

Piotr Lesiak^{a)*}, Dariusz Pietrzela^{a)}, Piotr Mortka^{a)}

^{a)} *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpozarowej – Państwowy Instytut Badawczy*

* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: plesiak@cnbop.pl*

Methods Used to Extinguish Fires in Electric Vehicles

Metody gaśnicze stosowane do gaszenia pożarów samochodów elektrycznych

ABSTRACT

Aim: The aim of the article is to present the current state of knowledge regarding the possibility of suppressing or effectively extinguishing fires of electric vehicle. Due to the growing popularity of means of transport powered by electric batteries, the problem of emerging fires and their effects is becoming recognizable. Due to the possible violent process of combustion of lithium-ion batteries (hereinafter referred to as Li-Ion batteries), a fire in a vehicle may lead to a wide range of property damage. For at least a decade, intensive efforts have been made to develop appropriate methods to allow firefighters to deal with the problem of fires of electric vehicles. These activities were directed, among others, at new fire extinguishing/suppression techniques, innovative extinguishing agents and methods of their application.

Introduction: Taking into account the current global trends in changing the method of powering vehicles from fossil fuels into electricity, the occurrence of such events should be expected to intensify. The authors systematize the issue by analysing the literature on fires, Li-Ion batteries being a critical element that may initiate a fire. The adopted and practiced methods of extinguishing/suppressing a fire as well as the used extinguishing agents were also analysed. The publication may be an element helpful in selecting the most optimal fire extinguishing method of the electric energy storage unit in a vehicle.

Methodology: The review of the current state of knowledge was made based on publications on the fire characteristics of Li-Ion batteries, as well as works and research projects in the field of extinguishing methods and the effectiveness of various extinguishing agents. In addition, the procedures used by the emergency services and selected real events were analysed.

Conclusions: Fires of Li-Ion batteries are a relatively new and growing phenomenon. Fires in fully or partially electric vehicles are much more difficult to fully extinguish compared to fires in vehicles with internal combustion engines. So far, no effective method has been developed that would allow a fire to be extinguished in a short time. Activities in this area focus on minimizing the effects. There is still a need to look for new technical and tactical solutions in order to optimize the procedures leading to more effective activities of the services in this type of incidents.

Keywords: lithium-ion battery, Li-Ion, fire, extinguishing, suppression

Type of article: review article

Received: 04.11.2021; Reviewed: 06.12.2021; Accepted: 07.12.2021;

Authors' ORCID IDs: P. Lesiak – 0000-0001-8465-2169; D. Pietrzela – 0000-0002-8201-454X; P. Mortka – 0000-0002-2661-3134;

The authors contributed the equally to this article;

Please cite as: SFT Vol. 58 Issue 2, 2021, pp. 38–57, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.3>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy w zakresie możliwości tłumienia lub skutecznego ugaszenia pożarów pojazdów elektrycznych. Z uwagi na wzrost popularności środków transportu zasilanych z akumulatorów elektrycznych, rozpoznawalna staje się problematyka pojawiających się pożarów i ich skutków. Z uwagi na możliwy gwałtowny proces przebiegu spalania akumulatorów litowo-jonowych (dalej akumulatory Li-Ion), wystąpienie pożaru w pojeździe może doprowadzić do szerokiego spektrum uszkodzeń mienia. Od co najmniej dekady prowadzone są intensywne działania ukierunkowane na wypracowanie właściwych metod pozwalających strażakom zmierzyć się z problemem pożarów pojazdów elektrycznych. Działania te ukierunkowano m.in. na nowe techniki gaszenia/tłumienia pożaru, innowacyjne środki gaśnicze i sposoby ich aplikacji.

Wprowadzenie: Ratownicy coraz częściej spotykają się z pożarami układów gromadzenia energii elektrycznej wykonanych w technologii Li-Ion, w tym stosowanych w pojazdach elektrycznych. Biorąc pod uwagę obecne, światowe trendy zmiany sposobu zasilania pojazdów z paliw pochodzących z kopalni na energię elektryczną, należy spodziewać się intensyfikacji pojawiania się takich zdarzeń. Autorzy systematyzują zagadnienie poprzez analizę literaturową w zakresie pożarów akumulatorów Li-Ion jako krytycznego elementu mogącego zapoczątkowywać pożar. Analizie także poddano przyjęte

i praktykowane metody gaszenia/tłumienia pożaru oraz wykorzystane środki gaśnicze. Publikacja może stanowić element pomocny w doborze najbardziej optymalnej metody ugaszenia pożaru zespołu gromadzenia energii elektrycznej w pojeździe.

Metodologia: Przeglądu obecnego stanu wiedzy dokonano na podstawie publikacji dotyczących charakterystyki pożarowej akumulatorów Li-Ion, a także prac oraz projektów naukowo-badawczych z zakresu metod gaszenia i efektywności różnych środków gaśniczych. Ponadto analizie poddano procedury stosowane przez służby ratownicze oraz wybrane zdarzenia rzeczywiste.

Wnioski: Pożary akumulatorów Li-Ion to stosunkowo nowe i narastające zjawisko. Pożary pojazdów w pełni lub częściowo elektrycznych są znacznie trudniejsze do pełnego ugaszenia w porównaniu do pożarów pojazdów z silnikami spalinowymi. Jak dotąd nie opracowano skutecznej metody, która pozwoliłaby na ugaszenie pożaru w krótkim czasie. Działania w tym obszarze skupiają się na minimalizacji skutków. W dalszym ciągu istnieje potrzeba szukania nowych rozwiązań technicznych i taktycznych w celu optymalizacji procedur prowadzących do bardziej efektywnych działań służb przy tego rodzaju zdarzeniach.

Słowa kluczowe: akumulator litowo-jonowy, Li-Ion, pożar, gaszenie, tłumienie

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Przyjęty: 04.11.2021; **Zrecenzowany:** 06.12.2021; **Zaakceptowany:** 07.12.2021;

Identyfikatory ORCID autorów: P. Lesiak – 0000-0001-8465-2169; D. Pietrzela – 0000-0002-8201-454X; P. Mortka – 0000-0002-2661-3134;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w powstanie artykułu;

Proszę cytować: SFT Vol. 58 Issue 2, 2021, pp. 38–57, <https://doi.org/10.12845/sft.58.2.2021.3>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Introduction

Vehicles with electric or hybrid drive are more and more often found on the roads of our country. Due to a relatively short period of time since this type of propulsion became popular, the technology and the risks associated with it constitute a novelty for the rescuers. Therefore, during the rescue and firefighting operations, they exercise increased caution and distrust, in particular in situations when an electric energy storage unit in a vehicle is ignited. This article, based on the available publications, presents the fire characteristics of Li-Ion batteries, analyses the testing on the effectiveness of various types of extinguishing agents and presents the rules of conduct during extinguishing activities, at the same time formulating the rules for using these extinguishing agents, the effectiveness of which during fires of Li-Ion batteries is the highest.

Certain symptoms of climate change in our environment, which – according to leading international organizations responsible for environmental protection – may be caused by the use of hydrocarbon fuels, thus introduced are the so-called clean technologies of accumulating energy. They include, among others, energy storage systems made with the use of the lithium element. The dissemination of the above solutions is related to the reduction of the production costs of lithium technologies, including lithium-based batteries. Due to this, it is possible to use them to drive means of transport. Recently, a trend has been observed related to the electrification of vehicle drive systems, which has become a priority for a vast majority of the manufacturers.

For at least a decade, testing has been conducted in many centres responsible for safety, the purpose of which is to assess the risks associated with the use of Li-Ion batteries. On their basis, the issues of extinguishing activities, the use of extinguishing agents and the methods of their application were developed.

