PERFORMANCE ANALYSIS OF LIQUID-BASED BATTERY THERMAL MANAGEMENT SYSTEM IN ELECTRIC VEHICLES

SUYASH VIKRAM

DEPARTMENT OF ENERGY SCIENCE AND ENGINEERING
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
AUGUST 2025

Performance Analysis of Liquid-based Battery Thermal Management System in Electric Vehicles

by

Suyash Vikram

Department of Energy Science and Engineering

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

HAUZ KHAS, NEW DELHI-110016 INDIA

August 2025

Dedicated to my family members

DECLARATION

I declare that this written submission represents my ideas in my own words. I have adequately cited and referenced the original sources when including others' ideas and words. I further declare that I have adhered to all academic honesty and integrity principles and have not misrepresented, fabricated, or falsified any idea, data, fact, or source in my submission.

This thesis is composed of my original work and contains no material previously published or written by another person, except where due reference has been made in the text. I have clearly stated the contributions of others to jointly authored works included in this thesis.

I acknowledge that an electronic copy of my thesis must be lodged with the university library, subject to the policy and procedures of the Indian Institute of Technology Delhi.

Suyash Vikram

Certificate

This is to certify that the thesis titled **Performance Analysis of Liquid-based Battery Thermal Management System in Electric Vehicles** submitted by **Mr. Suyash Vikram** to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **'Doctor of Philosophy'** is a Bonafide record of the original research work done by him under my guidance and supervision at Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi. The contents of this thesis, in full or in parts, have not been submitted to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

(Dr. Dibakar Rakshit)

Professor,
Department of Energy Science and Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi – 110016
India

ACKNOWLEDGEMENTS

I wholeheartedly would like to thank my supervisor, Prof. Dibakar Rakshit, for his suggestions, support, and freedom provided to me for carrying out the desired research studies over my course of PhD. It has been a learning experience for me, both on professional and personal fronts, through the detailed interactions I have had with him over various activities during my PhD.

I thank my SRC members, Prof. K. A. Subramanian, Prof. Anil Verma, and Prof. K Ravi Kumar, for their suggestions and support given to me from time to time during my Ph.D. I would also like to thank the Ministry of Education, Government of India, for providing the necessary support to facilitate the research.

I am thankful to my senior and fellow lab members -Dr. Alok Kumar Ray, Mr. Rahul Kumar Sharma, Ms. Sana Fatima Ali, Mr. Rahul Verma, Mr. Mohit Barthwal, Mr. Sagar Vashisht, Mr. Akash Sadar, Mr. Jibin M Joy, and others for helping me and upholding my moral high during the tough times of my research work. I am also thankful to the lab staff and other student colleagues at IIT Delhi for extending their support whenever necessary.

I express my heartfelt gratitude towards my parents, wife, siblings, and the Department of Science, Technology and Technical Education, Government of Bihar, for their encouragement and support, without which I couldn’t have carried out this work.

Suyash Vikram

ABSTRACT

In recent years, a shift from internal combustion engines to electric vehicles has been intensified due to increasing global environmental concerns. The lithium-ion battery is key to this transformation because of its several benefits, such as specific power output, higher energy density, and longer life span. However, the major concern is that its performance is highly sensitive to working temperatures, especially under dynamic driving conditions. Battery Thermal Management Systems (BTMS) are therefore essential in electric vehicle design to alleviate any thermal issues in the battery pack and maintain its consistent performance. BTMS has been classified into various categories based on the cooling medium utilized, namely Air Cooling, Liquid Cooling, Phase Change Material-based Cooling, etc. Furthermore, BTMS are typically classified as active and passive cooling systems. Active cooling systems necessitate an external energy source, specifically the energy necessary to operate fans or pumps in air or liquid cooling systems. Passive cooling solutions require no external energy sources, such as PCM or a heat pipe-based cooling system. Among the various cooling strategies available, liquid cooling-based BTMS are recognized for their exceptionally good heat transfer capabilities and compact configurations.

