

Implementasi Logika *Fuzzy* untuk Pengukuran SoC Baterai Mobil Listrik yang Akurat

(*Fuzzy Logic Implementation for Accurate Electric Car Battery SoC Measurement*)

Muhammad Dzaky Ashidqi¹, Miftahul Anwar^{1*}, Chico Hermanu B.A.¹, Agus Ramelan¹, Feri Adriyanto¹

Abstract—Changes in temperature can affect the accuracy of the estimated SoC value based on voltage. In this study, fuzzy logic was implemented to correct the SoC estimation error caused by the influence of temperature. The system acquired data through sensors and then processed it using the Arduino microcontroller. Parameters in the form of voltage, temperature, and current were processed by Arduino with a fuzzy logic program which was uploaded into it and produced the output of the estimated SoC value. From the observations, it was found that the estimated SoC value from this method had better accuracy with a smaller error than the SoC estimation based on voltage alone. Using the RMSE method, the errors calculated in this method in the process of charging and discharging without running were 2.26 and 7.74, while the SoC estimation error based on voltage alone reached 4.88 and 12.8. In the discharging process with a running car, the SoC estimation results using fuzzy logic also showed accurate results. There was only 1% of SoC value increasing pattern during the discharging process, which the value trend should continue to decrease and should not be an increase. In addition, compared to the previous method applied to the same research object, namely the chemical equilibrium constant method, this method also showed more accurate results.

Intisari—Perubahan suhu dapat memengaruhi akurasi estimasi nilai *State of Charge* (SoC) berdasarkan tegangan. Pada makalah ini, digunakan implementasi logika *fuzzy* untuk memperbaiki *error* estimasi SoC yang disebabkan pengaruh suhu. Sistem mengakuisisi data melalui sensor dan kemudian mengolahnya menggunakan mikrokontroler Arduino. Parameter berupa tegangan, suhu, dan arus diolah oleh Arduino dengan program logika *fuzzy* yang diunggah ke dalamnya sehingga dihasilkan keluaran nilai estimasi SoC. Dari hasil pengamatan didapati bahwa nilai estimasi SoC hasil dari metode ini memiliki akurasi yang lebih baik dengan *error* yang lebih kecil dibandingkan estimasi SoC berdasarkan tegangan saja. Dengan metode RMSE, *error* yang terhitung dengan metode ini pada proses *charging* dan *discharging* tanpa mobil berjalan adalah 2,26 dan 7,74, sedangkan *error* estimasi SoC berdasarkan tegangan saja mencapai 4,88 dan 12,8. Pada proses *discharging* dengan mobil berjalan, hasil estimasi SoC menggunakan logika *fuzzy* juga menunjukkan hasil yang akurat. Hanya terdapat 1% berupa pola kenaikan nilai SoC pada saat *discharging* yang seharusnya tren nilainya terus menurun, tidak boleh ada nilai yang naik. Selain itu, jika dibandingkan dengan metode

sebelumnya yang diaplikasikan pada objek penelitian yang sama, yaitu metode konstanta kesetimbangan kimia, metode ini juga menunjukkan hasil yang lebih akurat.

Kata Kunci—Baterai, Suhu, *State of Charge* (SoC), *Fuzzy Logic*.

I. PENDAHULUAN

Baterai merupakan salah satu elemen penting pada kendaraan listrik yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik [1]. Sebagai sumber energi penggerak mobil listrik, kapasitas muatan baterai, atau yang disebut dengan *State of Charge* (SoC), perlu dimonitor agar dapat diketahui waktu baterai harus diisi ulang. Selain itu, perhitungan SoC perlu dilakukan secara akurat untuk menghindari *overdischarge*, meningkatkan umur baterai, dan memungkinkan strategi kontrol yang rasional untuk menghemat energi [2]. Pengukuran SoC dapat dilakukan dengan berbagai cara, di antaranya dengan mengukur tegangan pada sel baterai, menggunakan metode *Coulomb Counting*, dan metode filter Kalman [3]. Metode pengukuran SoC berbasis pengukuran tegangan sel baterai merupakan metode yang paling mudah. Namun, pengukuran SoC dengan metode ini memiliki akurasi yang rendah karena naik turunnya suhu pada baterai ketika beroperasi dapat memengaruhi hasil pengukuran [4].

Pada penelitian yang dilakukan mengenai sistem *monitoring* SoC pada baterai, ditemukan bahwa temperatur pada baterai saat beroperasi dapat memengaruhi perhitungan SoC [5]. Pada penelitian tersebut, ditemukan bahwa temperatur memengaruhi 10% sampai 20% nilai SoC pada awal dan akhir waktu *charging*. Pada saat *discharging*, temperatur memengaruhi tegangan berdasarkan besar daya yang dikonsumsi motor listrik [5]. Temperatur operasi baterai perlu dijaga pada angka tertentu untuk mencapai efisiensi maksimum. Baterai yang beroperasi pada temperatur rendah atau terlalu tinggi tidak akan menghasilkan kinerja sebaik saat baterai beroperasi pada temperatur idealnya [6]. Temperatur baterai yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan semakin rendahnya tingkat *service life* [7].

Ketergantungan pengukuran SoC berdasarkan tegangan terhadap suhu dapat diatasi dengan penerapan teknologi kecerdasan buatan atau *artificial intelligent* seperti pada sebuah penelitian yang memprediksi SoC dengan masukan parameter tegangan dan suhu menggunakan algoritme genetika [8]. Hasil prediksi nilai SoC dengan penerapan algoritme genetika menunjukkan bahwa estimasi *error* yang terjadi pada proses pengambilan data mendekati 0 sehingga akurasi pengukuran SoC lebih tinggi. Selain pada pengukuran

¹ Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta 57126 INDONESIA (telp: 0271-646 994; fax: 0271-646655; e-mail: Dzakyash@student.uns.ac.id)

*Corresponding Author: miftahwar@staff.uns.ac.id



Gbr. 1 Prototipe mobil golf elektrik UNS yang digunakan sebagai bahan percobaan.