Wprowadzenie

Pojazdy z napędem elektrycznym lub hybrydowym są coraz częściej spotykane na drogach naszego kraju. Z uwagi na stosunkowo krótki okres od upowszechnienia się tego rodzaju napędu, dla ratowników technologia, jak i zagrożenia z nią związane stanowią pewną nowość. Dlatego podczas prowadzonych działań ratowniczo-gaśniczych zachowują oni wzmożoną ostrożność i nieufność, w szczególności w sytuacjach, w których dochodzi do zapłonu zespołu gromadzenia energii elektrycznej w pojeździe. W niniejszym artykule, w oparciu o dostępne publikacje, zaprezentowano charakterystykę pożarową samych akumulatorów Li-Ion, przeanalizowano prace badawcze z zakresu efektywności różnego rodzaju środków gaśniczych oraz przedstawiono zasady postępowania podczas działań gaśniczych, formułując jednocześnie reguły użycia tych środków gaśniczych, których skuteczność podczas pożarów akumulatorów Li-Ion jest najwyższa.

Pewne symptomy zmian klimatycznych w naszym otoczeniu, które – według wiodących organizacji międzynarodowych odpowiedzialnych za ochronę środowiska – mogą być skutkiem używania paliw węglowodorowych powodują, że wdrażane są tzw. czyste technologie gromadzenia energii. W ich skład wchodzi m.in. układy gromadzenia energii wykonane z wykorzystaniem pierwiastka litu. Upowszechnienie się powyższych rozwiązań związane jest z obniżeniem kosztów produkcji technologii litowych, w tym akumulatorów, opartych na tym pierwiastku. Dzięki temu istnieje możliwość zastosowania ich do napędzania środków transportu. W ostatnim czasie widoczny jest trend związany z elektryfikacją układów napędowych pojazdów, który dla przeważającej większości producentów stał się obecnie priorytetem.

Od co najmniej dekady, w wielu ośrodkach odpowiedzialnych za bezpieczeństwo powszechne, prowadzone są badania, których celem jest ocena zagrożeń związanych z użytkowaniem

The entire process is focused on the development of rescue and firefighting guidelines for dealing with vehicles equipped with electric energy storage systems.

Characteristics of fires in lithium-ion cells

Traction batteries (cells) of electric cars are treated as energy storage with a rated voltage of up to several hundred volts. They are an ecological alternative to the previously used fuels to power engines, i.e. gasoline, diesel oil, gas (LPG or LNG). Currently, manufacturers most often use lithium-ion batteries for electric vehicles. They consist of cells placed in parallel or in series. The number of cells determines the energy capacity, so usually (depending on the design) batteries can consist of up to thousands of cells. This translates into energy density and usable available power, enabling the vehicle to cover even greater distances on a single battery charge. Nevertheless, lead-acid batteries are still used to power the basic equipment of the vehicle (such as: lighting, on-board computer, radio). Manufacturers offer different shapes of cells, which allows them to be placed in many places – they are most commonly located in the floor of the vehicle (see Figure 1). It is the location of the cells that is particularly important from the point of view of extinguishing this type of fires.

akumulatorów Li-Ion. Na ich podstawie opracowywano m.in. problematykę działań gaśniczych, zastosowania środków gaśniczych i metod ich aplikacji. Całość procesu ukierunkowana jest na wypracowanie wytycznych ratowniczo-gaśniczych dotyczących postępowania z pojazdami wyposażonymi w układy gromadzenia energii elektrycznej.

Charakterystyka pożarów ogniw litowo-jonowych

Akumulatory trakcyjne (ogniwa) samochodów elektrycznych to magazyny energii o napięciu znamionowym nawet kilkuset woltów. Stanowią ekologiczną alternatywę dla stosowanych dotychczas paliw do napędzania silników tj. benzyny, oleju napędowego, gazu (LPG lub LNG). Obecnie producenci najczęściej stosują do pojazdów elektrycznych akumulatory litowo-jonowe. Zbudowane są one z ogniw umieszczonych równolegle lub szeregowo. Liczba ogniw determinuje pojemność energetyczną, przez co zazwyczaj (w zależności od konstrukcji) akumulatory mogą składać się nawet z tysięcy ogniw. Przekłada się to na gęstość energii oraz użytkową moc dyspozycyjną, umożliwiającą pokonywanie tak wyposażonym pojazdem – na jednym naładowaniu akumulatorów – coraz większych dystansów. Mimo to w dalszym ciągu do zasilania podstawowych urządzeń pojazdu (takich jak: oświetlenie, komputer pokładowy, radio) używane są akumulatory kwasowo-ołowiowe. Producenci oferują różne kształty ogniw, co pozwala na ich umieszczenie w wielu miejscach – najpowszechniej lokalizowane są one w części podłogowej pojazdu (zob. ryc. 1). Właśnie aspekt umiejscowienia ogniw jest szczególnie istotny z punktu widzenia gaszenia tego typu pożarów.



Figure 1. A set of batteries located in a part of the vehicle floor
Rycina 1. Zespół akumulatorów umieszczonych w podłodze pojazdu

Source / Źródło: <https://evduniya.com/ev-global/types-of-batteries-used-in-electric-vehicles-their-parameters.html> / [dostęp: 04.11.2021].

Both the vehicle as well as the system and its components (in particular those on which movement is dependent) must be characterized by:

- operational reliability,
- long time of failure-free operation without any changes that worsen the functional properties,
- little or no environmental burden [1].

Zarówno pojazd jako system, jak i jego elementy (w szczególności te, od których zależne jest poruszanie się) muszą charakteryzować się:

- niezawodnością działania,
- długim czasem bezawaryjnej pracy bez zmian pogarszających właściwości użytkowe,
- brakiem lub niewielkim obciążeniem dla środowiska naturalnego [1].

The cells consist of three basic elements: anode, cathode and electrolyte. The principle of operation is based on the movement of Li^+ ions in the electrolyte between two electrodes. The lithium-ion battery is also called a shuttle battery or a rocking-chair battery because the bidirectional movement of lithium ions between the anode and cathode through the electrolyte occurs during the charging and discharging process [2].

Ogniwa składają się z trzech podstawowych elementów: anody, katody i elektrolitu. Zasada działania polega na przemieszczaniu się jonów Li^+ w elektrolicie pomiędzy dwoma elektrodami. Elektrody zanurzone są w roztworze soli litu w postaci cieczy, żelu lub przewodzącego polimeru. Akumulator litowo-jonowy nazywany jest również akumulatorem wahadłowym lub akumulatorem fotela bujanego, ponieważ dwukierunkowy ruch jonów litu między anodą a katodą przez elektrolit zachodzi podczas procesu ładowania i rozładowania [2].

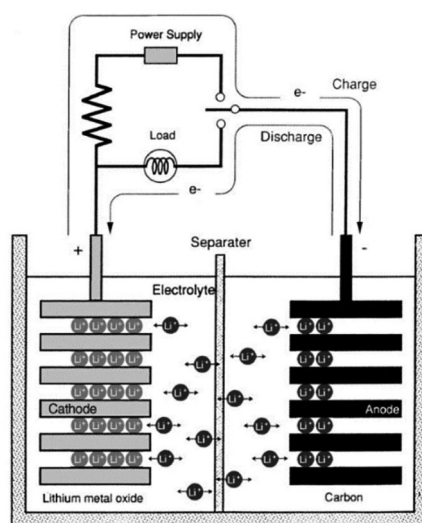


Figure 2. Diagram of the operation of a lithium-ion cell
Rycina 2. Schemat działania ogniwa litowo-jonowego

Source / Źródło: M. Wakihara, *Recent developments in lithium ion batteries*, „Materials Science and Engineering” 2021, 33, 109–134 [2].

