

**SKRIPSI**

***STATE OF CHARGE (SOC) UNTUK BATTERY  
MANAGEMENT SYSTEM (BMS) MELALUI KALMAN FILTER***



**NUR AZIZAH**

**12610017**

**PROGRAM STUDI MATEMATIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA**

**2017**



## **SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR**

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp :

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

*Assalamu'alaikum wr. wb.*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Nur Azizah

NIM : 12610017

Judul Skripsi : *State Of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) Melalui Kalman Filter*

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Matematika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Matematika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

*Wassalamu'alaikum wr. wb.*

Yogyakarta, 17 Februari 2017

Pembimbing

Dr. Muhammad Wakhid Mustofa, M.Si  
NIP: 19800402 200501 1 003



**PENGESAHAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR**

Nomor : B- 692/Un.02/DST/PP.05.3/03/ 2017

Skripsi/Tugas Akhir dengan judul : *State of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) melalui Kalman Filter*

Yang dipersiapkan dan disusun oleh :  
Nama : Nur Azizah  
NIM : 12610017  
Telah dimunaqasyahkan pada : 27 Februari 2017  
Nilai Munaqasyah : A

Dan dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga

**TIM MUNAQASYAH :**

Ketua Sidang

Dr. Muhammad Wakhid Musthofa, M.Si  
NIP. 19800402 200501 1 003

Penguji I

Sugiyanto, M.Si  
NIP.19800505 200801 1 028

Penguji II

Noor Saif Mahr. Mussafi, M.Sc  
NIP.19820617 200912 1 005

Yogyakarta, 6 Maret 2017  
UIN Sunan Kalijaga  
Fakultas Sains dan Teknologi  
Dekan



Dr. Murtono, M.Si  
NIP. 19691212 200003 1 001

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nur Azizah

NIM : 12610017

Program Studi : Matematika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi ini merupakan hasil pekerjaan penulis sendiri dan sepanjang pengetahuan penulis tidak berisi materi yang dipublikasikan atau ditulis orang lain, dan atau telah digunakan sebagai persyaratan penyelesaian Tugas Akhir di Perguruan Tinggi lain, kecuali bagian tertentu yang penulis ambil sebagai bahan acuan. Apabila terbukti pernyataan ini tidak benar, sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

Yogyakarta, 17 Februari 2017

Yang menyatakan



Nur Azizah  
NIM. 12610017

*Karya sederhana ini penulis persembahkan untuk  
Ibu Siti Badriyah dan Bapak Nur Ihsanuddin tercinta,  
Mbak Uswatun, Mas Thohir dan Adik Udin yang selalu aku sayangi,  
do'a dan dukungan dari kalian selalu mendampingi setiap proses  
perjalananku.*

*Sahabat-sahabatku yang selalu mewarnai cerita hidupku,  
proses yang panjang tlah kita lalui bersama untuk masa depan yang  
lebih indah.*

*Almamaterku Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negri Sunan Kalijaga  
Yogyakarta.*

## MOTTO

*”Kemarin adalah pelajaran, hari ini adalah perjuangan  
dan esok adalah kesuksesan.”*

*”Proses itu indah, terima dengan ikhlas,  
jalani dengan penuh semangat, hiasi dengan senyuman.”*

*(N Azizah)*



## KATA PENGANTAR

*Assalamualaikum Wr. Wb.*

*Alhamdulillahirabbil alamin*, segala puji bagi Allah SWT atas nikmat, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul "*State of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) melalui Kalman Filter*".

Sholawat serta salam semoga tetap tercurah pada kehadiran nabi Muhammad SAW, yang selalu menjadi suri tauladan bagi umatnya, dan pembawa ajaran kepada kebenaran yang hakiki. Semoga kita termasuk umat yang mendapat syafaatnya. Amin

Suatu keberhasilan bagi penulis telah menyelesaikan skripsi ini. Penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari dukungan, motivasi, kerjasama maupun bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada

1. Bapak Prof. Drs. Yudian Wahyudi, MA, Ph.D., selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Bapak Dr. Murtono M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
3. Bapak Muchammad Abrori, M. Kom., selaku dosen pembimbing akademik mahasiswa program studi matematika 2012.
4. Bapak Dr. Muhammad Wakhid Musthofa, M.Si., selaku Ketua Program Studi Matematika sekaligus dosen pembimbing I skripsi penulis, yang senantiasa



memberikan bimbingan serta pengarahan di tengah kesibukannya yang padat dengan penuh keikhlasan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

5. Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan kepada penulis.
6. Bapak dan Mamak tercinta, serta mbak, mas, adik yang telah tulus mendoakan, memberi dorongan dan dukungan baik moril maupun materiil.
7. Pakde Busyrowi, Bude Halim dan seluruh keluarga besar Bani Masruri yang telah memberikan banyak dukungan dan motivasi untuk selalu semangat belajar.
8. Sahabat VLC (Vio, Asty, Uland, Agustin) yang selalu setia menjadi tempat untuk mengeluh dan selalu memberi semangat.
9. Sahabat 305 (Yudha, Cita, Qurota, Astuti, Zahro, Nopek, Fadilah, Farida) yang senantiasa menemani, memotivasi dan memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Sahabatku Adella dan Rani yang selalu istimewa dalam memeberikan semangat.
11. Sepupuku Hanif (Konep) yang tidak pernah pelit memberikan tathering untuk mengerjakan skripsi ini.
12. Keluarga besar HM-PS Matematika, Korp LIMIT, PMII Rayon Aufklarung, ASTRONIC, Union Math, KKN 86 Klepu yang telah memberikan banyak sekali pengalaman.
13. Keluarga besar Prodi Matematika, khususnya Matematika Angkatan 2012 yang selalu ada cerita di setiap perjuangan menempuh studi S1.



