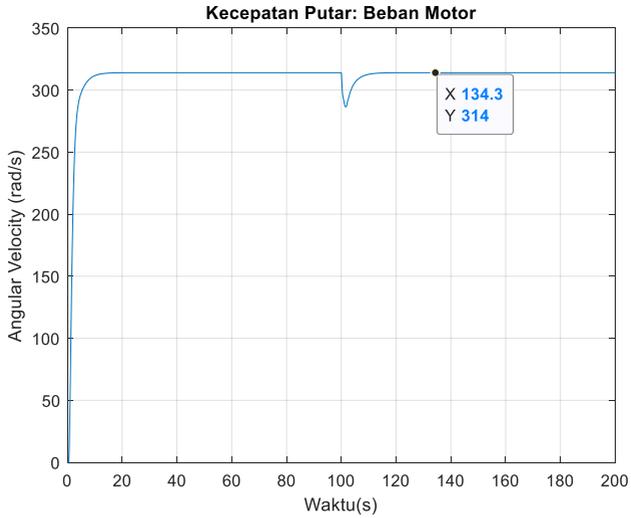


**Gambar 4.2** Arus Medan Generator tanpa Beban Luar

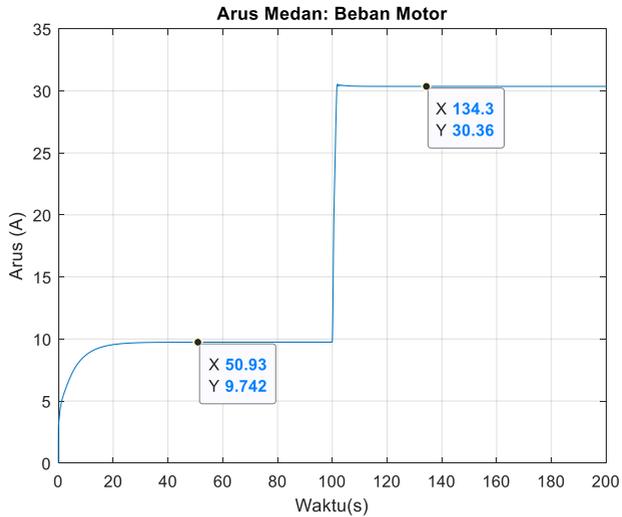


**Gambar 4.3** Tegangan Generator tanpa Beban Luar

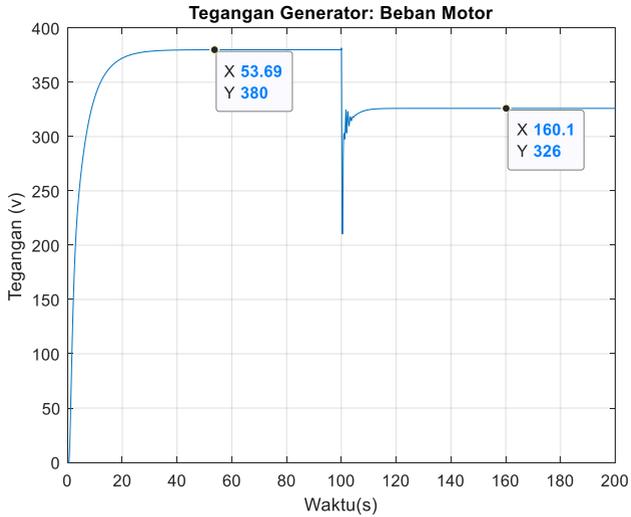
Gambar 4.1 sampai 4.3 menunjukkan hasil model generator jika belum diberikan beban luar. Terlihat bahwa respon keluaran ketiga gambar menuju nilai referensi yang telah ditentukan sebelumnya yaitu 314 rad/s untuk kecepatan putar, 380 V untuk tegangan keluaran generator. Selanjutnya model simulasi generator akan diberikan input beban luar berupa beban motor untuk mengetahui respon generator dalam mengatasi beban luar tersebut. Hasil respon model generator jika ditambah beban motor dapat dilihat pada Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6.



**Gambar 4.4** Kecepatan Putar Mesin Bakar dengan Beban Motor

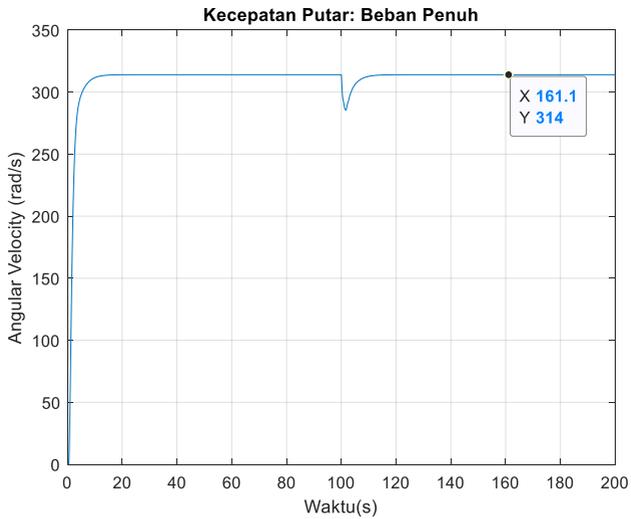


**Gambar 4.5** Arus Medan Generator dengan Beban Motor

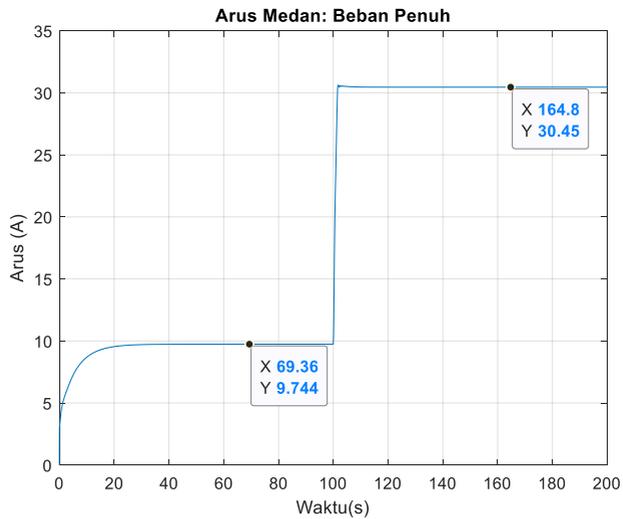


**Gambar 4.6** Tegangan Generator dengan Beban Motor

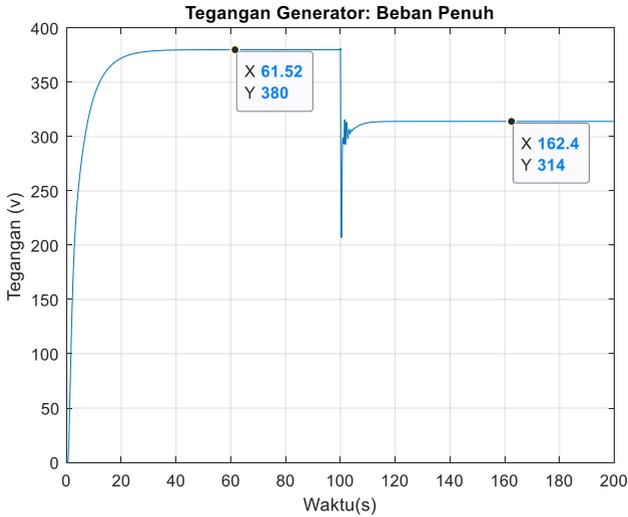
Gambar 4.4 sampai 4.6 menunjukkan hasil generator dengan ditambahkan beban motor listrik DC pada detik ke-100. Respon tersebut memperlihatkan bahwa kecepatan putaran mesin bakar akan mengalami penurunan sesaat karena ditambahkan beban motor DC secara tiba-tiba tetapi akan menuju kecepatan referensi. Penurunan kecepatan putaran ini diakibatkan adanya torsi lawan yang disebabkan oleh beban motor tersebut sehingga mengurangi torsi keluaran mesin bakar. Arus medan akan meningkat karena adanya beban motor karena beban ini menyebabkan *drop* tegangan pada generator. Arus medan harus bertambah untuk menjaga keluaran generator tetap sesuai referensi, tetapi karena beban motor yang dapat ditanggung oleh motor terlalu besar, maka terjadi *drop* tegangan menuju nilai 326 V.