A fire – according to the definition – is any case of an uncontrolled combustion process. The condition for initiating and maintaining the phenomenon is a combustion tetrahedron. This definition is also appropriate to characterize a fire of lithium-ion cells. The main fuel is the cell electrolyte. The electrolyte solution contains an organic solvent and an inorganic salt. The most common solvents used in the cells are: ethylene carbonate, propylene carbonate, dimethyl carbonate and diethyl carbonate. The most commonly used electrolyte salt is lithium hexafluorophosphate (LiPF_6). It was determined that it is a compound with low thermal stability [3]. Under normal conditions of use, the cell is a closed system without air access, which excludes the possibility of fire or explosion. However, inappropriate use (including emergencies) increases the risk of thermal runaway. The conducted testing confirms that when an uncontrolled thermal reaction occurs in a cell, the charged electrode becomes an unstable material. In particular, phenomena such as short-circuit, overload, use of reverse polarity have a negative impact here. The authors describe them as a chain reaction or a domino effect, which in turn leads to a fire or even an explosion [4]. The above is presented in Figure 3.

Pożar – zgodnie z definicją – to każdy przypadek niekontrolowanego procesu spalania. Warunkiem zainicjowania, jak i podtrzymania zjawiska jest czworościan spalania. Definicja ta jest właściwa również dla charakterystyki pożarów ogniwa litowo-jonowych. Głównym paliwem jest elektrolit ogniwa. Roztwór elektrolitu zawiera rozpuszczalnik organiczny i sól nieorganiczną. Najpopularniejsze rozpuszczalniki stosowane w ogniwach to: węgiel etylenu, węgiel propylenu, węgiel dimetylu oraz węgiel dietylu. Najczęściej używaną solą elektrolityczną jest heksafluorofosforan litu (LiPF_6). Określono, że jest to związek o niskiej stabilności termicznej [3]. W normalnych warunkach użytkowania ogniwa to system zamknięty bez dostępu powietrza, co wyklucza prawdopodobieństwo pożaru lub wybuchu. Jednakże nieodpowiednie użytkowanie (w tym sytuacje awaryjne) powoduje wzrost ryzyka wystąpienia zjawiska bardzo szybkiego wzrostu temperatury (ang. *thermal runaway*). Prowadzone badania potwierdzają, że gdy w ogniwie dochodzi do niekontrolowanych reakcji termicznych, naładowana elektroda staje się materiałem niestabilnym. W szczególności negatywny wpływ wywierają tu zjawiska, takie jak zwarcie, przeładowanie, zastosowanie odwrotnej polaryzacji. Autorzy opisują je jako reakcję łańcuchową lub efekt domina, który w konsekwencji prowadzi do pożaru, a nawet wybuchu [4]. Powyższe przedstawiono na rycinie 3.

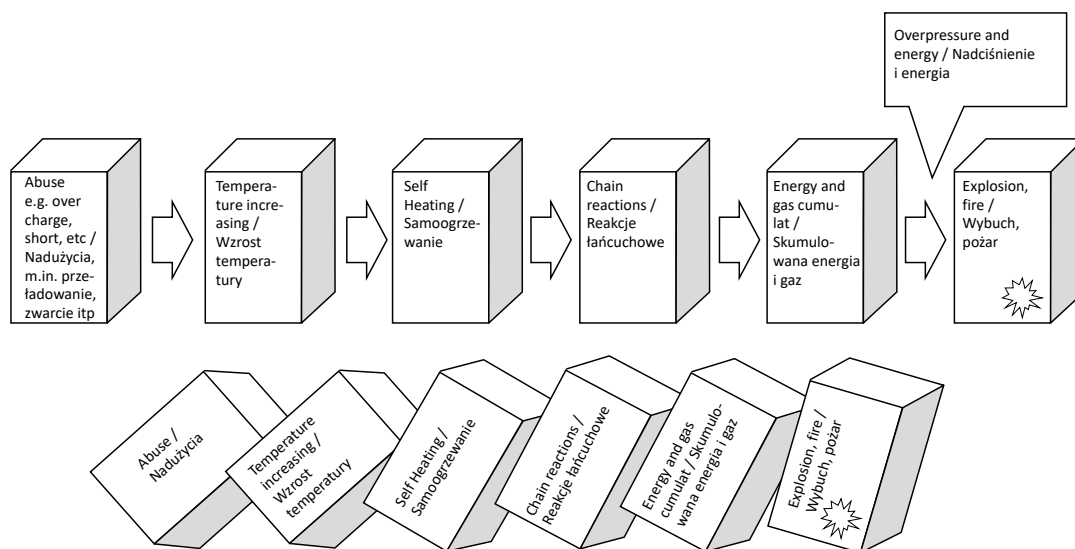


Figure 3. Domino effect leading to the fires of lithium-ion cell
Rycina 3. Efekt domina prowadzący do pożarów ogniw litowo-jonowych
Source / Źródło: [4].

In the closed volume of the system, which can be called a battery, the temperature increases, which leads to self-heating. This phenomenon favors the occurrence of chemical reactions and a further increase in temperature. When the generated heat is greater than its losses, the process becomes irreversible – the thermal runaway phenomenon described above then takes place [4]. As a consequence, the combustible components of the battery itself and other nearby components ignite. In case of a passenger vehicle, the interior of which is mostly finished with plastic materials, the time of the fire spreading is short and characterized by considerable dynamics.

Even in the event of thermal stability, a heated Li-ion battery (e.g. due to external fire) may emit flammable and toxic gases such as hydrogen fluoride (HF) and phosphoryl trifluoride (POF₃). The source of fluorine compounds is primarily the electrolyte, but also binders (e.g. PVdF) of the active electrode materials. The electrolyte usually contains flammable organic solvents, some of which are volatile at moderate temperatures (below 100°C). The results of the performed fire tests confirm the potential emission of HF and POF₃ compounds from the cells in the amounts that are toxic to humans. Moreover, the cells can emit flammable gases, e.g. H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ and C₂H₄ [5].

Research work

The American organization called National Fire Protection Association (NFPA) in the years 2013–2016 published a series of materials on extinguishing fires of traction battery. Tests, demonstrations and recommendations have been prepared in view of the growing number of fully electric or hybrid vehicles.

A battery fire in Li-Ion technology can in some cases be associated with a very rapid temperature runaway (thermal runaway). As shown by the available materials developed by leading research centres (including NFPA), the amount of water

W zamkniętej objętości systemu, jaką można nazwać baterię, dochodzi do zwiększania temperatury, co prowadzi do samoogrzewania. Zjawisko to sprzyja występowaniu reakcji chemicznych i dalszemu wzrostowi temperatury. Gdy generowane ciepło jest większe od jego strat, proces staje się nieodwracalny – następuje wówczas opisane wyżej zjawisko *thermal runaway* [4]. W konsekwencji tego dochodzi do zapłonu składników palnych samej baterii oraz innych elementów będących w pobliżu. W przypadku pojazdu osobowego, którego wnętrze wykończony jest w większości materiałami z tworzyw sztucznych, czas rozprzestrzenienia pożaru jest krótki i charakteryzuje się znaczną dynamiką.

Nawet w przypadku stabilności termicznej podgrzany akumulator Li-ion, (np. wskutek oddziaływania pożaru zewnętrznego) może wydzielać łatwopalne i toksyczne gazy, takie jak fluorowodór (HF) i trifluorek fosforu (POF₃). Źródłem związków fluoru jest przede wszystkim elektrolit, ale również spoiwa (np. PVdF) materiałów elektrod aktywnych. Elektrolit zwykle zawiera palne rozpuszczalniki organiczne, z których niektóre są lotne w umiarkowanych temperaturach (poniżej 100°C). Wyniki wykonanych testów pożarowych potwierdzają potencjalną emisję z ognia związku HF i POF₃ w ilości, które są toksyczne dla ludzi. Ponadto, ogniwa mogą emitować gazy palne, np. H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ i C₂H₄ [5].

Prace badawcze

Amerykańska organizacja National Fire Protection Association (NFPA) w latach 2013–2016 opublikowała serię materiałów na temat gaszenia pożarów akumulatorów trakcyjnych. Testy, demonstracje i zalecenia przygotowano z uwagi na rosnącą liczbę pojazdów wykorzystujących napęd w pełni elektryczny lub hybrydowy.

