

Analysis of the CC–CV Charging Profile Influence on Electric Vehicle Battery Lifespan

Duong Van Anh^{*}, Tuan Pham Thanh, Tung Duong Tuan, Tan Nguyen Hoang Duy,
Thang Nguyen Tien

Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, Vietnam

^{*}Corresponding author. Email: duongva@hcmute.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: 11/04/2025
Revised: 10/06/2025
Accepted: 07/08/2025
Published: 28/02/2026

KEYWORDS

Electric Vehicle;
Lithium Ion-Battery;
Charging process;
Battery lifespan;
Battery Saving.

ABSTRACT

Batteries represent a critical and high-value component within modern energy systems, particularly in the domain of electric vehicles (EVs). The operational lifespan of batteries significantly influences overall system performance, reliability, lifecycle costs, and environmental sustainability. Among the various stressors affecting battery health, the charging process is recognized as a predominant contributor to electrochemical degradation. Adverse conditions such as elevated charging rates, non-optimal ambient or cell temperatures, and suboptimal state-of-charge (SoC) windows can accelerate capacity fade and internal resistance growth, thereby diminishing battery longevity. Despite substantial advancements in battery technology, accurately characterizing and quantifying the long-term effects of diverse charging parameters remains a complex challenge, necessitating advanced modeling. In this context, the authors conducted comprehensive simulations to evaluate battery degradation behavior under varying charging profiles and environmental conditions. Based on the simulation outcomes, the study proposes evidence-based strategies to assist EV users in optimizing charging protocols, ultimately enhancing system efficiency, reducing maintenance costs, and prolonging battery service life.

Khảo sát ảnh hưởng của chế độ sạc CC-CV đến tuổi thọ của pin xe điện

Văn Ánh Dương^{*}, Phạm Thanh Tuấn, Dương Tuấn Tùng, Nguyễn Hoàng Duy Tân,
Nguyễn Tiên Thắng

Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

^{*}Tác giả liên hệ. Email: duongva@hcmute.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 11/04/2025
Ngày hoàn thiện: 10/06/2025
Ngày chấp nhận đăng: 07/08/2025
Ngày đăng: 28/02/2026

TỪ KHÓA

Xe điện;
Pin Lithium;
Quá trình sạc;
Tuổi thọ pin;
Bảo vệ pin.

TÓM TẮT

Pin lithium-ion đóng vai trò then chốt trong các hệ thống lưu trữ năng lượng, đặc biệt trong ứng dụng phương tiện giao thông điện. Tuổi thọ của pin ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất vận hành, độ tin cậy của hệ thống, chi phí bảo trì và tính bền vững môi trường. Trong đó, quá trình sạc là một trong những yếu tố chính góp phần gây suy giảm hiệu năng và rút ngắn tuổi thọ pin. Các điều kiện như tốc độ sạc cao, nhiệt độ môi trường không phù hợp và giới hạn dung lượng sạc không tối ưu có thể dẫn đến lão hóa sớm của tế bào pin. Tuy nhiên, việc định lượng và đánh giá định tính ảnh hưởng của các tham số sạc đến quá trình lão hóa pin vẫn là một thách thức kỹ thuật phức tạp. Thông qua các mô phỏng dựa trên mô hình hóa tiên tiến, nghiên cứu đã khảo sát tuổi thọ pin dưới nhiều kịch bản sạc khác nhau và đề xuất các chiến lược tối ưu hóa quy trình sạc nhằm kéo dài tuổi thọ và nâng cao hiệu quả khai thác năng lượng.

Doi: <https://doi.org/10.54644/jte.2026.1870>

Copyright © JTE. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium for non-commercial purpose, provided the original work is properly cited.

1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp ô tô đang trải qua một cuộc chuyển đổi sâu rộng theo hướng điện khí hóa, thể hiện rõ qua sự gia tăng đáng kể doanh số xe điện (EV) trên toàn cầu trong suốt thập kỷ qua. Động lực chính thúc đẩy sự thay đổi này trong lĩnh vực giao thông vận tải là áp lực ngày càng lớn từ vấn đề biến đổi khí hậu, xuất phát từ sự gia tăng liên tục của lượng phát thải khí nhà kính (GHG) [1]. Vì vậy, nhiều nghiên cứu chuyên sâu về điện khí hóa trong ngành giao thông đã được triển khai, với mục tiêu cốt lõi là nâng cao hiệu suất và độ tin cậy của xe điện chạy bằng pin (BEV), từ đó cải thiện hiệu quả kinh tế và tính khả dụng cho người dùng.

Hiện nay, pin lithium-ion điện áp cao (HV) được xem là nguồn năng lượng chính cho tất cả các tải điện của BEV. Song song với nghiên cứu và phát triển công nghệ pin, các phương thức sạc cũng đang được quan tâm và nghiên cứu rộng rãi trên toàn cầu. Trong số đó, phương pháp sạc CC-CV (Constant Current - Constant Voltage) đã nổi lên như một tiêu chuẩn hàng đầu nhờ vào hiệu suất cao và khả năng bảo vệ pin vượt trội. Cụ thể, giai đoạn sạc CC cung cấp dòng điện không đổi, giúp pin đạt khoảng 70-80% dung lượng trong thời gian ngắn, trong khi giai đoạn sạc CV duy trì điện áp không đổi, đảm bảo quá trình sạc diễn ra an toàn và tối ưu [2].

Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm cũng cho thấy phương pháp sạc CC-CV vẫn tồn tại một số hạn chế. Đáng chú ý nhất là thời gian sạc kéo dài trong giai đoạn điện áp không đổi (CV), đặc biệt sau khi pin đạt khoảng 80% dung lượng, gây bất tiện khi cần sạc nhanh. Hơn nữa, việc kiểm soát chính xác nhiệt độ trong suốt quá trình sạc, đặc biệt với dòng điện lớn, vẫn còn nhiều thách thức, làm tăng nguy cơ quá nhiệt và suy giảm chất lượng pin. Do đó, phương pháp CC-CV cần tiếp tục được điều chỉnh và tối ưu hóa để tương thích tốt hơn với pin thể rắn và các loại pin có mật độ năng lượng cao, nhằm đảm bảo hiệu suất và độ an toàn ở mức tối ưu.

Đáng chú ý, quá trình nghiên cứu và phát triển công nghệ sạc CC-CV đòi hỏi lượng lớn thời gian và nguồn lực, đặc biệt trong việc thu thập và xử lý dữ liệu thực nghiệm [3]-[5]. Trong nghiên cứu “Lithium-ion battery modeling and SoC estimation” của nhóm tác giả Ruoyu Xu, tác giả nhấn mạnh rằng mô hình hóa sạc CC-CV gặp nhiều khó khăn do dữ liệu thực nghiệm không đầy đủ và thiếu độ chính xác cao. Việc phụ thuộc vào dữ liệu sẵn có làm giảm tính linh hoạt trong việc xây dựng mô hình, đồng thời ảnh hưởng đến độ chính xác trong ước lượng trạng thái sạc (SOC) ở cấp độ cao [6].