14. Semua pihak yang memeberikan dukungan dan doa kepada penulis, serta pihak yang memebantu penulis menyelesaikan skripsi ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT menerima amal kebaikan beliau sekalian dan memberikan pahala yang berlipat-lipat atas kebaikan serta apa yang telah beliau berikan, dan semoga bermanfaat.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun supaya penulis dapat membuat karya yang lebih baik. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

*Wassalamualaikum Wr. Wb.*

Yogyakarta, 09 Februari 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

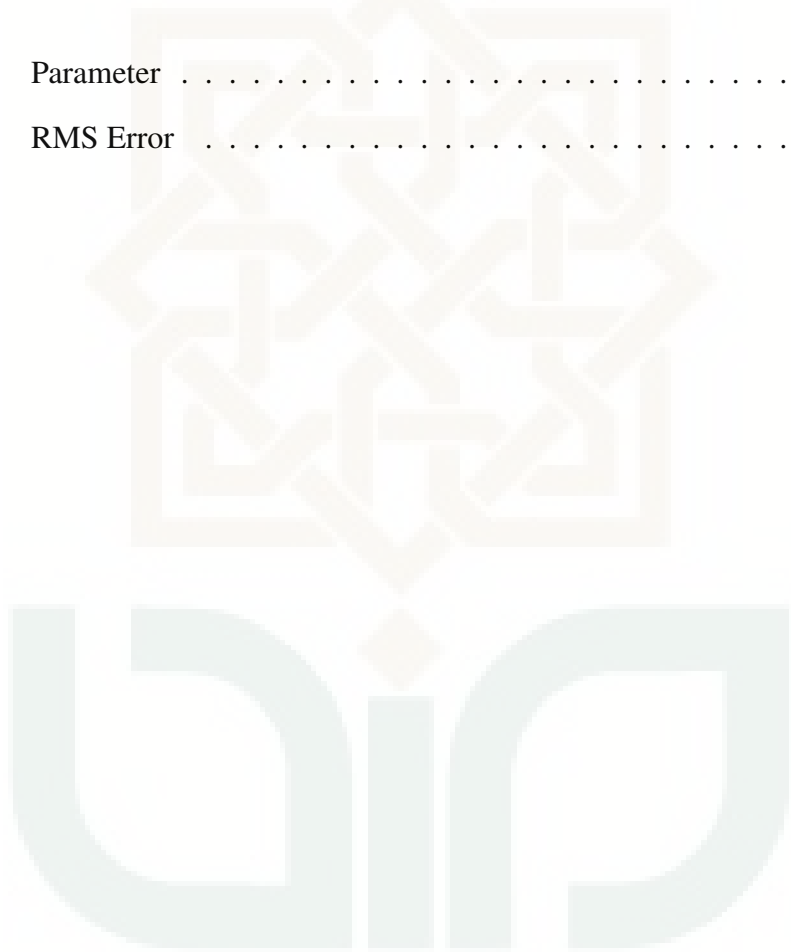
<b>HALAMAN JUDUL</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN MOTTO</b>	<b>vi</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR LAMBANG</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR LAMBANG</b>	<b>xvi</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>.xviii</b>
<b>I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Batasan Masalah	3
1.3. Rumusan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Tinjauan Pustaka	5
1.7. Sistematika Penulisan	7
1.8. Metode Penelitian	8
<b>II LANDASAN TEORI</b>	<b>10</b>

2.1. Matriks . . . . .	10
2.1.1. Operasi Matriks . . . . .	11
2.1.2. Bentuk Matriks dari Suatu Sistem Linier . . . . .	13
2.1.3. Transpos Suatu Matriks . . . . .	15
2.1.4. Matriks Identitas . . . . .	15
2.1.5. Invers Matriks . . . . .	16
2.1.6. Determinan Matriks . . . . .	17
2.2. Persamaan Diferensial . . . . .	17
2.2.1. Klasifikasi Persamaan diferensial . . . . .	18
2.2.2. Orde Persamaan Diferensial . . . . .	19
2.3. Teori Sistem . . . . .	19
2.3.1. Model <i>State Space</i> . . . . .	19
2.3.2. Sistem Linier <i>Time Invariant</i> . . . . .	22
2.3.3. Keteramatan Sistem . . . . .	23
2.4. Besaran-Besaran dalam Rangkaian Listrik <i>Resistor-Capacitor (RC)</i> . . . . .	27
2.4.1. Arus . . . . .	27
2.4.2. Tegangan . . . . .	28
2.4.3. Resistor . . . . .	29
2.4.4. Kapasitor . . . . .	30
2.5. Hukum Ohm . . . . .	30
2.6. Hukum Kirchoff I . . . . .	31
2.7. Penuaan Baterai . . . . .	32
2.8. <i>Kalman Filter</i> . . . . .	33
<b>III PEMBENTUKAN MODEL <i>STATE SPACE</i> DALAM MENENTUKAN <i>STATE OF CHARGE (SoC)</i> UNTUK <i>BATTERY MANAGEMENT SYS- TEM (BMS)</i> . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1. Pemodelan Baterai RC yang Tepat Menggunakan Model <i>State Space</i> . . . . .	36

3.1.1. Model baterai RC . . . . .	36
3.1.2. Penurunan Matematis dari Model Baterai . . . . .	37
3.1.3. Model <i>State Space</i> Baterai RC . . . . .	43
3.1.4. Mengubah Model <i>State Space</i> Menjadi Fungsi Transfer . . . . .	45
3.1.5. Hitung Numerik . . . . .	48
3.1.6. Keteramatan Model Baterai RC . . . . .	50
3.2. <i>Kalman Filter</i> untuk Estimasi <i>State of Charge</i> . . . . .	53
3.2.1. Komputasi Filter . . . . .	55
<b>IV SIMULASI . . . . .</b>	<b>58</b>
4.1. Fungsi Transfer . . . . .	59
4.2. Proses <i>Charging</i> . . . . .	60
4.3. Proses <i>Discharging</i> . . . . .	62
4.4. Respon <i>Kalman Filter</i> . . . . .	63
<b>V PENUTUP . . . . .</b>	<b>67</b>
5.1. Kesimpulan . . . . .	67
5.2. Saran . . . . .	68
<b>DAFTAR PUSTAKA . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>A M-File Proses <i>Charging</i> . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>B M-File Proses <i>Discharging</i> . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>C Hasil Fungsi Transfer . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>D Hasil Respon <i>Kalman Filter</i> . . . . .</b>	<b>78</b>
<b>DAFTAR RIWAYAT HIDUP . . . . .</b>	<b>79</b>

