

Numerical study on lithium-ion battery thermal management by using phase change material in various battery arrangements

Numeryczne badanie zarządzania temperaturą akumulatora litowo-jonowego przy użyciu materiału zmiennofazowego w różnych układach akumulatorów

DOI: 10.15199/62.2024.8.8

Zasymulowano, przy użyciu oprogramowania COMSOL Multiphysics 6.0, rozkład temperatury w akumulatorach litowo-jonowych z organicznymi materiałami o przemianie fazowej ciało stałe-ciecz w różnych układach akumulatorów. Zwykły układ akumulatorów wykazał dobrą kontrolę maksymalnej różnicy temperatur, podczas gdy układ krzyżowy pod kątem 45° wykazał optymalną kontrolę tej temperatury. Układ krzyżowy pod kątem 60° wykazywał największą gęstość energii. Wyniki symulacji mogą stanowić podstawę do wyboru odpowiednich układów akumulatorów spełniających określone wymagania.

Słowa kluczowe: zarządzanie temperaturą akumulatora, symulacja numeryczna, materiał zmiennofazowy, układy akumulatorów, akumulator litowo-jonowy

The temp. distribution within Li-ion batteries with the org. solid-liq. phase change materials under different arrangements was simulated by using the COMSOL Multiphysics 6.0 software. A regular battery pack arrangement exhibited superior control over the max. temp. difference, while a cross arrangement at a 45° angle demonstrated optimal control over the max. temperature. A cross arrangement at a 60° angle exhibited the highest energy density. The simulation results can be a basis for selecting appropriate battery pack arrangements to meet specific requirements.

Keywords: battery thermal management, numerical simulation, phase change material, battery arrangements, lithium-ion battery

Znaczenie opracowywania i wykorzystywania nowych źródeł energii wzrosło wykładniczo w świetle globalnego kryzysu energetycznego, efektu cieplarnianego i emisji ditlenku węgla. Jednocześnie poprawa infrastruktury dystrybucji energii elektrycznej, postępy w technologii wytwarzania akumulatorów i zdolność do przetwarzania zanieczyszczeń na wcześniejszych etapach produkcji sprawiły, że pojazdy elektryczne (EV) stały się bardzo obiecującym środkiem transportu lądowego. W szczególności akumulatory litowo-jonowe stały się wiodącym wyborem dla EV¹⁾ ze względu na ich liczne zalety, w tym dużą energię właściwą i moc, dopuszczalny współczynnik samorozładowania, pojemność dużych zestawów akumulatorów i względnie szybki czas ładowania²⁾. W raporcie Equal Ocean Intelligence przewidywano, że chiński rynek EV doświadczy szybkiego wzrostu, a prognozowana sprzedaż osiągnie 2,382 mln szt. w 2021 r., 4,46 mln szt. w 2022 r. i przekroczy 10 mln szt. w 2025 r. W związku z tym EV mogą w niedalekiej przyszłości zastąpić tradycyjne samochody. Wydajność akumulatorów litowo-jonowych

The significance of developing and utilizing new energy sources has grown exponentially in light of the global energy crisis, greenhouse effect, and carbon dioxide emissions. Concurrently, the maturation of electrical power distribution infrastructure, advancements in battery technology, and the ability to process pollutants upstream have positioned electric vehicles (EV) as a highly promising mode of ground transportation. Lithium-ion batteries, in particular, have emerged as a leading choice for EVs¹⁾ due to their numerous advantages, including high specific energy and power, reasonable self-discharge rate, the capacity for large battery packs, and relatively fast recharge duration²⁾. According to a report by Equal Ocean Intelligence, the Chinese market for electric vehicles is projected to experience rapid growth, with sales forecasted to hit 2.382 million units in 2021, 4.46 million units in 2022, and surpass 10 million units in 2025. Therefore, electric vehicles are poised to replace traditional cars in the near future. However, lithium-ion batteries efficiency is highly sensitive to ambient temperature³⁾. Exceeding the specified temperature range can accelerate the aging process and reduce the cycle life of these batteries⁴⁾. Their overheating can result in serious problems, including fires and explosions, under severe conditions⁵⁾. Therefore,

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang Province, 150040, China; e-mail: hanzhitao2001@hotmail.com

jest jednak bardzo wrażliwa na temperaturę otoczenia³). Przekroczenie określonego zakresu temperatur może przyspieszyć proces starzenia i skrócić cykl ich użytkowania⁴). Ich przegrzanie w trudnych warunkach może powodować poważne problemy, w tym pożary i eksplozje⁵). W związku z tym należy opracować niezawodny system zarządzania temperaturą akumulatorów (BTMS), aby zagwarantować ich wolne od ryzyka działanie. Tradycyjne opcje BTMS obejmują chłodzenie powietrzem, cieczami, organicznymi zmiennofazowymi materiałami ciała stałe-ciecz (PCM), chłodzenie z wykorzystaniem rurek cieplnych i chłodziw termoelektrycznych, a także przy użyciu multimodalnej technologii sprzężonego chłodzenia¹). Spośród czynników chłodzących, PCM wykazują wyjątkowe właściwości termiczne, w tym dużą jednorodność temperatury, dużą gęstość cieplną, minimalne lub zerowe przechłodzenie oraz opłacalność, co sprawia, że są one odpowiednie do zastosowań BTMS⁶). Jednak ograniczona przewodność cieplna i zdolność magazynowania ciepła przez PCM utrudnia ich powszechne zastosowanie w implementacjach BTMS.

Aby poprawić wydajność PCM, zaproponowano wiele strategii mających na celu rozwiązanie kwestii małej przewodności cieplnej i ograniczonej pojemności magazynowania ciepła. Początkowe podejście obejmowało włączenie pianek metalowych lub innych substancji do PCM w celu zwiększenia ich przewodności cieplnej^{3, 7}). Alipanah i wespół⁸) przeprowadzili symulacje numeryczne w celu oceny BTMS układu składającego się z czystego oktadekanu, czystego galu i materiałów kompozytowych z pianki oktadekanowo-glinowej. Wyniki badań wskazują, że w systemie chłodzenia BTMS układ składający się z materiałów kompozytowych z galu i pianki oktadekanowej-Al przewyższa czysty układ oktadekanowy, przy czym pianka Al wykazuje preferowaną porowatość 0,88, zapewnia niższe temperatury powierzchni i lepszą jednorodność. Li⁹) opracował warstwową strukturę chłodzącą wykorzystującą metalową piankę miedzianą impregnowaną za pomocą PCM. Włączenie PCM do porowatej pianki metalowej powoduje obniżenie temperatury powierzchni akumulatora i poprawę spójności rozpraszania ciepła. Wynika to z lepszej przewodności cieplnej piankowego kompozytu parafinowego (0,82 W/(m·K)) w porównaniu z czystym PCM (0,3 W/(m·K)). Na bazie kopolimerów blokowych etylen-etylen-butadien-styren, wzmocnionych koelastomerami polietylenowo-oktenowymi w celu zwiększenia elastyczności i zawierających grafit w celu poprawy przewodności cieplnej, Liu i wespół¹⁰) wyprodukowali kompozytowy PCM. Temperatura modułu akumulatora, dzięki kompozytowemu PCM, jest skutecznie utrzymywana na poziomie 41,56°C, czyli o 11,56°C niższym niż w przypadku braku PCM. Chociaż ta strategia poprawia przewodność cieplną PCM poprzez włączenie pianek metalowych lub innych substancji, współczynnik przenikania ciepła w systemie BTMS pozostaje niezadowolający. Wraz z poprawą przewodności cieplnej PCM, zwiększenie powierzchni przenikania ciepła okazuje się skuteczne w zwiększaniu szybkości wymiany

a reliable battery thermal management system (BTMS) must be developed to guarantee their risk-free operation. Traditional BTMS options include cooling with air, liquids, organic solid-liquid phase change materials (PCM), heat pipes, and thermoelectric coolers, as well as by using a multi-mode coupled cooling technology¹). Among the cooling agents, the PCMs exhibit exceptional thermal characteristics, including high temperature uniformity, high thermal density, minimal or no undercooling, and cost-effectiveness, making them highly suitable for BTMS applications⁶). However, the limited thermal conductivity and thermal storage capacity of PCMs have hindered their widespread adoption in BTMS implementations.