**Gambar 4.7** Kecepatan Putar Mesin Bakar Beban Penuh



**Gambar 4.8** Arus Medan Generator Beban Penuh



**Gambar 4.9** Tegangan Generator Beban Penuh

Gambar 4.7 sampai 4.9 menunjukkan hasil simulasi model generator dengan beban penuh yaitu beban motor dan beban *charge* baterai. Respon yang didapat sama dengan gambar 4.4 sampai 4.6 menunjukkan bahwa kecepatan putar mesin bakar akan mengalami penurunan sesaat karena ditambahkan beban secara tiba-tiba tetapi akan menuju nilai referensinya. Arus medan akan bertambah seiring penambahan beban terhadap generator sampai menuju nilai arus medan maksimal. Arus medan bertahan dinilai tersebut sehingga mengakibatkan tegangan keluaran dari generator akan turun karena arus medan telah sampai dibatas atasnya.

Kontroler yang ada di dalam model simulasi ini sangat berpengaruh dalam respon yang dihasilkan. Ketika beban berubah, torsi lawan dan beban jangkar akan berubah dan akan menyebabkan turunnya tegangan keluaran generator. Kontroler akan mengembalikan nilai seperti keadaan awal sesuai dengan referensi yang telah ditentukan dan batas yang telah ditentukan.

Persamaan 2.9 dan 2.10 merupakan persamaan untuk menghitung tegangan keluaran generator dimana  $E_g$  adalah tegangan keluaran,  $E_{ggl}$  adalah tegangan ggl generator,  $\omega_r$  adalah kecepatan putar mesin bakar,  $I_f$

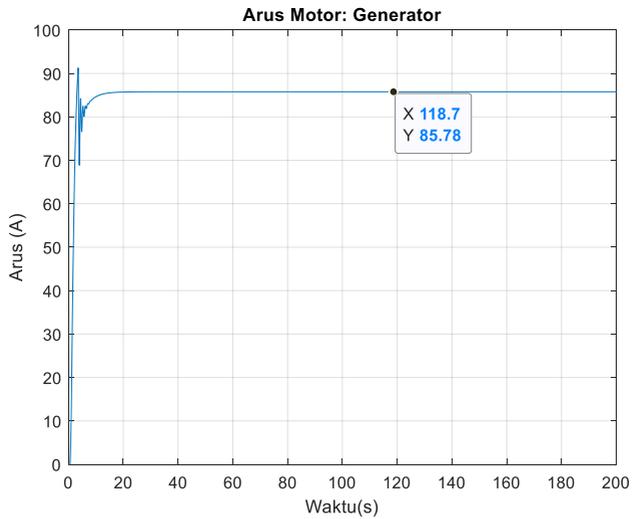
arus medan dan  $K_{ggl}$  adalah konstanta ggl.  $E_L$  merupakan tegangan beban berasal dari beban luar.

Pengujian tersebut sudah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya karena generator hanya dibutuhkan untuk menyuplai motor DC dan terjadi penurunan tegangan menuju 326V. Ketika generator juga menyuplai energi ke baterai, maka beban generator lebih besar dari beban yang dapat diatasinya sehingga terjadi penurunan tegangan keluaran generator menjadi 314 V.

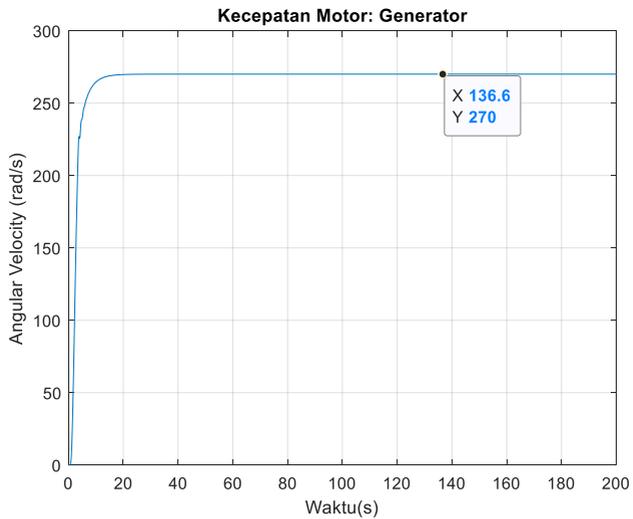
### **4.3 Pengujian Model Motor Listrik DC**

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai pengujian model motor listrik DC untuk melihat respon motor terhadap input dari nilai generator dan baterai. Respon yang perlu diperhatikan adalah kecepatan putar ( $\omega_m$ ) motor dan kecepatan linier ( $v$ ) kapal terhadap input yang diberikan.

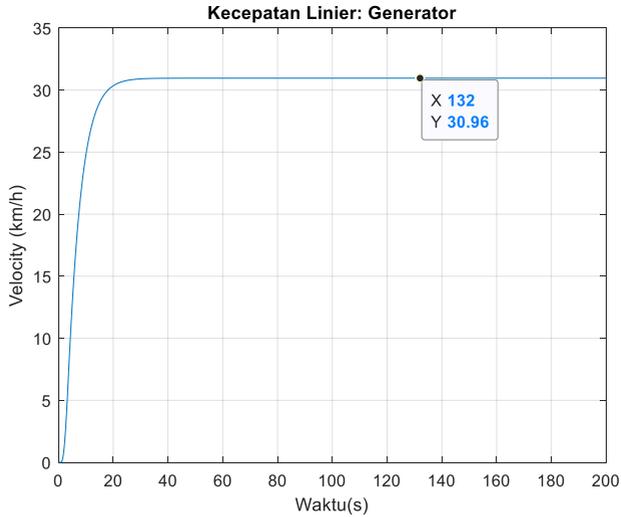
Pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal *step* sebagai representasi tegangan generator yang bernilai 326 Volt dan 182 Volt untuk tegangan yang berasal dari baterai. Dari hasil uji respon sistem untuk motor listrik DC, didapat nilai kecepatan putar sekitar 270 rad/s sedangkan kecepatan linier dari kapal adalah 30.96 km/h jika sumbernya berasal dari generator. Arus yang masuk ke motor untuk sumber berasal dari generator adalah sekitar 85.78 A. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat dari Gambar 4.10, 4.11 dan 4.12.