SoC dengan metode pengukuran tegangan, algoritme genetika juga dapat diterapkan pada metode pengukuran SoC *structured neural network* [9]. Penerapan teknologi kecerdasan buatan tersebut, jika dibandingkan dengan metode sebelumnya, yaitu *extended Kalman filter*, memperlihatkan hasil prediksi SoC dengan *error* yang lebih rendah 0.32% dibanding nilai referensinya.

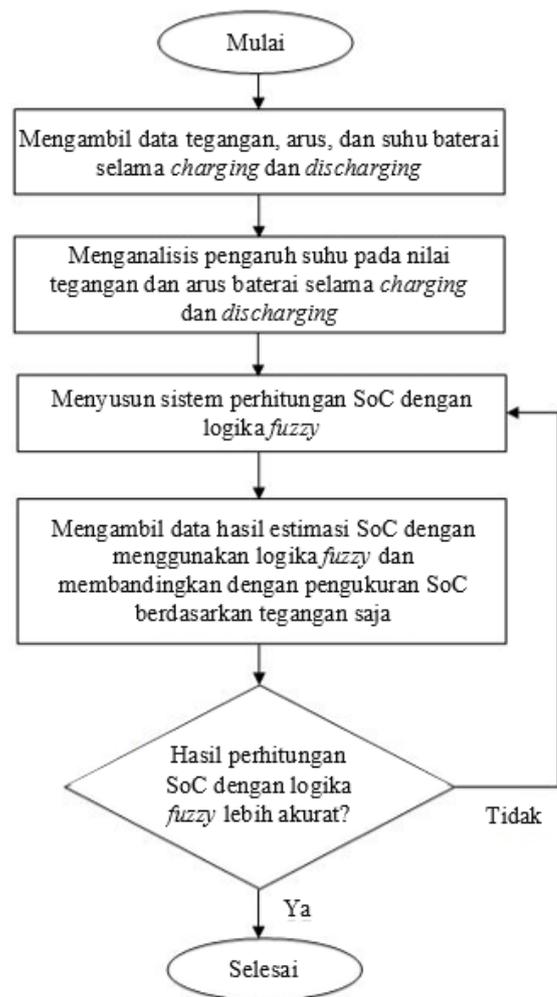
Selain algoritme genetika, logika *fuzzy* juga dapat diaplikasikan untuk perhitungan nilai SoC. Kelebihan logika *fuzzy* yaitu lebih mudah dipahami dan fleksibel dalam penggunaannya, sehingga dapat diimplementasikan pada rancangan perangkat keras teknik kendali dan instrumentasi konvensional [10]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu perangkat keras, bukan hanya simulasi saja, sehingga logika *fuzzy* lebih tepat untuk diaplikasikan dibandingkan dengan algoritme genetika.

Implementasi logika *fuzzy* dalam pengukuran sebuah parameter dapat meningkatkan akurasi hasil pengukuran karena dapat memberi toleransi pada data yang tidak tepat [11]. Dalam sebuah penelitian, dilakukan simulasi pengukuran SoC dengan metode filter Kalman yang di dalamnya diimplementasikan logika *fuzzy*, dengan hasil nilai SoC yang diukur lebih akurat [12]. Jika dibandingkan dengan nilai referensinya, estimasi nilai SoC dengan metode *fuzzy* menunjukkan rata-rata selisih kurang dari 0,1%, sedangkan dengan metode filter Kalman konvensional, rata-rata selisihnya lebih dari 0,5%.

Makalah ini bertujuan untuk merancang metode estimasi nilai SoC yang memiliki akurasi tinggi dan dapat diimplementasikan menjadi sebuah perangkat keras atau prototipe berbasis mikrokontroler. Pada penelitian-penelitian sebelumnya, metode estimasi SoC yang dirancang hanya diimplementasikan pada simulasi saja. Berdasarkan latar belakang yang disebutkan, pada makalah ini dipilih metode estimasi SoC menggunakan logika *fuzzy* karena telah teruji dapat memperbaiki akurasi dan dapat diimplementasikan pada perangkat keras berbasis mikrokontroler.

II. METODOLOGI

Pada makalah ini, baterai mobil listrik yang diukur SoC-nya adalah baterai jenis *lead-acid* berjumlah sepuluh buah

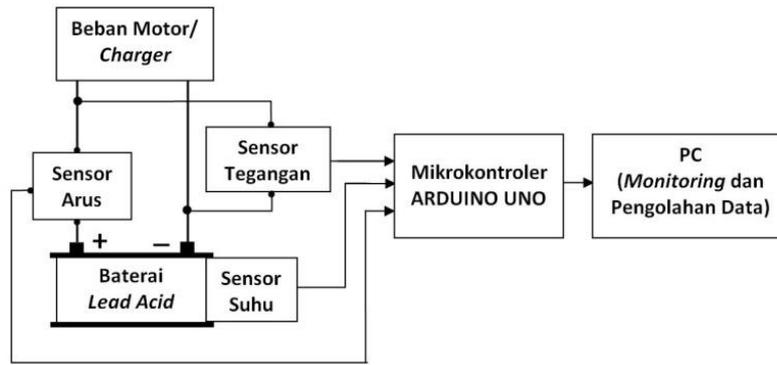


Gbr. 2 Diagram alir penelitian.