To enhance the performance of PCMs, a multitude of strategies have been proposed to address the issues of low thermal conductivity and restricted thermal storage capacity. The initial approach involves incorporating metal foams or other substances into PCMs to enhance their thermal conductivity^{5, 7}). Alipanah et al.⁸) conducted numerical simulations to appraise a BTMS composed of pure octadecane, pure gallium, and octadecane-Al foam composite materials. Their findings indicate that the BTMS comprising gallium and octadecane-Al foam composite materials outperforms pure octadecane BTMS, with the Al foam exhibiting a preferred porosity of 0.88, resulting in lower surface temperatures and improved uniformity. Li et al.⁹) devised a sandwiched cooling structure utilizing copper metal foam impregnated using PCMs. The incorporation of PCMs into the porous metal foam results in a decrease in the battery's surface temperature and an improvement in the consistency of temperature dispersion. This is attributed to the improved thermal conductivity of the foam paraffin composite (0.82 W/(m·K)) in comparison to that of pure PCMs (0.3 W/(m·K)). Supported by ethylene-ethylene-butadiene-styrene block copolymers, augmented by polyethylene octane-co-elastomers for higher flexibility, and featuring enlarged graphite for improved thermal conductivity, Liu et al.¹⁰) produced a composite PCM. The battery module's temperature is effectively maintained at 41.56°C, which is 11.56°C lower than in the absence of PCMs, thanks to the composite PCM. Although this strategy improves the thermal conductivity of PCMs by the incorporation of metal foams or other substances, the heat transfer rate of BTMS remains unsatisfactory. Along with improving PCMs' thermal conductivity, increasing heat transmission area proves effective in boosting the heat transfer rate of BTMS. Choudhari et al.¹¹) evaluated PCMs modules with diverse fin shapes (rectangular, triangular, trapezoidal, I-shape, and T-shape) and increased fin numbers to enhance heat transfer. The implementation of fin structures in PCMs modules resulted in a temperature reduction of 2°C and 6.4°C at 2C and 3C, respectively. In addition, it reduced the discrepancy in temperature between PCMs and battery temperature from 3.36°C to 1.78°C, increasing the heat transmission rate of BTMS. Weng¹²) has analyzed several

ciepła w BTMS. Choudhari i współprac.¹¹⁾ ocenili moduły PCM z różnymi kształtami żeber (prostokątne, trójkątne, trapezowe, w kształcie litery I lub T) i zwiększoną liczbą żeber w celu poprawy wymiany ciepła. Wdrożenie struktur żeberowych w modułach PCM spowodowało obniżenie temperatury o 2°C i 6,4°C przy częstotliwości cykli odpowiednio 2C i 3C. Ponadto zmniejszyło to rozbieżność temperatur między PCM a temperaturą akumulatora z 3,36°C do 1,78°C, zwiększając współczynnik przenikania ciepła BTMS. Weng¹²⁾ przeanalizował kilka nowatorskich żeber z wieloma kanałami przepływu ciepła (kształty V, Y i X) i włączył je do modułów PCM w celu poprawy wymiany ciepła. Żebro w kształcie litery X wykazywało optymalną funkcjonalność w środowisku o wysokiej temperaturze (40°C), utrzymując najwyższą temperaturę ogniwa poniżej 47°C. Sun i współprac.¹³⁾ ocenili nowe struktury żeber: proste i łukowe, w celu zwiększenia przenoszenia ciepła. Te innowacyjne struktury żeberowe wydłużyły czas pracy akumulatora o 54–90% w porównaniu z systemem składającym się w całości z PCM w fazie rozładowania akumulatora. Zwiększenie powierzchni wymiany ciepła BTMS prowadzi do zwiększenia szybkości wymiany ciepła. Jednak BTMS oparty na drugiej strategii nie rozwiązuje kwestii ograniczonej pojemności magazynowania ciepła PCM. Trzecia strategia obejmuje integrację PCM z innymi metodami chłodzenia w celu przywrócenia zdolności PCM do magazynowania ciepła^{14–17)}. System łączący chłodzenie powietrzem i wykorzystanie PCM w budowie akumulatorów litowo-jonowych w trakcie cyklu wymiany zaprojektowali Yang i współprac.¹⁸⁾.

W tych badaniach zaproponowano wykorzystanie PCM o grubości 2 mm i temperaturze przejścia fazowego 35°C, biorąc pod uwagę, że temperatura otoczenia wynosiła 26,5°C, a częstotliwość cykli wynosiła 2C. Zhang i współprac.¹⁹⁾ przeprowadzili badania nad systemem BTMS wspomaganym rurką cieplną i opartym na PCM. Wyniki badań wykazały, że najwyższe temperatury zestawu akumulatorów, zgodnie z tym systemem BTMS, działającym przy prędkościach rozładowania 1C, 3C i 4C (bez dodatkowego wentylatora), były niższe niż optymalna temperatura robocza 45°C. Ling i współprac.²⁰⁾ przetestowali hybrydowy system BTMS dla akumulatorów litowo-jonowych, który łączył PCM z wymuszonym chłodzeniem powietrzem. Wyniki pokazały, że ten BTMS utrzymywał maksymalną różnicę temperatur poniżej 3°C, wykazując wysoką sprawność i niezawodność. Należy jednak zauważyć, że ten BTMS jest bardziej złożony w porównaniu z poprzednimi dwoma strategiami. Inna strategia obejmuje łączenie PCM z innymi metodami chłodzenia. Shi i współprac.²¹⁾ niedawno zaprojektowali system BTMS, który integruje PCM z chłodzeniem powietrzem. Wyniki pokazały, że przy chłodzeniu powietrzem, nawet gdy PCM są całkowicie stopione, BTMS może nadal utrzymywać temperaturę akumulatora w bezpiecznym zakresie. Lv i współprac.²²⁾ przeprowadzili badania nad nowym systemem BTMS, który łączy serpentynowe PCM z chłodzeniem powietrzem i wykazali, że serpen-

novel fins with multiple heat-flow channels (V, Y, and X shapes) and incorporated them into PCMs modules to enhance heat transfer. The X-shaped fin exhibited optimal functionality in a high-temperature environment of 40°C, keeping the highest cell temperature under 47°C. Sun et al.¹³⁾ assessed new fin structures comprising straight and arc fins to enhance heat transmission. These innovative fin structures extended the battery's operating time by 54–90% in contrast to a system composed entirely of PCMs during the discharge phase. Therefore, increasing the heat transfer area of BTMS leads to an elevation in the heat transfer rate. However, BTMS based on the second strategy fails to address the issue of limited capacity for storing heat of PCMs. The third strategy involves the integration of PCMs with other cooling methods to restore the PCMs' thermal storing capability^{14–17)}. A system combining air and PCMs cooling for lithium-ion batteries in the course of the Yang et al.¹⁸⁾ designed changing cycle.

In this study, throughout the fluctuating period, it was suggested to utilize a PCM with a thickness of 2 mm and a stage transition temperature of 35°C, given that the ambient temperature was 26.5°C and the cycling rate was 2C. Zhang et al.¹⁹⁾ conducted research on a heat pipe-assisted separation type BTMS based on PCMs. Their findings indicated that the highest temperatures of the battery pack, according to this BTMS, operating at 1C, 3C, and 4C discharge rates (with no an auxiliary fan), were all below the optimum operating temperature of 45°C. Ling et al.²⁰⁾ tested a hybrid BTMS for lithium-ion batteries that combined PCMs with forced-air cooling. The results showed that this BTMS maintained a maximum temperature difference of less than 3°C, demonstrating high efficiency and reliability. However, it should be noted that this BTMS is more complex compared to the previous two strategies. Another strategy involves combining PCMs with other cooling methods to reduce the cooling load of PCMs. Shi et al.²¹⁾ recently designed a BTMS that integrates PCMs with air cooling. The results demonstrated that even when PCMs are completely melted, the BTMS can still maintain the battery temperature within the safe range with the assistance of air cooling. Lv et al.²²⁾ conducted research on a novel BTMS that integrates serpentine PCMs with air cooling. The results indicated that serpentine PCMs can save approximately 70% of the PCM amount, while elevating the battery energy density of the battery module by 13.8 Wh/kg. Zhao et al.²³⁾ proposed a BTMS in light of a thin heat sink embedded with PCMs. Compared to the air cooling method, this BTMS achieved a reduction in the maximum temperature of the battery by approximately 11.2%. The fourth strategy addresses the limited thermal storage capacity of PCMs by incorporating complex structures, such as PCMs and forced air cooling coupled BTMS, PCMs and liquid cooling coupled BTMS, PCMs and heat pipe coupled BTMS, and PCMs and thermoelectric cooler coupled BTMS. In comparison to the aforementioned strate-

