



**ESTIMASI STATE-OF-CHARGE BATERAI LITHIUM-ION
BERBASIS DIGITAL TWIN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN HIBRIDA ADAPTIVE NEURO-FUZZY
INFERENCE SYSTEM DAN ADAPTIVE KALMAN
FILTERING PADA KONDISI PENGISIAN ARUS PULSE**

TESIS

**UNIVERSITAS
MERCU BUANA
HORAS SAHALA MARBUN
55424110002**

**PROGRAM STUDI MEGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS MERCU BUANA
JAKARTA
2026**



**ESTIMASI STATE-OF-CHARGE BATERAI LITHIUM-ION
BERBASIS DIGITAL TWIN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN HIBRIDA ADAPTIVE NEURO-FUZZY
INFERENCE SYSTEM DAN ADAPTIVE KALMAN
FILTERING PADA KONDISI PENGISIAN ARUS PULSE**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan

Program Studi Megister Teknik Elektro

MERCU BUANA

Disusun Oleh

HORAS SAHALA MARBUN

55424110002

PROGRAM STUDI MEGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS MERCU BUANA

JAKARTA

2026

HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : HORAS SAHALA MARBUN

NIM : 55424110002

Program Studi : MEGISTER TEKNIK ELEKTRO

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Judul Laporan Tesis yang berjudul: **“Estimasi State-of-Charge Baterai Lithium-Ion Berbasis Digital Twin Menggunakan Pendekatan Hibrida Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System dan Adaptive Kalman Filtering pada Kondisi Pengisian Arus Pulse”** adalah hasil karya saya sendiri, tidak mengandung unsur plagiarisme, pelanggaran hak cipta, atau konten ilegal dalam bentuk apapun dan tidak melanggar hukum atau pihak manapun.

Apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap pernyataan ini, saya bersedia menanggung seluruh konsekuensi hukum dan membebaskan Universitas Mercu Buana dari segala tuntutan hukum dan saya siap mendapatkan sanksi akademis yang berlaku di Universitas Mercu Buana.

UNIVERSITAS Jakarta, 17 Agustus 2026
MERCU BUANA

Yang menyatakan,



(Horas Sahala Marbun)

SURAT KETERANGAN HASIL *SIMILARITY*

Menerangkan bahwa Jurnal / Karya Ilmiah / Laporan Tugas Akhir pada BAB I, BAB III, BAB IV, dan BAB V / Praktek Keinsinyuran atas nama:

Nama : **HORAS SAHALA MARBUN**
NIM : **55424110002**
Program Studi : **Magister Teknik Elektro**
Judul Tugas Akhir / Tesis
/ Praktek Keinsinyuran : **ESTIMASI STATE-OF-CHARGE BATERAI LITHIUM-ION BERBASIS DIGITAL TWIN MENGGUNAKAN PENDEKATAN HIBRIDA ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM DAN ADAPTIVE KALMAN FILTERING PADA KONDISI PENGISIAN ARUS PULSE.**

Telah dilakukan pengecekan *Similarity* menggunakan aplikasi/sistem *Turnitin* pada **Jumat, 21 Agustus 2026** dengan hasil presentase sebesar **20 %** dan dinyatakan memenuhi standar sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Fakultas Teknik Universitas Mercu Buana.

Demikian surat keterangan ini dibuat dan digunakan sebagaimana mestinya.

Jakarta, 21 Agustus 2026

Administrator Turnitin,



Itmam Haidi Syarif

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Heras Sahala Marbun
Nim : 55424110002
Program Studi : Megister Teknik Elektro
Judul Tesis : Estimasi State-of-Charge Baterai Lithium-Ion Berbasis Digital Twin Menggunakan Pendekatan Hibrida Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System dan Adaptive Kalman Filtering pada Kondisi Pengisian Arus Pulse.

Telah berhasil dipertahankan dalam sidang di hadapan Dewan Penguji dan dinyatakan lulus, serta memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana.

Jakarta 17 Agustus 2026

Disahkan Oleh:

Pembimbing



Dr. Ir. Umairah, S.ST.