**Gambar 4.10** Arus Motor Sumber Generator



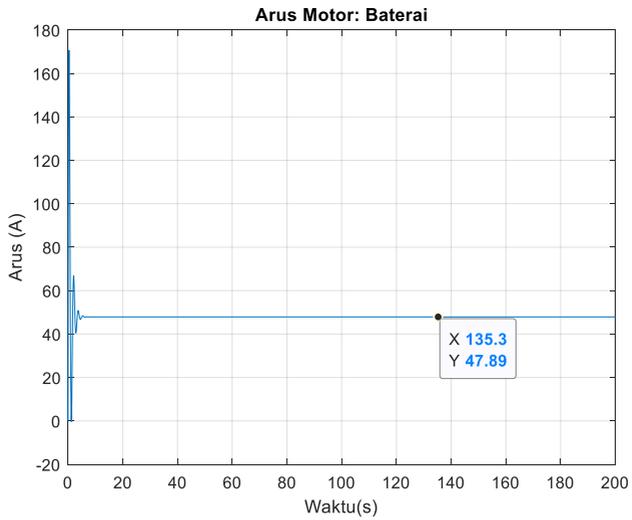
**Gambar 4.11** Kecepatan Putar Motor Sumber Generator



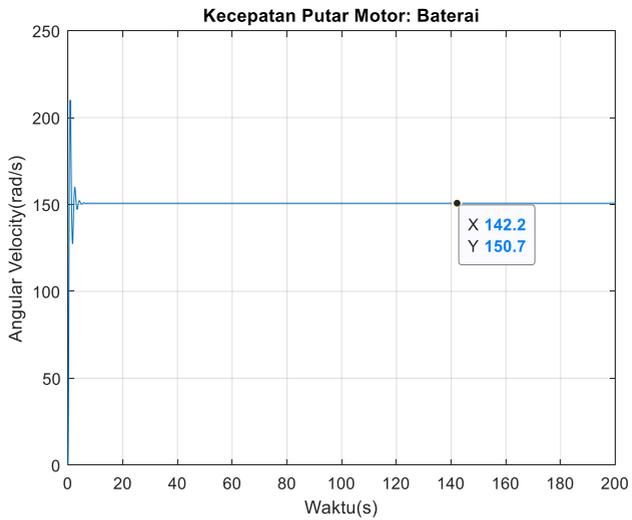
**Gambar 4.12** Kecepatan Linier Kapal Sumber Generator

Dari gambar 4.10 sampai 4.12 terlihat bahwa respon motor yang dihasilkan adalah arus motor, kecepatan putar motor dan kecepatan linier kapal terhadap input tegangan generator yang diberikan. Pada keadaan awal dengan sumber generator, respon arus motor akan besar karena merupakan arus *starting* motor tetapi ketika kecepatan motor sudah mulai konstan maka arus yang dipakai motor menjadi konstan sebesar 85.78 A. Untuk kecepatan putar motor akan menuju nilai 270 rad/s sedangkan kecepatan liniernya bernilai 30.96 km/h. Model motor listrik DC ini merupakan model motor *loop* terbuka tanpa ada pengaturan kecepatan motor hanya ada efek *back emf*.

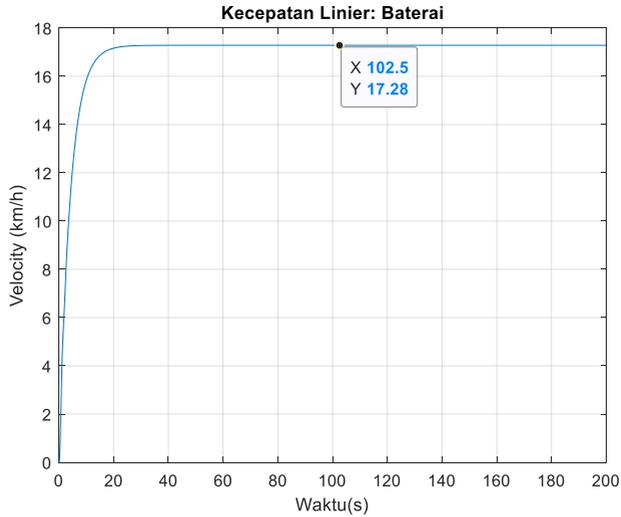
Hasil respon pengujian motor listrik DC dengan input *step* sebagai representasi tegangan baterai adalah seperti pada Gambar 4.13, 4.14 dan 4.15.



**Gambar 4.13** Arus Motor Sumber Baterai



**Gambar 4.14** Kecepatan Putar Motor Sumber Baterai



**Gambar 4.15** Kecepatan Linier Kapal Sumber Baterai

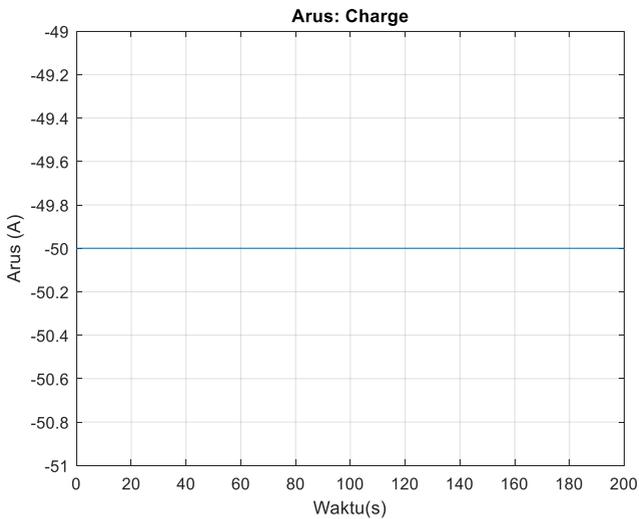
Gambar 4.13 sampai 4.15 menunjukkan hasil respon motor listrik DC dengan input *step* tegangan baterai yang dinaikkan menjadi 182 Volt. Respon tersebut menghasilkan arus motor konstan sekitar 47.89 A, kecepatan putar motor listrik DC sekitar 150.7 rad/s dan kecepatan linier kapal sekitar 17.28 km/h. Gambar 4.13, 4.14 dan 4.15 menunjukkan hasil grafik respon motor listrik DC arus motor, kecepatan putar motor dan kecepatan linier kapal secara berurutan.

Model motor listrik DC mempertimbangkan parameter kapal untuk menghasilkan kecepatan linier kapal seperti parameter konstanta *propeller* kapal, massa kapal dan damper kapal. Kecepatan linier kapal yang dihasilkan telah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Jika sumber motor listrik DC berasal dari generator maka akan menghasilkan kecepatan linier kapal normal yaitu sekitar 30.96 km/h sedangkan jika sumbernya berasal dari baterai akan menghasilkan kecepatan linier kapal yang rendah 17.28 km/h untuk manuver *silence* pada kapal tanpa awak.

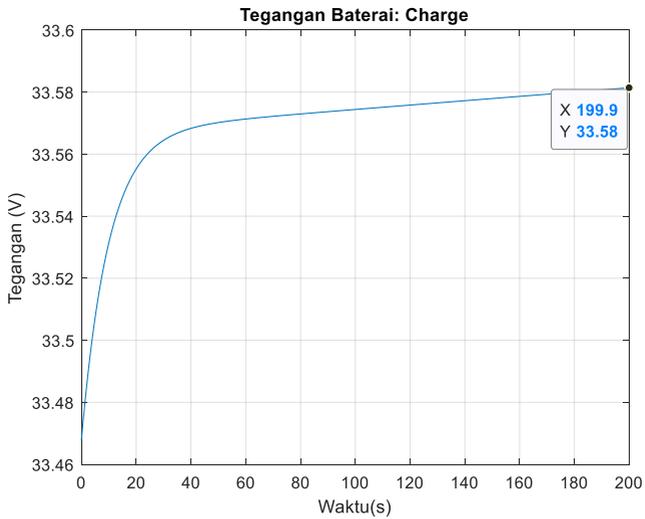
#### 4.4 Pengujian Sistem Penyimpanan Energi

Pada pengujian sistem penyimpanan energi dibuat sebuah simulasi sistem yang di dalamnya terdapat baterai sebagai komponen utama sistem penyimpanan energi. Uji coba pada sistem akan dilakukan dengan cara memberi input arus *charge* dan *discharge* pada baterai untuk mengetahui respon baterai terhadap pada *charge* dan *discharge* dalam bentuk *State of Charge (SOC)*, tegangan baterai dan arus baterai.