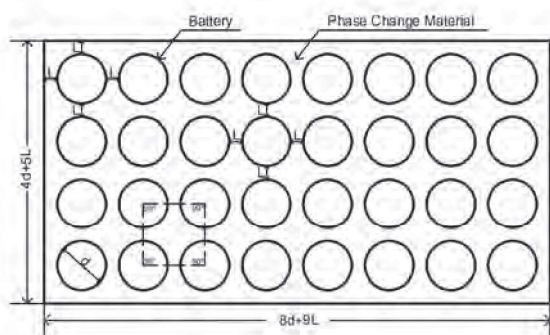


Fig. 1. Regular arrangement of batteries in BTMS

Rys. 1. Regularny układ akumulatorów w BTMS

tynowe moduły PCM mogą zaoszczędzić ok. 70% ilości PCM, jednocześnie zwiększając gęstość energii modułu akumulatora o 13,8 Wh/kg. Zhao i współpr.²³⁾ zaproponowali BTMS w postaci cienkiego radiatora osadzonego w PCM. W porównaniu z metodą chłodzenia powietrzem, ten system BTMS obniżył maksymalną temperaturę akumulatorów o ok. 11,2%. Czwarta strategia odnosi się do ograniczonej zdolności magazynowania ciepła przez PCM poprzez włączenie do BTMS złożonych struktur, takich jak PCM i wymuszone chłodzenie powietrzem, PCM i chłodzenie cieczą, PCM i rurka cieplna oraz PCM i chłodnica termoelektryczna. Spośród wymienionych strategii, pierwsza jest stosunkowo prosta, ponieważ nie wymaga żadnych dodatkowych urządzeń ani żeber.

W tych badaniach autorzy przeanalizowali systemy BTMS wykorzystujące PCM w różnych układach akumulatorów w celu określenia optymalnego układu na potrzeby BTMS. Kompozyt SBS@PA/EG wybrano w celu poprawy przewodności cieplnej PCM. Proces wymiany ciepła PCM w zestawie akumulatorów był badany za pomocą komercyjnego oprogramowania do elementów skończonych COMSOL Multiphysics 6.0. Praca miała na celu ocenę wpływu różnych układów akumulatorów na BTMS.

Opis modelu

Model geometryczny

Konfiguracja geometryczna akumulatorów została precyzyjnie zdefiniowana. Długość wynosiła $8d+9L$ mm, szerokość $4d+5L$ mm, a wysokość 65 mm. BTMS składał się z 2 elementów: akumulatorów (przedstawionych na rys. 1 jako okręgi) i PCM. Aby chronić system przed zewnętrznymi wstrząsami, użyto stalowej płyty o grubości 1 mm do pokrycia powierzchni BTMS, a moduły PCM zostały szczelnie upakowane w szczelinie między stalową płytą a akumulatorem. Zestaw akumulatorowy składał się z 32 cylindrycznych akumulatorów litowo-jonowych 26650 ułożonych w regularny wzór, z minimalną odległością L mm między każdą z nich i minimalną odległością L mm między granicą PCM a akumulatorami. Tutaj d reprezentowało stałą wartość średnicy akumulatora, a L było zmienną, której wartość wahała się w granicach 1–7 mm, w odstępach co 1

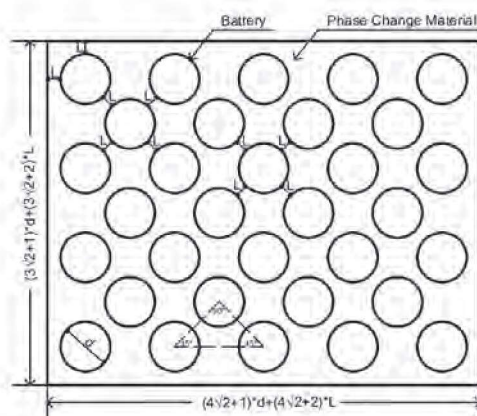


Fig. 2. Cross arrangement at 45-degree angle of batteries in BTMS

Rys. 2. Układ krzyżowy akumulatorów pod kątem 45°

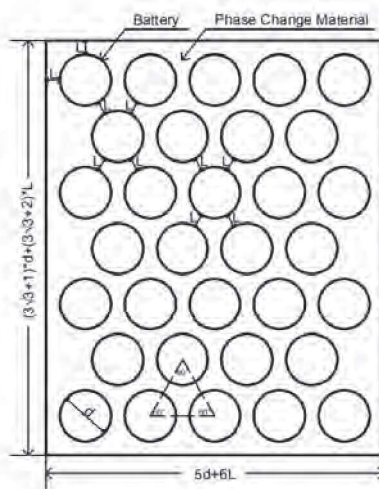


Fig. 3. Cross arrangement at 60-degree angle of batteries in BTMS

Rys. 3. Układ krzyżowy akumulatorów pod kątem 60°

gies, the first strategy is relatively simple as it does not require any additional devices or fins.

In this study, the authors analyzed BTMSs utilizing PCMs in different battery arrangements to determine the optimal battery arrangement for BTMS. Selecting composite SBS@PA/EGs was done to improve the PCMs' thermal conductivity. The heat transfer process of the PCMs in the battery pack is examined with the commercial finite element software COMSOL Multiphysics 6.0. This paper seeks to appraise the effects of different battery arrangements on BTMS.

Model description

Geometric model

The geometric configuration of the BTMS was precisely defined. The length was $8d+9L$ mm, the width $4d+5L$ mm, and the height 65 mm. The BTMS consisted of 2 parts: batteries (depicted as circles) and PCMs (depicted in white), as shown in Fig. 1. To protect the BTMS from external shocks, a 1 mm steel plate covered the surface of the BTMS, and the PCMs were tightly packed in the gap between the steel

mm. Aby zbadać wpływ różnych układów akumulatorów na BTMS, w niniejszym badaniu wprowadzono 2 dodatkowe układy, jak pokazano na rys. 2 i 3, a mianowicie układ krzyżowy pod kątem 45° i układ krzyżowy pod kątem 60°.

Akumulator i model PCM

Akumulator użyty w tym badaniu to model 26650 (średnica 26 mm i wysokość 65 mm)²⁴). Jego krytyczne parametry przedstawiono w tabeli 1. W badaniach jako PCM zastosowano kompozytowy materiał SBS@PA/EG o zwiększonej przewodności cieplnej. W celu zwiększenia przewodności cieplnej PCM zastosowano dodatek grafitu ekspandowanego (EG) do parafiny (PA). Aby poprawić właściwości mechaniczne PCM, Huang i współpracownicy⁵) zastosowali kopolimer styren-butadien-styren (SBS) jako materiał nośny. Gdy łączna masa PA i EG w PCM była równa masie SBS, przy czym EG stanowił 4% całkowitej masy, PCM wykazywały pożądaną szczytową temperaturę topnienia, duże wartości entalpii i podwyższoną przewodność cieplną. Na podstawie wyników DSC próbek SBS@PA/EG, temperatura kompozytu 1:1 SBS@PA/EG (4%) została określona na 47,7 °C, a przewodność cieplna kompozytu 1:1 SBS@PA/EG (4%) była ponad trzykrotnie większa od wartości dla czystego PA (0,24 W/(m·K)). Dlatego też kompozyt 1:1 SBS@PA/EG (4%) wykazał potencjał do stosowania w połączeniu z BTMS. Gęstość, przewodność cieplna i ciepło utajone PCM zestawiono w tabeli 2.

Model matematyczny i odnośne równania

Model akumulatora i warunki początkowe

Zakładając stałą temperaturę wewnątrz akumulatora, do określenia szybkości produkcji ciepła podczas jego ładowania i rozładowywania zaproponowano równanie Bernardiego²⁵) (1):

$$Q_{gen} = I \left[(E_0 - E) - T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (1)$$

w którym Q_{gen} oznacza szybkość generowania ciepła przez akumulator, I prąd podczas ładowania i rozładowywania, przy czym ładowanie ma znak ujemny, a rozładowywanie dodatni, E_0 i E oznaczają odpowiednio siłę elektromotoryczną i napięcie robocze akumulatora, a T jego temperaturę.

W równaniu (1), $(E_0 - E)$ można zastąpić równaniem (2):

$$E_0 - E = IR \quad (2)$$

w którym R jest równoważną rezystancją wewnętrzną.

