

Zarządzanie temperaturą w bateriach samochodów elektrycznych – przegląd systemów chłodzenia

Temperature management in electric car batteries – review of cooling systems

Agnieszka Skibińska, Zbigniew Stępień, Magdalena Żółty

Institut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Polska jest jednym z największych rynków samochodów osobowych w Europie pod względem sprzedaży, zajmując szóste miejsce wśród krajów Unii Europejskiej i Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu. Choć w flocie samochodów osobowych w Polsce dominują obecnie samochody z silnikami spalinowymi, kraj jest zaangażowany w zwiększanie liczby i udziału elektrycznych samochodów osobowych. Prawie 12 300 elektrycznych samochodów osobowych jeździło po polskich drogach do czerwca 2020 r. Ponad 56% z nich stanowiły pojazdy elektryczne na baterie (BEV). W niniejszym artykule zebrano informacje dotyczące stosowanych w samochodach elektrycznych systemów zarządzania temperaturą baterii. Przedstawiono sposoby chłodzenia z wykorzystaniem powietrza, czynnika chłodniczego, różnego rodzaju cieczy, materiałów o przemianie fazowej oraz systemu opartego na rurkach cieplnych, a także z zastosowaniem elementu termoelektrycznego. W czasie eksploatacji pojazdów BEV należy zwrócić szczególną uwagę na systemy zarządzania temperaturą baterii. Temperatura baterii wywiera różnorodny wpływ na działanie układu elektrochemicznego, co przekłada się na moc i efektywność energetyczną, bezpieczeństwo i niezawodność oraz koszt i okres użytkowania. W celu zapewnienia długiej żywotności i optymalnej wydajności baterii litowo-jonowych, należy zadbać o optymalny zakres temperatur oraz jednolity rozkład temperatury w pakiecie baterii i ogniwach.

Słowa kluczowe: zarządzanie temperaturą, samochody elektryczne, systemy chłodzenia, ciecze chłodzące.

ABSTRACT: Poland is one of the largest passenger car markets in Europe in terms of sales, ranking sixth place among the countries of the European Union and the European Free Trade Association. Although the passenger car fleet in Poland is currently dominated by cars with internal combustion engines, the country is committed to increasing the number and share of electric passenger cars. Almost 12 300 electric passenger cars were on Polish roads until June 2020. Over 56% of them were battery electric vehicles (BEV). This article gathers information on the temperature management systems used in electric cars. Cooling methods with the use of air, refrigerant, various types of liquids, materials with phase change and a system based on heat pipes as well as the use of a thermoelectric element were presented. When operating BEVs, particular attention should be paid to battery temperature management systems. Battery temperature has a variety of effects on the operation of the electrochemical system, which translates into power and energy efficiency, safety and reliability, cost and lifetime. In order to ensure the long life and optimal performance of lithium-ion batteries, care should be taken to ensure the optimal temperature range and uniform temperature distribution in the battery pack and cells.

Key words: temperature management, electric cars, cooling systems, cooling liquids.

Wprowadzenie

Samochody zelektryfikowane można ze względu na rodzaj stosowanego napędu podzielić na cztery grupy:

- BEV (ang. *battery electric vehicle*) – pojazdy w pełni elektryczne, które nie są wyposażone w silnik spalinowy, a których jedyną jednostką napędową jest silnik elektryczny zasilany baterią, ładowaną z zewnętrznych źródeł energii;

- HEV (ang. *hybrid electric vehicle*) – pojazdy wyposażone w silnik spalinowy oraz silnik elektryczny, wykorzystujący energię elektryczną. Ze względu na sposób wykorzystania wymienionych silników HEV można podzielić na hybrydy szeregowe i hybrydy równoległe. W przypadku hybryd szeregowych silnik spalinowy służy wyłącznie do napędzania generatora energii elektrycznej ładującej baterię. W przypadku hybrydy równoległej koła samochodu mogą

Autor do korespondencji: A. Skibińska, e-mail: agnieszka.skibinska@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 06.12.2021 r. Zatwierdzono do druku: 23.02.2022 r.

być napędzane zarówno silnikiem spalinowym, jak i silnikiem elektrycznym;

- PHEV (ang. *plug-in hybrid electric vehicle*) – to hybrydowe pojazdy elektryczne z możliwością ładowania ze źródeł zewnętrznych (ang. *plug in* – wtyczka). Są wyposażone w napęd częściowo konwencjonalny, a częściowo elektryczny. Muszą być tankowane na stacji paliw (ze względu na silnik spalinowy) i ładowane (bateria) z zewnętrznego źródła energii (ze względu na silnik elektryczny);
- REEV (ang. *range extended electric vehicle*) – pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym, w których silnik spalinowy wykorzystywany jest wyłącznie do napędzania generatora energii elektrycznej ładującego baterię.