Ngoài ra, trong nghiên cứu “Joint Estimation of SOC and Available Capacity of Power Lithium-Ion Battery” của nhóm tác giả Bo Huang và Chang Liu, đã chỉ ra rằng phương pháp CC-CV cũng cần sự hỗ trợ của trí tuệ nhân tạo (AI) để nâng cao hiệu quả tính toán và dự đoán. Sự kết hợp giữa AI và các thuật toán lọc nâng cao như EKF (Bộ lọc Kalman mở rộng) trong lĩnh vực Machine Learning (Máy học) và Deep Learning (Học sâu) sẽ giúp cải thiện đáng kể độ chính xác trong việc dự đoán SOC theo thời gian thực. Nhờ đó, hệ thống có thể cung cấp các giá trị SOC đầy đủ, chính xác hơn, phục vụ tốt hơn cho nhu cầu quản lý năng lượng và bảo vệ pin trong các ứng dụng thực tế [7].

Trong nghiên cứu này chúng tôi tập trung vào việc mô phỏng quá trình sạc dựa trên mô hình hóa tiên tiến, nghiên cứu đã khảo sát tuổi thọ pin dưới nhiều kịch bản sạc khác nhau và đề xuất các chiến lược tối ưu hóa quy trình sạc nhằm kéo dài tuổi thọ và nâng cao hiệu quả khai thác năng lượng.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Thông số tính toán

Đối với đề tài nghiên cứu, nhóm tác giả sử dụng thông số của pin loại li-ion Samsung SDI INR-18.650 (Bảng 1), làm cơ sở tính toán mô phỏng cho quá trình sạc cũng như là dự đoán tuổi thọ của pin thông qua các tác nhân khác tác động trong quá trình sạc.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của pin Pin Samsung SDI INR18650-20X [8].

Name	Samsung SDI INR18650-20X 2000mAh (Green)
Cell	Samsung SDI INR18650-20X 2000mAh

Supplier	ENERdan gmbH				Date	2-2013
Size	Weight:	42,4g	Length:	64,9mm	Diameter:	18,2mm
Info	Top:	flat	Bottom:	metal	Rated A	
Test Condition	Charge Voltage		4,2V	Termination current		0,1
Test Current (A)	0,2	0,5	1	2	3	5
Measured capacity (Ah)	2,064	2,047	2,019	1,980	1,965	1,962
Measured energy (Wh)	7,626	7,550	7,420	7,220	7,107	6,995
PCB protection trip current (A)	N/A					

Bảng 2. Bảng giá trị các thông số đo đạc được từ thực nghiệm dựa trên SOC.

SOC	Uocv	R0	R1	R2	C1	C2
10	3,17242	0,1867	0,0170	0,1898	3.737,7	7.051
20	3,2651	0,1469	0,0337	0,3775	20.592,2	2.785
30	3,36809	0,1190	0,0385	0,2770	47.868,8	4.753,3
40	3,47107	0,1224	0,0366	0,1077	806,19	1.227,5
50	3,57405	0,1180	0,0330	0,0898	1.361,6	1.461
60	3,67703	0,1160	0,0484	0,1514	1.908,8	1.363,8
70	3,7791	0,1084	0,0490	0,2361	2.095,8	7.842,1
80	3,87006	0,1079	0,0403	0,3066	2.858,5	4.182
90	3,97226	0,1102	0,0389	0,4284	2.336,3	3.535
100	4,16831	0,1117	0,0323	0,4363	3.084,7	2.995

Mô hình Dual Polarization [9] hiện tại là mô hình được sử dụng rộng rãi nhất để mô phỏng đặc tính điện hóa của pin trong các ứng dụng như quản lý năng lượng hoặc nghiên cứu về hệ thống lưu trữ năng lượng. Mô hình này phản ánh chính xác hơn các đặc điểm động học của pin so với mô hình đơn giản hơn như mô hình Thevenin [10] ($n = 1$). Vì vậy trong nghiên cứu tác giả sử dụng mô hình Dual Polarization để tính toán mô phỏng.

Theo Bảng 2, điện áp hở mạch (Uocv) tăng đều từ 3,17V tại SOC 10% lên 4,17V ở SOC 100%, phản ánh rõ mối quan hệ giữa điện áp và trạng thái sạc. Điện trở nội tại (nội trở) R0 giảm dần khi SOC tăng, thấp nhất tại SOC 80% (0,1079 Ohm), cho thấy pin đạt hiệu suất tối ưu trong vùng SOC 50–80%. Các điện trở R1, R2 và điện dung C1, C2 mô tả phản ứng động của pin: R1 và R2 biến đổi theo SOC, ảnh hưởng đến tổn hao ngắn hạn và dài hạn, trong khi C1 và C2 phản ánh khả năng lưu trữ điện tức thời và ổn định điện áp. Đặc biệt, tổn hao điện năng cao hơn ở SOC thấp và cao, cho thấy pin hoạt động hiệu quả nhất ở vùng SOC trung bình. Dữ liệu này rất quan trọng trong thiết kế hệ thống quản lý pin (BMS), giúp mô phỏng chính xác điện áp, tổn hao và tuổi thọ pin trong các điều kiện vận hành khác nhau.

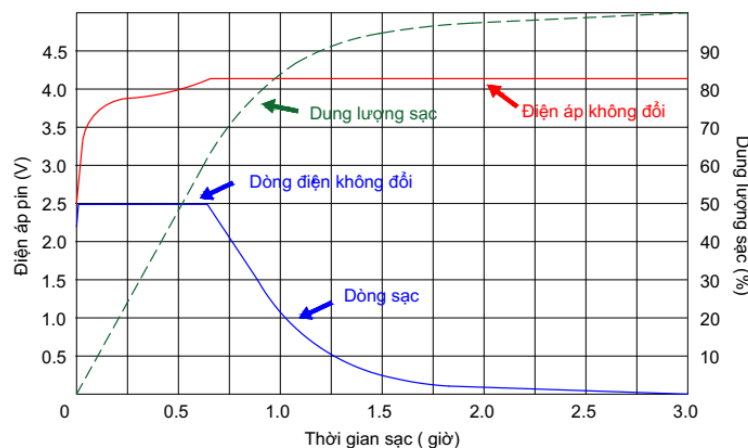
Bảng 2 thể hiện đặc tính điện theo SOC của pin dưới dạng các thông số trong mô hình mạch tương đương (ECM), giúp mô phỏng và dự đoán hiệu suất, tổn hao và phản ứng điện áp của pin trong thực tế. Thông qua các giá trị điện áp hở mạch (Uocv), điện trở (R0, R1, R2) và điện dung (C1, C2), bảng cung cấp cơ sở dữ liệu quan trọng để xây dựng mô hình pin trong phần mềm Matlab/ Simulink. Ý nghĩa chính của bảng là giúp đánh giá hiệu suất pin theo SOC, xác định vùng hoạt động tối ưu (SOC 50–80%), từ

đó tối ưu hóa quá trình sạc/xả, giảm tổn hao, kéo dài tuổi thọ và đảm bảo độ ổn định điện áp của hệ thống pin.