## DAFTAR TABEL

1.1	Tinjauan Pustaka . . . . .	6
3.1	Parameter untuk Model Baterai . . . . .	49
4.1	Parameter . . . . .	58
4.2	RMS Error . . . . .	65



## DAFTAR GAMBAR

1.1	Skema Penelitian . . . . .	9
2.1	Diagram Sistem Kontinu . . . . .	23
2.2	Diagram Sistem Diskrit . . . . .	23
2.3	Hukum Kirchoff I . . . . .	31
3.1	Skematik model baterai $RC$ . . . . .	36
4.1	Respon model $RC$ . . . . .	60
4.2	Charging . . . . .	61
4.3	Discharging . . . . .	62
4.4	Respon Kalman Filter . . . . .	66

## DAFTAR LAMBANG

$C_{bk}$	: kapasitor terbesar yang bertugas sebagai bagian penyimpanan energi dalam bentuk pengisian
$C_{surface}$	: kapasitor permukaan
$I$	: besar arus pada sambungan
$I_b$	: besar arus pada kapasitor terbesar
$I_s$	: besar arus pada kapasitor permukaan
$R_t$	: hambatan sambungan
$R_s$	: hambatan permukaan
$R_e$	: hambatan akhir
$V_{Cb}$	: tegangan yang melintasi kapasitor terbesar
$V_{Cs}$	: tegangan yang melintasi kapasitor permukaan
$V_0$	: tegangan sambungan
$\dot{V}_{Cb}$	: turunan pertama tegangan yang melintasi kapasitor terbesar
$\dot{V}_{Cs}$	: turunan pertama tegangan yang melintasi kapasitor permukaan
$\dot{V}_0$	: turunan pertama tegangan sambungan
$x(t)$	: vektor <i>state</i> dari sistem
$u(t)$	: <i>input</i> sistem
$y(t)$	: <i>output</i> sistem



## DAFTAR LAMBANG

<b>A</b>	: matriks <i>state</i> sistem linier <i>time invariant</i> berukuran $n \times n$
<b>B</b>	: matriks <i>input</i> sistem linier <i>time invariant</i> berukuran $n \times m$
<b>C</b>	: matriks <i>output</i> sistem linier <i>time invariant</i> berukuran $p \times n$
<b>D</b>	: matriks transmisi langsung sistem linier <i>time invariant</i> berukuran $p \times m$
<b>M</b>	: matriks <i>state</i> pada model baterai RC berukuran $n \times n$
<b>N</b>	: matriks <i>input</i> pada model baterai RC berukuran $n \times m$
$\mathcal{L}[f(s)]$	: transformasi <i>laplace</i> fungsi $s$
$\mathfrak{S}$	: matriks keteramatan sistem
<b>Q</b>	: kovarian <i>noise state</i>
<b>R</b>	: kovarian <i>noise output</i> (pengukuran)
$p(w) \sim N(0, \mathbf{Q})$	: probabilitas kovarian <i>noise</i> proses berdistribusi normal
$p(v) \sim N(0, \mathbf{R})$	: probabilitas kovarian <i>noise</i> pengukuran berdistribusi normal
$x(k)$	: vektor <i>state</i> dari sistem waktu diskrit
$u(k)$	: <i>input</i> sistem waktu diskrit
$y(k)$	: <i>output</i> sistem waktu diskrit
$A_d$	: matriks <i>state time-invariant</i> waktu diskrit
$B_d$	: matriks <i>input time-invariant</i> waktu diskrit
$C_d$	: matriks <i>output time-invariant</i> waktu diskrit.

## INTISARI

### *State of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) melalui Kalman Filter*

Oleh

Nur Azizah

12610017

Kendaraan listrik merupakan salah satu transportasi yang menggunakan baterai dalam operasionalnya. Untuk menjaga baterai agar selalu dalam kondisi yang aman dan baik diperlukan *Battery Management System (BMS)*. BMS merupakan perangkat elektronik yang salah satu tugas utamanya adalah memantau siklus *charging - discharging* baterai melalui status *State of Charge (SoC)*. Perancangan BMS diperlukan model yang akurat, dengan menggunakan model penuaan baterai, waktu hidup dari sebuah baterai dapat diprediksi secara tepat dengan memperhatikan SoC baterai. Dalam penelitian ini akan dilakukan pencarian model yang akurat untuk BMS, dan diestimasi menggunakan algoritma *Kalman Filter*.

Model baterai *Resistor-Capacitor (RC)* diaplikasikan untuk membentuk persamaan ke dalam model *state space*. Model *state space* memuat persamaan diferensial orde pertama dalam bentuk variabel *state*. Variabel *state* dari model baterai RC terdiri dari tiga variabel *state*  $V_{Cb}$ ,  $V_{Cs}$ , dan  $V_0$ . Studi kasus numerik diselesaikan untuk mengestimasi SoC. Selanjutnya untuk mengestimasi SoC secara akurat, *Kalman Filter* mampu meminimalkan kuadrat *error*nya. Estimasi dikatakan akurat jika nilai kovarian *error* estimasi lebih kecil dari kovarian *error* pengukuran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *error RMS* dari kovarian *error* estimasi sangat kecil dibandingkan dengan kovarian *error* pengukuran, sehingga estimasi dari model tersebut akurat. Estimasi yang akurat akan memperpanjang masa hidup baterai.

**Kata Kunci:** *Battery Management System, State of Charge, model baterai Resistor-Capacitor, state space, Kalman Filter.*

## ABSTRACT

### *State of Charge (SoC) for Battery Management System (BMS) via Kalman Filter*

By

Nur Azizah

12610017

An Electric Vehicle is one of the transportation that uses a battery on its operations. To keep the battery safe and always in a good condition, it needs a Battery Management System (BMS). BMS is an electronic device that is one of its main tasks is monitoring the cycle of charging-discharging battery through a State of Charge (SoC) status. BMS design needs an accurate model, by using the model of battery aging, the life span of a battery can be predicted accurately by observing the SoC battery. In this work will be conducted an accurate model to BMS, and estimated using Kalman Filter algorithms.