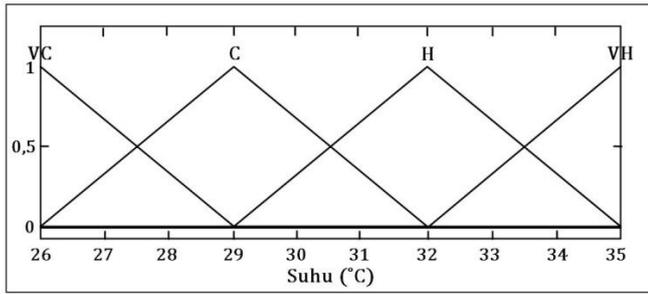
yang terpasang seri. Tegangan nominal total dari rangkaian baterai tersebut adalah 60 V dengan kapasitas 115 Ah. Percobaan dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Gbr. 1 menampilkan foto prototipe mobil golf listrik yang digunakan pada pengujian. Mobil tersebut memiliki bobot keseluruhan 220 kg dan menggunakan motor listrik jenis *Brushless Direct Current* (BLDC) berkapasitas 1 kW. Rangkaian proses penelitian yang dilakukan diperlihatkan oleh diagram alir pada Gbr. 2.

Akuisisi data arus, tegangan, dan suhu dilakukan pada tiga proses, yaitu pada proses *charging* selama 2.000 s, *discharging* tanpa mobil berjalan (motor tidak terhubung ke *gear box*) selama 250 s dan *discharging* dengan mobil berjalan selama 500 s. Seluruh proses akuisisi data diulang sebanyak empat kali untuk masing-masing prosesnya dan pada makalah ini ditampilkan hasil akuisisi data terbaik dari keempat percobaan pengambilan data.

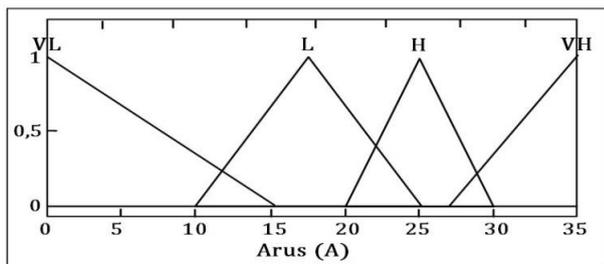
Adapun diagram blok sistem akuisisi data tegangan, arus, dan suhu yang digunakan diperlihatkan pada Gbr. 3. Sensor arus yang digunakan adalah jenis *hall effect sensor* WCS1500 yang memiliki kapasitas pengukuran arus hingga 200 A. Sementara itu, digunakan rangkaian pembagi tegangan yang terintegrasi dengan ADS1115 sebagai sensor tegangan dan



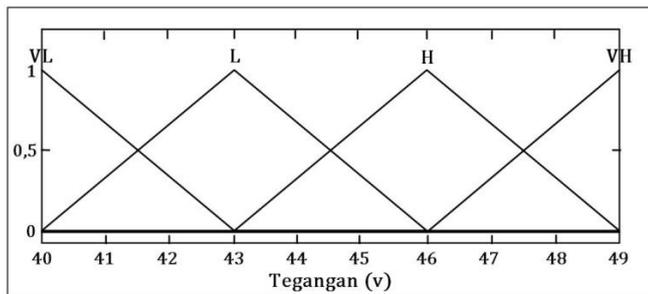
Gbr. 3 Diagram blok sistem akuisisi sata tegangan, arus dan suhu baterai.



(a)



(b)



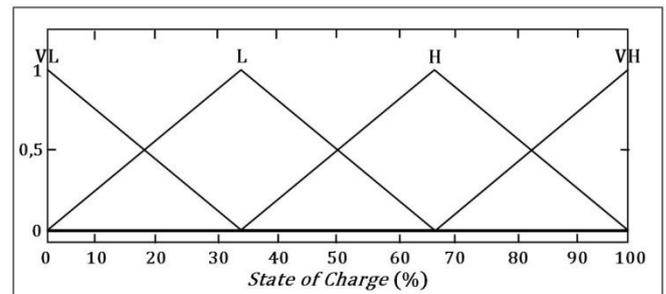
(c)

Gbr. 4 Fungsi keanggotaan masukan, (a) suhu, (b) arus, (c) tegangan.

sensor DS18B20 sebagai sensor suhu yang diletakkan di badan baterai. Mikrokontroler Arduino Uno digunakan untuk mengontrol sensor ketika proses akuisisi dan kemudian mengolah data-data tersebut untuk mengestimasi nilai SoC berdasarkan program sistem logika fuzzy yang terunggah ke perangkat tersebut.

III. PERANCANGAN LOGIKA FUZZY

Pada percobaan ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai estimasi SoC dengan cara memasukkan nilai tegangan



Gbr. 5 Fungsi keanggotaan keluaran SoC.