This thesis presents a comprehensive performance analysis of liquid cooling-based BTMS in electric vehicles through both numerical and experimental studies. A cold plate liquid cooling-based BTMS has been proposed, and its performance with water as a coolant has been analysed at different ambient temperatures for actual driving cycles. The present study employs a MATLAB/Simulink model for a liquid cooling-based BTMS in an electric vehicle. The battery pack is positioned above the cold plate. The coolant circulates in the cooling channels integrated

within the cold plate. The liquid coolant extracts heat from the battery pack, and the study examines changes in the average battery pack temperature along with the total energy consumed by the BTMS. The simulation model is designed to maintain the battery pack at a constant temperature of 25°C. Additionally, the influence of varying ambient temperatures on the efficacy of the liquid cooling system has been examined. Findings indicate that as the ambient temperature increases, the BTMS requires more time duration to lower the battery pack temperature, and overall energy usage also rises. The following chapter extends this analysis by evaluating the BTMS performance using three different coolants. To identify the most effective coolant and its ideal concentration, mixtures of water with ethylene glycol and propylene glycol at various ratios are tested. These additives are blended with water to enhance the coolant's thermal characteristics. In the case of a Water-Propylene glycol mixture, 25% propylene glycol concentration is advised; however, for a water-ethylene glycol mixture, 50% ethylene glycol concentration provides the optimal results.

Furthermore, in addition to BTMS in EVs, this thesis also focuses on the vehicle cabin thermal management. An integrated thermal management system, combining a BTMS with a vehicle cabin air conditioning system, is a viable approach to improving energy efficiency and reducing space requirements in electric vehicles. This study investigated the efficacy of an integrated system for EVs under an actual driving cycle. The simulations are conducted in MATLAB/Simulink, and the performance is analyzed at ambient temperatures and relative humidity levels. The model has been formulated in such a way as to regulate the cabin temperature between 22–24°C and the battery pack temperature within a safe range of 30–35°C. The results indicate that as ambient temperature rises, the duration required for the integrated system to attain the set cabin temperature increases, owing to increased heat exchange between the vehicle cabin and the surrounding environment at higher ambient temperatures. At 25°C ambient temperature, the cabin air conditioning system requires 625 seconds to reach the required set point cabin temperature, whereas at 30°C and 35°C ambient temperature, the corresponding time durations are 2045 seconds and 2150 seconds. The BTMS, being more vital, gives an optimal performance and maintains the battery pack temperature in the range of 30–35 °C at different ambient conditions.

Finally, an experimental study has been carried out to analyse the efficacy of the immersion cooling technique for lithium-ion battery packs. Indirect liquid cooling systems, such as those utilizing a cold plate, have shown effective performance by maintaining the battery pack temperature within the specified range. With the increasing demand for fast charging in EVs, immersion cooling techniques for LiB are gaining popularity. Immersion cooling has superior heat transfer efficiency as it maintains direct contact between the coolant and the battery surfaces, eliminating the thermal resistance introduced by intermediate materials like a cold plate, etc. Also, the battery packs are submerged in coolant, directly ensuring even temperature distribution in the cells. This research seeks to assess cooling efficiency, thermal uniformity, and the effects of immersion cooling technique on lithium-ion battery performance. In this study, the battery pack is made using 9 cells in a 3x3 arrangement (3S3P), i.e., three cells in a row, each connected in a series, and each row is connected in a parallel connection. The study offers an in-depth analysis of the thermal characteristics of LiB cells submerged in transformer oil through the integration of thermocouples, data loggers, climate chambers, and a power supply. The results demonstrate a substantial reduction in the maximum temperature of the centre cell when the battery pack is entirely immersed in the transformer oil. The transformer oil has a greater specific heat than air, and immersion cooling also has a higher heat transfer coefficient. Therefore, the complete

immersion of the battery pack in the transformer oil enables more heat dissipation from the batteries.

In summary, this thesis delivers a detailed exploration of liquid and immersion cooling-based BTMS for EVs, using both simulation and experimental approaches. Furthermore, the integration of BTMS with cabin thermal management is shown to improve energy efficiency and system compactness, a crucial step toward optimizing EV design. The immersion cooling study, in particular, underscores the superior thermal regulation, making it a promising solution for high-demand applications like fast charging. Overall, the research contributes valuable knowledge toward developing robust, energy-efficient, and safe BTMS strategies for next-generation EVs.