The Resistor-Capacitor (RC) battery model is applied to forms the equation into state space models. The state space model loads the first-order of the differential equation in form of a state variable. The state variable of the RC battery model consists three variable state  $V_{Cb}$ ,  $V_{Cs}$  and  $V_0$ . A numerical case study is done to estimate the SoC. Furthermore, to estimate the SoC accurately, Kalman Filter is able to minimize the root-mean-squared errors. It is applied if the estimation error covariance value is smaller than the measurement error covariance. From numerical result shows that very small RMS error of the estimated error covariance comparison to its measurement error covariance, so the estimation of the model is accurate. An accurate estimate will prolong battery life.

**Keyword:** Battery Management System, State of Charge, Resistor-Capacitor battery model, state space, Kalman Filter.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Minyak bumi dalam beberapa abad ini, menjadi penopang utama dalam perkembangan ekonomi di berbagai negara. Hal itu disebabkan karena semakin berkembang pesatnya tingkat transportasi yang memanfaatkan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Efek dari emisi karbon yang berlebihan dan terus menerus dapat membahayakan bagi lingkungan, salah satunya adalah pemanasan global. Selain itu juga dapat mengganggu kelangsungan hidup manusia.

Oleh karena itu, sekarang mulai bermunculan transportasi yang memanfaatkan energi listrik karena dapat menghemat biaya dan juga mampu mengurangi polusi udara, karena transportasi tersebut dibuat tanpa menggunakan bahan bakar fosil, yang biasa disebut dengan kendaraan listrik. Kendaraan listrik biasa dikenal dengan istilah Electric Vehicles (EVs) dan Hybrid Electric Vehicles (HEVs). EVs dan HEVs dianggap sebagai transportasi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan di tengah-tengah kenaikan harga minyak dan perubahan iklim global akibat emisi karbon, karena EVs dan HEVs merupakan salah satu transportasi yang memanfaatkan energi baterai.

Karena kendaraan listrik merupakan kendaraan yang memanfaatkan energi baterai, maka untuk menjaga baterai agar selalu dalam kondisi baik dan aman diperlukan *Battery Management System* (BMS). BMS merupakan perangkat elektronik yang tersusun atas sensor, aktuator, dan pengendali di dalamnya yang tertanam algoritma/sistem untuk memonitor operasional baterai. BMS juga

merupakan penghubung antara motor dan baterai. BMS secara efektif dapat menjaga baterai dari kerusakan, memprediksi masa penggunaan baterai, dan menjaga baterai saat beroperasi. Secara teknis, BMS dapat memaksimalkan siklus hidup baterai yaitu dengan memantau *charging* dan *discharging* baterai melalui status *State of Charge* (SoC). BMS tidak hanya memantau dan melindungi baterai, tetapi juga memberikan panduan pada penggunaan baterai yang optimal.

*State of Charge* (SoC) didefinisikan sebagai prosentase dari kapasitas baterai yang tersedia dengan kapasitas baterai maksimum. Nilai SoC dinyatakan dalam rentang 0-1 atau 0%-100% dengan 1 atau 100% menunjukkan baterai dalam keadaan terisi penuh dan 0 atau 0% baterai dalam keadaan kosong. SoC digolongkan sebagai parameter penting dari kapasitas baterai, yang secara tidak langsung hanya dapat diperkirakan melalui data tegangan, arus dan suhu yang dikumpulkan. Pengukuran SoC baterai secara akurat merupakan bagian penting dan menjadi prioritas untuk merancang BMS. Hal tersebut merupakan dasar untuk mengetahui status baterai dan memastikan masa kegunaan baterai selanjutnya. Tugas BMS adalah untuk mengetahui SoC baterai secara teliti. Dengan mengetahui SoC baterai, maka pengguna dapat mengatur kinerja baterai. Pemakaian baterai dalam keadaan aman akan memperpanjang umur baterai dan siklus *charge-discharge* baterai. Pengukuran SoC secara akurat juga dapat menghindarkan baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge*. Kondisi *overcharge* yaitu suatu kondisi dimana proses pengisian tetap dilanjutkan meskipun seluruh baterai sudah terisi 100%, sedangkan untuk kondisi *overdischarge* adalah kondisi dimana proses pengosongan atau pemakaian mencapai 0%.

Dalam merancang BMS diperlukan model yang akurat. Dengan menggunakan model penuaan, waktu hidup dari sebuah baterai dapat diprediksi secara tepat dengan memperhatikan SoC baterai. Model matematika dipresentasikan

dalam persamaan *state space* yang diambil dari skematik rangkaian model baterai RC (*Resistor-Capacitor*). Dalam penelitian ini, untuk mengestimasi SoC digunakan metode *Kalman Filter*. *Kalman Filter* merupakan rangkaian teknik perhitungan matematika yang memberikan perhitungan efisien dalam mengestimasi proses keadaan, yaitu dengan cara meminimalkan rata-rata kuadrat eror (*Mean Squared Error/MSE*). Prediksi yang akurat dari SoC baterai dapat memperpanjang waktu hidup baterai dan dapat terbebas dari biaya yang cukup besar.

## 1.2. Batasan Masalah

Batasan masalah dari skripsi ini dimaksudkan agar pembahasan dari skripsi ini tidak meluas. Adapun batasan masalah dari skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan *State of Charge* (SoC) baterai menggunakan penurunan matematis dari model baterai *Resistor-Capacitor* (RC).
2. Penurunan matematis model baterai digunakan untuk membentuk model *state space*.
3. Studi kasus numerik diselesaikan untuk memverifikasi model yang diperoleh dari penurunan matematis model baterai RC.
4. Mengestimasi SoC menggunakan algoritma dari *Kalman Filter*, dengan mengamati besarnya *error* estimasi dan *error* pengukuran.
5. Besaran-besaran dalam rangkaian listrik menggunakan rumus yang ada pada umumnya, sehingga tidak dicari secara mendetail penurunan dari rumus tersebut.