Baterie litowo-jonowe, czyli zestawy ogniw odwracalnych, w których nośnikiem ładunku są jony litu, należą do relatywnie tanich technologii gromadzenia energii elektrycznej. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka ich odmian, które różnią się między sobą rozwiązaniami konstrukcyjnymi i zastosowanymi związkami chemicznymi, w tym w szczególności rodzajem związku litu, z którego wykonana jest katoda. Mimo że noszą różne nazwy, wszystkie są bateriami litowo-jonowymi. Ze względu na dużą grawimetryczną gęstość energii pozwalają na dłuższe zasilanie silnika elektrycznego pojazdu pomiędzy procesami ładowania niż baterie wykonane w innej technologii. W samochodach elektrycznych mogą być eksploatowane przez około 10 lat, a ładowane 2500–3500 razy. Nie występuje w nich efekt pamięciowy, samorozładowanie jest niewielkie, a trwałość i żywotność – duża (w wielu przypadkach przekracza 1000 cykli pracy). Dlatego też są one najczęściej wybierane przez producentów samochodów elektrycznych (Sendek-Matysiak, 2019).

Baterie litowo-jonowe mogą działać w stosunkowo szerokim zakresie temperatur. Niezbędne jest jednak bieżące monitorowanie temperatury panującej wewnątrz obudowy, aby zapobiegać wykroczeniom poza dopuszczalny zakres temperatury pracy (typowo 0–45°C), przy czym zakres optymalny to 15–35°C.

Temperatura baterii ma duży i różnorodny wpływ na działanie układu elektrochemicznego, co przekłada się na jej moc i efektywność energetyczną, bezpieczeństwo i niezawodność oraz koszt i okres użytkowania. Celem zapewnienia długiej żywotności i optymalnej pracy baterii litowo-jonowych należy zadbać o optymalny zakres temperatur oraz jednolity rozkład temperatury w pakiecie baterii i każdego pojedynczego ogniwa. System zarządzania temperaturą nie może być zbyt duży ani zbyt ciężki, żeby nie kolidować z wydajnością elektrycznego układu napędowego. Skuteczność działania tego systemu musi być wystarczająca, aby szybko rozpraszać ciepło generowane przez baterię w każdych warunkach jej eksploatacji (Adair et al., 2014).

TMS (ang. *thermal management system*) lub według innych BTMS (ang. *battery thermal management system*) to system monitorujący i zarządzający termicznymi warunkami pracy baterii. Nadzoruje i zabezpiecza, by bateria (ogniwa baterii) pracowała w możliwie optymalnych temperaturowo warunkach. W przeciwnym razie bateria szybko traci wydajność, zwłaszcza przy nagłych zmianach temperatury i ich wykraczaniu poza ustalony zakres pracy. Ponieważ oziębienie baterii ogranicza jej sprawność i pojemność, przez co zmniejsza zasięg pojazdu, a jej przegrzewanie prowadzi do szybkiego zużycia (zmniejszenia pojemności), BTMS, jako system nadzorujący, a zarazem wykonawczy, w razie potrzeby chłodzi lub dogrzewa ogniwa (Forrister, 2019). Skuteczna strategia zarządzania temperaturą wydłuża żywotność baterii.

Różne typy systemów chłodzenia mają wpływ na wydajność i koszt systemu zarządzania temperaturą baterii (BTMS).

Istnieją różne systemy zarządzania sposobem przenoszenia ciepła, w tym:

- wewnętrzne lub zewnętrzne;
- pasywne (wykorzystywane jest tylko powietrze z otoczenia) lub aktywne (zintegrowane źródło);
- zapewniające ogrzewanie i/lub chłodzenie;
- podzielone na kategorie według medium przenoszącego ciepło, takiego jak: powietrze, ciecze, materiały o przemianie fazowej, rury cieplne, elementy termoelektryczne lub dowolną ich kombinację (Benabdelaziz et al., 2020).

Chłodzenie powietrzem

Spośród sposobów chłodzenia powietrzem wyróżnić można:

- pasywne chłodzenie, które wykorzystuje zasadę konwekcji. Powietrze, omywając chłodzoną powierzchnię, odprowadza ciepło emitowane przez obudowę. Chłodzenie takie jest konstrukcyjnie proste, ale niezbyt wydajne;
- aktywne chłodzenie powietrzem, które wykorzystuje zasadę wymuszonej konwekcji. W obudowie baterii znajdują się otwory wentylacyjne, a umieszczone w nich wentylatory zapewniają sprawną cyrkulację powietrza – w poprzek ogniw kierowane jest klimatyzowane powietrze lub nadmuchiwanego powietrza z otoczenia;
- chłodzenie z wykorzystaniem żeberk zwiększających powierzchnię, aby zintensyfikować szybkość wymiany ciepła. Z baterii do żeber ciepło jest przenoszone na skutek przewodzenia, a z żeber na zewnątrz – poprzez konwekcję. Wadą tego systemu jest dodatkowy ciężar żeber.

Zaletą zaletą systemu chłodzenia powietrzem jest stosunkowo prosta, tania i łatwa do wdrożenia konstrukcja. System ten można dostosować do różnych rodzajów i kształtów baterii. Nie ma tu problemów z wyciekami płynu, nie występuje też

niebezpieczeństwo zwarcia elektrycznego spowodowanego płynem (Rao i Wang, 2011). Podstawową wadą tego rozwiązania jest mało efektywna wymiana ciepła ze względu na właściwości powietrza: małą pojemność i przewodność cieplną. W chłodzonym obszarze w porównaniu z chłodzeniem płynnym czynnikiem chłodniczym występują większe wahania temperatury. Baterie o większej mocy i większych rozmiarach wymagają dużego natężenia przepływu powietrza, co wiąże się z większym ciężarem tego rozwiązania oraz znaczną objętością rur chłodzących.