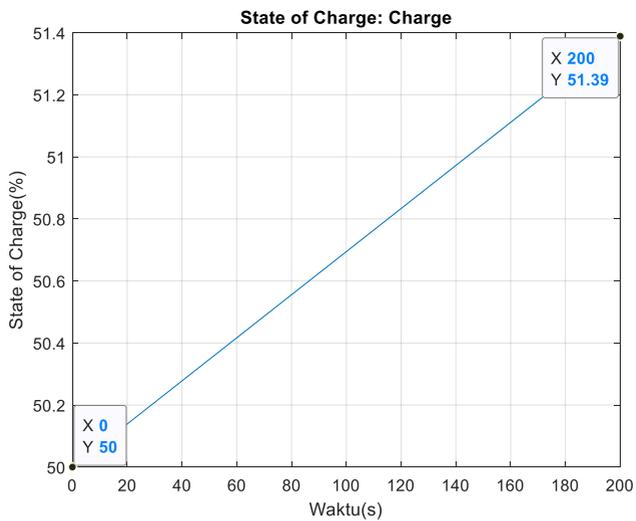
Respon *charge* baterai adalah ketika baterai mengalami pengisian ulang oleh generator. Nilai input arus yang diberikan ke baterai adalah sebesar 50A. Respon hasil *charge* baterai akan direpresentasikan pada Gambar 4.16, 4.17 dan 4.18.



Gambar 4.16 Arus Charging Baterai



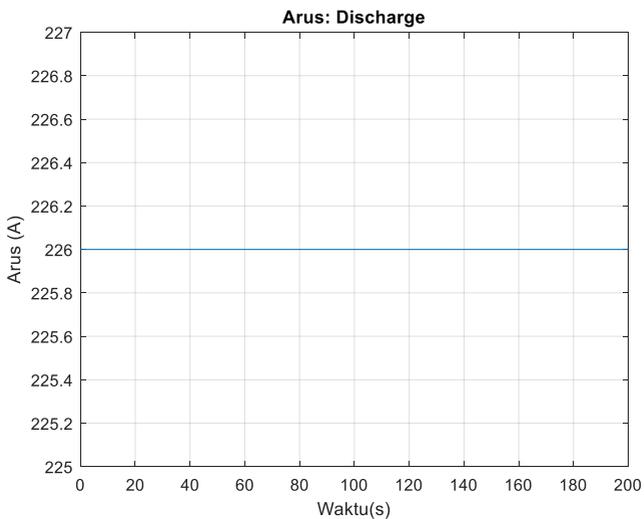
**Gambar 4.17** Tegangan Baterai saat *Charge*



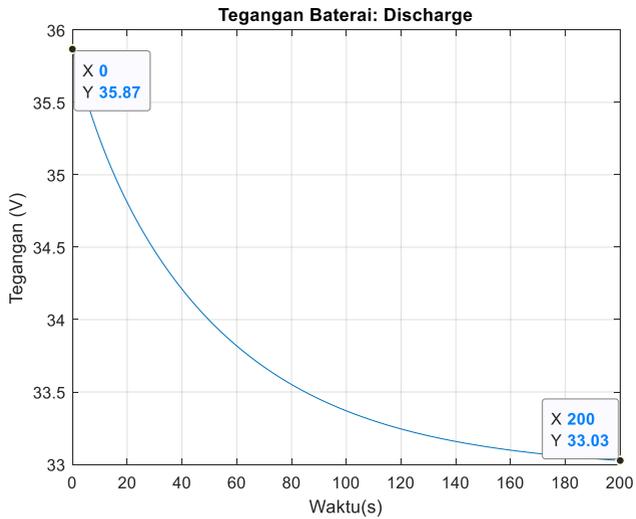
**Gambar 4.18** *State of Charge* Baterai saat *Charge*

Gambar 4.16 sampai 4.18 menunjukkan respon baterai pada sistem penyimpanan energi ketika baterai di-charge dengan arus 50A. Pada keadaan ini baterai akan menyimpan energi di dalamnya seperti yang ditampilkan oleh gambar grafik tersebut. Tegangan baterai bertambah dari 33.46 V menjadi 33.587 V dalam 200 detik. Pertambahan ini ternyata menambah daya dalam baterai sekitar 1.39% seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.18 mengenai *state of charge* baterai.

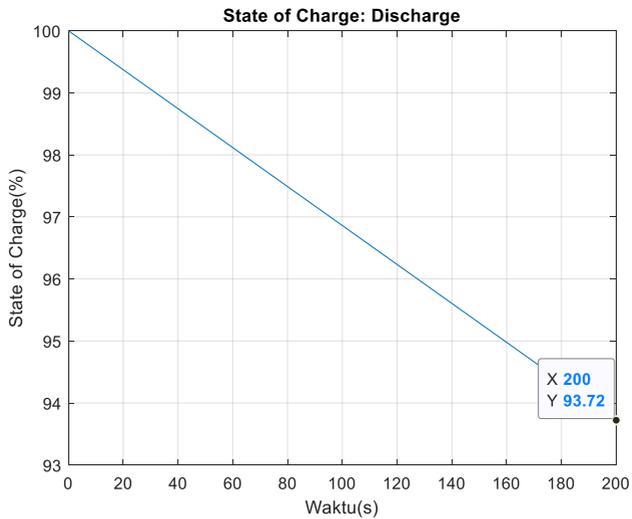
Hasil respon pengujian sistem penyimpanan energi pada keadaan *discharge* terhadap tegangan dan SOC baterai adalah seperti pada Gambar 4.19, 4.20 dan 4.21.



**Gambar 4.19** Arus *Discharge* Baterai



**Gambar 4.20** Tegangan Baterai saat *Discharge*



**Gambar 4.21** *State of Charge* Baterai saat *Discharge*

Arus *discharge* baterai ini diberikan senilai 226 A. Nilai arus *discharge* sekitar 226 A merupakan nilai *discharge* saat mode *fullspeed* yang direpresentasikan pada Gambar 4.19 dengan nilai arus positif yang berarti *discharge*. Respon yang dihasilkan oleh baterai adalah penurunan tegangan dari sekitar 35.87.2 V menuju 33.03 V. Respon *state of charge* adalah penurunan kapasitas baterai sekitar 6.28% dalam waktu 200 detik.

Pada saat *discharge* ini, baterai akan mengeluarkan energi di dalamnya menuju motor listrik DC sehingga energi yang dikandungnya akan berkurang. Sebaliknya, ketika *charge* baterai akan menyimpan energi. Parameter baterai pada simulasi ini sesuai dengan parameter yang telah dibuat yaitu kapasitas 200Ah dengan nilai tegangan maksimal sekitar 36 Volt. Nilai 200Ah berarti baterai akan kosong jika arus *discharge* 200A dalam 1 jam. Respon yang diperlihatkan sistem ini sesuai dengan keadaan baterai yaitu ketika baterai di-*charge* dengan arus 50A, kenaikan kapasitas dalam baterai sekitar 1.39% dalam 200 detik dan *discharge* pada arus 226A menurunkan kapasitas baterai sekitar 6.28% dalam 200 detik