TABEL I
RULE BASE LOGIKA FUZZY UNTUK PROSES CHARGING

		Tegangan			
		VL	L	H	VH
Temperatur	VC	VL	VL	L	VH
	C	VL	VL	L	VH
	H	L	VL	L	H
	VH	L	L	H	H

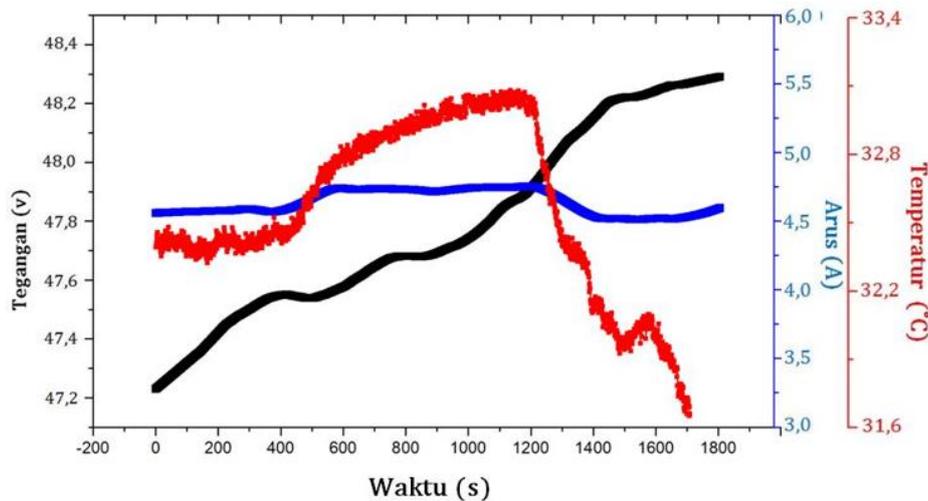
dan suhu baterai selama proses *charging* dan *discharging* ke dalam sistem logika fuzzy yang telah disiapkan. Untuk membuat sistem estimasi SoC dengan logika fuzzy, perlu dibuat fungsi keanggotaan (*membership function*) dan *rule base* (aturan logika) berdasarkan data-data yang telah diambil sebelumnya.

A. Fungsi Keanggotaan

Berdasarkan data-data yang diperoleh dari proses *charging* dan *discharging* pada baterai, rancangan fungsi keanggotaan untuk sistem logika fuzzy yang digunakan pada makalah ini adalah ditunjukkan pada Gbr. 4. Sebagai keluaran inferensi sistem logika fuzzy, fungsi keanggotaan untuk SoC juga perlu dibuat. Besaran SoC dihitung dalam bentuk persentase dengan rentang 0 sampai 100. Hasil rancangan fungsi keanggotaan untuk keluaran SoC adalah diperlihatkan pada Gbr. 5.

B. Rule Base Logika Fuzzy

Pada sistem ini dibuat *rule base* yang berbeda antara sistem *charging* dan *discharging*. *Rule base* yang digunakan pada proses *charging* diperlihatkan pada Tabel I, sedangkan *rule base* untuk proses *discharging* ditunjukkan pada Tabel II dan



Gbr. 6 Grafik hasil pengukuran parameter tegangan, suhu, dan arus baterai saat charging.

TABEL II
RULE BASE LOGIKA FUZZY UNTUK PROSES DISCHARGING 1

		Tegangan			
		VL	L	H	VH
Arus	VL	VL	VL	L	VH
	L	VL	VL	L	VH
	H	VL	L	H	VH
	VH	L	L	H	VH

TABEL III
RULE BASE LOGIKA FUZZY UNTUK PROSES DISCHARGING 2

		Real Voltage			
		VL	L	H	VH
Temperatu	VC	VL	L	H	L
	C	VL	VL	L	H
	H	L	L	L	VH
	VH	L	L	H	VH

Tabel III. Terdapat dua proses inferensi yang terjadi pada saat *discharging*. Hal ini karena pada saat *discharging* nilai arus tidak konstan seperti pada saat *charging* dan memengaruhi nilai tegangan. Nilai tegangan diinferensikan terlebih dahulu dengan arus, kemudian menghasilkan nilai *Real Voltage* (RV) sebagaimana terlihat pada Tabel II. Kemudian, hasil inferensi berupa RV diinferensikan dengan masukan nilai suhu sebagaimana terlihat pada Tabel III.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari sistem logika *fuzzy* yang telah dirancang sebelumnya, berhasil disusun *script* atau baris-baris program yang diunggah ke Arduino untuk memproses estimasi SoC berdasarkan masukan parameter tegangan, suhu, dan arus. Data hasil estimasi nilai SoC pada makalah ini dijelaskan sebagai berikut.

A. Charging

Pada saat *charging*, baterai mobil listrik dialiri arus dari *charger* dengan metode *constant current*. Hasil pengukuran tegangan, arus, dan suhu baterai pada saat *charging*

ditunjukkan pada Gbr. 6. Tampak bahwa arus yang mengalir ke baterai selama proses *charging* mendekati konstan dengan rata-rata nilai arus 4,63 A. Terjadi perubahan nilai tegangan yang tidak linier selama proses *charging* ketika suhu di atas 32,5°C. Sebelum terjadi perubahan suhu, nilai tegangan naik dengan perubahan yang linier, dari 47,2 V hingga 47,58 V.