Table 1. Thermophysical properties of batteries

Tabela 1. Właściwości termofizyczne akumulatorów

Property/Właściwość	Value/Wartość
Density/Gęstość, kg/m ³	2285
Thermal conductivity/Przewodność cieplna, W/(m·K)	3.91
Specific heat/Ciepło właściwe, kJ/(kg·K)	0.875

plate and the battery. The battery pack comprised 32 26650 lithium-ion cylindrical batteries arranged in a regular pattern, with a minimum distance of L mm between each battery and a minimum distance of L mm between the boundary of the PCMs and the batteries. Here, d represented the constant length of the battery diameter, and L was a variable that ranged from 1 mm to 7 mm, in increments of 1 mm. To explore the effects of various battery arrangements on BTMS, this study introduced 2 additional battery arrangements, as depicted in Fig. 2 and Fig. 3, namely the cross arrangement at a 45° angle and the cross arrangement at a 60° angle.

Battery and PCM model

The battery used in this research was the 26650 model (diameter of 26 mm and a height of 65 mm)²⁴). The critical parameters of the batteries were presented in Table 1. With the research, a composite SBS@PA/EG material with enhanced thermal conductivity was employed as the PCMs. The addition of expanded graphite (EG) to paraffin (PA) was responsible for enhancing the thermal conductivity of the PCMs. To enhance the mechanical properties of the PCMs, Huang et al.⁵) incorporated styrene-butadiene-styrene (SBS) copolymer as a supporting material. When the combined mass of PA and EG in the PCMs was equal to the mass of SBS, with EG accounting for 4% of the total mass, the PCMs exhibited desirable melting peak temperature, high enthalpies, and elevated thermal conductivity. Predicated on the DSC outcomes of the SBS@PA/EG samples, the temperature of the 1:1 composite SBS@PA/EG (4%) was determined to be 47.7°C, and the thermal conductivity of the 1:1 composite SBS@PA/EG (4%) was higher than threefold the value of pure PA (0.24 W/(m·K)). Therefore, the 1:1 composite SBS@PA/EG (4%) exhibited potential for using in conjunction with BTMS. The density, thermal conductivity, and latent heat of the PCMs were displayed in Table 2.

Mathematical model and governing equations

Battery model and initial conditions

Assuming a constant temperature inside the battery and consistent materials, the Bernardi equation²⁵) (1) was proposed for determining the rate of heat production during the charge and discharge:

$$Q_{gen} = I \left[(E_0 - E) - T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (1)$$

Table 2. Thermophysical properties of PCMs

Tabela 2. Właściwości termofizyczne PCM

Property/Właściwość	Value/Wartość
Density/Gęstość, kg/m ³ , rb	745
Thermal conductivity/Przewodność cieplna, W/(m·K), kb	0.88
Latent heat/Ciepło utajone, kJ/kg, h	170

Table 3. Battery heating power at different discharge rates

Tabela 3. Moc grzewcza akumulatora przy różnych szybkościach rozładowania

Discharge rate/Szybkość rozładowania, C	Heating power/Moc grzewcza, W/m ³
0.5	13052.57
1	36156.29

Z równań (1) i (2) można uzyskać równanie (3):

$$Q_{gen} = I^2 R - IT \frac{dE_0}{dT} \quad (3)$$

Gdy akumulator nie był poddawany ekstremalnym warunkom, takim jak przeładowanie i nadmierne rozładowanie, równoważny opór wewnętrzny R i jego współczynnik entropii dE_0/dT można było traktować jako stałe. W związku z tym można było obliczyć moc grzewczą akumulatora przy różnych szybkościach rozładowania (wartości podano w tabeli 3).

Stan początkowy akumulatorów został zdefiniowany jako:

$$t = 0 \\ T(x,y,z) = T_0$$

Model PCM i warunki brzegowe

Podczas procesu topnienia lub krzepnięcia PCM, w którym uwzględniono czyste przewodzenie ciepła, równanie energii można wyrazić równaniami (4) i (5):

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial t} = k_p \nabla^2 T \quad (4)$$

$$H = \int_{T_s}^{T_0} c_p dT + \beta L \quad (5)$$

w których ρ_p , L i k_p oznaczają odpowiednio gęstość, ciepło utajone i przewodność cieplną PCM (tabela 2), T i t oznaczają lokalną temperaturę i czas, H oznacza entalpię PCM, c_p oznacza intensywność objętości cieplnej PCM, a β odnosi się do frakcji ciekłej PCM i wielkość tę można wyrazić jako zależności (6):

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{(T - T_s)}{(T_1 - T_s)} & T_s < T < T_1 \\ 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (6)$$

w których T_s i T_1 oznaczają temperaturę odpowiednio krzepnięcia i skraplania PCM.

Warunkiem granicznym interfejsu akumulatory-PCM było zachowanie energii wynikające z równania (7):

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = -k_p \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7)$$

Procedura obliczeniowa

Oprogramowanie COMSOL Multiphysics 6.0 zostało wykorzystane do połączenia wielu pól fizycznych w syste-

where: Q_{gen} represents the heat generation rate of the battery; I denotes the current of the batteries during charging and discharging, with charging being negative and discharging being positive; E_0 and E signify the electromotive force and the operating voltage of the battery, respectively; and T stands for the temperature of the battery.

In equation (1), $(E_0 - E)$ can be replaced by equation (2):

$$E_0 - E = IR \quad (2)$$

where: R is the equivalent internal resistance.

According to equation (1) and equation (2), it is easy to get the equation (3):

$$Q_{gen} = I^2 R - IT \frac{dE_0}{dT} \quad (3)$$

When the battery was not subjected to extreme conditions such as overcharge and overdischarge, the equivalent internal resistance R and its entropy coefficient dE_0/dT can be treated as constants. Therefore, the battery heating power in a variety of discharge rates could be computed in Table 3.

The batteries' starting condition was defined as:

$$t = 0 \\ T(x,y,z) = T_0$$

PCMs model and boundary conditions

Regarding the PCMs, during the melting or solidification process, where pure heat conduction was considered, the energy equation could be expressed by equations (4) and (5):

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial t} = k_p \nabla^2 T \quad (4)$$

$$H = \int_{T_s}^{T_0} c_p dT + \beta L \quad (5)$$

where: ρ_p , L and k_p represent density, latent heat and thermal conductivity of PCMs, respectively (listed in Table 2), T and t denote the local temperature and time, H signifies the enthalpy of the PCMs, c_p indicates the intensity of the PCMs' heat volume, and β refers to the liquid fraction of the PCM, which can be expressed as :

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{(T - T_s)}{(T_1 - T_s)} & T_s < T < T_1 \\ 1 & T > T_1 \end{cases} \quad (6)$$

where: T_s and T_1 represent the solidification and liquefaction temperatures of the PCM, respectively.

Batteries-PCMs interface boundary condition was energy conservation driven by equation (7):

$$-k_b \frac{\partial T}{\partial n} = -k_p \frac{\partial T}{\partial n} \quad (7)$$

Numerical procedure

The COMSOL Multiphysics 6.0 software was employed to couple multiple physics fields on Windows 10 sys-

mach Windows 10. Gdy zestaw akumulatorów miał konfigurację regularną z $L = 1$ mm, przeprowadzono analizę wrażliwości przy użyciu 3 różnych standardów podziału siatki: normalnego standardu podziału, bardziej szczegółowego standardu podziału i bardzo szczegółowego standardu podziału w celu ustalenia odpowiedniej gęstości siatki. Przy stanie naładowania (SOC) w zakresie od 1 do 0, przy $C = 0,5$, najwyższa temperatura zestawu akumulatorów wynosiła odpowiednio $45,1971^{\circ}\text{C}$, $45,6612^{\circ}\text{C}$ i $45,7314^{\circ}\text{C}$ dla różnych standardów podziału. Rozbieżność między maksymalną temperaturą zestawu akumulatorów zgodnie z normalnym standardem podziału i bardzo szczegółowym standardem podziału wyniosła 1,17%. Jednakże, różnica pomiędzy maksymalną temperaturą zestawu akumulatorów zgodnie z bardziej szczegółowym standardem podziału i bardzo szczegółowym standardem podziału wyniosła 0,15%. Dlatego bardziej szczegółowy standard podziału (874231 jednostek domeny) został uznany za wystarczający do osiągnięcia pożądanej gęstości siatki. Ponadto wybrano odpowiednie kroki czasowe dla różnych przedziałów czasowych, w szczególności odpowiednio $C = 0,5$, 1 i 2, zapewniając niezależność czasową.