Keywords: Lithium-ion battery; Immersion Cooling; Integrated thermal management system; Liquid cooling, Electric Vehicles

सार

हाल के वर्षों में आंतरिक दहन इंजन (ICE) से इलेक्ट्रिक वाहनों (EVs) की ओर संक्रमण में तेजी आई है, जिसका प्रमुख कारण बढ़ती वैश्विक पर्यावरणीय चिंताएँ हैं। इस परिवर्तन में लिथियम-आयन बैटरी की भूमिका अत्यंत महत्वपूर्ण है, क्योंकि इसमें उच्च ऊर्जा घनत्व, विशिष्ट पावर आउटपुट और लंबी जीवन अवधि जैसी अनेक विशेषताएँ होती हैं। हालांकि, एक प्रमुख चिंता यह है कि लिथियम-आयन बैटरियों का प्रदर्शन, सुरक्षा और दीर्घायु उनके कार्य तापमान पर अत्यधिक निर्भर करता है, विशेष रूप से गतिशील ड्राइविंग परिस्थितियों में। इसलिए, बैटरी थर्मल मैनेजमेंट सिस्टम (BTMS) इलेक्ट्रिक वाहनों के डिज़ाइन में आवश्यक हो जाते हैं, ताकि बैटरी पैक में किसी भी प्रकार की थर्मल समस्या को रोका जा सके और उसका स्थिर प्रदर्शन सुनिश्चित किया जा सके। BTMS को प्रयुक्त शीतलक माध्यम के आधार पर विभिन्न वर्गों में बाँटा गया है, जैसे वायु शीतलन (Air Cooling), तरल शीतलन (Liquid Cooling), फेज़ चेंज मटेरियल (PCM) आधारित शीतलन और हीट पाइप आधारित शीतलन। इसके अतिरिक्त, BTMS को सामान्यतः सक्रिय (Active) और निष्क्रिय (Passive) शीतलन प्रणालियों के रूप में वर्गीकृत किया जाता है। सक्रिय शीतलन प्रणालियों को बाहरी ऊर्जा स्रोत की आवश्यकता होती है, जैसे पंखे या पंप चलाने हेतु ऊर्जा, जो वायु या तरल शीतलन प्रणालियों में प्रयुक्त होती है। वहीं, निष्क्रिय शीतलन प्रणालियों को किसी बाहरी ऊर्जा स्रोत की आवश्यकता नहीं होती, जैसे PCM या हीट पाइप आधारित प्रणालियाँ।उपलब्ध विभिन्न शीतलन विधियों में, तरल शीतलन आधारित BTMS को उनके उत्कृष्ट ऊष्मा स्थानांतरण गुणों और कॉम्पैक्ट डिज़ाइन के कारण सबसे प्रभावशाली माना गया है।

यह शोधप्रबंध इलेक्ट्रिक वाहनों में तरल शीतलन आधारित BTMS का एक समग्र प्रदर्शन विश्लेषण प्रस्तुत करता है, जिसमें संख्यात्मक (Numerical) और प्रयोगात्मक (Experimental) दोनों प्रकार के अध्ययन

शामिल हैं। एक कोल्ड प्लेट आधारित तरल शीतलन BTMS प्रस्तावित किया गया है, और इसमें जल (Water) को शीतलक के रूप में उपयोग करते हुए विभिन्न परिवेश तापमानों पर तथा वास्तविक ड्राइविंग चक्रों के लिए इसका प्रदर्शन विश्लेषित किया गया है। इस अध्ययन में MATLAB/Simulink आधारित एक सिमुलेशन मॉडल का उपयोग किया गया है, जिसमें बैटरी पैक को कोल्ड प्लेट के ऊपर रखा गया है। कोल्ड प्लेट के अंदर बने शीतलन चैनलों से तरल शीतलक प्रवाहित होता है, जो बैटरी पैक से ऊष्मा को अवशोषित करता है।बैटरी पैक के तापमान में होने वाले परिवर्तन और BTMS द्वारा उपभोग की गई संचयी ऊर्जा की मात्रा का विश्लेषण किया गया है। सिमुलेशन मॉडल को इस प्रकार विन्यस्त किया गया है कि वह बैटरी पैक का तापमान 25°C पर बनाए रखे।