NIDN: 0315089106

Mengetahui,

**Dekan
Fakultas Teknik**



Dr. Zulfa Fitri Ikatinasari, M.T.,

NIDN:0307037202

**Ketua Program Studi
Megister Teknik Elektro**



**Prof. Dr. Ir. Setiyo Budiyanto, ST, M.T.,
I.P.U., Asean-Eng., APEC-Eng., ACPE.,
SMIEEE.**

NIDN:0312118206

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulisan Laporan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Elektro pada Program Pascasarjana Universitas Mercu Buana. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan Laporan Tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. **Prof. Dr. Ir. Andi Adriansyah, M.Eng., SMEEE.** selaku Rektor Universitas Mercu Buana
2. **Dr. Ir. Zulfa Fitri Ikatrinasari, M.T.** selaku Dekan Fakultas Elektro Program Pascasarjana.
3. **Prof. Dr. Ir., Setiyo Budiyanto, S.T., M.T., I.P.U., Asean-Eng., APEC-Eng,** selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro sekaligus Penguji I dalam tesis ini, yang telah memberikan koreksi, arahan, dan masukan yang konstruktif dalam rangka penyempurnaan tesis ini.
4. **Yudhi Gunardi, S.T., M.T., Ph.D.,** selaku Penguji II dalam tesis ini, yang telah memberikan koreksi, arahan, dan masukan yang konstruktif dalam rangka penyempurnaan tesis ini.
5. **Dr. Umaisaroh, S.ST.** selaku Dosen Pembimbing Tesis yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan dan penyempurnaan Tesis ini.
6. Keluarga yang selalu berdoa dan mendukung sehingga terselasaikan penelitian ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga Laporan Tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 17 Agustus 2026

Penulis

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI DI REPOSITORI UMB

Sebagai sivitas akademik Universitas Mercu Buana, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Horas Sahala Marbun
Nim : 55424110002
Program Studi : Megister Teknik Elektro
Judul Tesis : Estimasi State-of-Charge Baterai Lithium-Ion Berbasis Digital Twin Menggunakan Pendekatan Hibrida Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System dan Adaptive Kalman Filtering pada Kondisi Pengisian Arus Pulse.

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, dengan ini memberikan izin dan menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Mercu Buana **Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul di atas beserta perangkat yang ada (jika diperlukan).

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Mercu Buana berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan Laporan Penelitian Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 17 Agustus 2026

Yang menyatakan,

A handwritten signature in black ink is written over a red and green 10,000 Rupiah Indonesian postage stamp. The stamp features a Garuda emblem and the text '10000', 'METERAN TEMPEL', and a serial number '236101001050463'.

(Horas Sahala Marbun)

ABSTRAK

Pesatnya peningkatan penggunaan kendaraan listrik *electric vehicles* (EV) di seluruh dunia memberikan dampak positif terhadap upaya dekarbonisasi global dalam mengurangi pemanasan global. Namun, hingga saat ini, teknologi pengisian daya medium, fast, dan ultra-fast charging masih bersifat kritis, sehingga diperlukan inovasi berkelanjutan dari para peneliti untuk memperoleh karakteristik sistem yang lebih andal.

Penelitian ini mengusulkan suatu kerangka kerja hybrid yang berbasis *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) dan *Adaptive Kalman Filter* (AKF), dikombinasikan dengan strategi *pulse charging* sebagai solusi inovatif untuk meningkatkan karakteristik estimasi *State of Charge* (SOC) baterai lithium-ion. Metode yang diusulkan dirancang untuk menghasilkan tingkat akurasi yang tinggi, konvergensi yang cepat, ketahanan yang kuat terhadap gangguan, serta kestabilan pada kondisi operasi yang dinamis, sehingga sesuai untuk implementasi real-time pada sistem *Battery Management System* (BMS).

Dalam penelitian ini, sistem secara adaptif melakukan penyesuaian dan penyetelan parameter secara daring atau *online tuning* untuk menghadapi ketidakpastian akibat sifat nonlinier baterai dan gangguan noise eksternal selama proses pengisian daya.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pendekatan berbasis *Equivalent Circuit Model* (ECM) orde empat yang diusulkan mampu mencapai akurasi estimasi SOC yang tinggi. Model ini menunjukkan *Root Mean Square Error* (RMSE) $\approx 0,0025\% - 0,975\%$, dengan kesalahan yang sedikit lebih tinggi terlihat pada awal pengisian 0–30% karena perilaku baterai yang non-linear sehingga $RMSE \approx 0,975\%$, dan secara keseluruhan mengungguli beberapa metode mutakhir yang telah dilaporkan sebelumnya.

Kata kunci: State-of-Charge (SoC), Baterai Lithium-Ion, Digital Twin, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Adaptive Kalman Filtering (AKF).