2.2. Nguyên lý hoạt động của cơ chế sạc CC-CV

Quá trình sạc CC-CV (Constant Current - Constant Voltage) được chia làm hai giai đoạn chính (Hình 1), nhưng hoạt động liền mạch nhằm tối ưu hiệu suất và độ an toàn khi sạc pin. Giai đoạn đầu tiên là sạc dòng không đổi (**CC - Constant Current**), trong đó dòng sạc được duy trì ở mức cố định (thường là khoảng 1C) để nhanh chóng tăng dung lượng pin. Trong suốt quá trình này, điện áp của pin tăng dần khi năng lượng được nạp vào cho đến khi đạt đến giá trị điện áp tối đa được định mức (ví dụ: 4,2 V/cell đối với pin lithium-ion). Khi điện áp đạt đến giới hạn này, quá trình chuyển sang giai đoạn sạc điện áp không đổi (**CV - Constant Voltage**). Trong giai đoạn CV, điện áp được giữ ổn định ở mức định mức, trong khi dòng sạc giảm dần theo thời gian do sự bão hòa của pin. Giai đoạn CV kết thúc khi dòng sạc giảm xuống dưới một giá trị ngưỡng nhỏ (thường là 0,05C hoặc thấp hơn), đảm bảo pin được sạc đầy (100%) mà không gây quá tải hoặc làm giảm tuổi thọ của pin. Phương pháp sạc CC-CV kết hợp tốc độ sạc nhanh ở giai đoạn CC với sự an toàn và chính xác ở giai đoạn CV, giúp tối ưu hóa hiệu suất hoạt động, bảo vệ hóa học bên trong pin và kéo dài tuổi thọ pin. [11]

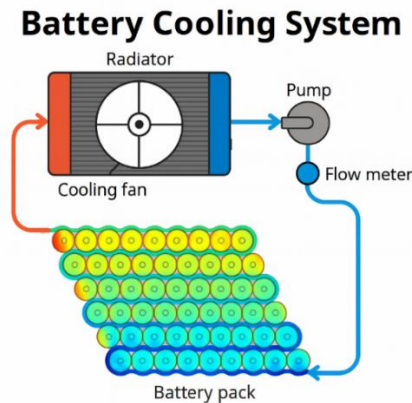
Trong quá trình sạc pin, đặc biệt ở giai đoạn sạc dòng không đổi (CC mode), dòng điện lớn được cung cấp để nhanh chóng nạp năng lượng cho pin, dẫn đến sự gia tăng đáng kể nhiệt độ. Khi chuyển sang giai đoạn sạc điện áp không đổi (CV mode), dòng điện bắt đầu giảm dần theo thời gian, giúp nhiệt độ của pin hạ xuống [12]. Trong giai đoạn này, hệ thống làm mát sẽ hỗ trợ hiệu quả hơn, giúp duy trì nhiệt độ pin ở mức an toàn và ổn định.



Hình 1. Đồ thị minh họa cơ chế sạc CC-CV. [11]

2.3. Cơ chế làm mát khi sạc CC-CV

Cơ chế làm mát của pin xe điện hoạt động dựa trên hai nguyên lý chính là truyền nhiệt dẫn (conduction) và đối lưu cưỡng bức (forced convection), đảm bảo duy trì nhiệt độ pin trong giới hạn an toàn khi sạc nhanh hoặc xả ở công suất cao. Hệ thống làm mát sử dụng chất lỏng, thường là hỗn hợp 50% nước và 50% ethylene glycol, được bơm tuần hoàn qua các ống dẫn bố trí tiếp xúc hoặc gần sát với bề mặt các mô-đun pin (Hình 2). Nhiệt lượng từ pin được truyền qua vật liệu dẫn nhiệt của ống dẫn đến chất lỏng bên trong. Chất làm mát sau đó hấp thụ nhiệt lượng này và được bơm đến bộ tản nhiệt (radiator), nơi nhiệt được truyền ra môi trường xung quanh nhờ quạt và cánh tản nhiệt. Đồng thời, việc làm mát này tác động gián tiếp đến các tế bào pin, duy trì nhiệt độ đồng đều và giảm thiểu rủi ro quá nhiệt cục bộ. Chất lỏng sau khi được làm mát sẽ quay trở lại ống dẫn để tiếp tục chu trình làm mát. Hệ thống đối lưu cưỡng bức này không chỉ tối ưu hóa hiệu quả tản nhiệt mà còn giúp bảo vệ pin khỏi nguy cơ quá nhiệt, đảm bảo hiệu suất vận hành ổn định, kéo dài tuổi thọ pin, ngay cả trong các điều kiện nhiệt độ môi trường khắc nghiệt. [13], [14]



Hình 2. Hình ảnh minh họa bố trí của hệ thống làm mát cưỡng bức trên pin xe điện.[13]

3. Tính toán, mô phỏng hệ thống sạc CC – CV và mô hình dự đoán tuổi thọ

3.1. Mô hình hệ thống sạc CC-CV

3.1.1. Thông số đầu vào

Trong nghiên cứu mô phỏng sạc này, nhóm tác giả lựa chọn trạng thái SOC ban đầu của pin là 10%. Tại mức SOC 10%, các thông số như điện trở, điện áp mạch hở, dung kháng, ... đều có giá trị tương ứng được trình bày trong bảng dữ liệu tại Bảng 3. Các thông số đó được kết hợp với các thông số của pin Samsung SDI INR18.650-20X đã đề cập trước đó, nhóm tác giả đã xây dựng bảng giá trị cơ bản của các thông số pin để phục vụ cho quá trình mô phỏng.

Bảng 3. Bảng giá trị của pin tương ứng với mức SOC = 10%.

Thông số kỹ thuật	Đơn vị	Pin Samsung SDI INR18650 - 20X
Trạng thái sạc SOC	%	10
Điện áp mạch hở OCV	Volt	3,17242
Điện trở trong R_0	Ohm	0,1867
Điện trở Ohmic R_1	Ohm	0,0170
Điện trở phân cực R_2	Ohm	0,1898
Tụ điện nhánh RC đầu tiên C_1	Farad	3.737,7
Tụ điện nhánh RC thứ hai C_2	Farad	7.051

3.1.2. Xây dựng và tính toán giải thuật sạc CC-CV

Tác giả sử dụng Matlab - Simulink làm công cụ để mô phỏng quá trình sạc pin theo thuật toán CC-CV. Thông qua đó, có thể đánh giá hiệu quả cũng như xác định những ưu điểm và hạn chế của thuật toán này. Giải thuật sạc CC-CV thì sẽ được chia ra làm 3 giai đoạn chính – Hình 3a,b:

Chế độ Standby (Standby Mode):

Trong trạng thái này, pin không còn đang sạc, do đó dòng điện sẽ bằng 0:

$$I = 0 \quad (1)$$

Khi sạc đã hoàn tất (SOC=100%), hệ thống sẽ chuyển sang chế độ Standby. Nếu pin còn nóng, nhiệt độ của cell sẽ giảm dần nhờ sự tác động của dung dịch làm mát, với công thức tính nhiệt độ như sau:

$$T_{cell}(t + \Delta t) = T_{cell}(t) + \frac{Q_{thermal} - Q_{cool}}{m \times c_p} \times \Delta T \quad (2)$$

Trong đó:

$T_{cell}(t)$: là nhiệt độ của cell pin tại thời điểm t

$T_{cell}(t + \Delta t)$: là nhiệt độ của cell pin tại thời điểm kế tiếp $t + \Delta t$, trong đó Δt là bước nhảy thời gian – khoảng thời gian nhỏ dùng để cập nhật nhiệt độ trong các mô phỏng hoặc tính toán động (s).