Model geometryczny BTMS został skonstruowany za pomocą oprogramowania COMSOL Multiphysics 6.0, przy czym zmienną była minimalna odległość między akumulatorami a PCM (L). W celu oceny wpływu L na BTMS geometryczny model BTMS był modyfikowany przez zmianę wartości L . Wymagane do obliczeń podstawowe właściwości termofizyczne akumulatorów i PCM zestawiono w tabelach 1 i 3. W przypadku identycznych akumulatorów moc grzewcza akumulatorów wzrastała wraz z większą szybkością rozładowania. W tabeli 3 zestawiono wartości mocy grzewczej akumulatora 26650 w tym modelu przy różnych szybkościach rozładowania. Oprogramowanie COMSOL Multiphysics 6.0 wykorzystano do symulacji fuzji PCM, przewodzenia ciepła między akumulatorami i PCM oraz innych procesów fizycznych.

Wyniki badań i dyskusja

Maksymalne różnice temperatur przy różnych konfiguracjach

Zmiany maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM dla różnych wartości L i rozmieszczenia akumulatorów w BTMS ($C = 0,5$) pokazano na rys. 4–6. Wyniki pokazały, że 3 różne zestawy akumulatorów w BTMS mogą kontrolować maksymalną różnicę temperatur zestawu w zakresie 5°C ($C = 0,5$). Zmienność najwyższej temperatury zestawu akumulatorów, która wykazywała początkowo spadek, a następnie wzrost dla układu krzyżowego, zarówno pod kątem 45° , jak i 60° , pokazano na rys. 5 i 6. Na przykład, gdy akumulatory były zestawione w układzie krzyżowym pod kątem 45° i $C = 0,5$, maksymalna różnica temperatur takiego zestawu spadła, a następnie wzrosła, gdy $L \geq 2$ mm. Spadek nastąpił, ponieważ wzrost grubości PCM spowodował

tems. When the battery pack was arranged in a regular configuration with $L = 1$ mm, a sensitivity analysis was conducted using 3 different grid refinement standards: normal division standard, more detailed division standard, and extremely detailed division standard to establish the suitable grid size. Under a state of charge (SOC) ranging from 1 to 0, with $C = 0.5$, the highest temperature of the battery pack was found to be 45.1971°C , 45.6612°C , and 45.7314°C , respectively, for the different division standards. The discrepancy between the maximum temperature of the battery pack under the normal division standard and the extremely detailed division standard was 1.17%. However, the difference between the maximum temperature of the battery pack under a more detailed division standard and the extremely detailed division standard was 0.15%. Therefore, the more detailed division standard (874231 domain units) was deemed sufficient for achieving the desired grid density. Furthermore, appropriate time steps were selected for various time intervals, specifically at $C = 0.5$, 1, and 2, respectively, ensuring temporal independence.

The geometric model of BTMS was constructed using COMSOL Multiphysics 6.0 software, with the variable being the minimum distance between the batteries and the PCM L . By changing the value of L , the geometric model of BTMS was modified to assess the impact of L on the BTMS. In addition, the basic thermophysical properties of the batteries and PCMs required for the calculations were presented in Tables 1 and 3. For identical batteries, the heating power of the batteries increased with a higher discharge rate. Table 3 provides the heating power values of the 26 650 batteries in this model at different discharge rates. Therefore, COMSOL Multiphysics 6.0 software was employed to simulate the fusion of PCMs, heat conduction between batteries and PCMs, and other physical processes.

Results and discussion

The maximum temperature differences under various arrangements

The variations in the battery pack's maximal temperature differential and the percentage of solids in PCMs for different lengths of L and battery arrangements in the BTMS ($C = 0.5$) were shown in Figs. 4–6. The results demonstrate that the 3 different battery arrangements in the BTMS can control the maximum temperature dissimilarity of the battery pack within a range of 5°C ($C = 0.5$). The variation in the highest temperature variation of the battery pack, which exhibited an initial decrease followed by a rise for the cross arrangement at both a 45 -degree angle and 60 -degree angle was shown in Figs. 5 and 6. For instance, when the battery arrangement was a cross arrangement at a 45 -degree angle and $C = 0.5$, the battery pack's maximum temperature differential dropped,

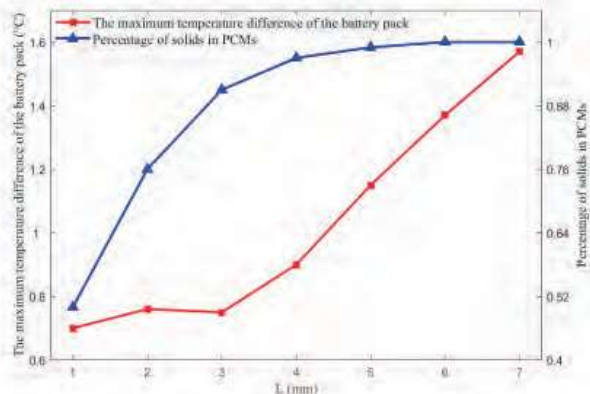


Fig. 4. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Regular arrangement (0.5C)

Rys. 4. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ regularny (0,5C)

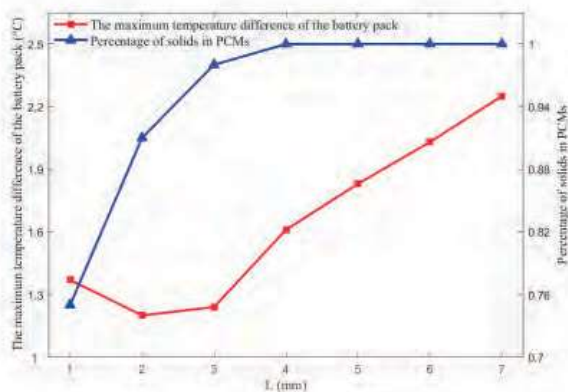


Fig. 5. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Cross arrangement at 45-degree angle (0.5C)

Rys. 5. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ krzyżowy pod kątem 45° (0,5C)

wał większą absorpcję energii cieplnej, co doprowadziło do ujednoczenia maksymalnej różnicy temperatur w zestawie akumulatorów, a wzrost nastąpił, ponieważ nadmierna ilość PCM utrudniała szybkie przewodzenie energii cieplnej, co powodowało zwiększenie różnicy temperatur. Dlatego samo zwiększenie długości L było nieskuteczne. Gdy wartość L stawała się zbyt duża, gęstość energii akumulatora spadała z powodu nadmiernej ilości PCM, która zajmowała pozycje akumulatorów. Jednak największe odchylenie temperatury akumulatora, reprezentowane przez czerwoną linię, wystąpiło wyłącznie w przypadku standardowej konfiguracji. Powodem tego wzrostu było to, że wartość 1 mm to więcej niż punkt zwrotny dla zwykłego układu. Wu i współpr.²⁶⁾ odkryli, że na każde 10% wzrostu masy EV zużycie energii wzrasta o 6% lub 8%. W związku z tym kluczowe było określenie optymalnej wartości L dla BTMS.

Największe odchylenie temperatury akumulatora przewidywane przez symulacje liczbowe dla układu krzyżowego pod kątem 45° i układu krzyżowego pod kątem 60°, przy

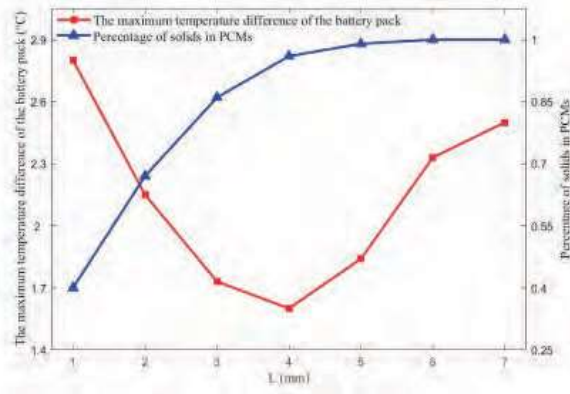


Fig. 6. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Cross arrangement at 60-degree angle (0.5C)

Rys. 6. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ krzyżowy pod kątem 60° (0,5C)

and then it increased when $L \geq 2$ mm. The decrease occurred because an increase in the PCM thickness resulted in more absorbed heat energy, leading to a more uniform maximum temperature difference in the battery pack. However, the increase happened because an excessive amount of PCM hinders the quick conduction of heat energy, resulting in a larger temperature difference. Therefore, solely increasing the length of L was ineffective. When L became too long, the energy density of the EVs' battery system decreased due to excessive PCM occupying the battery position. However, the highest temperature variance of the battery pack, represented by the red line, rose exclusively for the standard configuration. The reason for this increase was that 1 mm is already larger than the turning point for the regular arrangement. Wu et al.²⁶⁾ discovered that for every 10% increase in the mass of an EV, the energy consumption increased by 6% or 8%. Hence, it was crucial to determine an optimal thickness of L for BTMS.