ABSTRACT

The rapid adoption of electric vehicles (EVs) worldwide has made a significant contribution to global decarbonization efforts aimed at mitigating climate change. However, medium, fast, and ultra-fast charging technologies remain critical areas of development, highlighting the need for continuous innovation to achieve more reliable and robust charging-system characteristics.

This study proposes a hybrid framework based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) and an Adaptive Kalman Filter (AKF), integrated with a pulse charging strategy, as an innovative approach to enhancing the accuracy and reliability of State of Charge (SoC) estimation for lithium-ion batteries. The proposed methodology is designed to achieve high estimation accuracy, rapid convergence, strong robustness against disturbances, and stable performance under dynamic operating conditions, thereby supporting real-time implementation in Battery Management Systems (BMS).

The proposed system adaptively adjusts and tunes its parameters through an online tuning mechanism to address uncertainties arising from the nonlinear characteristics of batteries and external noise disturbances during the charging process.

*Experimental results demonstrate that the proposed fourth-order Equivalent Circuit Model (ECM) achieves high SoC estimation accuracy. The model yields a Root Mean Square Error (RMSE) ranging from approximately **0.0025% to 0.975%**, with slightly higher estimation errors observed during the initial 0–30% charging range. This increase, reaching an RMSE of approximately **0.975%**, is attributed to the nonlinear behavior of the battery during the early stage of charging. Overall, the proposed approach demonstrates superior performance compared with several state-of-the-art methods previously reported in the literature.*

Keywords: *State of Charge (SoC), Lithium-Ion Battery, Digital Twin, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Adaptive Kalman Filtering (AKF).*

DAFTAR ISI

TESIS	i
HALAMAN PENYATAAN KARYA SENDIRI	ii
SURAT KERANGAN HASIL SIMILARITY.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI DI REPOSITORI UMB....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR RUMUS	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	5
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Penelitian	6
1.5. Metodologi Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1. Landasan Teori.....	9
2.2. Penelitian Terdahulu	9
2.3. Gap dan Posisi Penelitian.....	17
2.4. Kerangka Pemikiran.....	18
2.5. Relevansi Tinjauan Pustaka terhadap Penelitian	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21

3.1.1	Start dan Input Data	22
3.1.2	Preliminary Check.....	22
3.1.3	Battery Condition OK?	22
3.1.4	Error $\leq$ Threshold?	22
3.1.5	Path A: Non-linear Model (ANFIS + PSO + AKF).....	22
3.1.6	Path B: Linear Model (Direct AKF)	23
3.1.7	Digital Twin Layer	23
3.2	Arsitektur Sistem Fisik dan Infrastruktur.....	25
3.2.1	Sistem Fisik <i>Battery Charging</i>	25
3.2.2	Sistem Akuisisi Data dan Pra-pemrosesan Data	25
3.2.3	Main Control Raspberry Pi	26
3.2.4	Pengendali Lapangan dan Antarmuka Monitoring Sistem ...	26
3.2.5	Pemodelan Baterai Berbasis ECM.....	29
3.2.6	Estimasi SoC Berbasis <i>Adaptive Kalman Filter</i> (AKF).....	29
3.2.7	Integrasi ANFIS dan Optimasi Parameter Berbasis PSO	30
3.2.8	Evaluasi Error dan Pembaruan Digital Twin	31
3.2.9	Peran Digital Twin dalam Sistem Monitoring Baterai.....	31
3.2.10	Infrastruktur Cloud.....	32
3.2.11	IGBT dan DC Charger	32
3.3	Hybrid State-of-Charge Estimation Method.....	33
3.4	Equivalent Circuit Model Orde Keempat	34
3.4.1	Algoritma AI dan Estimator.....	37
3.4.2	Struktur Input dan Output	37
3.4.3	Integrasi ke Digital Twin	38
3.5	Sistem Proteksi dan Pre-Check pada Digital Twin Baterai	38
3.5.1	Over-Voltage Protection	39