Chłodzenie konwekcyjne jest skuteczne tylko w przypadku baterii o niskiej gęstości energii i niskich wymaganiach dotyczących komfortu (pojazdy do krótkotrwałej pracy i pojazdy bezzałogowe), ponieważ aktywny system chłodzenia powietrzem wyposażony jest w generujące dużo hałasu wentylatory, zwiększające wymianę ciepła. Rozwiązanie takie podwyższa koszt, a wysoka moc wentylatora(-ów) wymaga dodatkowo elektrycznego zasilania.

Rozwój tego systemu chłodzenia ukierunkowany jest na wzrost wydajności poprzez zwiększenie objętości powietrza i natężenia jego przepływu, zwiększenie rozmiaru kanałów chłodzących i zoptymalizowanie rozmieszczenia baterii (Lu et al., 2020).

Generalnie strategia chłodzenia powietrzem pozwala na ograniczenie kosztów i wykorzystanie najprostszej struktury pakietu regulującego temperaturę. Jednak w przypadku baterii pracujących w trybie szybkiego ładowania/rozładowania i przy większym współczynniku generacji ciepła podejście to nie jest w stanie wystarczająco elastycznie kontrolować temperatury baterii w wymaganym zakresie.

Chłodzenie czynnikiem chłodniczym

Chłodzenie z wykorzystaniem płynu dielektrycznego (testowano już stosowany w klimatyzacjach czynnik R134a oraz ditlenek węgla) charakteryzuje się bardziej efektywnym odprowadzaniem ciepła na skutek większej pojemności cieplnej płynu w porównaniu z powietrzem. Wadą są jednak wyższe nakłady projektowe i wynikające z nich wyższe koszty instalacji tego typu układu chłodzenia, jak również możliwe problemy z uszczelnieniem. Ponadto zwiększona liczba dodatkowych komponentów niezbędnych w takiej instalacji wymaga dużej, często nieosiągalnej przestrzeni montażowej. W związku z powyższym bezpośredni system chłodzenia czynnikiem chłodniczym nie jest szeroko stosowany w pojazdach elektrycznych. Czynniki, które wpływają na wydajność bezpośredniego układu chłodzenia i stanowią obecnie główne kierunki badań, to: typ czynnika chłodniczego, natężenie jego przepływu, powierzchnia styku i wydajność chłodzenia (Lu et al., 2020).

Zaletami tego rozwiązania jest stabilność i równomierność rozkładu temperatury czynnika chłodniczego w całym układzie chłodzenia w porównaniu z układem pośredniego chłodzenia, a także możliwość recyklingu czynnika chłodniczego. W przypadku wykorzystania chłodzenia za pomocą istniejącego systemu klimatyzacji w samochodzie kompaktowe rozwiązanie pozwala na zmniejszenie ciężaru konstrukcji i wymaga mniejszej pojemności układu chłodzącego. W przypadku gdy do chłodzenia baterii wykorzystuje się osobny układ z obiegiem sprężarki, system zarządzania temperaturą baterii i klimatyzacyjne układy chłodnicze w kabinie są od siebie niezależne i mogą działać odrębnie.

Podstawową wadą bezpośredniego chłodzenia czynnikiem chłodniczym jest wysoki koszt budowy układu i jego utrzymania w eksploatacji ze względu na wymogi izolacji związane z elektryczną przewodnością cieczy chłodzącej. Podczas eksploatacji pojazdu czynnik chłodzący powinien być kierowany zgodnie z faktycznym rozpraszaniem ciepła, a dodatkowe zadania związane z rozpraszaniem ciepła w układzie chłodniczym sprężarki zwiększają rozmiary systemu i jego koszt (Saw et al., 2015).

Rozwój tego systemu chłodzenia ukierunkowany jest na eliminację kondensacji czynnika podczas użytkowania oraz na poprawę szczelności, aby do środka nie przedostawało się powietrze. Problemy do rozwiązania mają związek z: optymalizacją lepkości czynników chłodniczych, ich stabilnością chemiczną, działaniem korozyjnym na elementy składowe baterii. Ponadto należy zoptymalizować strategię sterowania przepływem czynnika chłodniczego w połączeniu z systemami kontroli temperatury i kontroli przepływu (Lu et al., 2020).

Chłodzenie z wykorzystaniem materiału o przemianie fazowej

Układ chłodzenia wykorzystujący materiał zmiennofazowy umożliwia lepszą kontrolę temperatury w zarządzaniu termicznym baterii. Może on zapewnić bardziej równomierny rozkład temperatury w pakiecie ogniw baterii i zminimalizować wpływ niebezpiecznego zjawiska niestabilności cieplnej w razie jego wystąpienia (Hémery et al., 2014). Materiały PCM (ang. *phase-change material*), pochłaniając energię cieplną, zmieniają stan skupienia. Żeby działać skutecznie, powinny się one charakteryzować: temperaturą topnienia w żądanym zakresie temperatur roboczych, wysokim ciepłem właściwym i wysokim przewodnictwem cieplnym, małą zmianą objętości podczas przejścia fazowego, stabilnością, nietoksycznością, niepalnością i niewybuchowością (Rao i Wang, 2011).