Pożar akumulatora w technologii Li-Ion w pewnych przypadkach może wiązać się z bardzo szybkim wzrostem temperatury (ang. *thermal runaway*). Jak wykazują dostępne materiały opracowane przez wiodące ośrodki badawcze (m.in. National Fire

necessary to permanently extinguish a fully electric vehicle (or in fact lithium-ion batteries) is very large – sometimes even several times greater than in the case of cars with a hybrid drive or exhaust gas. In studies conducted by NFPA, 5–10 m³ of water were used depending on the specific case. It should be borne in mind that the element hindering the firefighting activities is, among others, the fact that the energy storage package is most often located in the lower part of the vehicle and is enclosed by the casing elements.

It is important, above all, that extinguishing a fire (disappearance of the visible combustion process) does not solve the problem, because in case of commonly used Li-Ion batteries, the fire may re-emerge. Interruption of the combustion process and a certain extinguishing effect can only be achieved by permanently lowering the temperature of all cells. If the cell temperature remains high, there is a high risk of the fire of the battery re-emerging above a certain threshold. Depending on many factors, the combustion process may take place after a while, after several hours or even after one day. The value of this temperature will vary depending on the type of used cell design solutions and the entire battery. In electric vehicles, a fire can occur without visible symptoms from the outside, e.g. due to the changes inside the battery (internal short circuits that increase the temperature or leakage in the cooling system, whereby liquid seeps into live parts and causes a short circuit with a subsequent fire). The time scales of these phenomena may range from a few seconds to several days.

At the turn of the last decade, tests were carried out to assess the extinguishing effect of various methods and extinguishing agents that were used during a fire in Li-Ion batteries. Such tests were carried out by the Federal Aviation Administration (FAA) and the Civil Aviation Authority (CAA). The research on the method of extinguishing fires of lithium-based batteries made in the USA is also worth mentioning – in FM Global, the aforementioned NFPA and the State Key Laboratory of Fire Science [6].

The FAA agency carried out a number of experiments that were to enable the selection of the most effective extinguishing agent from among the solutions available on the market, assessing, among others, the cooling effects of energy storage systems. During the tests, fire simulations were also used. The extinguishing agent halon 1211 – bromochlorodifluoromethane – CF₂ClBr and agents based on water with additives: Hartindo AF31, Hartindo AF21, A-B-D were compared. Gaseous extinguishing agents were also compared: FM-200, FE-36, Halotron I with Purple K and Novec 1230 extinguishing agents. The results show that the aqueous solutions have a great potential to lower the temperature – a significant cooling effect is observable. In case of extinguishing agents that do not contain water, the temperature lowering effect will not be the primary mechanism for extinguishing a battery fire. Increasing the output of these types of extinguishing agents has no measurable impact, unlike water-based agents. Figure 4 shows the effect of cooling the battery surface by various extinguishing agents [7].

Protection Association, NFPA), ilość wody konieczna do trwałego ugaszenia pojazdu w pełni elektrycznego (a w zasadzie akumulatorów litowo-jonowych) jest bardzo duża – czasami nawet kilkakrotnie większa niż w przypadku samochodów z napędem hybrydowym lub spalinowych. W badaniach prowadzonych przez NFPA, w zależności od konkretnego przypadku zużyto 5–10 m³ wody. Należy mieć na względzie, że elementem utrudniającym działania gaśnicze jest m.in. to, że pakiet układu gromadzenia energii znajduje się najczęściej w dolnej części pojazdu i jest zabudowany elementami osłonowymi.

Istotne jest przede wszystkim, że ugaszenie ognia (zanik widocznego procesu spalania) nie rozwiązuje problemu, gdyż w przypadku powszechnie stosowanych akumulatorów Li-Ion pożar może rozwinąć się ponownie. Przerwanie procesu spalania i pewny efekt gaśniczy można osiągnąć wyłącznie poprzez trwałe obniżenie temperatury wszystkich ogniw. Jeżeli temperatura ogniw pozostaje wysoka, powyżej pewnego progu istnieje wysokie ryzyko ponownego wystąpienia pożaru akumulatora. W zależności od wielu czynników proces spalania może nastąpić po chwili, po kilku godzinach lub nawet po jednej dobie. Gaszenie wodą ma zatem na celu schłodzenie ogniw do temperatury rzędu kilkudziesięciu stopni. Wartość tej temperatury będzie różna w zależności od typu zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych ogniw i całego akumulatora. W pojazdach elektrycznych może dojść do pożaru bez widocznych symptomów z zewnątrz, np. z powodu zmian wewnątrz akumulatora (wewnętrzne zwarcia, które zwiększają temperaturę lub wycieki w układzie chłodzenia, przez co ciecz przedostaje się do części pod napięciem i powoduje zwarcie z późniejszym pożarem). Skale czasowe tych zjawisk mogą wynosić od kilku sekund do kilku dni.

Na przełomie ostatniej dekady przeprowadzono testy, mające na celu ocenę działania gaśniczego różnych metod i środków gaśniczych, które zastosowano podczas pożaru akumulatorów Li-Ion. Testy takie przeprowadzone zostały przez organizację Federal Aviation Administration (FAA) oraz Civil Aviation Authority (CAA). Na uwagę zasługują także badania sposobu gaszenia pożarów akumulatorów zbudowanych w technologii litowej wykonane w USA – w FM Global, wspomnianej wcześniej NFPA i State Key Laboratory of Fire Science [6].

Agencja FAA wykonała szereg eksperymentów, które miały umożliwić wybór najefektywniejszego środka gaśniczego spośród dostępnych na rynku rozwiązań, poddając ocenie m.in. efekty chłodzenia układów gromadzenia energii. Podczas badań posługiwano się także wykonanymi symulacjami pożarów. Porównano środek gaśniczy halon 1211 – bromochlorodifluorometan – CF₂ClBr oraz środki na bazie wody z dodatkami: Hartindo AF31, Hartindo AF21, A-B-D. Porównano również środki gaśnicze w postaci gazowej: FM-200, FE-36, Halotron I ze środkami gaśniczymi Purple K oraz Novec 1230. Wyniki wskazują, że roztwory wodne posiadają duży potencjał w zakresie obniżenia temperatury – możliwy do zaobserwowania jest znaczący efekt chłodzący. W przypadku środków gaśniczych, które nie zawierają wody, efekt obniżenia temperatury nie będzie głównym mechanizmem gaśniczym pożaru akumulatora. Zwiększanie wydatku tego typu środków gaśniczych nie daje mierzalnego wpływu, w przeciwieństwie do środków opartych na wodzie. Na rycinie 4 przedstawiono wpływ wychładzania powierzchni akumulatora przez różne środki gaśnicze [7].

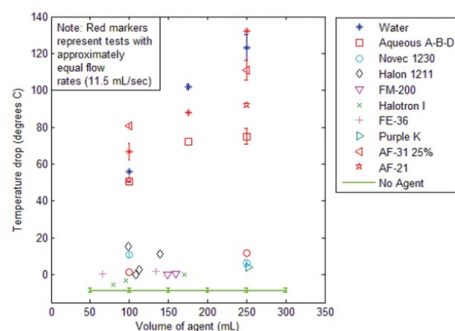


Figure 4. Effect of cooling the battery surface by various extinguishing agents
Rycina 4. Wpływ wychładzania powierzchni akumulatora przez różne środki gaśnicze

Source / Źródło: T. Maloney, *Extinguishment of Lithium-Ion and Lithium-Metal Battery Fires*, US Department of Transportation, Technical Report, Federal Aviation Administration 2014, 46–51 [7].