3.5.2	Over-Current Protection.....	39
3.5.3	Temperature protection	40
3.5.4	Interlock dan Fail-Safe Mechanism	40
3.5.5	Respons Tegangan dan Temperatur Baterai	42
3.5.6	Estimasi SoC dan Validasi Model Digital Twin.....	42
3.5.7	Estimasi Resistansi Internal (R_o Kalman)	42
3.5.8	Fast-Charging Profile	43
3.5.9	Control Logic	43
3.5.10	Adaptive Behavior	43
3.6	Digital Twin Battery Monitoring System	44
3.6.1	Konsep Digital Twin.....	45
3.6.2	Physical Layer.....	46
3.6.3	Virtual Layer	46
3.6.4	Data Synchronization Layer.....	47
3.6.5	Operator Interaction Layer	48
3.7	Evaluation Metrics	48
3.7.1	Mean Square Error (MSE)	49
3.7.2	Root Mean Square Error (RMSE).....	49
3.7.3	Mean Absolute Error (MAE)	49
3.7.4	SoC Estimation Error	50
3.7.5	Dynamic Response Criteria.....	50
BAB IV ANALISA & PEMBAHASAN		52
4.1	Implementasi Sistem Digital Twin	52
4.2	Hasil Estimasi State of Charge (SoC)	52
4.2.1	Profil Pengujian Fast Charging Pada Fase SoC 40%.....	53
4.2.2	Respon Dinamik Fast Charging pada Fase SoC 50%	54

4.2.3	Performa Fast Charging Adaptif Pada Fase SoC 60%.....	55
4.2.4	Performa Fast Charging Adaptif Pada Fase SoC 70%.....	56
4.2.5	Performa Fast Charging Adaptif Pada Fase SoC 80%.....	57
4.2.6	Performa Fast Charging Adaptif pada SoC 90%	58
4.2.7	Performa Fast Charging Adaptif pada SoC 95% -100%.....	59
4.3	Analisis Kinerja Estimasi	61
4.3.1	Root Mean Square Error (RMSE).....	61
4.3.2	Mean Absolute Error (MAE)	61
4.3.3	Metriks Error perbandingan terhadap penelitian terdahulu....	62
4.3.4	Analisis Error Estimasi	63
4.4	Pembahasan.....	64
4.4.1	Pengaruh Spesifikasi Baterai terhadap Hasil Estimasi.....	64
4.4.2	Perbandingan dengan Penelitian Terkait.....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan	67
5.2	Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....		69

DAFTAR RUMUS

Rumus 3.1 Tegangan Terminal Baterai	36
Rumus 3.2 Mean Square Error (MSE).....	49
Rumus 3.3 Root Mean Square Error (RMSE)	49
Rumus 3.4 Mean Absolute Error (MAE).....	49
Rumus 3.5 SoC Estimation Error.....	50
Rumus 3.6 Dynamic Response Criteria	50



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Literatur review lima tahun terakhir.	14
Tabel 4.1. Perbandingan Spesifikasi dan Sistem.	65
Tabel 4. 2. Perbandingan Hasil Penelitian Estimasi SoC	65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Metodologi Penelitian Pengembangan	21
Gambar 3. 2 Arsitektur Sistem Fisik dan Infrastruktur	25
Gambar 3. 3 Integrasi Raspberry Pi terhadap Siemens Tia Portal	27
Gambar 3. 4 Visualisasi Antarmuka Manusia dan Mesin secara real-time.	28
Gambar 3. 5 <i>Equivalent Circuit Model</i> (ECM) Orde Tiga.....	29
Gambar 3. 6 Alur Proses Internal Adaptif Kalman Filter (AKF).....	30
Gambar 3. 7 Alur Proses ANFIS dan Optimasi PSO secara Online	31
Gambar 3. 8 Validasi Payload Database Cloud Hostinger	32
Gambar 3. 9 Diagram Metodologi Penelitian yang Diusulkan.....	34
Gambar 3. 10 Equivalent Circuit Model Orde Keempat	34
Gambar 3. 11 Validasi Daring ECM Baterai Li-Ion Orde Keempat	38
Gambar 3. 12 Validasi Pulse Charging Control Strategi.....	41
Gambar 3. 13 Validasi Digital Twin Baterai secara Real-Time.....	44
Gambar 3. 14 <i>Physical-to-Digital</i> Battery System Integration and Control	45