Materiały PCM można podzielić, biorąc pod uwagę następujące kryteria:

- zgodnie z formą przemiany fazowej – na cztery typy: ciało stałe–ciało stałe, ciało stałe–ciecz, ciało stałe–para i ciecz–para;
- zgodnie z różnymi zakresami temperatur przemiany fazowej:
 - materiały o przemianie fazowej o niskiej temperaturze (-50°C do 90°C),
 - materiały o przemianie fazowej o średniej temperaturze (90 do 550°C),
 - materiały o przemianie fazowej o wysokiej temperaturze ($>550^{\circ}\text{C}$);
- ze względu na skład chemiczny:
 - organiczne (parafina, kwasy tłuszczowe, estry, poliole itp.),
 - nieorganiczne (w tym głównie sole stopione, krystaliczne uwodnione sole i stopy),
 - materiały kompozytowe o przemianie fazowej (dwu- lub wieloskładnikowe) (Lu et al., 2020).

Do materiałów już testowanych w tego typu rozwiązaniach zaliczyć można: chlorek wapnia $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, siarczan sodu $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, kwasy: laurylowy, kaprynowy, stearynowy, mieszaninę laurylowego i palmitynowego, oktadekan, glikol polietylenowy PEG 900, parafinę, kompozycje parafiny z innymi materiałami, takimi jak: siatka miedziana, grafit ekspandowany, wielościennie nanorurki węglowe, włókno węglowe, polietylen o wysokiej gęstości, krzemionka, montmorylonit (Rao i Wang, 2011; Yang et al., 2019).

Zaletą tego systemu chłodzenia jest zwarta konstrukcja (niewiele elementów) i dostępność materiałów, co przekłada się na niską cenę rozwiązania. Wysoka gęstość magazynowania energii materiałów PCM pozwala na oszczędność energii, ponadto ze względu na swój charakter chemiczny często są one przyjazne dla środowiska. Kontrola temperatury w tego typu rozwiązaniach jest bardziej precyzyjna w porównaniu z tradycyjnymi technologiami, jak aktywne chłodzenie powietrzem i obiegowe chłodzenie cieczą. Wadą wykorzystania materiału o przemianie ciała stałego w ciecz jest to, że materiał taki działa jednokierunkowo: może jedynie absorbować wytworzone ciepło, a nie oddawać go. Ponadto podczas przemiany zachodzi zmiana objętości, która ogranicza zastosowanie i generuje możliwość przecieków. Przewodność cieplna większości PCM jest stosunkowo niska, natomiast podniesienie jakości PCM poprawia wydajność, jednocześnie zwiększając zużycie energii, co zmniejsza osiągi pojazdu.

Do kierunków rozwoju systemów chłodzenia z wykorzystaniem materiałów PCM należą: zwiększenie szczelności układów, by zapobiegać wyciekom, oraz poprawa przewodności cieplnej materiałów (poprzez dodawanie metali w różnej formie, proszku grafitu ekspandowanego, nanocząstek metali lub nanorurek węglowych). Systemy chłodzenia hybrydowego,

czyli łączenie chłodzenia PCM z innymi systemami (takimi jak: tradycyjny system chłodzenia cieczą, aktywny system chłodzenia powietrzem), mogą pozwolić na poprawę niezawodności działania systemu, zwiększenie przewodności cieplnej, zmniejszenie zużycia energii.

Chłodzenie oparte na rurkach cieplnych

W tym systemie bateria podczas ładowania/rozładowywania oddaje ciepło do rury cieplnej, która styka się bezpośrednio z dolną lub boczną częścią baterii, a ciepło jest odbierane przez system rozpraszania ciepła na zimnym końcu rury cieplnej. Dzięki swej konstrukcji rura cieplna może przenosić dużą ilość ciepła do wnętrza pakietu baterii, aby utrzymać ją w wymaganym zakresie temperatur roboczych (Lu et al., 2020). Generalnie układ chłodzenia oparty na wykorzystaniu rurkowego wymiennika ciepła jest podzielony na trzy części: część parownika, część izotermiczną i część skraplacza (Zohuri, 2016). Proces pracy takiego wymiennika przebiega w sposób następujący (Reay et al., 2014): najpierw ciekły czynnik chłodzący absorbuje ciepło i odparowuje w sekcji parownika. Następnie czynnik przemieszcza się z sekcji izotermicznej do sekcji skraplacza, oddaje swoje ciepło i zamienia się w ciecz. Potem ciecz przepływa do sekcji parownika i kontynuuje endotermiczny proces jak w poprzednim przypadku. W części skraplacza ciepło musi być absorbowane z medium chłodzącego na zewnątrz, aby zapewnić ciągłą pracę układu. Zatem konieczne jest chłodzenie sekcji skraplacza poprzez zastosowanie wymuszonego obiegu powietrza lub np. natrysku wodnego (Zhao R. et al., 2015).

Zastosowanie wyżej opisanego rozwiązania technicznego pozwala zmniejszyć różnicę temperatur wewnątrz akumulatora, jak również wewnątrz ogniw baterii. Czynniki, które wpływają na efektywność przenoszenia ciepła przez rurę cieplną, to: rozmiar kanału, zdolność napełniania cieczą, medium robocze. Jako medium testowano już m.in.: wodę, etanol i aceton.