इसके अतिरिक्त, परिवेश तापमान का तरल शीतलन प्रणाली के प्रदर्शन पर क्या प्रभाव पड़ता है, इसका भी परीक्षण किया गया है।परिणामों से ज्ञात हुआ कि जैसे-जैसे परिवेश तापमान बढ़ता है, BTMS को बैटरी पैक को ठंडा करने में अधिक समय लगता है, और कुल ऊर्जा खपत भी बढ़ जाती है। अगले अध्याय में इस BTMS के तीन विभिन्न शीतलक द्रवों के साथ प्रदर्शन की तुलना की गई है। जल, जल-एथिलीन ग्लाइकॉल मिश्रण और जल-प्रोपाइलीन ग्लाइकॉल मिश्रण के विभिन्न सांद्रता स्तरों का उपयोग किया गया है, ताकि सर्वोत्तम शीतलक और उसकी उपयुक्त सांद्रता का निर्धारण किया जा सके।इन मिश्रणों में जल के साथ जोड़े गए योजक (Additives) उनके थर्मल गुणों को बेहतर बनाते हैं। जल-प्रोपाइलीन ग्लाइकॉल मिश्रण के लिए 25% प्रोपाइलीन ग्लाइकॉल की सांद्रता अनुशंसित की गई है, जबकि जल-एथिलीन ग्लाइकॉल मिश्रण के लिए 50% एथिलीन ग्लाइकॉल की सांद्रता सर्वोत्तम प्रदर्शन देती है, क्योंकि इससे BTMS की ऊर्जा खपत और बैटरी पैक में तापमान वितरण दोनों ही अनुकूल रहते हैं।

BTMS के अलावा, यह शोधप्रबंध इलेक्ट्रिक वाहनों के केबिन थर्मल प्रबंधन पर भी केंद्रित है।बैटरी थर्मल मैनेजमेंट सिस्टम और केबिन एयर कंडीशनिंग सिस्टम को एकीकृत करने वाली संयुक्त थर्मल प्रबंधन

प्रणाली (Integrated Thermal Management System - ITMS) को ऊर्जा दक्षता बढ़ाने और वाहन में स्थान की बचत के लिए एक व्यवहार्य विकल्प के रूप में देखा गया है। इस अध्ययन में, एकीकृत थर्मल प्रबंधन प्रणाली के प्रदर्शन को वास्तविक ड्राइविंग चक्र पर MATLAB/Simulink के माध्यम से विश्लेषित किया गया है। मॉडल को इस प्रकार तैयार किया गया है कि वह केबिन तापमान को 22–24°C के बीच तथा बैटरी पैक के तापमान को 30–35°C की सुरक्षित सीमा के भीतर बनाए रख सके।परिणाम बताते हैं कि जैसे-जैसे परिवेश तापमान बढ़ता है, वाहन केबिन को वांछित तापमान तक पहुँचाने में अधिक समय लगता है, क्योंकि परिवेश और केबिन के बीच अधिक ऊष्मा का आदान-प्रदान होता है। 25°C परिवेश तापमान पर केबिन एयर कंडीशनिंग सिस्टम को 625 सेकंड लगते हैं वांछित तापमान तक पहुँचने में; वहीं 30°C और 35°C पर यह समय क्रमशः 2045 सेकंड और 2150 सेकंड होता है। बैटरी थर्मल प्रबंधन प्रणाली, जो अधिक महत्वपूर्ण है, सभी परिवेश तापमानों पर 30–35°C के भीतर बैटरी पैक तापमान बनाए रखकर उत्तम प्रदर्शन देती है।

अंततः, लिथियम-आयन बैटरी पैक के लिए इमर्शन कूलिंग (Immersion Cooling) रणनीति का एक प्रयोगात्मक अध्ययन किया गया है। हालाँकि कोल्ड प्लेट जैसे अप्रत्यक्ष तरल शीतलन विधियाँ भी अच्छा प्रदर्शन देती हैं और बैटरी पैक को आवश्यक तापमान सीमा में बनाए रखती हैं, फिर भी इलेक्ट्रिक वाहनों में तीव्र चार्जिंग की बढ़ती माँग के चलते इमर्शन कूलिंग तकनीकें लोकप्रियता प्राप्त कर रही हैं। इमर्शन कूलिंग में शीतलक द्रव बैटरी की सतहों के सीधे संपर्क में होता है, जिससे कोल्ड प्लेट जैसे मध्यवर्ती अवरोधकों द्वारा उत्पन्न तापीय प्रतिरोध समाप्त हो जाता है। इसमें बैटरी पैक को शीतलक में पूरी तरह डुबो दिया जाता है, जिससे (Cells) में समान रूप से तापमान वितरण सुनिश्चित होता है। यह अध्ययन इमर्शन कूलिंग तकनीक की शीतलन दक्षता, तापीय एकरूपता और लिथियम-आयन बैटरी के प्रदर्शन पर इसके प्रभाव का मूल्यांकन करता है। इस प्रयोगात्मक अध्ययन में ट्रांसफॉर्मर ऑयल में डुबोए गए बैटरी