### 1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pemodelan baterai RC yang tepat menggunakan model *state space*?
2. Bagaimana respon *Kalman Filter* dalam mengestimasi *State of Charge* untuk *Battery Management System*?

### 1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pemodelan baterai RC yang tepat menggunakan model *state space*.
2. Mengetahui respon *Kalman Filter* dalam mengestimasi *State of Charge* untuk *Battery Management System*.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Dengan mengacu pada tujuan penelitian, maka manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini memberikan pengetahuan tentang pentingnya *State of Charge* dalam merancang *Battery Management System*.
2. Penelitian ini dapat menambah pemahaman bahwa ilmu matematika dapat diterapkan dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan. Seperti dalam penelitian ini, perhitungan matematis digunakan dalam menurunkan model dari sebuah baterai yang lebih diperdalam dalam ilmu fisika.
3. Penelitian ini dapat menambah referensi bagi pengembang *Battery*



*Management System* untuk menggunakan algoritma yang tepat dalam mengestimasi *State of Charge* secara akurat.

## 1.6. Tinjauan Pustaka

Penulisan skripsi ini merujuk pada jurnal "*Desain Proposional-Integral Observer untuk Optimasi Metode Coloumb Counting*" yang ditulis oleh Asep Nugroho (Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada, 2014). Dalam penelitian ini, SoC diestimasi menggunakan *Coloumb Counting* (CC). Metode CC bekerja dengan cara menghitung jumlah muatan yang masuk ataupun keluar dari baterai, kemudian melakukan penjumlahan secara akumulatif. Kelemahan dari metode ini adalah terjadinya akumulasi *error* pembacaan SoC dari waktu ke waktu.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut dikembangkan berbagai macam algoritma yang berfungsi sebagai *observer*. *Observer* yang dipilih untuk mengatasi masalah ini adalah *Proposional-Integral Observer*. *Proposional-Integral Observer* berfungsi melakukan koreksi atau mendeteksi setiap ketidaktepatan pembacaan SoC.

Penelitian ini juga merujuk pada jurnal yang berjudul "*State-Space Battery Modeling for Smart Battery Management System*" ditulis oleh T.O. Ting dkk (*Proceedings of the International Multi Convergence of Engineers and Computer Scientists* 2014 Vol. II). Penelitian ini mengestimasi *State of Charge* menggunakan model baterai *Resistor-Capacitor* dibentuk ke dalam model *state space*. Sedangkan metode yang digunakan untuk mengestimasi yaitu dengan *observer Kalman Filter*. Dalam penelitian ini hasil numerik dari perhitungan *State of Charge* masih perlu dikembangkan, karena prediksi dari *Kalman Filter* terkait perhitungan *error* dari prediksi masih perlu pengembangan.

Skripsi dengan judul "*State of Charge (SoC) untuk Battery Management*

*System (BMS) melalui Kalman Filter* yang disusun oleh penulis terinspirasi dari kedua tinjauan pustaka di atas. Penelitian ini merupakan pengembangan dari tinjauan pustaka yang kedua yaitu dengan mengetahui *Root Mean Square (RMS)* dari perhitungan *State of Charge* menggunakan *Kalman Filter*. Perbedaan dengan tinjauan pustaka yang pertama terletak pada metode yang digunakan untuk mengestimasi *State of Charge*.

Adapun detail perbedaan dari ketiga penelitian di atas dapat dilihat pada Tabel (1.1) berikut ini.

**Tabel 1.1 Tinjauan Pustaka**

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Perbedaan
1.	Asep Nugroho	Desain <i>Propositional-Integral Observer</i> untuk Optimasi Metode <i>Coloumb Counting</i>	Peneliti menggunakan metode <i>Coloumb Counting</i> dengan menambahkan observer <i>Propositional-Integral Observer</i> untuk menurunkan nilai <i>error</i>
2.	T.O. Ting dkk	<i>State-Space Battery Modeling for Smart Battery Management System</i>	Menghitung SoC menggunakan <i>Kalman Filter</i> . Dalam penelitian ini belum ada pembahasan mengenai simulasi numerik estimasi dari <i>Kalman Filter</i> dalam mencari RMS.

3.	Nur Azizah	<i>State of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) melalui Kalman Filter</i>	Menghitung SoC menggunakan <i>Kalman Filter</i> . Dalam penelitian ini dibahas mengenai simulasi numerik estimasi dari <i>Kalman Filter</i> dalam mencari RMS.
----	------------	--	--

### 1.7. Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi dalam lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

#### BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini meliputi pembahasan latar belakang, batasan masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, tinjauan pustaka serta sistematika penulisan.

#### BAB II LANDASAN TEORI

Pada bab ini membahas tentang teori-teori atau dasar-dasar yang digunakan dalam menyusun tugas akhir, antara lain tentang matriks, besaran-besaran yang digunakan dalam model baterai *Resistor-Capacitor* serta teori matematika yang digunakan sebagai acuan penulisan tugas akhir ini.

#### BAB III PEMBENTUKAN MODEL *STATE SPACE* DALAM MENENTUKAN *STATE OF CHARGE (SoC)* UNTUK *BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)*

Pada bab ini berisikan uraian mengenai estimasi *State of Charge (SoC)* untuk *Battery Management System (BMS)* dengan menggunakan model baterai RC yang dibentuk ke dalam model *state space*. Dengan menggunakan contoh numerik dari model baterai RC akan dicari keteramatan dari sistem tersebut. Untuk mengestimasi SoC secara akurat menggunakan *Kalman Filter*.

## BAB IV SIMULASI

Pada bab ini berisikan interpretasi simulasi dari estimasi *State of Charge* (SoC) untuk *Battery Management System* (BMS) melalui *Kalman Filter* menggunakan *software* MATLAB.