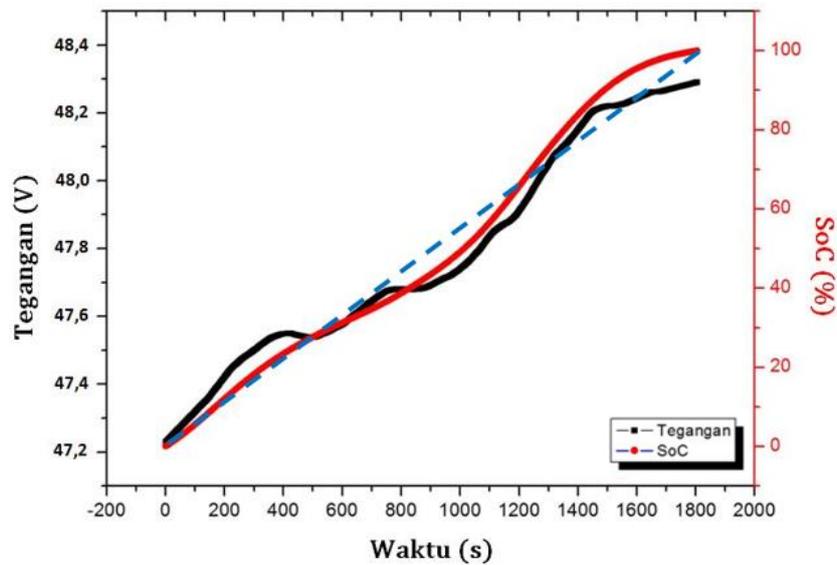
Hasil estimasi SoC menggunakan logika *fuzzy* pada saat *charging* ditampilkan pada Gbr. 7. Berdasarkan teori perhitungan muatan listrik, ketika baterai diisi ulang dengan arus yang konstan, SoC naik secara linier. Pada grafik perbandingan estimasi nilai SoC menggunakan logika *fuzzy* dan estimasi nilai SoC berdasarkan tegangan saja diberikan sebuah garis linier putus-putus berwarna biru sebagai pembanding kelinieran hasil estimasi SoC dengan kedua metode tersebut dan dijadikan sebagai acuan untuk menghitung *error* dari kedua metode tersebut. *Error* pada kedua metode tersebut dibandingkan dengan garis linier biru, dihitung menggunakan metode *Root Mean Square Error* (RMSE). Rumus perhitungan RMSE yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_t^2 (y'_t - y_t)^2}{n}} \tag{1}$$

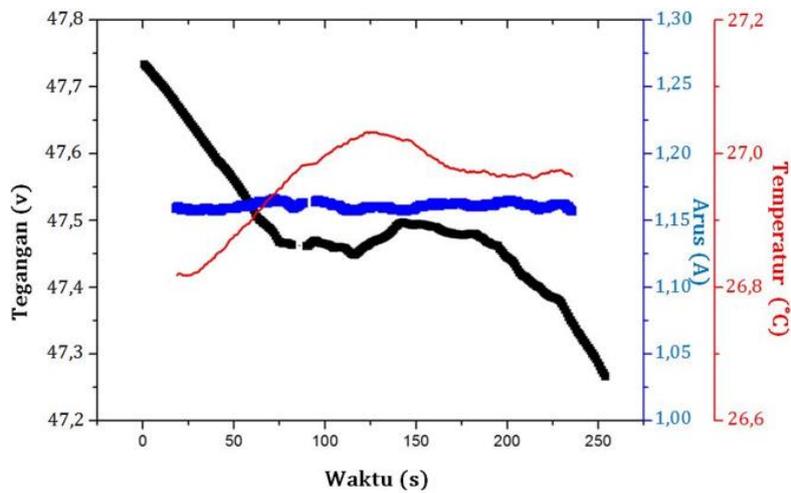
dengan y'_t adalah nilai SoC pada t dari metode yang akan dihitung *error*-nya, sedangkan y_t adalah nilai acuan SoC sesuai garis linier. Dari perhitungan tersebut, diperoleh nilai *error* pada metode estimasi SoC dengan metode logika *fuzzy* adalah 2,26, sedangkan pada metode estimasi SoC berdasarkan tegangan saja nilai *error*-nya adalah 4,88. Dengan demikian, estimasi SoC menggunakan metode logika *fuzzy* pada proses *charging* menunjukkan hasil yang lebih akurat.

B. Discharging tanpa Mobil berjalan

Pada saat *discharging* tanpa mobil berjalan, baterai dihubungkan ke motor listrik BLDC tanpa dihubungkan ke roda (rantai penghubung motor dan *gear* roda dilepas). Motor berputar konstan selama proses *discharging*. Hasil pengukuran tegangan, arus, dan suhu baterai pada saat



Gbr. 7 Estimasi SoC dengan fuzzy logic pada saat charging.



Gbr. 8 Grafik hasil pengukuran suhu, arus, dan tegangan baterai pada saat discharging tanpa mobil berjalan.

discharging tanpa mobil berjalan ditunjukkan oleh grafik pada Gbr. 8.

Pada kondisi discharging tanpa mobil berjalan, nilai arus yang mengalir dari baterai ke controller cenderung konstan karena kecepatan motor juga konstan selama discharging. Dari Gbr. 8 dapat diketahui bahwa nilai rata-rata arus yang mengalir ke motor selama discharging adalah 1,15 A. Meskipun arus yang mengalir konstan, didapati nilai tegangan tidak menurun secara linier. Pada detik ke-75 hingga detik ke-120, nilai tegangan tidak berubah dan mendekati konstan sebesar 47,45 V, padahal arus terus mengalir keluar pada rentang waktu tersebut.