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 7.1 Panel Kendali Dilengkapi Human–Machine Interface (HMI) untuk Operasional dan Monitoring Sistem Pengujian.	77
LAMPIRAN 7.2 Enklosur Sistem Fast Charging beserta Konfigurasi Perangkat Elektronika dan Sistem Kendali untuk Implementasi Prototipe Penelitian	77
LAMPIRAN 7.3 Human–Machine Interface (HMI) Siemens sebagai Antarmuka Lokal untuk Monitoring Operasional Sistem.	78
LAMPIRAN 7.4 Tampilan Antarmuka dan Fitur Monitoring HMI Siemens pada Sistem Fast Charging	78
LAMPIRAN 7.5 Baterai Lithium Ion – ICR18650 -30A SAMSUNG SD1	79
LAMPIRAN 7.6 Simulasi MATLAB/Simulink untuk Verifikasi Kesenjangan Penelitian Berdasarkan Skenario Pengujian pada Penelitian Sebelumnya.	79
LAMPIRAN 7.7 Simulasi MATLAB/Simulink untuk Evaluasi Pulse Charging dalam Mempercepat Pengujian dan Mengendalikan Kenaikan Temperatur Internal Baterai.	80
LAMPIRAN 7.8 Arsitektur Sistem Fisik dan Infrastruktur.....	80
LAMPIRAN 7.9 Implementasi Monitoring Digital Twin secara Real-Time pada Proses Pengisian Baterai	81
LAMPIRAN 7.10 Implementasi Akuisisi, Data Logging, dan Penyimpanan Data Monitoring Digital Twin secara Real-Time pada Database MySQL.....	81

DAFTAR SINGKATAN

Simbol / Singkatan	Makna / Definisi	Satuan
EV	Electric Vehicle	-
AI	Artificial Intelligence	-
IoT	Internet of Things	-
ESS	Energy Storage System	-
LIB	Lithium-ion Battery	-
HIL	Hardware-in-the-Loop	-
SoH	State-of-Health	-
SoC	State-of-Charge	-
RMSE	Root Mean Square Error	-
MSE	Mean Squared Error	-
MAE	Mean Absolute Error	-
CC	Coulomb Counting	-
BMS	Battery Management System	-
Digital Twin	Replikasi digital sistem fisik untuk monitoring dan kontrol	-
V2G	Vehicle-to-Grid	-
G2V	Grid-to-Vehicle	-
Pulse DC	Pengisian baterai dengan arus pulsa DC	-
PPC	Positive Pulse Charging	-
MPC	Model Predictive Control	-
CC-CV	Constant Current–Constant Voltage Charging	-
DFN	Doyle-Fuller-Newman model	-
Fast Charging	Pengisian cepat baterai	-
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System	-
ML	Machine Learning	-
CNN	Convolutional Neural Network	-
ANN	Artificial Neural Network	-
LSTM	Long Short-Term Memory	-
AKF	Adaptive Kalman Filter	-
DEKF	Dual Extended Kalman Filter	-
AEKF	Adaptive Extended Kalman Filter	-
UKF	Unscented Kalman Filter	-
EKF	Extended Kalman Filter	-
CDKF	Central Difference Kalman Filter	-
CKF	Cubature Kalman Filter	-

Simbol / Singkatan	Makna / Definisi	Satuan
UT-DEKF	Unscented Transformed-Dual Extended Kalman Filter	-
VBMCKKF	Variational Bayesian–Maximum Correntropy Cubature Kalman Filter	-
SPKF	Sigma Point Kalman Filter	-
ECM	Equivalent Circuit Model	-
PSO	Particle Swarm Optimization	-
SaPSO	Self-Adaptive Particle Swarm Optimization	-
OCV	Open Circuit Voltage	V
RLS	Recursive Least Squares	-
PF	Particle Filter	-
FOM	Fractional-Order Model	-
LFP	Lithium Iron Phosphate	-
RFR	Random Forest Regressor	-
RF	Random Forest	-
NCA	Nickel Cobalt Aluminum Oxide	-
V_t	Terminal Voltage	V
I	Input Current	A
V_0	Output Voltage	V
R_i	Resistances in RC Networks ($i = 1,2,3$)	Ω
R_0	Ohmic Resistance	Ω
R0, R1, R2, R3	Resistors dalam ECM	Ω
C1, C2, C3	Capacitors dalam ECM	F
α	Adaptive weighting factor untuk EKF-UKF switching	-
VOCV	Open-Circuit Voltage	V
Q	Battery Capacity	Ah
Ci	Capacitances in RC Networks ($i = 1,2,3$)	F
eff	Battery Efficiency	-
dt	Time Step Duration	H
τ_i	Time Constant dari i-th RC network	H
sk	Measurement Noise	V
Ik	Load Current	A
wk	Process Noise	A
yk	Output Voltage	V
Pk	Covariance Matrix pada Time Step k	-
Kk	Kalman Gain pada Time Step k	-