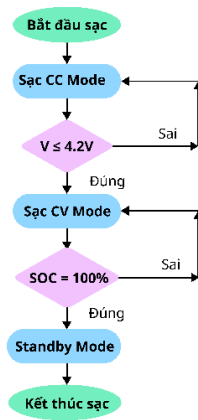
$Q_{thermal}$: là nhiệt lượng được sinh ra khi pin hoạt động sạc/ xả (W).

Q_{cool} : là nhiệt lượng lấy đi hoặc giảm bớt do có sự tác động của hệ thống làm mát (W).

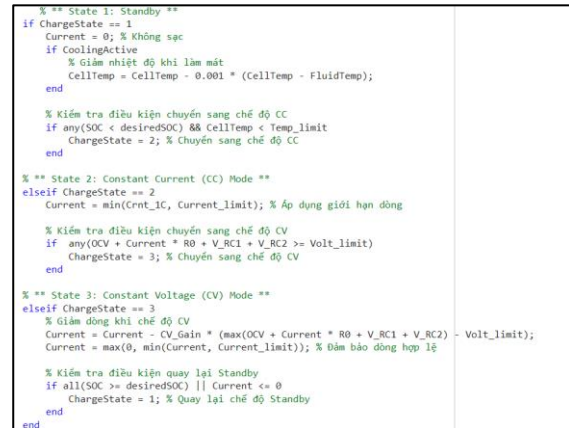
m : khối lượng của cell pin (kg).

c_p : là nhiệt dung riêng của môi chất làm mát (kg.J/K).

ΔT : Độ chênh lệch nhiệt độ



(a)



(b)

Hình 3. (a) Lưu đồ thuật toán mô phỏng sạc Pin và (b) Giải thuật mô phỏng sạc CC-CV.

Chế độ sạc CC (Constant Current Charging Mode):

Khi bắt đầu sạc, dòng được luôn được giữ ở mức 1C.

$$I = \min(I_{1C}, I_{limit}) \quad (3)$$

Đối với công thức trên mô tả quá trình điều chỉnh dòng sạc trong giai đoạn đầu của chế độ sạc CC-CV (dòng không đổi – điện áp không đổi) cho pin lithium-ion. Trong đó I_{1C} , là dòng điện sạc ở mức 1C, tức là dòng điện bằng chính dung lượng danh định của pin (ví dụ pin INR 18.650 có dung lượng danh định là 2A thì 1C = 2A) còn I_{limit} là giới hạn dòng điện sạc tối đa là do giới hạn an toàn của pin. Hàm “min” chọn giá trị nhỏ hơn giữa hai dòng này để đảm bảo rằng dòng sạc thực tế không vượt quá mức cho phép, vừa giúp pin sạc an toàn, vừa kéo dài tuổi thọ. Trong mô phỏng MATLAB/Simulink, công thức này là cơ sở để duy trì dòng sạc ổn định ở mức tối ưu trong pha dòng không đổi (CC), trước khi chuyển sang giai đoạn điện áp không đổi (CV) khi pin đạt tới ngưỡng điện áp định mức. Hơn nữa việc duy trì dòng sạc cho phép sạc nhanh hơn, và khi dòng điện không đổi thì điện áp sẽ tăng dần theo thời gian. Lúc này, điện áp $V(t)$ của pin được tính như sau:

$$V(t) = OCV(SOC) + I(t) \times R_0 + V_{RC1}(t) + V_{RC2}(t) \quad (4)$$

Và điều kiện để chuyển mode sang CV đó là $V(t) = 4.2V$, hoặc là khi $SOC = SOC_{desired}$ (SOC mong muốn) thì sẽ ngắt dòng về chế độ Standby.

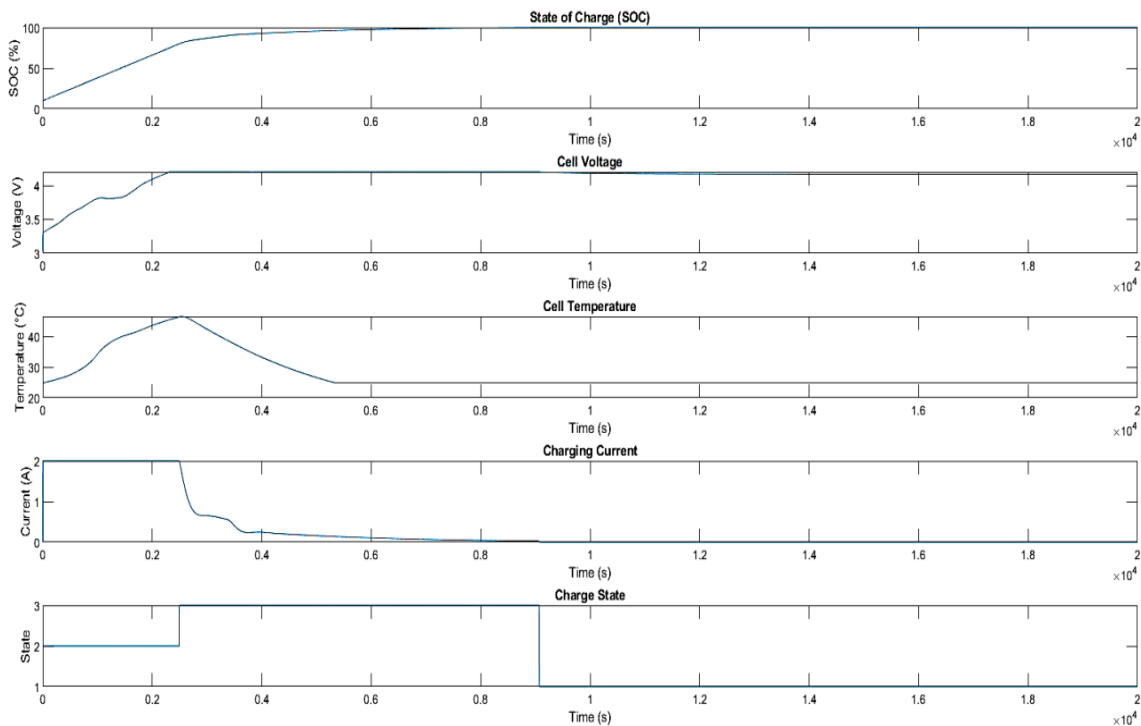
Chế độ sạc CV (Constant Voltage Charging Mode):

Khi pin gần đầy hoặc khi điện áp đạt ngưỡng tối đa ($Volt_limit = 4,2V$), hệ thống sạc sẽ chuyển sang chế độ sạc chậm CV Mode (Constant Voltage). Trong chế độ này, điện áp được duy trì cố định ở mức tối đa, trong khi dòng sạc giảm dần theo thời gian để đảm bảo nhiệt độ của pin ổn định và quá trình sạc diễn ra hiệu quả, và dòng điện được tính thông qua công thức:

$$I(t) = I_{prev} - CV_{gain} \times (V(t) - V_{limit}) \quad (5)$$

Trong đó hệ số CV_{Gain} được sử dụng để điều chỉnh tốc độ giảm của dòng điện, từ mức 1C giảm dần xuống 0,05C. Khi pin được sạc đầy, quá trình sạc sẽ tự động ngắt để bảo vệ pin.