#### **4.5 Pengujian Sistem Mode dan Misi**

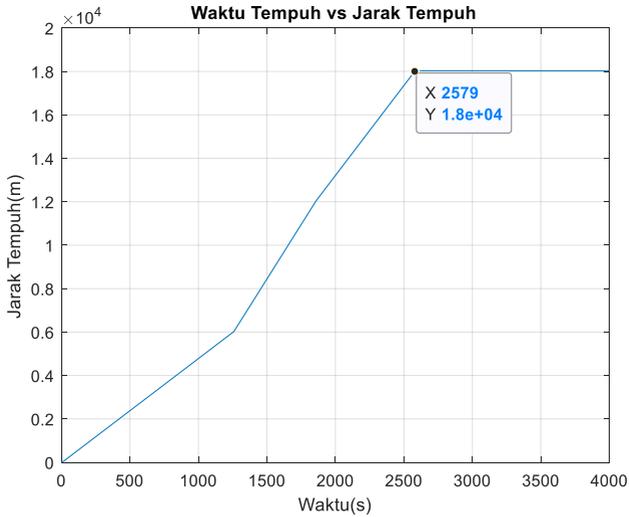
Pada sub bab ini dilakukan simulasi untuk menguji kombinasi mode *switch* terhadap misi yang telah ditentukan sebelumnya. Mode dan misi ini adalah suatu rancangan simulasi yang mengatur wahana untuk mengerjakan misi yang telah direncanakan dengan mengatur mode yang digunakan berupa tegangan yang masuk ke blok motor listrik DC. Pada simulasi ini dilakukan pengujian dengan memberikan nilai input kombinasi *switch* mode yang telah dibuat sebelumnya dan mengamati output nya berupa waktu tempuh wahana dengan jarak yang ditentukan sebesar 18 km (18.000 m).

Pada tahap pertama, dilakukan penentuan semua kombinasi *switch* yang ada pada wahana ini. Hasil rancangan penentuan semua kombinasi ini akan diperlihatkan pada Tabel 4.1. Penentuan keberhasilan misi adalah jika wahana dapat bergerak sejauh 18000 m dengan waktu kurang dari 2600 detik.

**Tabel 4.1** Kombinasi *Switch* mode pada kapal tanpa awak

No.	SWITCH	Waktu	Status
1	111	3751	0
2	112	3101	0
3	113	3225	0
4	121	3101	0
5	122	2450	1
6	123	2575	1
7	131	3224	0
8	132	2575	1
9	133	2699	0
10	211	3099	0
11	212	2449	1
12	213	2574	1
13	221	2449	1
14	222	1801	1
15	223	1925	1
16	231	2574	1
17	232	1925	1
18	233	2049	1
19	311	3198	0
20	312	2548	1
21	313	2673	0
22	321	2548	1
23	322	1898	1
24	323	2023	1
25	331	2645	0
26	332	1996	1
27	333	2094	1

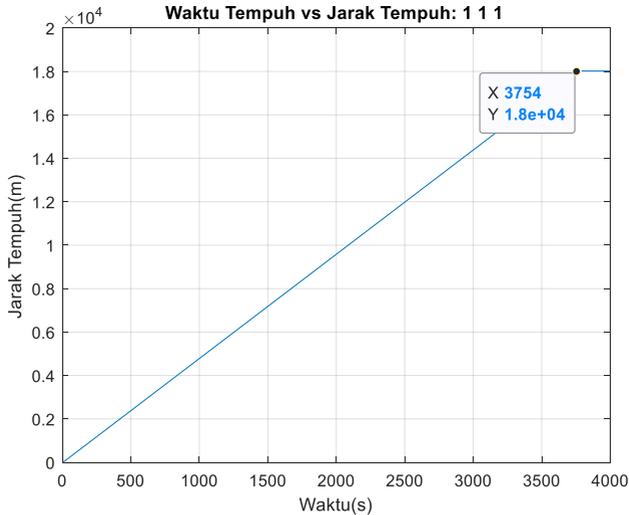
Dari data pada Tabel 4.1, kombinasi pertama yang akan dicoba adalah kombinasi *switch* mode 1,2 dan 3 yaitu pertama manuver tanpa suara yang hanya menggunakan baterai sebagai sumber tenaganya, kedua *fullspeed* dan ketiga menggunakan sumber generator. Hasil respon waktu tempuh terhadap jarak tempuh untuk motor listrik DC seperti pada Gambar 4.22.



**Gambar 4.22** Respon Waktu tempuh Kombinasi mode *switch* 1, 2 dan 3

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa dengan kombinasi mode *switch* 1,2 dan 3 wahana akan menempuh jarak 18 km dengan waktu tempuh 2579 s. Dari kriteria misi yang diberikan, kombinasi ini sudah berhasil melakukan misi tersebut. Jika dibandingkan dengan Tabel 4.1, waktu tempuh wahana hampir sama yaitu 2575 s yang berasal dari Tabel 4.1 dan 2579 s untuk percobaan simulasi pada model sistem

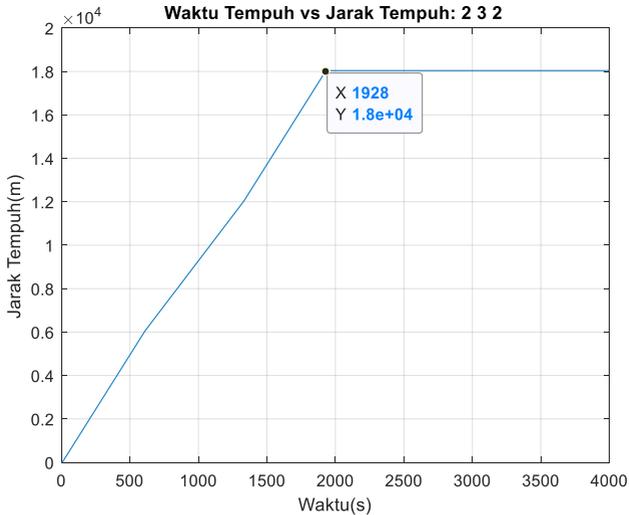
Kombinasi *Switch* kedua adalah 1,1 dan 1 yang mana wahana akan melakukan manuver dengan kecepatan rendah selama pengerjaan misi yang diberikan. Simulasi ini dilakukan untuk melihat respon yang gagal mencapai misi. Hasil respon waktu tempuh terhadap jarak tempuh yang ditentukan seperti pada Gambar 4.23.



**Gambar 4.23** Respon Waktu tempuh Kombinasi *switch* mode 1, 1 dan 1

Gambar 4.23 menunjukkan respon wahana jika menggunakan kombinasi mode *switch* 1,1 dan 1. Dilihat dari respon yang dihasilkan, didapat waktu tempuh sebesar 3754 s untuk mencapai 18 km. Jika dibandingkan dengan Tabel 4.1, hasil yang didapat hampir sama yaitu 3751 s yang berasal dari Tabel 4.1 dan 3754 s untuk percobaan simulasi pada model sistem.

Kombinasi *switch* ketiga adalah 2,3 dan 2 yang artinya kapal akan berjalan dengan mode *fullspeed* pada bagian pertama, dengan mode *generator* pada bagian kedua dan dengan mode *fullspeed* pada bagian terakhir. Hasil respon waktu tempuh terhadap jarak tempuh seperti pada Gambar 4.24.



**Gambar 4.24** Respon Waktu tempuh Kombinasi *switch* mode 2,3 dan 2

Gambar 4.24 menunjukkan respon wahana jika menggunakan kombinasi mode *switch* 2,3 dan 2. Dilihat dari hasil respon waktu yang dihasilkan, didapat waktu tempuh wahana sebesar 1928 s untuk mencapai jarak tempuh 18 km. Jika dibandingkan dengan hasil pada Tabel 4.1, hasil yang didapat hampir sama yaitu 1925 s yang berasal dari Tabel 4.1 dan 1928 dari hasil simulasi pada model sistem.