Do zalet systemu chłodzenia opartego na rurkach cieplnych można zaliczyć dobrą przewodność cieplną materiału rury, elastyczność w jego kształtowaniu i szeroki zakres zastosowań, natomiast do wad – małą pojemność cieplną, małą powierzchnię odbioru ciepła od baterii, złożoną konstrukcję systemu, ryzyko wycieku, wysoki koszt, złożoną technologię.

Kierunkami rozwoju systemu chłodzenia opartego na rurkach cieplnych są: optymalizacja parametrów rury cieplnej (pod względem rozmiaru i pojemności), optymalizacja układu rur, dobór medium chłodzącego. Przewidywana jest oszczędność energii poprzez rozwój hybrydowych systemów chłodzenia, łączących materiały o przemianie fazowej z rurami cieplnymi (ang. *phase change material – heat pipe*, PCM-HP).

Chłodzenie oparte na elemencie termoelektrycznym

Chłodzenie takie to technologia o wysokiej wydajności i niskim zużyciu energii. Wykorzystywane są następujące rodzaje elementów termoelektrycznych:

- generator termoelektryczny (TEG) oparty na efekcie Seebecka, przekształcający ciepło w energię elektryczną i wykorzystujący ciepło odpadowe jako energię;
- chłodnica termoelektryczna (TEC) oparta na efekcie Peltiera, przekształcająca energię elektryczną w ciepło w celu chłodzenia i ogrzewania.

Badania w zakresie chłodzenia elementów termoelektrycznych stosowanych w BTMS są w początkowym okresie rozwoju i wciąż pozostaje wiele problemów do rozwiązania.

Zaletami tego systemu chłodzenia są: niskie zużycie energii, brak hałasu, długa żywotność, brak emisji szkodliwych gazów. Do wad należy zaliczyć niską sprawność konwersji, wysoki koszt elementów termoelektrycznych i wymóg zewnętrznego zasilania (Lu et al., 2020).

Rozwój tego systemu chłodzenia ukierunkowany jest na poprawę wydajności chłodzenia TEC, poprawę systemu zarządzania temperaturą, dobór i optymalizację materiału o wysokiej przewodności, zastosowanie źródła zewnętrznego zasilania (wejściowej energii elektrycznej).

Chłodzenie cieczą

Klasyfikacja systemów chłodzenia cieczą zależy od przyjętego kryterium.

W zależności od strategii działania systemy chłodzenia dzieli się na pasywne i aktywne:

- w układzie pasywnym ciepło przekazywane jest z akumulatora do chłodziwa, a następnie (ze względu na różnicę temperatur) do powietrza zewnętrznego, skąd jest odbierane przez wentylator. Innym przypadkiem tego typu chłodzenia jest wykorzystanie hydrożelu, który charakteryzuje się małą wydajnością chłodzenia i słabą kontrolą temperatury, dlatego też jest odpowiedni tylko w przypadku akumulatorów o małej mocy;
- aktywny system chłodzenia wykorzystuje ciekły wymiennik ciepła, żeby odebrać ciepło pochłonięte przez ciecz chłodzącą. Inne elementy systemu to pompa i/lub grzejnik elektryczny. System aktywny jest bardziej złożony od systemu pasywnego, a koszty jego zaprojektowania i wykonania są wyższe.

W zależności od rodzaju kontaktu cieczy chłodzącej z baterią system chłodzenia może być bezpośredni lub pośredni.

Chłodzenie bezpośrednie – bateria jest zanurzona w czynniku chłodzącym. Wymaga ono cieczy nieprzewodzącej, takiej

jak hydrofluoroeter, olej mineralny, woda dejonizowana lub olej silikonowy (Kalaf et al., 2020). Użycie oleju silikonowego lub mineralnego umożliwia uproszczenie konstrukcji układu chłodzenia, a co za tym idzie – ogranicza koszty jego budowy, a ponadto układ taki jest prostszy w obsłudze.

W zależności od umiejscowienia chłodzenie bezpośrednie może zachodzić w układzie wewnętrznym lub zewnętrznym:

- w układzie wewnętrznym przepływowe kanały chłodzące umieszczone są pomiędzy ogniwami. Rozprowadzanie ciepła w baterii jest równomierne dzięki przemianie fazowej cieczy i równomiernemu przenoszeniu ciepła w stanie nasyconym. System wewnętrzny ma wyższą skuteczność niż zewnętrzny, ponieważ kontroluje temperaturę baterii, a także całego ich zestawu, a wadą systemu jest zwiększenie ciężaru baterii litowo-jonowej oraz jej kosztu;

- w układzie zewnętrznym przepływowe kanały chłodzące umieszczone są na zewnątrz ogniw (Kalaf et al., 2020).

Rozwiązanie to jeszcze nie jest skomercjalizowane, choć posiada bardzo duży potencjał chłodniczy.

Chłodzenie pośrednie – chłodziwo krąży w przewodach instalacji lub w kanałach płyt chłodzących. Płyty chłodzące pomagają w przekazywaniu ciepła, co jednak zmniejsza sprawność termiczną układu z powodu dużej rezystancji termicznej.