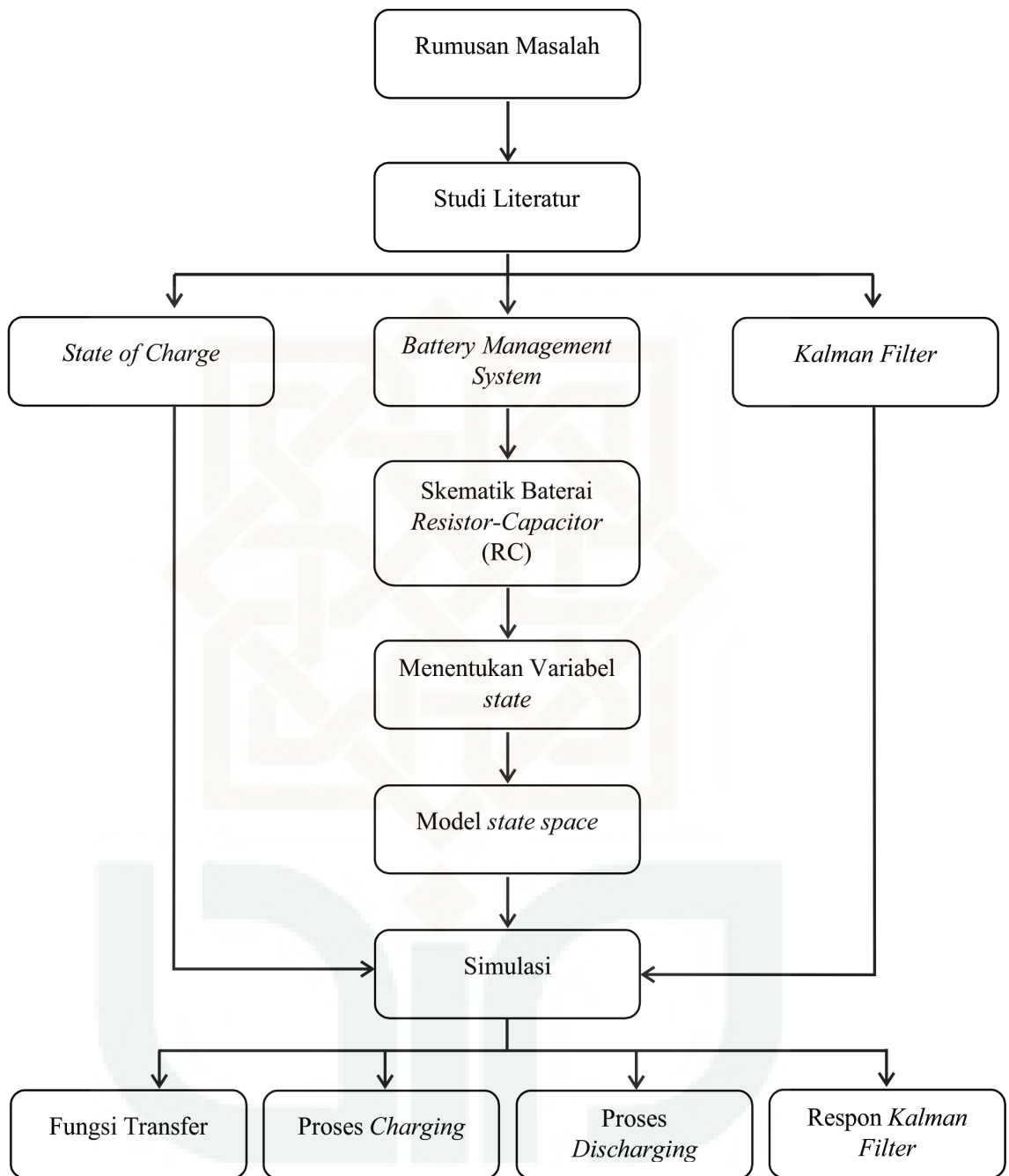
## BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisikan tentang kesimpulan dari penelitian dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan penulis.

### 1.8. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah studi literatur, yaitu membahas topik masalah secara teoritis dan konseptual. Sumber literatur utama yang digunakan diperoleh dari jurnal yang berjudul "*State of Charge for Battery Management System Kalman Filter*". Hal-hal yang dilakukan penulis adalah mengumpulkan referensi pendukung seperti jurnal dan buku yang mendukung skripsi dengan judul "*State of Charge (SoC) untuk Battery Management System (BMS) melalui Kalman Filter*". Langkah-langkah yang dilakukan penulis dalam penelitian adalah sebagai berikut: yang pertama penelitian dilakukan dengan cara studi literatur, dimulai dengan mempelajari konsep dari BMS, SoC dan *Kalman Filter*. Yang kedua, memilih rangkaian baterai RC yang akan digunakan dalam pembentukan model. Yang ketiga, memodelkan tegangan sambungan pada rangkaian baterai RC. Yang keempat, melakukan penurunan matematis untuk mencari variabel *state* yang nantinya akan dibentuk ke dalam model *state space*. Selanjutnya model yang sudah dibentuk ke dalam model *state space* disimulasikan menggunakan algoritma *kalman filter* dengan program Matlab 7.1. Yang terakhir adalah menganalisis hasil yang diperoleh dari simulasi.

Berdasarkan uraian di atas dapat dibuat skema penelitian sebagai berikut:



**Gambar 1.1 Skema Penelitian**

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan pada bab-bab sebelumnya dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan model baterai RC dapat diperoleh model yang tepat yaitu dengan mendapatkan tiga variabel *state*  $V_{Cb}(t)$ ,  $V_{Cs}(t)$  dan  $V_0(t)$ . Variabel tersebut didapatkan dengan menurunkan rumus dari rangkaian baterai RC ke dalam model *state space* diperoleh sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{Cb}(t) \\ \dot{V}_{Cs}(t) \\ \dot{V}_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A & A & 0 \\ B & -B & 0 \\ (-A+B) & 0 & (A-B) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb}(t) \\ V_{Cs}(t) \\ V_0(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A.R_s \\ B.R_e \\ A(0.5R_s - R_t - D) + B(0.5R_e + R_t + D) \end{bmatrix} I(t),$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Cb}(t) \\ V_{Cs}(t) \\ V_0(t) \end{bmatrix}$$

dengan 
$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{bk}(R_e + R_s)} \\ \frac{1}{C_{surface}(R_e + R_s)} \\ \frac{R_e R_s}{R_e + R_s} \end{bmatrix}.$$