Hasil pengujian tersebut digunakan untuk mengetahui seberapa besar waktu yang diperlukan wahana dalam mengerjakan misi yang telah diberikan yaitu jarak tempuh 18000 m. Pada kombinasi *switch* mode 123, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai jarak 18 km adalah sebesar 2579s. Pada kombinasi *switch* mode 111, waktu yang dibutuhkan adalah 3754 s dan pada kombinasi *switch* mode 232, waktu tempuh yang diperlukan untuk berjalan sepanjang 18km adalah 1928 s. Jika dibandingkan dengan Tabel 4.1 yang merupakan penentuan kombinasi *switch* mode yang cocok terhadap misi yang dijalankan, maka hasil yang diberikan bisa dikatakan sama.

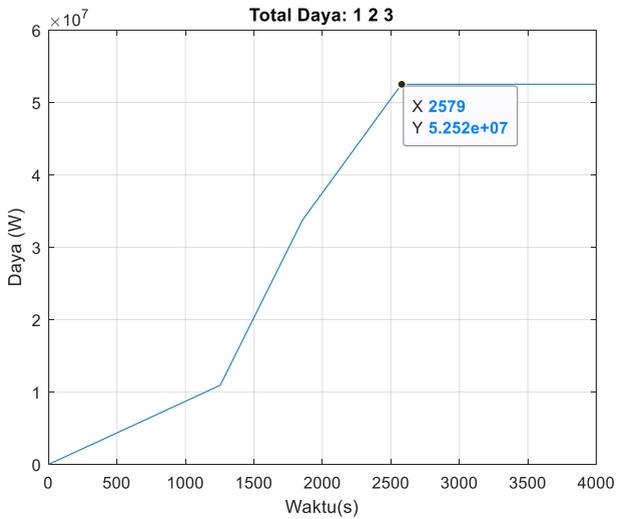
#### 4.6 Pengujian Sistem Manajemen Daya

Pada pengujian ini, dilakukan simulasi total dari sistem manajemen daya pada USV untuk melihat respon kecepatan linier kapal, daya motor dan kombinasi *switch* mode yang meminimalkan nilai penggunaan daya. Pengujian ini meliputi sistem pembangkitan energi dari generator, sistem penyimpanan tenaga oleh baterai, sistem mode dan misi untuk mengatur misi wahana dalam bentuk jarak tempuh dan sistem motor listrik DC. Respon yang akan diamati adalah daya pada motor, kombinasi *switch* mode yang dijalankan dan kecepatan linier kapal serta jarak tempuh wahana ketika misi dijalankan dalam satu waktu. Hasil penentuan kombinasi *switch* mode pada wahana akan ditunjukkan oleh Tabel 4.2 beserta jumlah penggunaan dayanya. Hasil respon kombinasi *switch* mode 1,2 dan 3 dalam bentuk penggunaan daya, kecepatan linier kapal, dan jarak tempuh wahana ditunjukkan pada Gambar 4.25, 4.26, dan 4.27.

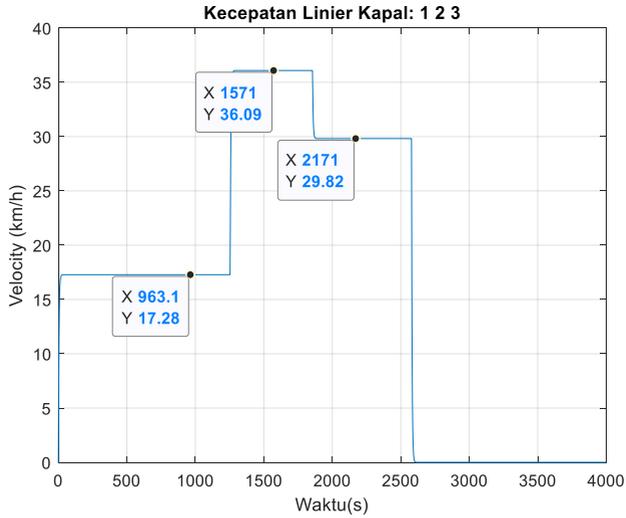
**Tabel 4.2** Kombinasi *Switch* untuk Penentuan Misi dan Daya Minimum

No	<i>Switch</i>	Daya	Waktu	Status	Baterai	Daya per satuan waktu
1	111	32693716	3751	0	-6773716	8716
2	112	44598716	3101	0	-757916	14382.04321
3	113	39281144	3225	0	5424484	12180.19969
4	121	44598716	3101	0	-757916	14382.04321
5	122	56495000	2450	1	5266600	23059.18367
6	123	51201575	2575	1	11450800	19884.1068
7	131	39287859	3224	0	5443716	12186.06048
8	132	51201575	2575	1	11450800	19884.1068
9	133	45884003	2699	0	17633200	17000.37162
10	211	44610568	3099	0	-739900	14395.1494
11	212	56515568	2449	1	5275900	23076.99796
12	213	51222143	2574	1	11460100	19899.82246
13	221	56515568	2449	1	5275900	23076.99796
14	222	68438000	1801	1	11274268	38000
15	223	63120428	1925	1	17456668	32789.83273

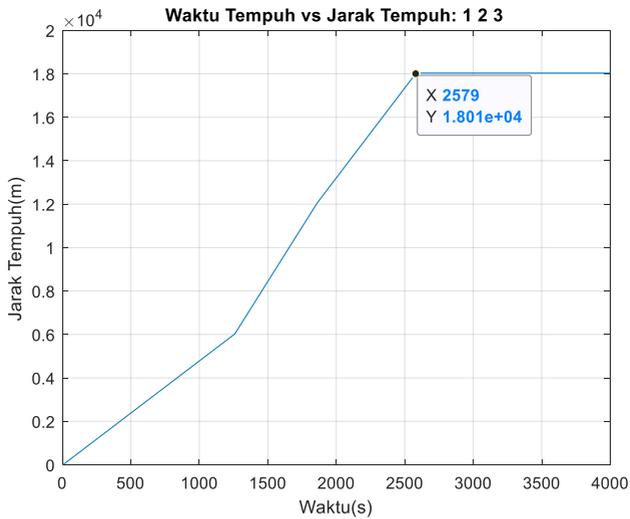
16	231	51206712	2574	1	11449584	19893.82751
17	232	63120428	1925	1	17456668	32789.83273
18	233	57802856	2049	1	23639068	28210.27623
19	311	41309570	3198	0	4130000	12917.31395
20	312	53214570	2548	1	10145800	20884.83909
21	313	47921145	2673	0	16330000	17927.85073
22	321	53214570	2548	1	10145800	20884.83909
23	322	65119570	1898	1	16161600	34309.57323
24	323	59826145	2023	1	22345800	29572.98319
25	331	49925424	2645	0	15033716	18875.3966
26	332	61839140	1996	1	21040800	30981.53307
27	333	58558710	2094	1	25920000	27965



**Gambar 4.25** Respon Total Penggunaan Daya Kombinasi *Switch* 1,2,3



**Gambar 4.26** Respon Kecepatan Linier Kapal Kombinasi *Switch* 1,2,3



**Gambar 4.27** Respon Jarak Tempuh terhadap Waktu *switch* 1,2,3

Tabel 4.2 merupakan tabel yang berisi kombinasi mode *switch* yang dapat dilakukan oleh wahana dilengkapi dengan nilai penggunaan daya, status pengerjaan misi, waktu tempuh, sisa daya baterai dan daya per satuan waktu. Tabel tersebut digunakan untuk memilih kombinasi mode *switch* mana yang dapat memenuhi misi yang diberikan dan menggunakan daya paling minimum. Dari tabel didapat bahwa kombinasi *switch* 123 dan 132 merupakan kombinasi yang paling minimum dari 27 kemungkinan tersebut.