सेल्स की तापीय प्रवृत्ति का विश्लेषण थर्मोकपल, डेटा लॉगर, जलवायु कक्ष और विद्युत आपूर्ति की सहायता से किया गया है। परिणामों से यह सिद्ध होता है कि जब बैटरी पैक को पूरी तरह ट्रांसफॉर्मर ऑयल में डुबोया गया, तो केंद्र स्थित बैटरी सेल का अधिकतम तापमान काफी हद तक कम हो गया। ट्रांसफॉर्मर ऑयल की विशिष्ट ऊष्मा (Specific Heat) वायु की तुलना में अधिक होती है, और इमर्शन कूलिंग की ऊष्मा स्थानांतरण गुणांक (Heat Transfer Coefficient) भी अधिक होता है। इसलिए, ट्रांसफॉर्मर ऑयल में बैटरी पैक की पूरी डुबकी से बैटरियों से अधिक ऊष्मा का निष्कासन संभव हो पाता है।

संक्षेप में, यह शोध प्रबंध तरल और इमर्शन कूलिंग आधारित बैटरी थर्मल मैनेजमेंट सिस्टम (BTMS) के लिए एक विस्तृत अध्ययन प्रस्तुत करता है, जिसमें सिमुलेशन और प्रायोगिक दोनों दृष्टिकोणों का उपयोग किया गया है। साथ ही, BTMS का केबिन थर्मल मैनेजमेंट के साथ एकीकरण ऊर्जा दक्षता और सिस्टम की कॉम्पैक्टनेस को बढ़ाता है, जो इलेक्ट्रिक वाहन (EV) डिज़ाइन के अनुकूलन की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है। विशेष रूप से, इमर्शन कूलिंग अध्ययन बेहतर तापीय नियंत्रण को रेखांकित करता है, जिससे यह फास्ट चार्जिंग जैसी उच्च मांग वाली अनुप्रयोगों के लिए एक आशाजनक समाधान बन जाता है। समग्र रूप से, यह शोध अगली पीढ़ी के EVs के लिए मज़बूत, ऊर्जा-कुशल और सुरक्षित BTMS रणनीतियों के विकास में महत्वपूर्ण ज्ञान का योगदान करता है।

कीवर्ड: लिथियम-आयन बैटरी; इमर्शन कूलिंग; एकीकृत थर्मल मैनेजमेंट सिस्टम; तरल शीतलन; विद्युत वाहन

Contents

3 Performance analysis of Liquid-based BTMS for Electric Vehicles during discharge under drive cycles at various ambient temperatures

4 Performance analysis of Liquid-based BTMS system for Electric Vehicles during discharge under drive cycles for different coolants

5 Performance analysis of integrated battery and cabin thermal management system in Electric Vehicles

6. Experimental Study of Immersion Cooling Technique for Lithium-Ion Battery Pack

List of figures

List of tables

Nomenclature

A. Acronyms

AC	Air Conditioning
BTMS	Battery thermal management system
EG	Ethylene Glycol
ECM	Equivalent Circuit Model
CCHS	Channel Cooled Heat Sink
CFD	Computational Fluid Dynamics
CF	Copper Foam
CPCM	Composite Phase Change Material
EG	Ethylene Glycol
ECM	Equivalent Circuit Model
ICE	Internal Combustion Engine
IDC	Indian Driving Cycle
LiB	Lithium-Ion Battery
PCM	Phase changing material
EV	Electrical vehicle
SOC	State of charge

B. Symbols

I	Current (A)
k_{bat}	Thermal Conductivity of the battery material (W/m.K)
h_{amb}	Ambient convective heat transfer coefficient
T	Temperature (°C)
$T_{ambient}$	Ambient Temperature (°C)
V	Voltage(V)
C_d	Drag Coefficient
F_{acc}	Acceleration of Vehicles (m/sec^2)
F_{ad}	Aerodynamic Drag acting on the Vehicle (N)
F_r	Rolling Resistance on the Vehicle (N)
F_g	Uphill Resistance on the Vehicle (N)
T_c	Coolant Temperature
h_{in}	Convective heat transfer coefficient in the inside region
$Q_{overall}$	Overall Heat Exchange in the Cabin of the Vehicle
$U_{overall}$	Overall Heat Transfer Coefficient
T_{batt}	Battery Temperature (°C)
T_{cabin}	Cabin Temperature(°C)
k_b	Thermal Conductivity of the vehicle cabin material
R_{int}	Internal Resistance