Rozwiązania techniczne układów pośredniego chłodzenia cieczą to m.in.:

- ogniwa poprzetykane wijącymi się taśmami z kanałami z płynem chłodzącym (zastosowane w baterii Tesli Model S);
- zespoły ogniw umieszczone między płytkami, w których wydrążone są kanały wypełnione cieczą chłodzącą ogniwa (rozwiązanie zastosowane w samochodach Chevrolet Bolt i Opel Ampera-e);
- chłodzenie baterii z wykorzystaniem kanałów znajdujących się w płycie dolnej części baterii (rozwiązanie zastosowane w samochodzie Volkswagen ID.3);
- ogniwa w kształcie walców z zakończeniami oddającymi ciepło (ogniwo Tesla 4680).

Podczas chłodzenia pośredniego ciecz o wysokiej przewodności cieplnej i niskiej lepkości zużywa mniej energii, a to zwiększa sprawność wymiany ciepła i ułatwia zapewnienie większych masowych natężeń przepływu. Można do tego celu wykorzystać wodę, nanociecze, ciekły metal lub mieszaninę glikolu i wody jako chłodziwa (Kalaf et al., 2020).

Systemy chłodzenia cieczą mogą mieć układy z obiegiem zamkniętym lub obiegiem otwartym. W układach z obiegiem otwartym ciecz przepływa przez układ chłodzenia, następnie zostaje schłodzona w wymienniku ciepła i ponownie zawrócona do układu (Ekbote et al., 2020).

Spośród dostępnych systemów zarządzania temperaturą system chłodzenia cieczą jest bardziej skuteczny w odprowadzaniu ciepła wytwarzanego w ogniwie i tworzeniu optymalnego

środowiska pracy dla baterii niż system chłodzenia powietrzem. Można ograniczyć problemy związane z niezrównoważonymi elektrycznie ogniwami, wydłużyć cykl życia ogniwa, a także zwiększyć bezpieczeństwo eksploatacji baterii (Saw et al., 2015).

Na świecie w wielu ośrodkach badawczych prowadzone są prace nad technicznymi rozwiązaniami systemów chłodzenia baterii z wykorzystaniem cieczy. Najnowsze informacje zestawiono w tabeli 1.

Do zalet systemu chłodzenia cieczą należy duża wydajność i efektywność chłodzenia, ponieważ ciecze w porównaniu

z powietrzem charakteryzują się lepszymi parametrami w zakresie pojemności cieplnej właściwej, wyższym współczynnikiem wymiany ciepła, dużym masowym natężeniem przepływu, ponadto system taki umożliwia równomierny rozkład temperatury w baterii.

Do wad tego systemu należy zaliczyć dużą złożoność, która wymaga dużej przestrzeni montażu, a to powoduje wzrost całkowitej masy pojazdu i podnosi jego koszt. Potrzebna jest specjalna warstwa uszczelniająca, aby zwiększyć odporność na przenikanie ciepła, poprawić skuteczność chłodzenia oraz zapobiegać wyciekom cieczy.

Tabela 1. Prace nad chłodzeniem baterii z wykorzystaniem cieczy – podsumowanie

Table 1. Works on cooling batteries with the use of liquids – summary

Ciecz chłodząca	Przepływ	Temperatura [°C]			Bateria		Autorzy
		włot	max.	różnica	liczba ogniw	pojemność [Ah]	
Roztwór glikolu etylenowego	–	26,9	35,16	–	1	–	Jarrett i Kim, 2011
	–	26,9	40,7	–	1	–	Jarrett i Kim, 2014
	1,93 l/min	20	41; 63	–	2	–	Wang et al., 2015
	–	20	38,7	–	110	10	Zheng et al., 2019
	1,5 kg/s	15	40	–	192	35	Benabdelaziz et al., 2020
	0,17–0,29 kg/s	15–24	41,2–37,6	4,2–6,2	15	49	Shang et al., 2019
50-proc. roztwór glikolu	0,004 kg/s	35	46	–	256	2,6	Tang et al., 2018
	350 l/h	–	>10	>5	12	55	Xu et al., 2018
50-proc. roztwór metanolu	0,1 m/s	25	2,2 K	0,7 K	71	1,5	Zhao et al., 2019
Woda	–	25	>40	–	6	3	Rao et al., 2017
	1 l/min	25	–	5,9	8	25	Smith et al., 2018
	100 ml/min	25	42	–	18	5	Du et al., 2018
	–	25; 16	39,8; 67,6	–	16	20	Li et al., 2018
	–	30	–	1,8	15	70	Li et al., 2019b
	4 l/min	30	48,7	–	5	20	Wang et al., 2018
	–	30	43,4	–	3	20	Malik et al., 2019
	16 g/s	25	–	7,6	5	–	Li et al., 2019a
	1,2 l/m	20	28; 32; 43	–	180	2,75	Cao et al., 2019
	–	5; 15; 25	7,8; 16,2; 25,3	–	1	20	Panchal et al., 2017
	–	25	18	–	1	20	Zhang et al., 2018
	$0,25 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-6}$ m ³ /s	37	317–319 K	–	5	1,5	Siruvuri i Budarapu, 2020
	80 ml/min	–	37,7	5,8	20	2,2	Wang et al., 2020
	0,05–1 ml/s	–	39–49	–	1	8	Sheng et al., 2019
	–	20	–	6,47	144	16	Chung i Kim, 2019
	2,39 g/s	–	–	2–5,5	1	20	An et al., 2019
	–	–	<50	–	–	–	Jin et al., 2014
	–	25	58,4	–	3	7	Huo et al., 2015
	–	25	<39	–	40	10	Zhao J. et al., 2015
	–	25	32,2	–	3	–	Qian et al., 2016