Gambar 4.25 merupakan hasil respon jumlah penggunaan daya dalam satu kali pengerjaan misi yaitu dengan jarak 18000 m dibagi menjadi 3 bagian per 6000 m. Jumlah daya yang dipakai selama pengerjaan misi tersebut adalah sebesar 52.522 kW. Gambar 4.26 merupakan kecepatan linier kapal terhadap kombinasi mode *switch* yang diberikan, yaitu 1 dan 3 berupa mode *silence*, *fullspeed* dan *generator*. Gambar 4.26 ini memperlihatkan respon kecepatan linier kapal setiap mode yang diberikan dimana pada bagian pertama dengan kecepatan 17.28 km/h, bagian kedua 36 km/h dan bagian ketiga 29.82 km/h. Gambar 4.27 merupakan respon hasil jarak tempuh wahana dimana misi tersebut akan selesai jika mencapai jarak 18000 m tersebut. Terlihat bahwa misi selesai pada jarak 18000 m dengan waktu 2800 s.

Tabel 4.2 merupakan tabel yang berisi nilai-nilai yang berasal program penentuan kombinasi mode *switch* wahana. Jika semua kombinasi tersebut dicoba pada model sistem yang dibuat, maka hasilnya akan ditampilkan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Uji Manual Kombinasi Mode *Switch* pada Sistem

No	Switch	Daya	waktu
1	111	32715552	3754
2	112	40906982	3005
3	113	40656881	3231
4	121	44605321	3101
5	122	56495404	2454
6	123	52525524	2579

<b>7</b>	<b>131</b>	40630676	3228
<b>8</b>	<b>132</b>	52533987	2580
<b>9</b>	<b>133</b>	48558191	2705
<b>10</b>	<b>211</b>	43923784	3019
<b>11</b>	<b>212</b>	56544152	2451
<b>12</b>	<b>213</b>	52556403	2577
<b>13</b>	<b>221</b>	56465854	2449
<b>14</b>	<b>222</b>	68355937	1802
<b>15</b>	<b>223</b>	64386059	1927
<b>16</b>	<b>231</b>	52509075	2576
<b>17</b>	<b>232</b>	64412385	1928
<b>18</b>	<b>233</b>	60436589	2053
<b>19</b>	<b>311</b>	41358506	3202
<b>20</b>	<b>312</b>	53287582	2553
<b>21</b>	<b>313</b>	49299835	2679
<b>22</b>	<b>321</b>	53220138	2550
<b>23</b>	<b>322</b>	65110221	1903
<b>24</b>	<b>323</b>	61140344	2028
<b>25</b>	<b>331</b>	49977651	2650
<b>26</b>	<b>332</b>	61878585	2002
<b>27</b>	<b>333</b>	58625379	2101

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

Pada bab ini akan dibahas mengenai kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil pengujian dari perancangan sistem manajemen daya pada USV dengan penggerak *hybrid*, serta saran dan pengembangan kedepannya.

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi rancangan sistem manajemen daya pada USV yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengujian pada model rancangan generator sederhana dalam model ini sudah berjalan dengan baik, ditandai dengan pengujian generator pada saat tanpa beban, dengan beban motor dan beban penuh (motor dan *charge* baterai) dimana hasil dari kecepatan putar mesin bakar dan tegangan keluaran generator selalu menuju nilai referensinya yaitu 314 rad/s dan nilai arus medan yang selalu bertambah seiring meningkatnya beban untuk mengatasi *drop* tegangan kecuali telah mencapai batas maksimal arus medannya yaitu 30.45 A serta tegangan keluaran yang diinginkan telah sesuai pada saat tanpa beban 380 V, beban motor 326 V dan pada beban penuh 314 V.
2. Pengujian pada model motor listrik DC untuk menghasilkan keluaran kecepatan linier kapal sudah berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Hal ini ditandai dengan penyesuaian kecepatan putar motor terhadap tegangan input yang diberikan yaitu jika sumber berasal dari generator menghasilkan 270 rad/s, sumber baterai 150.7 rad/s dan kedua sumber 314 rad/s serta kecepatan linier kapal yaitu jika sumber berasal dari generator kecepatan linier kapal adalah 30.96 km/h, sumber dari baterai akan menghasilkan kecepatan 17.28 km/h dan sumber penuh menghasilkan kecepatan 36 km/h.
3. Mode yang dilakukan wahana kapal tanpa awak sudah sesuai dengan apa yang direncanakan yaitu mode *silence*, *fullspeed*

dan *generator*, dan penentuan kombinasi *switch* yang memenuhi misi yang diberikan telah sesuai dengan tes yang diberikan pada simulasi sistem. Keberhasilan rencana kombinasi mode *switch* ini ditandai dengan respon wahana dalam menempuh misi dengan jarak 18 km apakah bisa dengan waktu dibawah 2600 s atau tidak yang diketahui dari status akhir.

4. Sistem Manajemen Daya ini dikatakan berjalan baik karena pada percobaan penentuan kombinasi mode *switch* didapat nilai penggunaan daya minimum dan keberhasilan misi serta nilai tersebut dibandingkan dengan nilai hasil simulasi pada model sistem dimana nilai akhir dari waktu dan penggunaan daya hampir sama yaitu sekitar 2579 s dengan penggunaan daya 52522 kW dengan kombinasi mode *switch* 1,2 dan 3. Perbandingan juga dapat dilihat pada tabel 4.2 yang berasal dari penentuan kombinasi mode *switch* dari program dan tabel 4.3 dari tes manual dengan model sistem. Hasil yang didapat berguna untuk mengetahui dan menentukan kombinasi sumber mana yang paling minimum dalam penggunaan daya.

## 5.2 Saran

Untuk pengembangan selanjutnya dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran antara lain:

1. Perancangan model simulasi sistem penyimpanan energi menggunakan model matematika untuk mengetahui sifat-sifat baterai secara mendalam.
2. Simulasi penentuan kombinasi mode *switching* dapat menggunakan metode lain yang lebih mudah, simpel dan lebih mudah dipahami serta ringkas.
3. Perancangan model simulasi generator dan motor listrik DC yang lebih kompleks untuk mendapatkan respon yang lebih baik dan mencerminkan sifat-sifat aslinya.
4. Pemberian nilai parameter yang sesuai dengan keadaan sebenarnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Department of The Navy United States of America, "THE NAVY UNMANNED SURFACE VEHICLE (USV) MASTER PLAN," 23 July 2007. [Online]. Available: <https://www.navy.mil/navydata/technology/usvmppr.pdf>. [Accessed 6 February 2019].
- [2] Liu, Zhixiang; Zhang, Youmin; Yu, Xiang; Yuan, Chi, "Unmanned Surface Vehicle: An Overview of Developments and Challenges," Annual Reviews, Montreal, Canada, 2019.
- [3] Y. Du, J. Gao, L. Yu, J. Song, F. Zhao and W. Zhan, "HEV System Based on Electric Variable Transmission," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Beijing, 2009.
- [4] F. Hamada, "Pengaturan Kecepatan pada SIMulator Parallel Hybrid Electric Vehicle Menggunakan Metode PID - Linear Quadratic Regulator," Jurusan Teknik Elektro, Surabaya, 2015.
- [5] D. Pal, "An Introduction to DC Generator Using MATLAB/SIMULINK," *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, vol. 2, no. 4, pp. 935-938, 2016.
- [6] A. A. Mahfouz, M. M. K. and F. A. Salem, "Modeling, Simulation and Dynamics Analysis Issues of Electric Motor, for Mechatronics Applications, Using Different Approaches and Verification by MATLAB/SIMULINK," *International Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 39-57, 2013.
- [7] R. A. Huggins, *Energy Storage*, New York: Springer US, 2010.
- [8] G. A. Pangemanan, "Kajian Eksperimen Discharge Test pada Baterai 12V yang Dihubungkan dengan Motor DC Feedback Tipe No. 63-110 Di Laboratorium Listrik dan Otomasi Kapal," Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Surabaya, 2017.
- [9] K. J. Astroom and R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2010.