The FAA continued its research to show that the success of the extinguishing operation in battery fires is ensured by the use of a mechanism of heat collection, which prevents or reduces the combustion process. A series of tests were carried out to assess this effect, using a Li-Ion 18650 battery with a capacity of 2600 mAh and a charge level (SOC) of approx. 50%. It was heated by fire to the limit of the spontaneous process of temperature increase. Subsequently, the extinguishing agents in the liquid phase were applied to it at ambient conditions. They were: water, AF-31, AF-21, A-N-D and Novec 1230. These liquids were applied to the burning cell in the form of free outflow from a container with a volume of 0.5 dm³. Other extinguishing agents such as Halon1211, Halotron, I, FM and Purple-K were also used. The results of the experiment clearly indicate that the liquid – in ambient conditions – extinguishing agents are the most effective in collecting the heat released during the combustion of the material contained in the lithium battery.

At the Institute of China Classification Society [8], a series of studies was carried out to assess the extinguishing efficiency of batteries in lithium technology. Carbon dioxide, dry powder and HFC 227ea (FE227TM and FM-200®) were analysed. The assessment was made on the basis of the following criteria:

- the amount of produced smoke,
- extinguishing speed,
- the possibility of recurrence of combustion.

The use of carbon dioxide leaves no doubt that this gas does not have good extinguishing properties, which are responsible for effectively removing heat from a burning cell – similar to a powder extinguishing agent. HFC227ea was the most effective. Similar results were confirmed in a study conducted at the University of Science and Technology of China [9]. The general conclusions that can be deduced from these activities are focused on the efficiency of heat collection by water with or without additives. Their participation in certain situations increases the physical properties responsible for the effectiveness in terms of heat reception. It is also hardly effective to administer water to the area of a burning accumulator in the form of a water mist.

The F-500 water additive, developed by Control Arts Inc. (HCT), has many advantages and extinguishing potential. The additive does not increase the wetting properties of the water, nor does

FAA kontynuowała badania w celu wykazania, że gwarantem powodzenia działania gaśniczego podczas pożarów akumulatorów jest wykorzystanie mechanizmu odbierania ciepła, co zapobiega procesowi spalania lub go ogranicza. Wykonano szereg testów ukierunkowanych na ocenę tego efektu, wykorzystując do tego celu akumulator Li-Ion 18650 o pojemności 2600 mAh i poziomie naładowania (SOC) ok. 50%. Ogniwo zostało podgrzane do granicy samoistnego procesu wzrostu temperatury. Następnie podano na niego środki gaśnicze będące w fazie ciekłej w warunkach otoczenia. Były to: woda, AF-31, AF-21, A-B-D i Novec1230. Ciecze te podano na palące się ogniwo w postaci swobodnego wypływu z pojemnika o objętości 0,5 dm³. Użyto także innych środków gaśniczych, takich jak: Halon1211, Halotron, I, FM i Purple-K. Efekty eksperymentu jednoznacznie wskazują na to, że ciekłe – w warunkach otoczenia – środki gaśnicze są najbardziej efektywne w odbieraniu ciepła wydzielanego podczas spalania materiału zawartego w akumulatorze litowym.

W Institute of China Classification Society [8] przeprowadzono serię badań dotyczących oceny skuteczności gaśniczej podczas pożaru akumulatorów w technologii litowej. Przeanalizowano dwutlenek węgla, proszek gaśniczy oraz HFC 227ea (FE227TM oraz FM-200®). Oceny dokonano na podstawie następujących kryteriów:

- ilość powstałego dymu,
- szybkość gaszenia,
- możliwość nawrotu spalania.

Zastosowanie dwutlenku węgla nie pozostawia wątpliwości, że gaz ten nie posiada dobrych właściwości gaśniczych odpowiadających za efektywne odbieranie ciepła z płonącego ogniwa – podobnie jak środek gaśniczy w postaci proszku. Najbardziej efektywny był HFC227ea. Podobne wyniki zostały potwierdzone w ramach badania wykonanego w University of Science and Technology of China [9]. Generalne wnioski, jakie wynikają z tych działań, oscylują wokół skuteczności odbierania ciepła przez wodę bez dodatków bądź z dodatkami. Ich udział w pewnych sytuacjach podwyższa właściwości fizyczne odpowiedzialne za skuteczność w aspekcie odbioru ciepła. Trudno także uznać za skuteczne podawanie w obszar palącego się akumulatora wody w postaci mgły wodnej.

Sporymi zaletami i potencjałem gaśniczym charakteryzuje się dodatek do wody o nazwie F-500, opracowany przez firmę

it create a foam layer. It is given in the concentration range of 0.25–1% for group A fires and increased concentrations in the range of 3–6% for group B fires. It works, among other things, by lowering the surface tension, thanks to which it is able to cover a large surface of, for example, a burning liquid in a short time, and – importantly – strongly enhances the effect of heat absorption (6–10 times compared to pure water).

In 2009, Bosch conducted a series of tests of water, firefighting foam and powders together with water mixtures with F-500 to evaluate the effectiveness of extinguishing fires of lithium batteries. This work showed that F-500 is a leader among the selected materials. In 2013, DEKRA applied this measure in the event of a fire in batteries used in vehicles whose ignition was caused by an external fire effect, originating from the burnt n-heptane. Already at a concentration of 1% of F-500 in water, a significant improvement was achieved over pure water. It turns out that the properties of F-500 described above significantly improve the extinguishing properties of water. This finds practical application during fires of batteries made in lithium technology.

A team of scientists from Italy performed testing on a single lithium-ion cell and a set of interconnected cells [10]. The tests were carried out using a flame of an LPG burner with a power of approx. 7.5 kW, to which the tested system was exposed. EIG C020 lithium-ion cells were used and the extinguishing efficiency of carbon dioxide, foam, dry powder, clean water and water fog was assessed. The treated cells were charged to 50% SOC. As described above, the tests were carried out on single cells and on a package consisting of 48 cells. An example of a constructed sample and a stand is presented in Figure 5.

Control Arts Inc (HCT). Dodatek nie podwyższa właściwości zwilżających wody, ani też nie tworzy warstwy piany. Podawany jest w zakresie stężeń 0,25–1% dla grupy pożarów A i zwiększonych stężeniach w zakresie 3–6% dla pożarów grupy B. Jego działanie polega między innymi na obniżeniu napięcia powierzchniowego, dzięki czemu w krótkim czasie jest w stanie pokryć znaczną powierzchnię np. płonącej cieczy oraz – co istotne – silnie wzmacnia efekt odbierania ciepła (6–10 razy w porównaniu do czystej wody).

W 2009 r. firma Bosh przeprowadziła serię badań wody, pian gaśniczych oraz proszków wraz z mieszaninami wody z F-500 pod kątem oceny skuteczności gaszenia pożarów akumulatorów litowych. Prace te pokazały, że F-500 jest wiodący spośród wybranych materiałów. W 2013 r. DEKRA zastosowała ten środek w trakcie pożaru akumulatorów stosowanych w pojazdach, których zapłon był wywoływany zewnętrznym oddziaływaniem ognia, pochodzącym ze spalanego n-heptanu. Już przy stężeniu 1% F-500 w wodzie uzyskano znaczną poprawę względem czystej wody. Okazuje się, że wyżej opisane właściwości F-500 w sposób znaczący poprawiają właściwości gaśnicze wody. Znajduje to praktyczne zastosowanie podczas pożarów akumulatorów wykonanych w technologii litowej.

Zespół naukowców z Włoch wykonał badania na pojedynczym ogniwie litowo-jonowym oraz na zestawie połączonych ogniw [10]. Testy były przeprowadzone z wykorzystaniem płomienia palnika LPG o mocy ok. 7,5 kW, na którego działanie był wystawiany badany układ. Wykorzystano ogniwa litowo-jonowe EIG C020 i oceniono skuteczność gaśniczą dwutlenku węgla, piany gaśniczej, proszku gaśniczego, czystej wody oraz mgły wodnej. Poddawane ogniwa było naładowane do 50% SOC. Jak opisano wyżej, testy przeprowadzono na pojedynczych ogniwach oraz pakiecie składającym się z 48 ogniw. Przykład zbudowanej próbki oraz stanowiska przedstawiony został na rycinie 5.