Và Hình 4 là đồ thị mô phỏng kết quả sạc CC-CV:



Hình 4. Kết quả mô phỏng giải thuật sạc CC-CV.

Phân tích đồ thị (Hình 4):

Giai đoạn đầu (SOC ban đầu ~10%, kích hoạt chế độ sạc CC):

Ở thời điểm bắt đầu sạc, SOC thấp (~10%) và điện áp cell cũng khá thấp (~3,5V, dựa trên đồ thị Cell Voltage).

Hệ thống sạc ngay lập tức chuyển sang chế độ sạc dòng không đổi (Constant Current - CC, State 2).

Trong giai đoạn này dòng sạc được giữ ổn định ở mức 1C (xem đồ thị Charging Current). Điều này đảm bảo quá trình sạc nhanh và hiệu quả, giúp SOC tăng nhanh chóng (đồ thị SOC). Điện áp cell tăng dần tuyến tính theo thời gian (đồ thị Cell Voltage). Đây là một đặc điểm của chế độ CC: khi dòng điện được giữ cố định, điện áp cell sẽ tăng dần nhờ vào quá trình tích lũy năng lượng bên trong pin. Nhiệt độ cell tăng mạnh (đồ thị Cell Temperature). Nguyên nhân là do nhiệt lượng sinh ra từ dòng sạc lớn. Tuy nhiên, hệ thống quản lý nhiệt (Thermal Management System) sẽ hoạt động để làm mát pin, đảm bảo nhiệt độ không vượt quá ngưỡng an toàn.

Chuyển sang trạng thái sạc CV khi điện áp đạt 4,2V:

Khi điện áp của cell đạt đến mức tối đa ($Volt_limit = 4,2V$), hệ thống chuyển từ chế độ CC sang chế độ điện áp không đổi (Constant Voltage - CV, State 3). Trong chế độ sạc CV này điện áp được duy trì ổn định ở mức 4,2V (xem đồ thị Cell Voltage). Đây là điều kiện lý tưởng để tránh quá tải điện áp, bảo

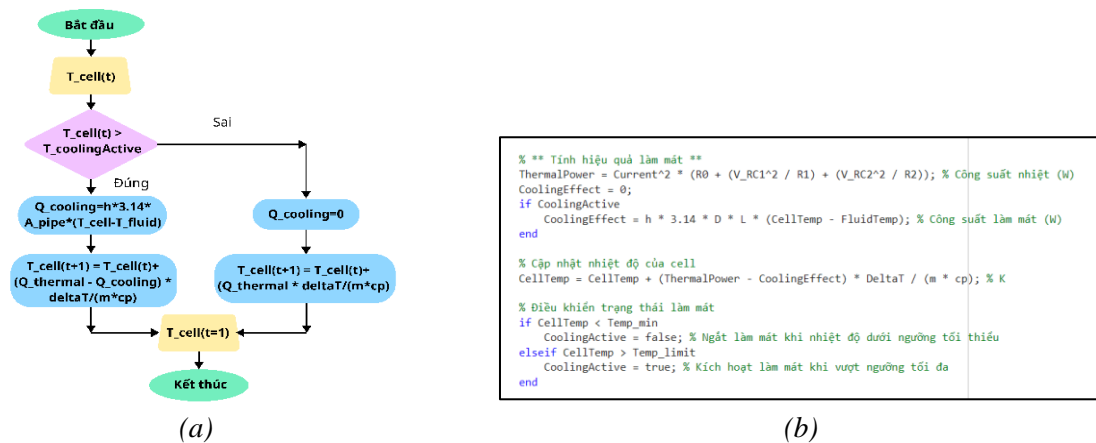
vệ pin khỏi nguy cơ hư hỏng hoặc giảm tuổi thọ. Dòng sạc giảm dần (đồ thị Charging Current). Điều này xảy ra do sự bão hòa năng lượng trong pin khi SOC tăng cao. Tại thời điểm này, pin gần đạt dung lượng tối đa, và việc giảm dòng sạc sẽ giảm tải nhiệt sinh ra, bảo vệ tuổi thọ pin. Trong quá trình sạc CV thì nhiệt độ cell giảm dần (đồ thị Cell Temperature). Đây là kết quả của việc giảm dòng sạc, đồng thời hệ thống làm mát vẫn hoạt động hiệu quả. Vì dòng sạc nhỏ nên SOC tăng chậm dần và gần đạt 100%. Điều này phản ánh việc sạc pin trong chế độ CV chậm hơn so với chế độ CC, nhưng cần thiết để đảm bảo tính an toàn và hiệu quả.

Kết thúc quá trình sạc (chuyển sang trạng thái Standby - State 1):

Khi SOC đạt 100%, hệ thống tự động ngắt sạc và chuyển sang trạng thái Standby (State 1). Trong trạng thái này dòng điện sạc giảm về 0 (đồ thị Charging Current), ngăn ngừa quá sạc hoặc sinh nhiệt không cần thiết. SOC duy trì ở mức 100% và không tăng thêm, đảm bảo pin đã đầy và không bị quá tải. Nhiệt độ tiếp tục giảm nhẹ, dần ổn định ở mức gần bằng nhiệt độ môi trường. Điều này là nhờ sự ngừng hoạt động của dòng sạc và hệ thống làm mát vẫn đảm bảo tản nhiệt dư thừa.

3.2. Quản lý nhiệt độ khi sạc

Trong quá trình sạc, việc kiểm soát nhiệt độ pin là quan trọng bởi nhiệt độ không chỉ ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và tuổi thọ pin mà còn liên quan đến tính an toàn cháy nổ, bảo vệ sức khỏe con người và tài sản. Do đó, hệ thống quản lý nhiệt độ trong quá trình sạc (Hình 5) đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo quá trình sạc diễn ra an toàn và hiệu quả, đồng thời tối ưu hóa việc lưu trữ và sử dụng năng lượng.



Hình 5. (a) Lưu đồ thuật toán làm mát pin; (b) Giải thuật mô phỏng CTMS.

Bảng 4 là các thông số liên quan đến môi chất làm mát được sử dụng trong hệ thống:

Bảng 4. Bảng giá trị của môi chất làm mát Etylen Glycol.

T (K)	ρ (kg/m ³)	μ (mPa·s)	k (W/m·K)	cp (J/kg·K)	ϵ (W/m·K)	σ (S/m)	Pr (-)
273	1.130,8	2.294	6,51	57,6	0,933	617	0,65
280	1.125,8	2.323	4,20	37,3	0,933	400	0,65
290	1.118,8	2.368	2,47	22,1	0,936	236	0,65
300	1.114,4	2.415	1,57	14,1	0,939	151	0,65
310	1.103,7	2.460	1,07	9,65	0,939	103	0,65
320	1.096,2	2.505	0,757	6,91	0,940	73,5	0,65
330	1.089,5	2.549	0,561	5,15	0,936	55,0	0,65

340	1.083,8	2.592	0,431	3,98	0,929	42,8	0,65
350	1.079,0	2.637	0,342	3,17	0,917	34,6	0,65
360	1.074,0	2.682	0,278	2,59	0,906	28,6	0,65
370	1.066,7	2.728	0,228	2,14	0,900	23,7	0,65
373	1.058,5	2.742	0,215	2,03	0,906	22,4	0,65

Trong đó:

$T (K)$: Nhiệt độ theo Kelvin – đơn vị đo nhiệt độ tuyệt đối.