The highest temperature variance of the battery pack predicted by numerical simulations for the cross arrangement at a 45-degree angle and the cross arrangement at a 60-degree angle, with the same value of $C = 0.5$ were presented in Figs. 5 and 6. It was observed that the cross arrangement at a 45-degree angle exhibited greater temperature uniformity than the 60-degree angle layout. However, when $L = 4$ mm, the highest temperature variance of the battery pack for the cross arrangement at a 60-degree angle was lower than that of the cross arrangement at a 45-degree angle. It was notable that the percentage of solids in PCMs for the cross arrangement at a 60-degree angle was the lowest at 0.4 compared to the others ($L = 1$ mm and $C = 0.5$). Nevertheless, the highest temperature difference of the battery pack was the largest at 2.8°C. Overall, the regular arrangement of the BTMS exhibited the most consistent temperature allocation in the battery pack, while the other arrangements also met the requirement of a temperature difference under 5°C.

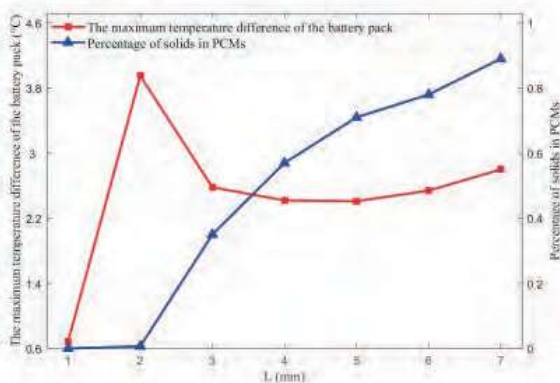


Fig. 7. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Regular arrangement (1C)

Rys. 7. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ regularny (1C)

tej samej wartości $C = 0,5$, przedstawiono na rys. 5 i 6. Zaobserwowano, że układ krzyżowy pod kątem 45° wykazywał większą równomierność temperatury niż układ pod kątem 60° . Jednak gdy $L = 4$ mm, najwyższa zmienność temperatury zestawu akumulatorów dla układu krzyżowego pod kątem 60° była mniejsza niż w przypadku układu krzyżowego pod kątem 45° . Warto zauważyć, że procentowa zawartość substancji stałej w PCM dla układu krzyżowego pod kątem 60° była w porównaniu z innymi najmniejsza i wynosiła 0,4 ($L = 1$ mm i $C = 0,5$). Niemniej jednak największa różnica temperatur zestawu akumulatorów była największa i wynosiła $2,8^\circ\text{C}$. Ogólnie rzecz biorąc, regularny układ BTMS wykazywał najbardziej spójną alokację temperatury w zestawie akumulatorów, choć inne układy również spełniały wymóg różnicy temperatur poniżej 5°C .

Zmienność maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L i układach w BTMS, $C = 1$ przedstawiono na rys. 7–9.

W odniesieniu do wyników symulacji, gdy L wynosiło 2 mm, 1 mm lub 2 mm, największe różnice temperatur dla zwykłego układu akumulatorów, układu krzyżowego pod kątem 45° i układu krzyżowego pod kątem 60° w BTMS osiągnęły odpowiednio $3,95^\circ\text{C}$, $6,58^\circ\text{C}$ i $9,3^\circ\text{C}$. Maksymalne różnice temperatur dla układu krzyżowego pod kątem 45° i 60° przekroczyły 5°C (rys. 8 i 9), co nie spełniało kryteriów jednorodności temperatury dla akumulatorów. Jeśli jednak maksymalne różnice temperatur dla układu krzyżowego pod kątem 45° i 60° nie obejmowały PCM, można je było utrzymać na poziomie $4,47^\circ\text{C}$. Wyniki te sugerują, że wykorzystanie PCM w BTMS było skuteczne w tym konkretnym modelu. Ponadto trendy czerwonych linii przy $C = 1$ różniły się od trendów czerwonych linii przy $C = 0,5$, ponieważ wykazywały trend wzrostowy, po którym następował trend spadkowy, a następnie kolejny ruch w górę. Trendy te przedstawiono na rys. 7 i 9. Początkowy wzrost czerwonych linii został przypisany zmianie procentowej

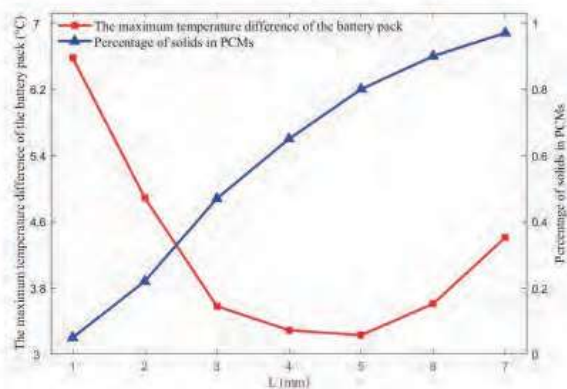


Fig. 8. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Cross arrangement at 45-degree angle (1C)

Rys. 8. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ krzyżowy pod kątem 45° (1C)

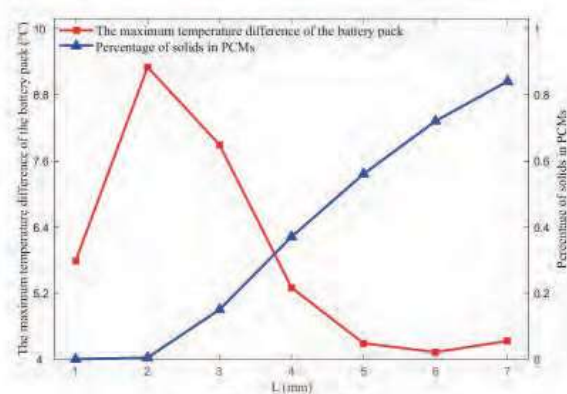


Fig. 9. Variation of the maximum temperature difference of the battery pack and percentage of solids in PCMs under the different lengths of L - Cross arrangement at 60-degree angle (1C)

Rys. 9. Zmiana maksymalnej różnicy temperatur zestawu akumulatorów i procentowej zawartości substancji stałej w PCM przy różnych wartościach L - układ krzyżowy pod kątem 60° (1C)

The results of varying the highest temperature variance of the battery pack and the percentage of solids in PCMs under different lengths (L) and battery arrangements in the BTMS, $C = 1$, were depicted in Figs. 7–9.

Concerning the simulation results, when $L = 2$ mm, 1 mm, and 2 mm, the highest temperature differences for the regular battery arrangement, cross arrangement at a 45-degree angle, and cross arrangement at a 60-degree angle in the BTMS reached 3.95°C , 6.58°C , and 9.3°C , respectively. The maximum temperature differences for the cross arrangement at a 45-degree angle and a 60-degree angle exceeded 5°C as illustrated in Figs. 8 and 9, which failed to meet the temperature uniformity criteria for batteries. However, if the maximum temperature differences for the cross arrangement at a 45-degree angle and a 60-degree angle did not include PCMs, they could be maintained at 4.47°C . These findings suggested that the utilization of PCMs in the BTMS was effective for this

zawartości substancji stałej w PCM z 0 do wartości niezerowej, co spowodowało większą różnicę temperatur między nieroztopionym PCM a akumulatorami. Następnie spadek czerwonych linii można było przypisać zwiększonej całkowitej ilości PCM, pochłaniającej więcej energii cieplnej z akumulatorów, zmniejszając w ten sposób maksymalną temperaturę zestawu akumulatorów, a następnie zmniejszając maksymalną różnicę temperatur tego zestawu. Biorąc pod uwagę przyczynę trendu wzrostowego czerwonych linii ($C = 0,5$), drugi wzrost czerwonej linii ($C = 1$) był spowodowany nadmierną ilością PCM, co utrudniało szybkie przewodzenie energii cieplnej wewnątrz PCM, prowadząc do większej różnicy temperatur. Czerwone linie wykazywały jedynie ruch w górę, a następnie w dół, co można przypisać faktowi, że zawartość procentowa substancji stałej w PCM była zawsze większa niż 0 (rys. 8). Obserwacja ta potwierdziła również uzasadnienie podwójnego wzrostu czerwonych linii na rys. 7 i 9. Trendy niebieskich linii przy $C = 1$ były podobne do trendów niebieskich linii przy $C = 0,5$, ponieważ wykazywały one ciągły trend wzrostowy. Dodatkowo zaobserwowano, że niebieskie linie dla $C = 1$ zaczęły rosnąć, gdy zawartość procentowa cząstek stałych w PCM wynosiła 0, ponieważ większa wartość C spowodowała zwiększone wytwarzanie ciepła w akumulatorze, co wymagało stopienia większej ilości PCM w celu pochłonięcia dodatkowej energii cieplnej.