- [10] G. S. Putra, "Perancangan Kontrol Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Sliding Mode Berbasis PID," Jurusan Teknik Elektro, Surabaya, 2016.
- [11] W. K. Chen, *The Electrical Engineering Handbook*, Academic Press, 2004.
- [12] P. Singh and A. Nallanchakravarthula, "Fuzzy Logic Modelling of Unmanned Surface Vehicle (USV) Hybrid Power System," in *Intelligent Systems Application of Power Systems*, Arlington, 2005.
- [13] T. v. Keulen, B. d. Jager, J. Kessels and M. Steinbuch, "Energy Management in Hybrid Electric Vehicles: Benefit of Prediction," in *International Symposium on Advance in Automative Control (AAC)*, Munich, 2010.



```

clear pbatc pbatd pgen l u Status dayabat;
delt=1;
a=0; c=0; s=0; tt=0;
Vmin=4.8; Vmax=10; Vnom=8.6; Vchr=8.283;
dayabat=25920000;
delpgen=27965; delpbatc=1800; delpbatd=8716;
delpbatdfull=8132; delpgenfull=29868; delpgenchr=25947;
for i=1:3
    for j=1:3
        for k=1:3
            a=a+1;
            s=0; tt(1,a)=0; dayabat(1,a)=25920000;
            while s<=6000
                c=c+1;
                if (i==1)
                    tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                    s=s+Vmin*delt;
                    pbatd(c,a)=delpbatd*delt;
                    pbatc(c,a)=zeros;
                    pgen(c,a)=zeros;
                    dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                    elseif (i==2)
                        tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                        s=s+Vmax*delt;
                        pbatd(c,a)=delpbatdfull*delt;
                        pbatc(c,a)=zeros;
                        pgen(c,a)=delpgenfull*delt;
                        dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                    elseif (i==3)
                        tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                        s=s+Vnom*delt;
                        pbatd(c,a)=zeros;
                        pbatc(c,a)=zeros;
                        pgen(c,a)=delpgen*delt;
                        dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                    end
                end
                while (s>6000 && s<=12000)
                    c=c+1;
                    if (j==1)
                        tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                        s=s+Vmin*delt;
                        pbatd(c,a)=delpbatd*delt;
                        pbatc(c,a)=zeros;
                        pgen(c,a)=zeros;

```

```

        dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
        elseif (j==2)
            tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
            s=s+Vmax*delt;
            pbatd(c,a)=delpbatdfull*delt;
            pbatc(c,a)=zeros;
            pgen(c,a)=delpgenfull*delt;
            dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
        elseif (j==3)
            if (i<3)
                if (dayabat<25920000)
                    tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                    s=s+Vchr*delt;
                    pbatd(c,a)=zeros;
                    pbatc(c,a)=delpbatc*delt;
                    pgen(c,a)=delpgenchr*delt;
                    dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                elseif (dayabat>=25920000)
                    tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                    s=s+Vnom*delt;
                    pbatd(c,a)=zeros;
                    pbatc(c,a)=zeros;
                    pgen(c,a)=delpgen*delt;
                    dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                end
            elseif (i==3)
                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                s=s+Vnom*delt;
                pbatd(c,a)=zeros;
                pbatc(c,a)=zeros;
                pgen(c,a)=delpgen*delt;
                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
            end
        end
    end
while (s>12000 && s<=18000)
    c=c+1;
    if (k==1)
        tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
        s=s+Vmin*delt;
        pbatd(c,a)=delpbatd*delt;
        pbatc(c,a)=zeros;
        pgen(c,a)=zeros;
    end
end

```

```

                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                elseif (k==2)
%                                c=c+1;
                                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                s=s+Vmax*delt;
                                pbatd(c,a)=delpbatdfull*delt;
                                pbatc(c,a)=zeros;
                                pgen(c,a)=delpgenfull*delt;
                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                elseif (k==3)
                                if (j<3)
                                if (dayabat<25920000)
                                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                s=s+Vchr*delt;
                                pbatd(c,a)=zeros;
                                pbatc(c,a)=delpbatc*delt;
                                pgen(c,a)=delpgenchr*delt;
                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                elseif (dayabat>=25920000)
                                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                s=s+Vnom*delt;
                                pbatd(c,a)=zeros;
                                pbatc(c,a)=zeros;
                                pgen(c,a)=delpgen*delt;
                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                end
                                elseif (j==3)
                                if (i<3)
                                if (dayabat<25920000)
                                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                s=s+Vchr*delt;
                                pbatd(c,a)=zeros;
                                pbatc(c,a)=delpbatc*delt;
                                pgen(c,a)=delpgenchr*delt;
                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                elseif (dayabat>=25920000)
                                tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                s=s+Vnom*delt;
                                pbatd(c,a)=zeros;
                                pbatc(c,a)=zeros;
                                pgen(c,a)=delpgen*delt;
                                dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);

```

```

                                end
                                elseif (i==3)
                                    tt(1,a)=tt(1,a)+delt;
                                    s=s+Vnom*delt;
                                    pbatd(c,a)=zeros;
                                    pbatc(c,a)=zeros;
                                    pgen(c,a)=delpgen*delt;
                                    dayabat(1,a)=dayabat(1,a)-
pbatd(c,a)+pbatc(c,a);
                                end
                                end
                                end
                                end
                                if (tt(1,a)<=2600)
                                    Status(1,a)=1;
                                elseif (tt(1,a)>2600)
                                    Status(1,a)=0;
                                end
                                end
                                end
                                end
                                l=pgen+pbatd-pbatc;
                                m=pgen+pbatd;
                                u(1,:)=sum(l(:, :));
                                v(1,:)=sum(m(:, :));

```

**Gambar 2** Source Code Penentuan Kombinasi Mode Switch Wahana

**Keterangan:**

- Pgen = Daya Generator
- Pbatd = Daya Discharge Baterai
- Pbatc = Daya Charge Baterai
- Status = Status Keberhasilan Misi
- U = Daya Total
- Dayabat = Sisa Daya Baterai
- Delpgen = Penggunaan Daya Generator per satuan waktu
- Delpbatd= Discharge Daya Baterai per satuan waktu
- Delpbatc= Charge Daya Baterai per satuan waktu
- Delt = Satuan Waktu
- tt = Total Waktu
- a = Urutan Kombinasi Switch
- s = Jarak Tempuh



## BIOGRAFI PENULIS



**Muhammad Ariebsalam**, lahir di Banjarmasin pada tanggal 8 Oktober 1997. Penulis merupakan putra ketiga dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di TK Tarbiyatul Athfal dari 2002. Kemudian dilanjutkan memasuki MIN Kertak Hanyar II pada tahun 2003. Tahun 2009 penulis melanjutkan pendidikan di MTsN Banjar Selatan I dan selanjutnya melanjutkan pendidikan di SMAN Banua Kalsel BBS pada tahun 2012. Pada tahun 2015 penulis mulai memasuki jenjang perkuliahan dengan berkuliah di Departemen Teknik Elektro program S1, di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, dengan mengambil Program Studi Teknik Sistem Pengaturan. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui surat elektronik pada alamat email [ariebsalam@gmail.com](mailto:ariebsalam@gmail.com)