$\rho (kg/m^3)$: Mật độ khối lượng (Density) – lượng khối lượng trên một đơn vị thể tích.

$\mu (mPa \cdot s)$: Độ nhớt động lực học (Dynamic Viscosity) – đo lực cản dòng chảy của chất lỏng.

$k (W/m \cdot K)$: Hệ số dẫn nhiệt (Thermal Conductivity) – khả năng dẫn nhiệt của vật chất.

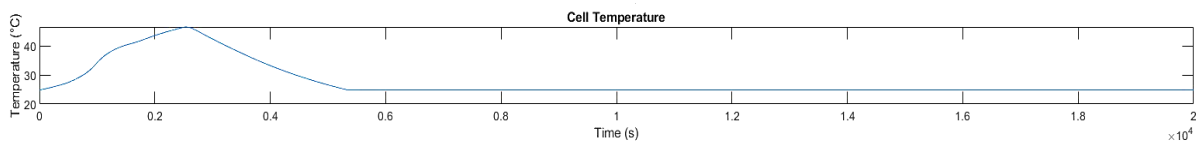
$c_p (J/kg \cdot K)$: Nhiệt dung riêng (Specific Heat Capacity) – nhiệt lượng cần thiết để tăng nhiệt độ một đơn vị khối lượng lên 1 Kelvin.

$\varepsilon (W/m \cdot K)$: Hệ số phát xạ hoặc hiệu suất dẫn nhiệt tùy điều kiện (đơn vị giả định) – có thể là hiệu suất truyền nhiệt.

$\sigma (S/m)$: Độ dẫn điện (Electrical Conductivity) – khả năng dẫn dòng điện.

$Pr (-)$: Số Prandtl – tỷ số giữa độ nhớt động lực học và độ dẫn nhiệt, không có đơn vị, dùng trong phân tích truyền nhiệt.

Kết quả mô phỏng:



Hình 6. Kết quả mô phỏng nhiệt độ pin khi sạc ở chế độ CC-CV

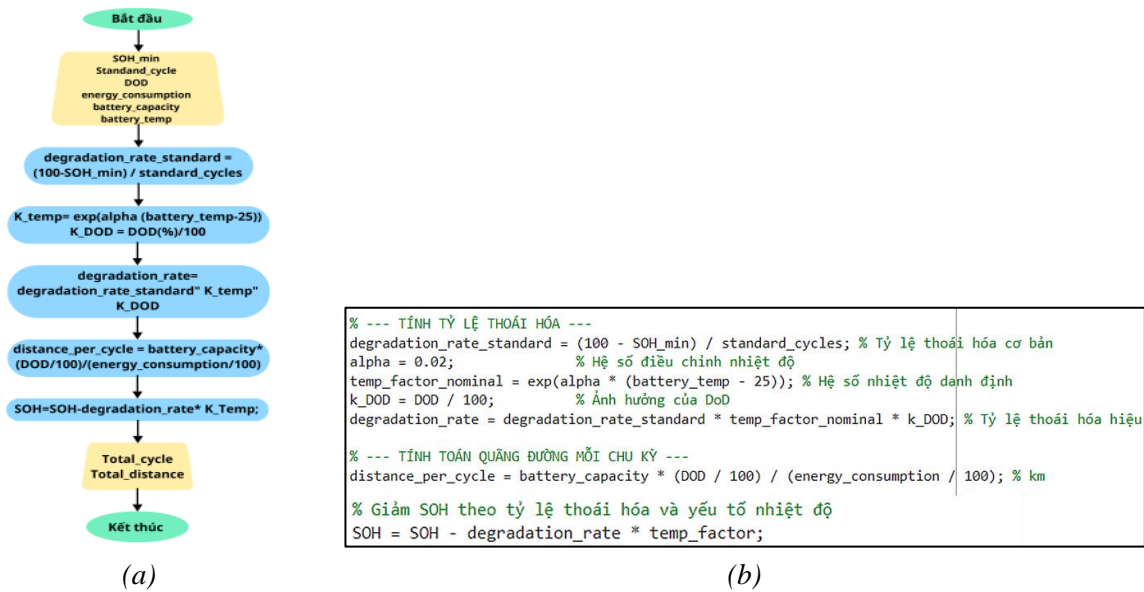
Theo Hình 6 có thể nhận thấy rằng trong giai đoạn Constant Current (CC), nhiệt độ pin tăng nhanh và đáng kể, có thể đạt trong khoảng 40°C - 45°C. Nếu không có hệ thống tản nhiệt hiệu quả, nhiệt độ có thể tiếp tục tăng lên mức 65°C – 70°C, gây ảnh hưởng tiêu cực đến tuổi thọ pin.

Mặc dù giai đoạn CC có tác động nhiệt lớn, nhưng thời gian duy trì trạng thái này tương đối ngắn. Khi pin đạt đến một mức điện áp nhất định, hệ thống sẽ chuyển sang chế độ Constant Voltage (CV). Trong giai đoạn này, dòng sạc giảm dần, giúp ổn định nhiệt độ pin, đồng thời ngăn ngừa các hiện tượng như quá tải nhiệt và stress hóa học, từ đó bảo vệ cấu trúc hóa học bên trong pin.

Bên cạnh ảnh hưởng của nhiệt độ, một yếu tố quan trọng khác trong việc đánh giá tuổi thọ pin là tần suất sạc. Số lần sạc-xả trong suốt vòng đời của xe có tác động trực tiếp đến mức suy giảm dung lượng và hiệu suất tổng thể của pin. Do đó, để có một đánh giá chính xác hơn về tuổi thọ pin, cần xem xét đồng thời cả nhiệt độ hoạt động và chu kỳ sạc của xe. Và để trực quan trọng hơn trong việc đưa ra đánh giá thì đây là biểu đồ biểu thị tuổi thọ của xe khi sạc chế độ CC-CV một cách đều đặn, không lạm dụng chế độ CC.

3.3 Mô hình dự đoán tuổi thọ dựa vào SOH và tỷ lệ thoái hóa của pin

Việc xây dựng mô hình dự đoán Hình 7a,b không chỉ giúp hiểu rõ hơn về các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ mà còn hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế hệ thống pin và chiến lược sử dụng, qua đó kéo dài thời gian hoạt động hiệu quả của pin trong các ứng dụng như xe điện (EV) và lưu trữ năng lượng.