Rozwój tego systemu chłodzenia ukierunkowany jest na optymalizację kontroli natężenia przepływu cieczy, co może zmniejszyć zużycie energii i poprawić wydajność pracy. Połączenie systemu obiegu chłodniczego z automatycznym systemem sterowania jest kluczowe dla przyszłego rozwoju tej technologii. Ponadto prace zmierzają w kierunku obniżenia kosztów chłodzenia – obiecująco wyglądają efekty prac nad chłodzeniem z wykorzystaniem nanocieczy, ciekłych metali oraz cieczy w stanie wrzenia (Lu et al., 2020).

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Zarządzanie temperaturą w bateriach samochodów elektrycznych* – praca INiG – PIB na zlecenie MEiN; nr zlecenia: 0055/TO, TE/2021, nr archiwalny: DK-4100-0041/2021.

Literatura

- Adair D., Ismailov K., Bakenov Z., 2014. Thermal Management of Lithium-ion Battery Packs. *COMSON Conference 2014*.
- An Z., Shah K., Jia L., Ma Y., 2019. A parametric study for optimization of minichannel based battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 154: 593–601. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.088.
- Benabdelaziz K., Lebrouhi B., Maftah A., Maaroufi M., 2020. Novel external cooling solution for electric vehicle battery pack. *Energy Reports*, 6: 262–272. DOI: 10.1016/j.egy.2019.10.043.
- Cao W.J., Zhao C.R., Wang Y.W., Dong T., Jiang F.M., 2019. Thermal modeling of full-size-scale cylindrical battery pack cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 138: 1178–1187. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.137.
- Chung Y., Kim M.S., 2019. Thermal analysis and pack level design of battery thermal management system with liquid cooling for electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 196(51): 105–116. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.05.083.
- Du X., Qian Z., Chen Z., Rao Z., 2018. Experimental investigation on cooling mini-channel-based thermal management for Li-ion battery module under different cooling schemes. *International Journal of Energy Research*, 42(15): 2781–2788. DOI: 10.1002/er.4067.
- Ekbote A., Karvinkoppa M., Bhojwani V., Patil N., 2020. Comprehensive study on smart cooling techniques used for batteries. *6th International Conference on Energy and City of the Future (EVF'2019)*, 170: 01028. DOI: 10.1051/e3sconf/202017001028.
- Forrister T., 2019. Analyzing the Liquid Cooling of a Li-Ion Battery Pack. <<https://www.comsol.com/blogs/analyzing-the-liquid-cooling-of-a-li-ion-battery-pack>> (dostęp: 19.01.2019).
- Hémery Ch.-V., Pra F., Robin J.F., Marty P., 2014. Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material. *Journal of Power Sources*, 270: 349–358. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.147.
- Huo Y., Rao Z., Liu X., Zhao J., 2015. Investigation of power battery thermal management by using mini-channel cold plate. *Energy Conversion and Management*, 89, 387–395.
- Jarrett A., Kim I.Y., 2011. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance. *Journal of Power Sources*, 196(23): 10359–10368. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.06.090.
- Jarrett A., Kim I.Y., 2014. Influence of operating conditions on the optimum design of electric vehicle battery cooling plates. *Journal of Power Sources*, 245: 644–655. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.06.114.
- Jin L.W., Lee P.S., Kong X.X., Fan Y., Chou S.K., 2014. Ultra-thin minichannel LCP for EV battery thermal management. *Applied Energy*, 113(C): 1786–1794. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.07.013.
- Kalaf O., Solyali D., Asmael M., Zeeshan Q., Safaei B., Askir A., 2020. Experimental and simulation study of liquid coolant battery thermal management system for electric vehicles: A review. *International Journal of Energy Research*, 45(5): 6495–6517. DOI: 10.1002/er.6268.
- Li K., Yan J., Chen H., Wang Q., 2018. Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal management system. *Applied Thermal Engineering*, 132: 575–585. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.131.
- Li W., Peng X., Xiao M., Garg A., Gao L., 2019a. Multi-objective design optimization for mini-channel cooling battery thermal management system in an electric vehicle. *International Journal of Energy Research*, 43(8): 3668–3680.
- Li W., Zhuang X., Xu X., 2019b. Numerical study of a novel battery thermal management system for a prismatic Li-ion battery module. *Energia Procedia*, 158: 4441–4446. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.771.
- Lu M., Zhang X., Ji J., Xu X., Zhang Y., 2020. Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 27: 101155. DOI: 10.1016/j.est.2019.101155.
- Malik M., Dincer I., Rosen M.A., Mathew M., Fowler M., 2019. Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129: 472–481. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029.
- Panchal S., Khasow R., Dincer I., Agelin-Chaab M., Fraser R., Fowler M., 2017. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 122: 80–90. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.010.
- Qian Z., Li Y., Rao Z., 2016. Thermal performance of lithium-ion battery thermal management system by using mini-channel cooling. *Energy Conversion and Management*, 126(C): 622–631. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.08.063.
- Rao Z., Wang S., 2011. A review of power battery thermal energy management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9): 4554–4571. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.096.
- Rao Z.H., Qian Z., Kuang Y., Li Y.M., 2017. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123: 1514–1522. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059.
- Reay D.A., Kew P.A., McGlen R.J., 2014. Heat Pipes – Theory, Design and Applications. *Elsevier*. DOI: 10.1016/C2011-0-08979-2.
- Saw L.H., Taya A.A.O., Zhang L.W., 2015. Thermal Management of Lithium-ion Battery Pack with Liquid Cooling. *31-st Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM)*. DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2015.7100176.
- Sendek-Matysiak E., 2019. Ocena baterii litowo-jonowych stosowanych w samochodach elektrycznych typu BEV pod względem bezpieczeństwa i wpływu na środowisko. *Problemy Transportu i Logistyki*, 2(46): 59–68. DOI: 10.18276/ptl.2019.46-06.
- Shang Z.Z., Qi H.Z., Liu X.T., Ouyang C.Z., Wang Y.S., 2019. Structural optimization of lithium-ion battery for improving thermal performance based on a liquid cooling system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130: 33–41. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.074.
- Sheng L., Su L., Zhang H., Li K., Fang Y., Ye W., Fang Y., 2019. Numerical investigation on a lithium ion battery thermal management utilizing a serpentine-channel liquid cooling plate

- exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141(1): 658–668. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.033.
- Siruvuri S.V., Budarapu P.R., 2020. Studies on thermal management of Lithium-ion battery pack using water as the cooling fluid. *The Journal of Energy Storage*, 29: 101377. DOI: 10.1016/j.est.2020.101377.
- Smith J., Singh R., Hinterberger M., Mochizuki M., 2018. Battery thermal management system for electric vehicle using heat pipes. *International Journal of Thermal Sciences*, 134: 517–529. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.022.
- Tang Z., Min X., Song A., Cheng J., 2018. Thermal management of a cylindrical lithium-ion battery module using a multichannel wavy tube. *Journal of Energy Engineering*, 145(1): 1–9. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000592.
- Wang C., Zhang G., Li X., Huang J., Wang Z., Lv Y., Meng L., Situ W., Rao M., 2018. Experimental examination of large capacity LiFePO₄ battery pack at high temperature and rapid discharge using novel liquid cooling strategy. *International Journal of Energy Research*, 42: 1172–1182. DOI: 10.1002/er.3916.
- Wang H., Tao T., Xu J., Mei X., Liu X., Piao G., 2020. Cooling capacity of a novel modular liquid-cooled battery thermal management system for cylindrical lithium ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 178(2): 115591. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115591.
- Wang Q., Jiang B., Xue Q.F., Sun H.L., 2015. Experimental investigation on EV battery cooling and heating by heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 88: 54–60. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.083.
- Xu X., Fu J., Ding R., Jin H., Xiao Y., 2018. Heat dissipation performance of electric vehicle battery liquid cooling system with double-inlet and double-outlet channels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10, 055701. DOI: 10.1063/1.5037433.
- Yang S., Ling Ch., Fan Y., Yang Y., Tan X., Dong H., 2019. A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Management System Strategies and the Evaluate Criteria. *International Journal of Electrochemical Science*, 14: 6077–6107. DOI: 10.20964/2019.07.06.
- Zhang C.-W., Xu K.-J., Li L.-Y., Yang M.-Z., Gao H.-B., Chen S.-R., 2018. Study on a battery thermal management system based on a thermoelectric effect. *Energies*, 11(2): 279. DOI: 10.3390/en11020279.
- Zhao C., Sousa A.C.M., Jiang F., 2019. Minimization of thermal non-uniformity in lithium-ion battery pack cooled by channeled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129: 660–670. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.017.
- Zhao J., Rao Z., Li Y., 2015. Thermal performance of minichannel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*, 103: 157–165. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.06.056.
- Zhao R., Zhang S., Gu J., Liu J., 2015. A review of thermal performance improving methods of lithium ion battery: Electrode modification and thermal management system. *Journal of Power Sources*, 299: 557–577. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.001.
- Zheng Y., Shi Y., Huang Y., 2019. Optimisation with adiabatic interlayers for liquid-dominated cooling system on fast charging battery packs. *Applied Thermal Engineering*, 147: 636–646. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.090.
- Zohuri B., 2016. Heat pipe design and technology: Modern applications for practical thermal management, second edition. *Springer, Cham, Germany*: 1–539.



Dr hab. inż. Zbigniew STĘPIEŃ, prof. INiG – PIB
Kierownik Zakładu Oceny Właściwości
Eksploatacyjnych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: zbigniew.stepien@inig.pl



Mgr inż. Agnieszka SKIBIŃSKA
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Olejów, Środków Smarowych i Asfaltów
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: agnieszka.skibinska@inig.pl



Dr inż. Magdalena ŻÓŁTY
Zastępca Dyrektora ds. Technologii Nafty
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: magdalena.zolty@inig.pl