2. Setelah memebentuk model *state space* dari penurunan matematis model baterai RC, penurunannya menjadikan kesimpulan bahwa terdapat tiga variabel *state* yang relevan untuk model baterai. Oleh karena itu, berdasarkan teori kendali, telah berhasil menentukan respon dari sistem. Dengan model

estimasi *state* ini, *Kalman Filter* diaplikasikan untuk estimasi *State of Charge* dari *Battery Management System*. Dengan menggunakan contoh numerik, *Kalman Filter* lebih akurat dalam memprediksi sistem dinamik. Hal ini ditunjukkan dengan sangat kecilnya *erros* RMS dari *error* estimasi dibandingkan dengan *error* pengukuran.

## 5.2. Saran

*Kalman Filter* merupakan estimator yang bisa digunakan dalam kasus sistem *linear time invariant* dan dalam kasus sistem *linear time varying*, Dalam penelitian ini *Kalman Filter* digunakan dalam dalam kasus sistem *linear time invariant*, pada penelitian lebih lanjut *Kalman Filter* dapat digunakan dalam kasus sistem *linear time varying*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Anton, H., 2000, *Dasar-dasar Aljabar Linier Jilid 1*, New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Brogan, W.L., 1991, *Modern Control Theory-3rd ed.*, USA: Prentice Hall, Inc.
- Heij, C., Andre Ran dan Freek van Schagen, 2007, *Introduction to Mathematical Systems Theory: Linear Systems, identification and Control*, Germany: Birkhäuser Verlag.
- Kulakowski, B.T., John F. Gardner dan Shearer, J. L., 2007, *Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems-3rd ed.*, New York: Cambridge University Press.
- Ogata, Katsuhiko, 2004, *System Dynamics-4th ed.*, USA: Pearson Education Hall, Inc.
- Olsder, G.J. dan J.W. van der Woude, 1997, *Mathematical Systems Theory*, Delft University Press.
- Pop, V., H.J. Bergveld, dkk., 2008, *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*, The Netherlands: Springer.
- Ramdhani, Mohamad, 2008, *Rangkaian Listrik*, Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Ross, Shepley L., 1989, *Introduction to Ordinary Differential Equations-4th ed.*, USA: John Wiley and Sons, inc.
- Subiono, 2010, *Matematika Sistem*, Jurusan Matematika, FMIPA-ITS, Surabaya.

T.O. Ting, Ka Lok Man, dkk., 2014, *State Space Battery Modeling for Smart Battery Management System*, in *Lecture Notes in Engineering and Computer Science: Proceedings of The International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*, pp. 866-869. Jurnal-UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24,2006.

Welch, Greg dan Gary Boishop, 2006, *An Introduction to the Kalman Filter*, Jurnal-UNC-Chapel Hill, TR 95-041, July 24,2006.

Widodo, Rohani Jahya, 2008, *Sistem Kendali dengan Format Vektor-Matriks*, Yogyakarta: Graha Ilmu.



## LAMPIRAN A

### M-File Proses *Charging*

```
format long;
%hasil untuk resistor dan kapasitor
Csurface=82.11;
Cbk=88372.83;
Re=0.00375;
Rs=0.00375;
Rt=0.002745;

a=1/(Cbk*(Re+Rs));
b=1/(Csurface*(Re+Rs));
d=(Re*Rs)/(Re+Rs);

%matrik variabel state
A=[-a a 0 ; b -b 0 ; (-a+b) 0 (a-b)]
B=[a*Re ; b*Re ; a*(0.5*Rs-Rt-d)+b*(0.5*Re+Rt+d)]
C=[0 0 1]
D=[0]

%fungsi transfer
figure(1); %gambar 1
[num, den]=ss2tf(A,B,C,D,1)
G=tf(num,den)
step(G),grid;

%untuk kalman filetr
%identitas matriks + elemen diagonal
A=[1-a a 0 ; b 1-b 0 ; (-a+b) 0 1+(a-b)]
B=[a*Re ; b*Re ; a*(0.5*Rs-Rt-d)+b*(0.5*Re+Rt+d)]
C=[0 0 1]

Tc=1;
A=A*Tc;
B=B*Tc;
C=C;
```

```

Plant = ss(A, [B B], C, 0, -1, 'inputname', {'u'
'w'}, 'outputname', 'y');

Q=1; R=1;
[kalmf, L, P, M] = kalman(Plant, Q, R);
kalmf = kalmf(1, :);
kalmf

a = A;
b = [B B 0*B];
c = [C; C];
d = [0 0 0; 0 0 1];
P = ss(a, b, c, d, -1, 'inputname', {'u' 'w'
'v'}, 'outputname', {'y' 'yv'});

%koneksi paralel dari output ye dan y
sys=parallel(P, kalmf, 1, 1, [], [])

% loop tertutup sekitar input #4 dan outpu #2
SimModel=feedback(sys, 1, 4, 2, 1)

%menghapus yv dari daftar I/O
SimModel=SimModel([1 3], [1 2 3])
SimModel.inputname

t=[0:60000]';
u(:) = 1.53; %arus untuk charging

n=length(t);
randn('seed', 0)
w = sqrt(Q)*randn(length(t), 1);
v = sqrt(R)*randn(length(t), 1);

%%