Figure 5. Battery system and test stand used during the tests

Rycina 5. Układ akumulatora oraz stanowisko badawcze wykorzystane podczas testów

Source / Źródło: [10].

During the tests, an infrared camera was used to monitor the degree of heating of the surfaces of the tested devices. A single cell was heated to a temperature of approx. 650°C by means of an external fire. Then, an extinguishing agent was applied to its surface, of which carbon dioxide, foam, extinguishing powder, clean water and water fog were used for the cell. Water was used to extinguish the battery. In the described test, the cell exposed

Podczas testów użyto kamery na podczerwień do monitorowania stopnia nagrzewania się powierzchni badanych urządzeń. Pojedyncze ogniwo zostało ogrzane za pomocą ognia zewnętrznego do temperatury ok. 650°C. Następnie na jego powierzchnię podano środek gaśniczy, z czego dla ogniwa zastosowano dwutlenek węgla, pianę gaśniczą, proszek gaśniczy, czystą wodę i mgłę wodną. Do gaszenia akumulatora użyto wody. W opisanym

to the LPG flame reached a temperature of about 650°C in 2 minutes (see Figure 6). After the burner was turned off, the cell temperature dropped to approx. 400°C within 6 minutes. During the tests, the leakage of gases from the cell and their ignition as well as the swelling effect of the cell were observed. The effects of gas outflow and the increase in cell volume are shown in Figure 7.

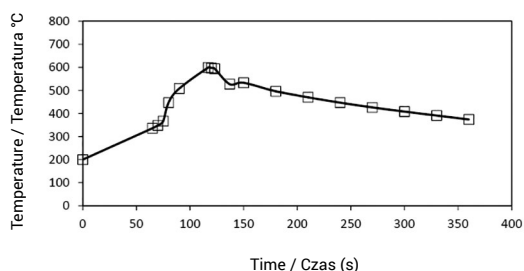


Figure 6. Maximum temperature of the heated cell – 650°C
Rycina 6. Maksymalna temperatura ogrzewanego ogniwa – 650°C

Source / Źródło: [10].

The multi-cell package has been built in such a manner as to reduce the likelihood of uncontrolled thermal propagation by ensuring an appropriate distance between the cells (heat exchange between them has been minimized). In this case, it was observed that the uncontrolled combustion process of a single cell causes the uncontrolled transfer of the combustion mechanism to adjacent cells through various actions: direct contact, hot gas blast, flame impingement (see Figure 8). The maximum temperature reached in the system of the built battery was approx. 700°C, and the flame height – up to 2 meters.

badaniu ogniwo wystawione na działanie płomienia LPG osiągnęło temperaturę ok. 650°C w ciągu 2 min (zob. ryc. 6). Po wyłączeniu palnika temperatura ogniwa spadła do ok. 400°C w ciągu 6 min. Podczas testów obserwowano wyciek gazów z ogniwa i ich zapłon oraz pojawienie się efektu puchnięcia ogniwa. Efekty wypływu gazów oraz zwiększenie objętości ogniwa pokazano na rycinie 7.

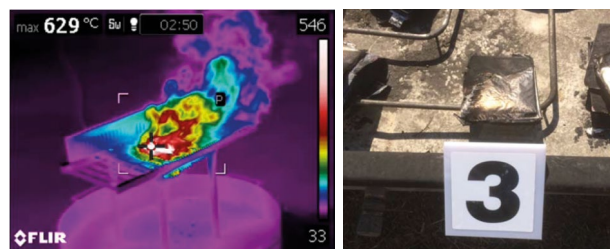


Figure 7. Effects of gas outflow and increase in cell volume
Rycina 7. Efekty wypływu gazów oraz zwiększenie objętości ogniwa

Source / Źródło: [10].

Pakiet wieloogniwoy został zabudowany w taki sposób, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo niekontrolowanej propagacji termicznej poprzez zapewnienie odpowiedniego odstępu między komórkami (zminimalizowano wymianę ciepła między nimi). W tym przypadku zaobserwowano, że niekontrolowany przebieg spalania pojedynczego ogniwa powoduje niekontrolowane przenoszenie się mechanizmu spalania na sąsiednie ogniwa poprzez różne działania: bezpośredni kontakt, uderzenie gorących gazów, uderzenie płomienia (zob. ryc. 8). Maksymalna temperatura, jaką osiągnięto w układzie zbudowanego akumulatora, wyniosła ok. 700°C, a wysokość płomienia – do 2 metrów.



Figure 8. Uncontrolled combustion of the tested system
Rycina 8. Niekontrolowane spalanie badanego układu

Source / Źródło: [10].

The results of the quenching (cooling) tests of individual cells are presented in Figure 9. Among the various tested agents, water and foam were the most effective because they lowered the cell

Wyniki testów gaszenia (ochładzania) pojedynczych ogniwo przedstawiono na rycinie 9. Spośród różnych badanych środków woda i piana były najskuteczniejsze, ponieważ w krótkim czasie

temperature and extinguished the fire in a short time (<20 s). Water mist turned out to be less effective and its use poses many problems, including, among others: the uniformity of the applied water mist cannot be guaranteed – the liquid droplets reach the combustion surface with the energy that may be too small to effectively penetrate the stream of extracting gases out of the cells when they burn. Small extinguishing effects were also noted with regard to CO₂ and extinguishing powder.

(<20 s) obniżyły temperaturę ogniwa i gasiły ogień. Mgła wodna okazała się mniej efektywna, a jej wykorzystanie stwarza wiele problemów, m.in.: nie można zagwarantować jednorodności stosowanej mgły wodnej – kropelki ciecży docierają do powierzchni spalania z energią, która może być zbyt mała, aby skutecznie przedrzeć się przez strumień gazów wydobywających się z ogniwa podczas ich spalania. Niewielkie efekty gaśniczy odnotowano także w odniesieniu do CO₂ i proszku gaśniczego.

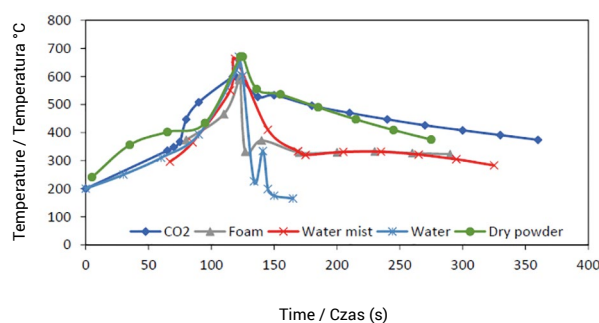


Figure 9. Cell drop while cooling down was recorded
Rycina 9. Zanotowany spadek ogniwa podczas ich ochładzania

Source / Źródło: P. Russoa, C. Di Barib, M. Mazzaroc, A. De Rosac, I. Morriellod., *Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-ion Battery* Morriellod., „Chemical Engineering Transactions” 2018, vol. 67, 727–732 [10].

The graph above shows that using water as expected results in a rapid drop in cell temperature. A similar effect can be observed when using foam. The use of the latter measure may give rise to further considerations, since the foam layer may form a fixed area that allows heat to be received for a longer period of time than with the use of water. In such a case, the foam keeps the water in a specific place, preventing it from running off the surface of the accumulator, which promotes heat collection.