Ogólnie rzecz biorąc, zaobserwowano, że regularny układ akumulatorów w BTMS, $L = 1$ mm, $C = 1$, wykazywał najbardziej równomierny rozkład temperatury spośród wszystkich rozważanych układów. Maksymalne różnice temperatur w układzie regularnym były konsekwentnie mniejsze niż w układach krzyżowych pod kątem 45° i 60° , dla różnych długości L . Zostało to przedstawione na rys. 8 i 9, które wykazały, że układ krzyżowy pod kątem 45° nie zapewniał lepszej jednorodności temperatury w porównaniu z układem krzyżowym pod kątem 60° . Dodatkowo zaobserwowano ujemną korelację pomiędzy procentową zawartością substancji stałej w PCM a maksymalnymi różnicami temperatur w BTMS. Podsumowując, regularny układ akumulatorów w BTMS osiągnął lepszą jednorodność temperatury w porównaniu z układami krzyżowymi pod kątem 45° i 60° . Należy jednak zauważyć, że regularny układ niekoniecznie musi być optymalny.

Maksymalne temperatury w różnych konfiguracjach

Sama jednorodność temperatury nie determinowała w pełni sprawności BTMS. Kolejnym krytycznym czynnikiem wpływającym na tę sprawność była maksymalna temperatura zestawu akumulatorów. Analiza porównawcza wpływu różnych układów akumulatorów i odległości L na najwyższą temperaturę zestawu została przedstawiona na rys. 10.

Różnice w najwyższej temperaturze zestawu akumulatorów dla różnych układów akumulatorów oraz różnych C i długości L pokazano na rys. 10. Wykres słupkowy wykazał, że najwyższa temperatura zestawu zmniejszała się wraz ze wzrostem L . Dodatkowo, przy różnych wartościach L i $C = 0,5$, maksymalna

particular model. In addition, the trends of the red lines ($C = 1$) differed from those of the red lines ($C = 0.5$), as they exhibited an upward trend followed by a downward trend, and then another upward movement. These trends are depicted in Figs. 7 and 9. The initial rise of the red lines was attributed to the change in the percentage of solids in PCMs from 0 to a non-zero value, resulting in a greater temperature gap between the unmelted PCMs and the batteries. Subsequently, the decline in the red lines could be attributed to the increased total amount of PCMs, which absorbed more heat energy from the batteries, thereby reducing the maximum temperature of the batteries and subsequently decreasing the maximum temperature difference of the battery pack. Considering the reason behind the upward trend of the red lines ($C = 0.5$), the second rise of the red line ($C = 1$) was due to an excessive amount of PCMs, which hindered the rapid conduction of heat energy within the PCMs, leading to a larger temperature difference. The red lines only exhibited an upward and then downward movement, which can be attributed to the fact that the percentage of solids in PCMs was always higher than 0 (Fig. 8). This observation also confirmed the rationale behind the double rise of the red lines in Figs. 7 and 9. It is worth noting, that the trends of the blue lines ($C = 1$) were similar to those of the blue lines ($C = 0.5$), as they demonstrated a continuous upward trend. Additionally, it was observed that the blue lines ($C = 1$) began to rise when the percentage of solids in PCMs was 0, as a larger value of C resulted in increased heat generation in the battery, necessitating the melting of more PCMs to absorb additional heat energy.

In general, it was observed that the regular arrangement of batteries in BTMS, $L = 1$ mm, $C = 1$, exhibited the most uniform temperature distribution among all arrangements considered. The maximum temperature differences in the regular arrangement were consistently smaller than those in the cross arrangement at 45-degree and 60-degree angles, for varying lengths of L . This finding was visually represented in Figs. 8 and 9, which demonstrated that the cross arrangement at a 45-degree angle did not offer superior temperature uniformity compared to the cross arrangement at a 60-degree angle. Additionally, a negative correlation was observed between the percentages of solids in PCMs and the maximum temperature differences in BTMS. In summary, the regular arrangement of batteries in BTMS achieved the best temperature uniformity compared to the cross arrangement at 45-degree and 60-degree angles. However, it should be noted that the regular arrangement may not necessarily be the optimal arrangement.

The maximum temperatures under the various arrangements

It is important to acknowledge that temperature uniformity alone did not fully determine the efficiency of BTMS.

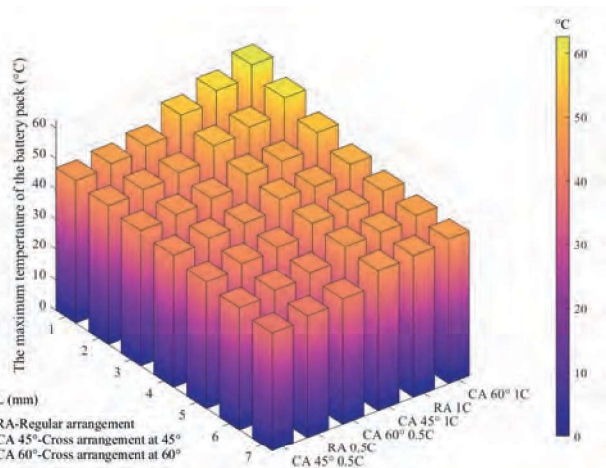


Fig. 10. Variation of the maximum temperature of the battery pack under the different arrangements of batteries and the different lengths of L

Rys. 10. Zmiana maksymalnej temperatury zestawu akumulatorów przy różnych układach akumulatorów i różnych wartościach L

temperatura układu regularnego miała mniejszą wartość niż temperatura układu krzyżowego pod kątem 60° , a maksymalna temperatura układu krzyżowego pod kątem 60° była niższa niż temperatura układu krzyżowego pod kątem 45° . Warto zauważyć, że dla $C = 0,5$ regularny układ wykazywał najniższą maksymalną różnicę temperatur, choć nie najniższą maksymalną temperaturę. Układ krzyżowy pod kątem 45° osiągnął najniższą maksymalną temperaturę. Maksymalne temperatury zwykłego układu akumulatorów, układu krzyżowego pod kątem 45° i układu krzyżowego pod kątem 60° utrzymywały się poniżej 50°C , co spełniało wymóg utrzymania temperatury poniżej 60°C . Dlatego wszystkie 3 układy okazały się skuteczne w kontrolowaniu maksymalnej temperatury akumulatorów w BTMS. Spośród tych układów, układ krzyżowy pod kątem 45° był najbardziej skuteczny, ponieważ utrzymywał temperaturę na poziomie $38,94^\circ\text{C}$. Ten wynik był prawdziwy dla określonego modelu z $L = 7$ mm i $C = 0,5$.

Stwierdzono, że maksymalne temperatury obserwowane w różnych układach akumulatorów (układzie regularnym, krzyżowym pod kątem 45° i krzyżowym pod kątem 60°) były generalnie niższe niż 60°C . Należy jednak zauważyć, że maksymalna temperatura dla układu krzyżowego pod kątem 60° osiągnęła $62,67^\circ\text{C}$, gdy wartości L i C zostały ustawione odpowiednio na 1 mm i 1, zgodnie z rys. 10. Biorąc pod uwagę zestaw akumulatorów o $C = 0,5$, maksymalna temperatura w układzie regularnym była nieco niższa niż w układzie krzyżowym pod kątem 45° , gdy wartości L były ustawione na 3, 4 i 5 mm, a C było ustawione na 1. Dodatkowo zaobserwowano, że maksymalne temperatury początkowo gwałtownie spadały, a następnie stopniowo wzrastały wraz ze wzrostem L . Szybki spadek był spowodowany zwiększoną absorpcją energii cieplnej przez PCM, co znacznie obniżyło najwyższą temperaturę zestawu akumulatorów. Jednak powolny spadek temperatury można przypisać słabej przewodności cieplnej PCM, która utrudniała odpowiednie odprowadzanie ciepła generowanego

The maximum temperature of the battery pack was another critical factor that influenced the BTMS performance. A comparative analysis of the impacts of different battery arrangements and lengths of L on the battery pack's utmost temperature was shown in Fig. 10.