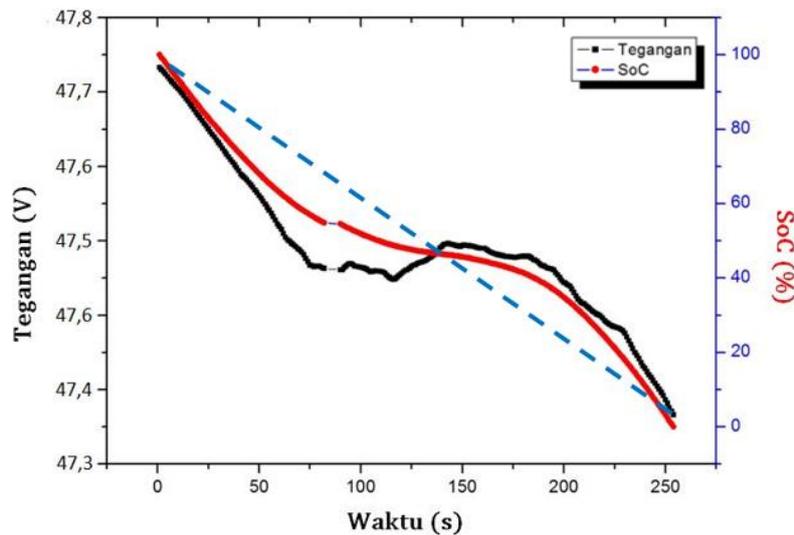
Estimasi SoC menggunakan logika fuzzy pada saat discharging tanpa mobil berjalan pada Gbr. 9. Seperti halnya ketika baterai diisi ulang dengan arus yang konstan, SoC naik secara linier, pada proses discharging jika arus yang keluar dari baterai konstan, SoC juga akan turun secara linier. Pada grafik perbandingan estimasi nilai SoC dengan menggunakan logika fuzzy dan estimasi nilai SoC berdasarkan tegangan saja

diberikan sebuah garis linier putus-putus berwarna biru sebagai pembanding kelinieran hasil estimasi SoC dengan kedua metode tersebut. Dengan menggunakan (1), diketahui error dari metode estimasi SoC dengan metode logika fuzzy sebesar 7,74, sedangkan pada metode estimasi SoC berdasarkan tegangan saja nilai error-nya adalah 12,8. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi SoC dengan metode logika fuzzy menghasilkan nilai yang lebih akurat.

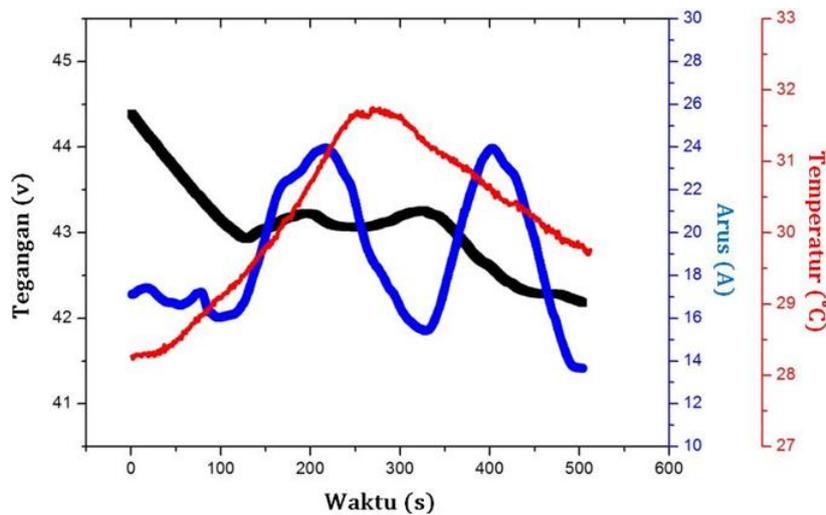
C. Discharging dengan Mobil Berjalan

Pada saat discharging dengan mobil berjalan, motor listrik dihubungkan ke gear roda. Hasil pengukuran tegangan, arus, dan suhu baterai pada saat discharging dengan mobil berjalan ditunjukkan oleh grafik pada Gbr. 10.

Dari Gbr. 10 dapat diamati bahwa nilai arus yang keluar dari baterai ke beban tidak konstan sebagaimana pada proses charging dan discharging tanpa mobil berjalan. Nilai arus terbesar yang terbaca adalah 24,1 A pada detik ke-205 dan detik ke-415. Berubah-ubahnya nilai arus menyebabkan nilai



Gbr. 9 Estimasi SoC dengan *fuzzy logic* pada saat *discharging* tanpa mobil berjalan.



Gbr. 10 Grafik hasil pengukuran suhu, arus, dan tegangan baterai pada saat *discharging* tanpa mobil berjalan.

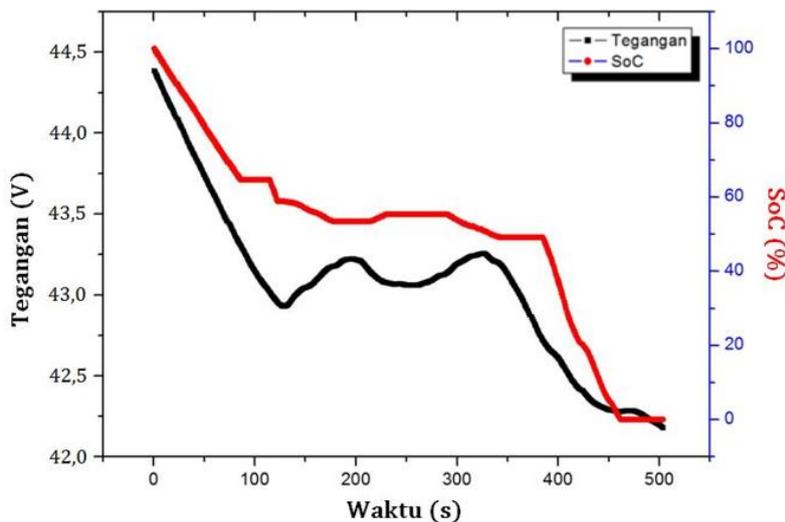
tegangan tidak menurun secara linier. Hasil estimasi SoC menggunakan logika *fuzzy* pada saat *discharging* dengan mobil berjalan ditunjukkan oleh grafik pada Gbr. 11.