It is worth emphasizing the fact that the conducted research aimed at developing technical solutions for storage facilities, e.g. energy or batteries intended for processing, made in lithium technology. The results of such work are presented in the report prepared in 2019 by the Fire Protection Research Foundation [11]. Small and large-scale free-burning tests and large-scale sprinkler tests were carried out on various types of energy storage systems, i.e. lithium-ion batteries: lithium-iron-phosphate (Li-FePO₄, denoted as LFP) and oxide Lithium Nickel Oxide (LNO) and Lithium Manganese Oxide (LMO). The tests were carried out to assess the extinguishing effects, taking into account the proximity of flammable and non-flammable materials and the effectiveness of sprinkler protection. Each type of test showed that for all types of battery technology, the ignition of a single battery was sufficient to fire all modules in the tested system. By comparing the two types of batteries, each test step showed that LFP modules presented a lower risk of fire than LNO/LMO modules. One sprinkler was able to control the spread of fire during the LFP test. In the test with LNO/LMO batteries, many sprinklers were activated, which resulted in water covering an area of over 230 m². Despite this, the fire spread from the start of the fire to neighbouring areas. On the basis of the performed research, certain universal conclusions can be drawn. Fire control of LFP

Powyższy wykres pokazuje, że zastosowanie wody – zgodnie z oczekiwaniami – skutkuje szybkim spadkiem temperatury ogniwa. Podobny efekt można zaobserwować w przypadku zastosowania piany gaśniczej. Użycie tego ostatniego środka może być impulsem do dalszych rozważań, ponieważ warstwa piany może tworzyć utrwalaony obszar, który umożliwiał będzie odbieranie ciepła przez dłuższy – niż przy zastosowaniu wody – okres czasu. Piana w takim przypadku zapewnia utrzymanie wody w określonym miejscu, zapobiegając jej spływaniu z powierzchni akumulatora, co sprzyja odbiorowi ciepła.

Warto zwrócić uwagę na prowadzone badania, mające na celu wypracowanie rozwiązań technicznych dla magazynów np. energii lub akumulatorów przewidzianych do przetworzenia wykonanych w technologii litowej. Efekty takich prac przedstawia raport przygotowany w 2019 roku przez Fire Protection Research Foundation [11]. Przeprowadzono testy swobodnego spalania na małą i dużą skalę oraz testy z użyciem instalacji tryskaczowych na dużą skalę, na różnych typach systemów magazynowania energii, tj. akumulatorów litowo-jonowych: litowo-żelazowo-fosforanowy (Li-FePO₄, ozn. LFP) i tlenku litowo-niklowego (LNO) oraz tlenku litowo-manganowego (LMO). Badania wykonano w celu oceny efektów gaszenia, biorąc pod uwagę bliskość materiałów palnych i niepalnych oraz skuteczności ochrony tryskaczowej. Każdy rodzaj testu wykazał, że dla wszystkich rodzajów technologii wykonania akumulatorów zapłon pojedynczego akumulatora był wystarczający, aby objąć pożarem wszystkie moduły w testowanym układzie. Porównując dwa typy akumulatorów, każdy z etapów testów wykazał, że moduły LFP stwarzają mniejsze ryzyko pożaru niż moduły LNO/LMO. Podczas testu LFP jeden tryskacz wykazywał zdolność kontrolowania rozprzestrzeniania się ognia. W teście z akumulatorami LNO/LMO aktywowało się wiele tryskaczy, czego efektem

batteries (stored up to 4.6 m) with a sprinkler system is possible and does not require special measures. In this case, provide a water supply for at least 90 minutes. The last recommendation applies especially to rooms intended for the so-called energy storage. For LNO/LMO batteries, fire develops significantly faster and is likely to spread to adjacent storage systems. In case of batteries, FM Global recommends to use free burning tests to determine the appropriate minimum safe distances between the batteries. Such action should be carried out in situations where sprinkler protection cannot be provided or where it is possible to change the functional development of the space intended for energy storage during its use. Large-scale tests can also be carried out to select sprinkler system parameters such as: minimum water supply time, expenditure, protected area. It should be noted that after the fire has been extinguished, the fire brigade forces should assist until the batteries are removed from the site by a specialized entity (due to the risk of the cells catching fire again). Currently, there are no reliable studies that would enable the selection of appropriate water expenditure that should be given to a fire by fire brigades. However, there is no doubt that firefighters considering water jets in the event of fires in energy storage areas should proceed with caution, taking into account the risks associated with degassing / venting the batteries and the potential explosion hazard.

In their article, C. Un and K. Aydın [12] described experiments concerning, among others, fire suppression systems, the features of which make it possible to use in practice. They also widely addressed the issue of the dangerous thermal runaway phenomenon, which initiates the massive and sudden burning of fuel in the cells. Experiments related to this phenomenon were carried out with different types of lithium batteries. Ten experiments were carried out, and the extinguishing tests were carried out using a fire-extinguishing nozzle and an automatic extinguishing system based on boron compounds.

Fire experiments were carried out on the basis of cells as well as modules and packages. In the A series test, cells and batteries were placed on a stand under which a propane burner was placed, generating a thermal power of 10 kW and 400 kW. The indicated type of heating has been applied to other types of batteries in the same way and under the same conditions. In this series, in case of cell fires, clean water proved to be an effective and convenient means of extinguishing, due to its ability to lower the temperature very quickly. In case of starting the self-heating process, the battery also had additional effects: loud noises, smoke, and it was practically impossible to put out the fire. The total burning time may be up to 1 hour without the intervention of a fire brigade. In this series of experiments, it was necessary to use significant amounts of water to completely extinguish the combustion. In case of cylindrical cells, an explosion risk and a splintering effect were observed. During a fire, gaps were formed in the housing, which allowed better penetration of the extinguishing agents into the interior and faster cooling of the battery. During the thermal decomposition process, a strong gas release effect was observed, which increased with increasing temperature inside the battery. Intense bursts of cylindrical cells were also observed. As the battery size increases, the amount

było pokrycie wodą powierzchni ponad 230 m². Pomimo tego ogień rozprzestrzenił się z miejsca zapoczątkowania pożaru na obszary sąsiednie. Na podstawie wykonanych badań można sformułować pewne uniwersalne wnioski. Kontrola pożaru akumulatorów wykonanych w technologii LFP (składowanych do wysokości 4,6 m) za pomocą instalacji tryskaczowej jest możliwa i nie wymaga specjalnych środków. W takim przypadku należy zapewnić zapas wody na przynajmniej 90 minut. Ostatnie zalecenie dotyczy zwłaszcza pomieszczeń przeznaczonych na tzw. magazyny energii. W przypadku akumulatorów LNO/LMO pożar rozwija się znacznie szybciej i istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że rozprzestrzeni się on na sąsiednie układy gromadzenia energii. W przypadku akumulatorów FM Global zaleca, aby w celu określenia właściwych minimalnych odległości bezpiecznych pomiędzy akumulatorami posiłkować się przeprowadzonymi testami swobodnego spalania. Takie działania powinno być przeprowadzone w sytuacjach, w których nie można zapewnić ochrony tryskaczowej lub w których istnieje możliwość zmiany zagospodarowania funkcjonalnego przestrzeni przeznaczonej na magazyn energii w trakcie jego użytkowania. Wielkoskalowe testy mogą być także przeprowadzone w celu doboru parametrów instalacji tryskaczowej, takich jak: minimalny czas zaopatrzenia w wodę, wydatek, powierzchnia chroniona. Dotyczy to przede wszystkim sytuacji, w których magazyny energii wymagają szczególnego zabezpieczenia ze względu na rolę, jaką pełnią. Zaznaczyć należy, że po ugaszeniu pożaru siły straży pożarnej powinny asystować do czasu zabrania akumulatorów z pogorzeliska przez wyspecjalizowany podmiot (ze względu na niebezpieczeństwo ponownego zapalenia się ogniw). Brak jest obecnie miarodajnych opracowań, które umożliwiłyby dobór odpowiednich wydatków wody, jaka powinna być podawana do pożaru przez jednostki straży pożarnej. Natomiast nie ulega wątpliwości, że strażacy rozważający podanie prądów wody w przypadku pożarów magazynów energii powinni postępować ostrożnie, biorąc pod uwagę zagrożenia związane z odgazowywaniem/odpowietrzaniem akumulatorów i potencjalne zagrożenie wybuchem.