```

```

% Selanjutnya simulasi respon menggunakan LSIM:
clf;
out= lsim(SimModel,[w,v,u]);
y = out(:,1); % respon sebenarnya
ye = out(:,2); % respon yang difilter
yv = y + v; % respon yang di ukur

figure(2); %gambar 2
%plot(t,y,'g--',t,ye,'b-'), grid on;
plot(t,ye,'b-'),grid on;
xlabel('time(s)'),
ylabel('Tegangan sambungan baterai (V_o)')

%Tanggapan Kalman Filter
figure(3); %gambar 3
plot(t,y-ye,'b-'), grid on;
xlabel('time(s)'), ylabel('Error')

%menghitung error
MeasErr=y-yv; %pengukuran error
MeasErrCov=...
    sum(MeasErr.*MeasErr)/length(MeasErr);
EstErr=y-ye; %mengestimasi error
EstErrCov=...
    sum(EstErr.*EstErr)/length(EstErr);

% Kovarian error sebeleum pemfilteran (error
pengukuran):
MeasErrCov

% Kovarian error sesudah pemfilteran (error
estimasi):
EstErrCov

```

## LAMPIRAN B

### M-File Proses *Discharging*

```
format long;
%hasil untuk resistor dan kapasitor
Csurface=82.11;
Cbk=88372.83;
Re=0.00375;
Rs=0.00375;
Rt=0.002745;

a=1/(Cbk*(Re+Rs));
b=1/(Csurface*(Re+Rs));
d=(Re*Rs)/(Re+Rs);

%matrik variabel state
A=[-a a 0 ; b -b 0 ; (-a+b) 0 (a-b)]
B=[a*Re ; b*Re ; a*(0.5*Rs-Rt-d)+b*(0.5*Re+Rt+d)]
C=[0 0 1]
D=[0]

%fungsi transfer
figure(1); %gambar 1
[num, den]=ss2tf(A,B,C,D,1)
G=tf(num,den)
step(G),grid;

%untuk kalman filetr
%identitas matriks + elemen diagonal
A=[1-a a 0 ; b 1-b 0 ; (-a+b) 0 1+(a-b)]
B=[a*Re ; b*Re ; a*(0.5*Rs-Rt-d)+b*(0.5*Re+Rt+d)]
C=[0 0 1]

Tc=1;
A=A*Tc;
B=B*Tc;
C=C;
```

```

Plant = ss(A,[B B],C,0,-1,'inputname',{'u' 'w'},'outputname','y');

Q=1; R=1;
[kalmanf,L,P,M] = kalman(Plant,Q,R);
kalmanf = kalmanf(1,:);
kalmanf

a = A;
b = [B B 0*B];
c = [C;C];
d = [0 0 0;0 0 1];
P = ss(a,b,c,d,-1,'inputname',{'u' 'w' 'v'},'outputname',{'y' 'yv'});

%koneksi paralel dari output ye dan y
sys=parallel(P,kalmanf,1,1,[],[])

% loop tertutup sekitar input #4 dan outpu #2
SimModel=feedback(sys,1,4,2,1)

%menghapus yv dari daftar I/O
SimModel=SimModel([1 3],[1 2 3])
SimModel.inputname

t=[0:60000]';
u(:)=1.53; %arus untuk pemakaian

n=length(t);
randn('seed',0)
w = sqrt(Q)*randn(length(t),1);
v = sqrt(R)*randn(length(t),1);

%%

```



```

% Now simulate the response using LSIM:
clf;
out= lsim(SimModel,[w,v,u]);
y0=2.2;
y = y0-out(:,1); % true response
ye = y0-out(:,2); % filtered response
yv = y + v; % measured response

figure(2); %gambar 2
%plot(t,y,'g--',t,ye,'b-'), grid on;
plot(t,ye,'b-'),grid on;
xlabel('time(s)'),
ylabel('Tegangan sambungan baterai (V_o)')

%Tanggapan Kalman Filter
figure(3); %gambar 3
plot(t,y-ye,'b-'), grid on;
xlabel('time(s)'), ylabel('Error')

%hitungan eror
MeasErr=y-yv; %pengukuran eror
MeasErrCov=...
    sum(MeasErr.*MeasErr)/length(MeasErr);
EstErr=y-ye; %mengestimasi eror
EstErrCov=...
    sum(EstErr.*EstErr)/length(EstErr);

% Covariance of error before filtering (measurement error):
MeasErrCov

% Covariance of error after filtering (estimation error):
EstErrCov

```

## LAMPIRAN C

### Hasil Fungsi Transfer

```
Command Window
>> coba

A =
-0.00150875934757  0.00150875934757  0
 1.62383794097349 -1.62383794097349  0
 1.62232918162593  0 -1.62232918162593

B =
0.00000565784755
0.00608939227865
0.01054268588221

C =
0  0  1

D =
0

num =
0  0.01054268588222  0.01714469860237  0.00002981006354

den =
1.00000000000000  3.24767588194698  2.63684738219026 -0.00000000000000

Transfer function:
0.01054 s^2 + 0.01714 s + 2.981e-005
-----
s^3 + 3.248 s^2 + 2.637 s - 1.144e-018
```

## LAMPIRAN D

### Hasil Respon *Kalman Filter*

#### Matriks Baru dengan $T_c = 1$

```
Command Window
A =
    0.99849124065243    0.00150875934757    0
    1.62383794097349   -0.62383794097349    0
    1.62232918162593    0   -0.62232918162593

B =
    0.00000565784755
    0.00608939227865
    0.01054268588221

C =
    0    0    1
```

#### Error Pengukuran dan Error Estimasi

```
MeasErrCov =
    1.00136010496009

EstErrCov =
    1.918588914888881e-004
```

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



### A. Data Pribadi

Nama : Nur Azizah  
Tempat, Tanggal Lahir : Bantul, 5 Januari 1994  
Jenis Kelamin : Perempuan  
Alamat : Plaosan RT.02/RW.09 Taji Prambanan  
Klaten  
Status : Belum Nikah  
No. HP : 085878256599  
E-Mail : [azizahnur262@gmail.com](mailto:azizahnur262@gmail.com)

### B. Latar Belakang Pendidikan

1. SD N II Bugisan (2000-2006)
2. MTsN Prambanan Klaten (2006-2009)
3. SMA N 1 Jetis Bantul (2009-2012)
4. UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta (2012-2017)

### C. Pengalaman Organisasi

1. PMII Rayon Aufklarung UIN Sunan Kalijaga
2. HM-PS Matematika UIN Sunan Kalijaga
3. I.P.P.N.U PAC Prambanan