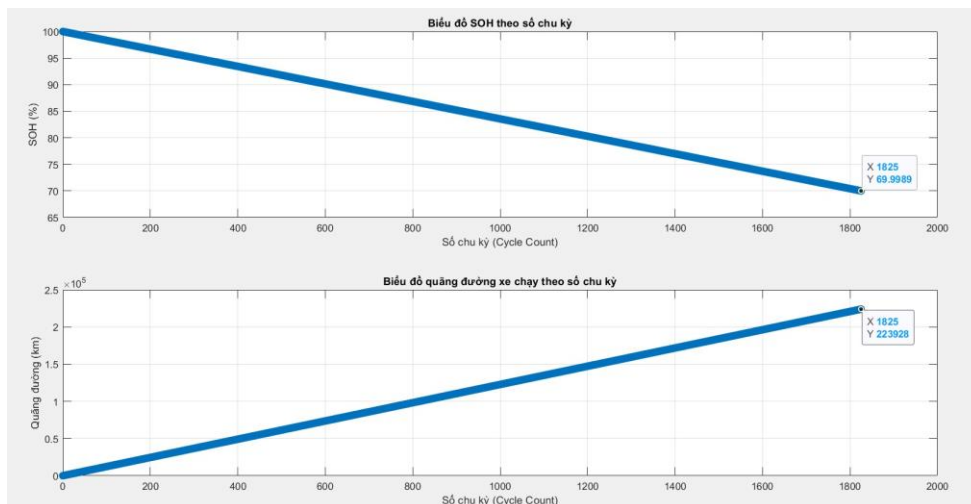


Hình 7. (a) Lưu đồ thuật toán; (b) Code mô phỏng dự đoán tuổi thọ pin.

- Kết quả mô phỏng

Trường hợp 1: Xe hoạt động, sạc xe liên tục và mức sạc sẽ từ 30 đến 60%.

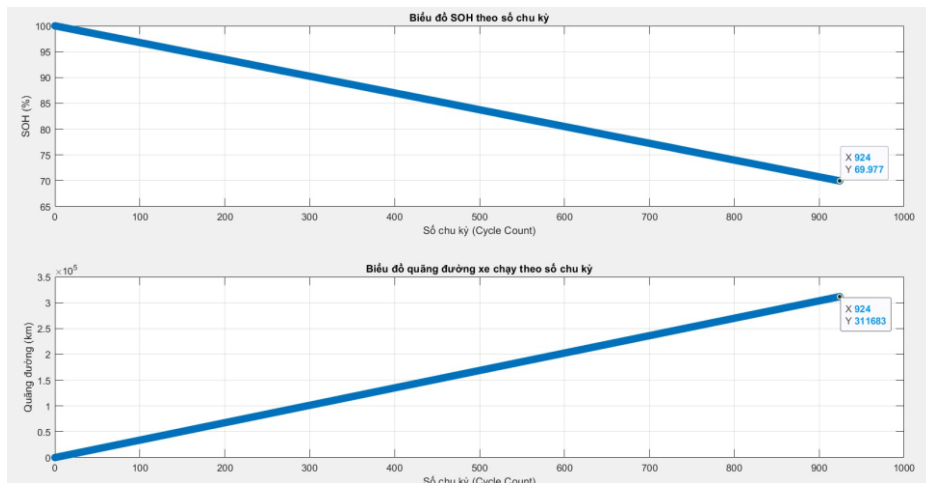
Hình 8 cho thấy việc ưu tiên sạc nhanh CC trong quá trình vận hành liên tục khiến pin thường xuyên làm việc ở dòng và nhiệt độ cao, tiệm cận giới hạn BMS cho phép (45–50°C). Do đó, quãng đường khai thác của xe chỉ đạt mức tối thiểu thiết kế. Kết quả chỉ ra rằng dù số chu kỳ sạc cao, tuổi thọ pin vẫn suy giảm đáng kể do nhiệt độ lớn và tần suất sạc/xả liên tục.



Hình 8. Kết quả mô phỏng theo trường hợp 1.

Trường hợp 2: Xe không sử dụng cạn pin, sạc xe đều đặn từ 20% đến 100%.

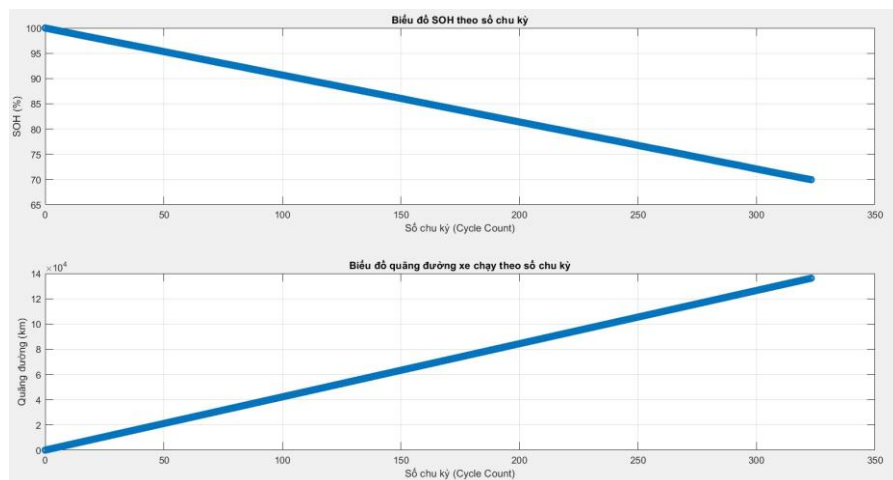
Hình 9 mô tả trường hợp xe gia đình với tần suất sử dụng thấp. Chủ xe duy trì mức SOC tối ưu, thường sạc khi pin còn khoảng 20%, tránh xả sâu và hạn chế tăng nhiệt. Nhờ đó, ảnh hưởng của nhiệt độ và độ sâu xả (DOD) gần như không đáng kể, giúp tỷ lệ thoái hóa thấp, số chu kỳ sạc cao và tổng quãng đường đạt đúng tiêu chuẩn thiết kế (160.934–321.868 km). Trong điều kiện này, tuổi thọ pin có thể vượt 9 năm với tần suất sạc khoảng 4 ngày/lần. Kết quả cho thấy chiến lược sử dụng và sạc hợp lý là yếu tố then chốt kéo dài tuổi thọ pin, đồng thời giảm chi phí vận hành và nâng cao an toàn khai thác.



Hình 9. Kết quả mô phỏng theo trường hợp 2.

Trường hợp 3: Xe luôn luôn sử dụng cạn pin và sạc xe từ 0% đến 100%.

Hình 10 minh họa việc sử dụng xe thiếu kiểm soát, khi người dùng không theo dõi SOC và thường để pin cạn hoàn toàn trước khi sạc. Thói quen này làm tăng nhiệt độ, gia tăng phản ứng hóa học trong tế bào pin, dẫn đến thoái hóa nhanh và rủi ro an toàn cao. Việc sạc liên tục từ 0% lên 100% khiến pin giảm hiệu suất, rút ngắn tuổi thọ đáng kể. Trong trường hợp này, tác động của nhiệt độ và độ xả sâu (DOD) rất lớn, khiến tỷ lệ thoái hóa đạt 0,08–0,1% mỗi chu kỳ, cao hơn nhiều so với mức 0,03% ở điều kiện tiêu chuẩn. Kết quả là pin chỉ duy trì khoảng 300 chu kỳ và hơn 120.000 km, trong khi cách sử dụng hợp lý có thể đạt trên 800 chu kỳ và hơn 250.000 km.



Hình 10. Kết quả mô phỏng theo trường hợp 3.