The variance in the highest temperature of the battery pack for different arrangements of batteries and the different C and lengths of L was demonstrated in Fig. 10. The bar chart revealed that the highest temperature of the battery pack decreased with increasing the length of L . Additionally, under varying lengths of L and $C = 0.5$, the maximum temperature of the regular arrangement had a lower value than the cross arrangement at a 60 -degree angle, and the maximum temperature of the cross arrangement at a 60 -degree angle was lower than that of the cross arrangement at a 45 -degree angle. Notably, the regular arrangement exhibited the lowest maximum temperature difference, albeit not the lowest maximum temperature, for $C = 0.5$. However, the cross arrangement at a 45 -degree angle achieved the lowest maximum temperature. It is worth mentioning that the maximum temperatures of the regular arrangement, cross arrangement at a 45 -degree angle, and cross arrangement at a 60 -degree angle all remained below 50°C , which satisfied the requirement of maintaining battery temperatures below 60°C . Therefore, all 3 arrangements prove effective in controlling the maximum temperature of batteries in BTMS. Among these arrangements, the cross arrangement at a 45 -degree angle was the most effective, as it maintained the battery temperature at 38.94°C . This result was true for the specified model with $L = 7$ mm and $C = 0.5$.

The maximum temperatures observed in various battery pack arrangements, including regular arrangement, cross arrangement at a 45 -degree angle, and cross arrangement at a 60 -degree angle, were found to be generally below 60°C . However, it should be noted that the maximum temperature for the cross arrangement at a 60 -degree angle reached 62.67°C when the values of L and C were set to 1 mm and 1, respectively, according to Fig. 10. When considering a battery pack with a C value of 0.5, the maximum temperature of the regular arrangement was slightly lower than that of the cross arrangement at a 45 -degree angle when L values were set to 3, 4, and 5 mm, and C was set to 1. Additionally, it was observed that the maximum temperatures decreased rapidly at first and then gradually with an increase in L . The quick decrease was due to the PCMs' enhanced heat energy absorption, which significantly decreased the battery pack's highest temperature. However, temperature's slow decline could be attributed to the poor thermal conductivity of the PCMs, which hindered the timely dissipation of heat generated by the battery. It is worth noting, that the thermal conductivity of the PCMs used in this study was more than 4 times that of pure paraffin. Therefore, it could be concluded that both the regular arrangement and the cross arrangement

przez akumulator. Przewodność cieplna zastosowanych w tym badaniu PCM była ponad 4 razy większa niż czystszej parafiny. W związku z tym można stwierdzić, że zarówno zwykły układ, jak i układ krzyżowy pod kątem 45° wykazywały lepszą kontrolę, przekraczającą najwyższą temperaturę zestawu akumulatorów niż układ krzyżowy pod kątem 60°.

Wnioski

Na sprawność EV wpływają takie czynniki, jak gęstość energii, temperatura pracy i gradient temperatury w zestawie akumulatorów. W ramach tych badań przeprowadzono ocenę termiczną akumulatorów litowo-jonowych przy użyciu podstawowych zasad wymiany ciepła w celu oceny szybkości generowania ciepła przez akumulatory o wartościach C wynoszących 0,5 i 1. W celu oceny wydajności zestawu akumulatorów rozważono różne ich układy i odległości między akumulatorami (L). Zgodnie z wynikami liczbowymi, regularny układ zestawu akumulatorów wykazywał największą zdolność do kontrolowania maksymalnych różnic temperatur, następnie układ krzyżowy pod kątem 45°, a na końcu układ krzyżowy pod kątem 60°. Zastosowanie układu akumulatorów i PCM odegrało kluczową rolę w łagodzeniu skutków termicznych akumulatorów litowo-jonowych, zwiększając w ten sposób jednorodność temperatury w całym zestawie akumulatorów. W porównaniu z układem krzyżowym pod kątem 45°, układ krzyżowy pod kątem 60° wykazał mniejszą zdolność do kontrolowania różnic temperatur. W większości przypadków najwyższa temperatura zestawu akumulatorów w układzie krzyżowym pod kątem 45° była niższa niż w układzie zgodnym z normą, a najwyższa temperatura w układzie regularnym była niższa niż w układzie krzyżowym pod kątem 60°, przy wartościach SOC od 1 do 0.

Podziękowania

Badanie to było wspierane przez Natural Science Foundation of Heilongjiang Province [Fundacja Nauk Przyrodniczych prowincji Heilongjiang] (LH2021E003).

at a 45-degree angle exhibited superior control exceeding the highest temperature of the battery pack than the cross arrangement at a 60-degree angle.

Conclusion

The performance of an EV is influenced by factors such as the energy density, operating temperature, and temperature gradient within its battery pack. With this research, a thermal evaluation of lithium-ion batteries was conducted using fundamental heat transfer principles to appraise the heat generation rate of batteries with C values of 0.5 and 1. Various battery arrangements and interval lengths (L) were considered to assess the performance of the battery pack. According to the numerical outcomes, the regular arrangement of the battery pack exhibited the highest ability to control the maximum temperature differences, followed by the cross arrangement at a 45-degree angle, and finally, the cross arrangement at a 60-degree angle. The allocation of batteries to PCMs played a crucial role in mitigating the thermal effects of lithium-ion batteries, therefore enhancing temperature uniformity throughout the battery pack. Compared to the cross arrangement at a 45-degree angle, the cross arrangement at a 60-degree angle demonstrated a lower ability to control temperature differences. In most cases, the highest temperature of the battery pack in the cross arrangement at a 45-degree angle was lower than that following the norm, and the highest temperature in the regular arrangement was lower than that in the cross arrangement at a 60-degree angle, with SOC values from 1 to 0.

Acknowledgment

This study was supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2021E003).

Received/Otrzymano: 04-07-2024

REFERENCES/LITERATURA

- [1] Z.-G. Shen et al., *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, **148**, 111301.
- [2] G. Zubi et al., *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, **89**, 292.
- [3] Y. Xie et al., *Energy Conv. Manage.* 2017, **154**, 562.
- [4] G. Jiang et al., *Appl. Thermal Eng.* 2017, **120**, 1.
- [5] Q. Huang et al., *Appl. Thermal Eng.* 2021, **183**, 116151.
- [6] N. Zhang et al., *Adv. Eng. Mater.* 2018, **20**, No. 6, 1700753.
- [7] M. Kiani et al., *Appl. Thermal Eng.* 2020, **180**, 115840.
- [8] M. Alipanah et al., *Int. J. Heat Mass Transfer* 2016, **102**, 1159.
- [9] W.Q. Li et al., *J. Power Sources* 2014, **255**, 9.
- [10] X. Liu et al., *Appl. Thermal Eng.* 2022, **212**, 118510.
- [11] V.G. Choudhari et al., *Int. J. Heat Mass Transfer* 2020, **163**, 120434.
- [12] J. Weng et al., *Energy Conv. Manage.* 2019, **200**, 112106.
- [13] Z. Sun et al., *Int. J. Thermal Sci.* 2021, **165**, 106945.
- [14] R.D. Jilte et al., *Appl. Thermal Eng.* 2019, **161**, 114199.
- [15] M. Safdari et al., *Energy* 2020, **193**, 116840.
- [16] M. Bamdezh et al., *J. Power Sources* 2020, **457**, 227993.
- [17] P. Qin et al., *Energy Conv. Manage.* 2019, **195**, 1371.
- [18] Y. Yang et al., *Int. J. Thermal Sci.* 2021, **165**, 106968.
- [19] W. Zhang et al., *Appl. Thermal Eng.* 2020, **165**, 114571.
- [20] Z. Ling et al., *Appl. Energy* 2015, **148**, 403.
- [21] S. Shi et al., *Energy Conv. Manage.* 2017, **138**, 84.
- [22] Y. Lv et al., *J. Power Sources* 2020, **468**, 228398.
- [23] J. Zhao et al., *Appl. Thermal Eng.* 2020, **174**, 115304.
- [24] J. Zhao et al., *Appl. Thermal Eng.* 2015, **85**, 33.
- [25] P. Jiridal et al., *Appl. Thermal Eng.* 2022, 201, 117794
- [26] X. Wu et al., *Int. J. Heat Mass Transfer* 2020, **163**, 120495.