Pada proses *discharging* dengan mobil berjalan, nilai SoC yang dihasilkan berbeda dengan tren nilai tegangannya. Jika grafik pada Gbr. 11 diamati, nilai tegangan naik turun secara tidak beraturan. Pada detik ke-120, nilai tegangan, yang sebelumnya menurun secara linier dari 44,5 V hingga 42,9 V, naik menjadi 43,2 V pada detik ke-200. Pada detik ke-320 nilai tegangan kembali mengalami kenaikan hingga 43,3 V dari sebelumnya 43 V pada detik ke-270. Jika nilai SoC diestimasi berdasarkan nilai tegangan yang terbaca saja, maka hasil perhitungan menimbulkan *error* karena nilai SoC baterai ketika *discharging* akan terus menurun dan tidak naik turun sebagaimana nilai tegangan pada grafik di Gbr. 11. Sementara itu, jika hasil estimasi SoC diamati menggunakan logika *fuzzy*, didapati hanya ada sedikit *error* yang menunjukkan nilai SoC naik kembali setelah menurun, yaitu pada detik ke-225. Namun, kenaikannya hanya sedikit, yaitu menjadi 55% dari sebelumnya 54%. pada detik ke-220.

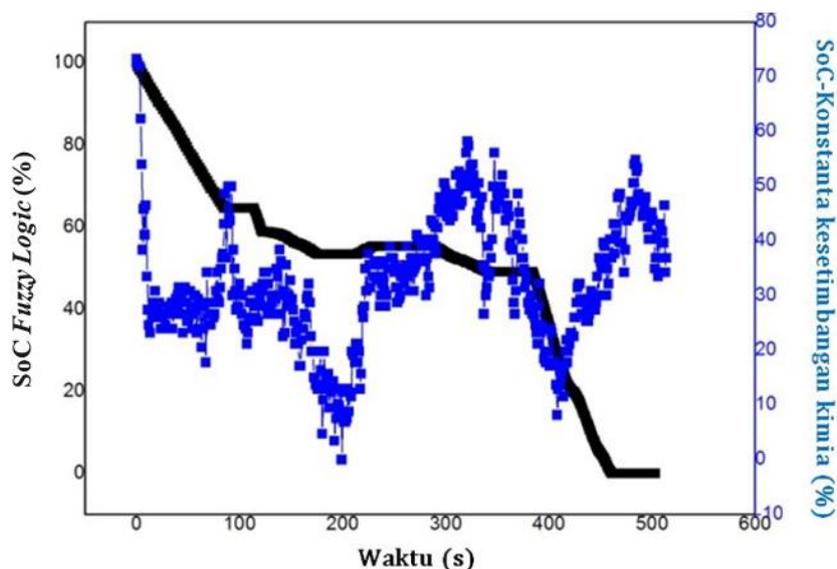
Jika dibandingkan dengan metode pengukuran SoC dengan metode berbeda yang dilakukan sebelumnya pada baterai mobil listrik milik Program Studi Teknik Elektro UNS, metode pada makalah ini menghasilkan estimasi nilai SoC yang lebih akurat. Pada penelitian sebelumnya dilakukan pengukuran SoC menggunakan metode operasi konstanta kesetimbangan reaksi kimia, yang disimulasikan menggunakan (2) [13].

$$C(I, \theta) = \frac{K_c C_0 * K_t}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\theta} \quad (2)$$

Perbandingan hasil simulasi menggunakan (2) dengan pengukuran SoC pada makalah ini ditampilkan dalam grafik pada Gbr. 12. Dengan data tegangan, arus, dan suhu baterai yang sama, hasil perhitungan menggunakan sistem logika *fuzzy* lebih akurat dibandingkan hasil pengukuran SoC menggunakan metode konstanta kesetimbangan kimia. Hasil estimasi SoC dengan metode konstanta kesetimbangan kimia menunjukkan tren nilai SoC yang naik turun, seperti pada detik ke-200 yang nilai SoC-nya turun sampai 0% kemudian



Gbr. 11 Estimasi SoC dengan logika fuzzy pada saat discharging dengan mobil berjalan.



Gbr. 12 Perbandingan hasil perhitungan SoC dengan metode logika fuzzy terhadap metode konstanta kesetimbangan kimia [13].

naik lagi dengan kenaikan yang sangat jauh yaitu hingga 60%. Lalu, nilai SoC kembali turun hingga 10% pada detik ke-400 dan kemudian naik lagi hingga 55% pada detik ke-500. Pada proses *discharging*, nilai SoC baterai seharusnya mengalami penurunan secara terus menerus [14]. Hal ini seperti yang ditunjukkan oleh hasil estimasi SoC menggunakan metode *fuzzy logic* yang dirancang dalam makalah ini. Meskipun terjadi *error* berupa nilai SoC yang naik turun pada detik ke-225, kenaikannya hanya sedikit, yaitu menjadi 55% dari sebelumnya 54% pada detik ke-220. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa estimasi nilai SoC dengan metode logika *fuzzy* lebih akurat dibandingkan estimasi SoC dengan metode konstanta kesetimbangan kimia yang diaplikasikan pada objek penelitian yang sama sebelumnya.