4. Kết luận

Từ kết quả phân tích, có thể thấy rằng phương pháp sạc ảnh hưởng đáng kể đến tuổi thọ và hiệu suất của pin. Hai yếu tố quan trọng nhất là sự thay đổi nhiệt độ trong quá trình sạc và tần suất sạc. Sạc nhanh ở chế độ CC giúp rút ngắn thời gian nhưng lại làm nhiệt độ pin tăng cao, gây căng thẳng hóa học, đẩy nhanh quá trình suy giảm dung lượng và làm giảm tuổi thọ pin xuống chỉ còn khoảng 66% so với sạc CC-CV. Nhiệt độ cao cũng có thể gây giãn nở cơ học, mất cân bằng điện áp giữa các cell và tăng nguy cơ cháy nổ nếu không được kiểm soát tốt. Trong khi đó, sạc CC-CV, dù mất nhiều thời gian hơn, lại giúp duy trì nhiệt độ ổn định hơn, giảm tác động tiêu cực lên pin và kéo dài tuổi thọ đáng kể.

Để tối ưu hóa quá trình sạc và bảo vệ pin, cần hạn chế lạm dụng sạc nhanh, kết hợp giữa sạc nhanh và sạc chậm hợp lý, đồng thời kiểm soát nhiệt độ thông qua hệ thống làm mát hiệu quả. Ngoài ra, việc

nâng cấp thuật toán quản lý pin (BMS) giúp cân bằng điện áp giữa các cell, giám sát nhiệt độ và tối ưu chu kỳ sạc cũng đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì tuổi thọ pin. Do đó, để đảm bảo hiệu suất vận hành lâu dài và an toàn, người dùng cần áp dụng chiến lược sạc hợp lý, hạn chế sạc đầy 100%, duy trì SOC trong khoảng 20%-80%, đồng thời thực hiện bảo trì định kỳ để kiểm soát các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ của pin.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này là sản phẩm thuộc đề tài mã số T2025-24 do Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh tài trợ kinh phí thực hiện.

Xung đột lợi ích

Các tác giả không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. T. Trang, H. H. Van, and N. T. K. Oanh, "Traffic emission inventory for estimation of air quality and climate co-benefits of faster vehicle technology intrusion in Hanoi, Vietnam," *Carbon Management*, vol. 6, no. 3–4, pp. 117–128, 2015.
- [2] N. Q. Do, B. P. Do, K. T. Nguyen, and D. H. Pham, "Nghiên cứu phương pháp sạc nhanh cho pin lithium dựa trên mô hình nhiệt," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng – Trường Đại học Điện Lực*, no. 26, pp. 27–40, 2021.
- [3] K. A. Severson *et al.*, "Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation," *Nature Energy*, vol. 4, pp. 383–391, 2019.
- [4] G. dos Reis, E. V. B. dos Santos, J. Marco, A. Attia, and P. A. Christensen, "Lithium-ion battery data and where to find it," *Joule*, 2021.
- [5] F. Stroebel *et al.*, "A multi-stage lithium-ion battery aging dataset using various experimental design methodologies," *Scientific Data*, vol. 11, art. no. 1020, Sep. 19, 2024.
- [6] R. Xu, *Lithium-Ion Battery Modeling and SoC Estimation*, M.S. thesis, School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Jun. 2023.
- [7] B. Huang, C. Liu, M. Hu, L. Li, G. Jin, and H. Yang, "Joint estimation of SOC and available capacity of power lithium-ion battery," *Electronics*, vol. 11, no. 1, art. no. 151, Jan. 2022.
- [8] Samsung SDI, "INR18650-20R lithium-ion rechargeable cell: Product specification (Rev. Mar. 2020)," Kaisi Power, 2020.
- [9] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach," *Energies*, vol. 4, pp. 582–598, 2011.
- [10] R. Xiong, F. Sun, H. He, and K. Zhao, "A data-driven based adaptive state of charge estimator of lithium-ion polymer battery used in electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1421–1433, Jan. 2014.
- [11] S. Valedsaravi, A. El Aroudi, and L. Martinez-Salamero, "Review of solid-state transformer applications on electric vehicle DC ultra-fast charging station," *Energies*, vol. 15, no. 15, art. no. 5602, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15155602.
- [12] Z. Wang and X. Wei, "Design considerations for wireless charging systems with an analysis of batteries," *Energies*, vol. 8, no. 10, pp. 10664–10683, 2015.
- [13] D. M. Weragoda, G. Tian, A. Burkitbayev, K. H. Lo, and T. Zhang, "A comprehensive review on heat pipe based battery thermal management systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 224, art. no. 120070, 2023.
- [14] M. Bernagozzi, A. Georgoulas, N. Miche, and M. Marengo, "Heat pipes in battery thermal management systems for electric vehicles: A critical review," *Applied Thermal Engineering*, vol. 219, 2023.

Duong Van Anh received engineer's degree in Automotive engineering, in 2013, and Master's degree, in 2015 from Ho Chi Minh city, University of Technology and Education (currently Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering). From 2014-2021, he is a Lecturer at Cao Thang Technical College. He had instructed his students when they competed in Minicar Racing Contest, Eco Mileage Challenge in Ha Noi. From 2022, he is a Lecturer at Ho Chi Minh City, University of Tehnology and Education (currently Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering, or HCM-UTE). In 2023, his students participated in Robocon 2023 with him. Besides, He still guides graduation thesis for his students. His research includes Automotive Powertrains system, Automotive Chassis System, Vehicle Stability Control and material for batteries for EV.

Email: duongva@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1572-4266>

Tuan Pham Thanh received the Bachelor of Science with Honor program in Physics, from University of Science – Vietnam National University, Ho Chi Minh city, in 2009 and Master degree in Optics, in 2013. He joined the Applied Material Science Institute (IAMS) – Vietnam Academy Science and Technology (VAST) in 2009. He had worked as a researcher in IAMS from 2009 to 2015 before studying Doctoral Program in Myongji University - Korea. He holds Ph.D. degree in 2019 in Myongji University. After that he worked as a Professor Researcher in the same University. Currently, he is a Lecturer at Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering (HCM-UTE) at Renewabke Energy Department. He has published 28 papers in International Journals and International Conference. Furthermore, He have three Patents in Industry about Photovoltaic technology and Optics. His current research interests include daylighting, photovoltaic system, thin film, optical material and material for batteries for large scale energy storage.

Email: tuanpt@hcmute.edu.vn. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2682-1427>

Tung Duong Tuan has received his B.E, M.E, and Ph.D degree in Automotive Engineering from HCMC University of Technology and Education (currently Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering or HCM-UTE) in 2005, 2010 and 2020. He currently works at Faculty of Advanced Education, HCM-UTE. His research interest includes powertrain system, automotive control system and regenerative braking system.

Email: tungdt@hcmute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0002-4479-3359>

Tan Nguyen Hoang Duy received his Engineer's degree in Automotive Engineering Technology in 2025 from Ho Chi Minh City University of Technology and Education (currently Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering or HCM-UTE). He is currently working as an Express Maintenance Technician at Bien Hoa Mitsubishi Company (BHA). During his academic career, he conducted extensive research on automotive braking systems and Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). More recently, he completed a comprehensive study on electric vehicle (EV) battery performance.

Email: 21145266@student.hcmute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0005-6195-5630>

Thang Nguyen Tien studied from 2021 to 2025 and received Engineer's degree in Automotive Engineering Technology in 2025 from Ho Chi Minh City University of Technology and Education (currently Ho Chi Minh City University of Technology and Engineering or HCM-UTE).

Email: 21145650@student.hcmute.edu.vn. ORCID:  <https://orcid.org/0009-0004-7007-8580>