V. KESIMPULAN

Perubahan suhu pada baterai dapat menyebabkan *error* pada estimasi nilai SoC berdasarkan tegangan. Pada makalah ini dilakukan percobaan implementasi logika *fuzzy* pada

estimasi nilai SoC berdasarkan tegangan yang diaplikasikan pada perangkat keras berbasis mikrokontroler Arduino. Hasilnya, perancangan logika *fuzzy* untuk estimasi SoC berhasil diaplikasikan menjadi perangkat keras. Algoritme sistem yang diubah menjadi kumpulan kode berhasil diunggah ke mikrokontroler Arduino. Hasil estimasi nilai SoC menunjukkan akurasi yang lebih baik daripada pengukuran SoC berdasarkan tegangan saja. Pada proses *charging* dan *discharging* tanpa mobil berjalan, *error* estimasi SoC menggunakan metode logika *fuzzy* adalah 2,26 dan 7,74, sedangkan *error* estimasi SoC berdasarkan tegangan saja mencapai 4,88 dan 12,8. Pada proses *discharging* dengan mobil berjalan, hasil estimasi SoC menggunakan logika *fuzzy* menunjukkan perubahan nilai SoC yang terus menurun. Hanya terdapat sedikit pola naik turun dengan kenaikan hanya 1%. Jika dibandingkan dengan estimasi SoC berdasarkan tegangan saja maupun dengan metode konstanta kesetimbangan kimia, rasio naik turunnya mencapai 10% dan 50%. Metode ini memberikan hasil yang akurat dan berhasil

diimplementasikan menjadi perangkat keras. Selanjutnya, perancangan prototipe alat *monitoring* SoC perlu dikembangkan lagi dari metode ini dengan pengembangan pada metode akuisisi data untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Sifa'us Wulaning Arsri dan Tim Penelitian Electrical Vehicle Program Studi Teknik Elektro UNS atas kontribusinya pada penelitian ini. Penelitian ini didukung oleh Prioritas Riset Nasional Baterai Lithium (No. kontrak: No. 86/Menteri Ristek/Ka BRIN/E1/PRN/2020 dan No. 005/E1/PRN/2021) atas kerjasama LPDP, BPPT, Universitas Sebelas Maret, PT. LEN, dan PT. Pertamina.

REFERENSI

- [1] R. Faria, P. Moura, J. Delgado, dan A.T. de Almeida, "Managing the Charging of Electrical Vehicle: Impacts on the Electrical Grid and on the Environment," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, Vol. 6, No. 3, hal. 54-65, Jul. 2014.
- [2] Z.H. Cai, G.F. Liu, dan J. Luo, "Research State of Charge Estimation Tactics of Nickel-Hydrogen Battery," *2010 Int. Symp. Intell. Inf. Process. Trusted Comput. (IPTC)*, 2010, hal. 184-187.
- [3] A. Nugroho dan E. Rijanto, "The Simulation for Optimizing of Measurement of Battery's State of Charge Using Integral Observer," *Widyariset*, Vol. 17, No. 3, hal. 323-332, 2014.
- [4] S. Yarlagadda, T.T. Hartley, dan I. Husain, "A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, No. 6, hal. 2720-2729, Mei 2013.
- [5] M. Anwar, M.D. Ashidqi, S. Kaleg, F. Adriyanto, S.I. Cahyono, A. Hapid, dan K. Diharjo, "State of Charge Monitoring System of Electric Vehicle Using Fuzzy Logic," *Proc. 6th Int. Conf. Sustain. Energy Eng. Appl. (ICSEEA 2018)*, 2018, hal. 34-38.
- [6] M. Gencten, K.B. Donmesh, dan Y. Sahin, "Investigation of the Temperature Effect on Electrochemical Behaviors of TiO₂ for Gel Type Valve Regulated Lead-acid Batteries," *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A-Applied Sci. Eng.*, Vol. 17, No. 5, hal. 882-894, Jul. 2016.
- [7] K. Qian, C. Zhou, Y. Yuan, dan M. Allan, "Temperature Effect on Electric Vehicle Battery Cycle Life in Vehicle-to-Grid Applications," *Proc. China Int. Conf. Electr. Distrib.*, 2010, hal. 1-6.
- [8] H. Chaoui, S. Miah, A. Oukaour, dan H. Gualos, "State-of-Charge and State-of-Health Prediction of a Lead-Acid Batteries with Genetic Algorithms," *2015 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo (ITEC)*, 2015, hal. 673-674.
- [9] D. Andre, A. Nuhic, T. Soczka-Guth, dan D.U. Sauer, "Comparative Study of a Structured Neural Network and an Extended Kalman filter for State of Health Determination of Lithium-ion Batteries in Hybrid Electricvehicles," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, Vol. 26, No. 3, hal. 951-961, 2013.
- [10] T.J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Application*, 3rd ed., Hoboken, USA: John Wiley and Sons, Ltd., 2010.
- [11] M. Rasheed dan M.A. Sarhan, "Characteristics of Solar Cell Outdoor Measurements Using Fuzzy Logic Method," *Insight-Mathematics*, Vol. 1, No. 1, hal. 1-8, 2019.
- [12] X. Yan, Y. Yang, Q. Guo, H. Zhang, and W. Qu, "Electric Vehicle Battery SOC Estimation Based on Fuzzy Kalman Filter," *2nd Int. Symp. Instrum. Meas. Sens. Netw. Autom (IMSNA)*, 2013, hal. 863-866.
- [13] S.W. Arsri, M. Anwar, F.A. Farisi, J.A. Pratama, I. Iftadi, S. Kaleg, A. Hapid, S.I. Cahyono, dan K. Diharjo, "Analytical Study of Temperature Effect on Current and Voltage of Battery at Charging and Discharging Condition on Electric Vehicle," *AIP Conf. Proc.*, Vol. 2217, No. 1, hal. 030068.1-8, 2020.
- [14] M. Chen dan G.A. Rincon-Mora, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 21, No. 2, hal. 504-511, 2016.