W swym artykule C. Un i K. Aydın [12] opisali eksperymenty dotyczące m.in. systemu tłumienia pożaru, którego cechy umożliwiają zastosowanie w praktyce. Odniesli się także szeroko do kwestii niebezpiecznego zjawiska *thermal runaway*, które zapoczątkuje masowe i nagłe spalanie materiału palnego znajdującego się ogniwach. Eksperymenty związane z tym zjawiskiem przeprowadzono z różnymi rodzajami akumulatorów litowych. Wykonano dziesięć eksperymentów, testy gaszenia przeprowadzono z wykorzystaniem prądownicy gaśniczej i automatycznego systemu gaszenia na bazie związków boru. Eksperymenty pożarowe przeprowadzono zarówno na bazie ogniw, jak i na modułach oraz pakietach. W badaniu serii A ogniwa i akumulatory umieszczano na stanowisku, pod którym umieszczono palnik propanowy generujący moc cieplną 10 kW i 400 kW. Wskazany rodzaj ogrzewania został zastosowany do innych typów akumulatorów w taki sam sposób i w tych samych warunkach. W omawianej serii, w przypadku pożarów ogniw, czysta woda okazała się skutecznym i wygodnym środkiem gaszenia, ze względu na jej zdolność do bardzo szybkiego obniżania temperatury. W przypadku rozpoczęcia procesu samonagrzewania w akumulatorze występowały także efekty dodatkowe: głośne dźwięki, dym, a zgaszenie pożaru było praktycznie niemożliwe. Bez

of the released gas can increase to a significant level. Although battery fires can be extinguished by a number of methods, the effects of thermal instability are more difficult to control and continuous cooling is required. Thus, the design of the battery compartment should maintain integrity. The battery should also include passive temperature management, using a combination of space separation, cooling and zoned fire extinguishing within a module, and insulation between modules, all to prevent uncontrolled thermal reaction and spread of fire to adjacent modules. The study showed that the use of boron compounds in the area of extinguishing batteries in Li-Ion technology, due to the speed of heat removal and environmentally friendly properties, can be used in place of various other substances harmful to the environment. Consequently, fire suppression of this type of electrical equipment can be made more environmentally friendly through the use of boron compounds.

Fires of electric and hybrid cars

On the global automotive market, we can distinguish several types of vehicles powered by an electric motor. These are hybrid cars, plug-in hybrid electric vehicles, extended-range electric vehicles and battery electric vehicles. Despite the design differences in the drive or loading of a given type of vehicle, all of the models mentioned above have one thing in common – fire hazard.

The main risk in an accident with an electric car is the high probability of damaging the complex battery system. As a result, unfavourable thermal phenomena in the energy storage system may occur, which may lead to a fire.

Firefighters around the world are trying to work out the optimal tactics for extinguishing vehicles with electric motors. Polish firefighters did not have many opportunities to actively participate in activities related to extinguishing electric vehicles, due to the low popularity of this type of vehicles on national roads. One of the few examples of events in Poland that can be assessed, is a car fire on the DK 91 road in Zajączkowo near Tczew. It was an incident with BMW i8 plug-in hybrid car. The fire spread over the entire vehicle in a relatively short time, due to a significant share of elements made of plastic. The firefighting activities of the three newly arrived fire brigades consisted in long-term cooling of the vehicle and battery cells by attacking with a water jet [13]. It was a firefighting tactic that required time and a lot of water. In the event of a car fire,

ingerencji straży pożarnej łączny czas spalania może trwać do 1 godziny. W tej serii eksperymentów konieczne było użycie znacznych ilości wody, aby całkowicie wygasić spalanie. W przypadku ogniw cylindrycznych zaobserwowano ryzyko powstania wybuchu oraz efekt odłamkowania. W trakcie pożaru w obudowie powstawały szczeliny, które umożliwiały lepszą penetrację środków gaśniczych do wnętrza i szybsze ochładzanie akumulatora. Obserwowano silny efekt wydzielania gazów powstających w trakcie procesu rozkładu termicznego, który narastał wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz akumulatora. Zauważono również intensywne wybuchy cylindrycznych ogniw. Wraz ze wzrostem rozmiaru baterii ilość uwalnianego gazu może wzrosnąć do znaczącego poziomu. Chociaż pożary z udziałem akumulatorów można ugasić wieloma metodami, skutki niestabilności termicznej są trudniejsze do opanowania i wymagane jest ciągłe chłodzenie. W związku z tym konstrukcja komory akumulatorów powinna zachować integralność. Akumulator powinien także obejmować pasywne zarządzanie temperaturą, wykorzystujące połączenie separacji przestrzeni, chłodzenia i strefowego gaszenia pożaru w module oraz izolacji między modułami – wszystko po to, aby zapobiec niekontrolowanej reakcji termicznej i rozprzestrzenianiu się ognia na sąsiednie moduły. W badaniu wykazano, że zastosowanie związków boru w obszarze gaszenia akumulatorów w technologii Li-Ion, ze względu na szybkość odbierania ciepła oraz przyjazne dla środowiska właściwości, może być stosowane w miejsce różnych innych szkodliwych dla środowiska substancji. W związku z tym tłumienie pożarów tego typu urządzeń elektrycznych może być bardziej przyjazne dla środowiska dzięki zastosowaniu związków boru.

Požary samochodów elektrycznych i hybrydowych

Na światowym rynku motoryzacyjnym możemy wyróżnić kilka typów pojazdów napędzanych silnikiem elektrycznym. Są to samochody hybrydowe, hybrydowe pojazdy elektryczne typu plug-in, pojazdy elektryczne o zwiększonym zasięgu oraz akumulatorowe pojazdy elektryczne. Pomimo rozbieżności konstrukcyjnych w przypadku napędu lub ładowania danego typu pojazdu jedno łączy wszystkie wymienione modele – zagrożenie pożarowe.

Podstawowym zagrożeniem podczas wypadku samochodu elektrycznego jest wysokie prawdopodobieństwo uszkodzenia skomplikowanego systemu akumulatorów. Efektem tego może być zaistnienie niekorzystnych zjawisk termicznych w układzie gromadzenia energii, które mogą doprowadzić do pożaru.

Strażacy na całym świecie próbują wypracować optymalną taktykę gaszenia pojazdów z silnikami elektrycznymi. Polscy strażacy nie mieli zbyt wielu okazji do czynnego udziału w działaniach przy gaszeniu pojazdów elektrycznych, ze względu na małą popularność tego typu pojazdów na drogach krajowych. Jednym z nielicznych przykładów zdarzeń na terenie Polski, jaki można poddać ocenie, jest pożar samochodu na drodze DK 91 w miejscowości Zajączkowo pod Tczewem. Było to zdarzenie z autem BMW i8 typu hybryda plug-in. Pożar objął cały pojazd w stosunkowo krótkim czasie m.in. ze względu na znaczny udział elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Działania gaśnicze trzech

water is the most common and available extinguishing agent for energy consumption.



Figure 10. Comparison of a photo of the new model with the vehicle after the firefighting operation in Tczew
Rycina 10. Porównanie zdjęcia nowego modelu z pojazdem po akcji gaśniczej w Tczewie

Source / Źródło: www.elektrowoz.pl/auta/tczew-pozar-bmw-i8-w-zajackowie-brawa-dla-osp-milobadz-za-wlasciwe-podejscie-do-baterii/ [dostęp: 04.11.2021].

The extinguishing of electric cells cannot be considered based on the principle: extinguished or not extinguished. Often reported are cases of re-fires of a previously extinguished electric car. Scandinavian firefighters have developed additional procedures to prevent reigniting. Northern European countries have a very large fleet of electric and hybrid cars. The popularity of this type of vehicle in these countries is very high, which translates into a greater risk of fire. After the initial extinguishing of this type of vehicle, firefighters additionally transport the wreck to a container. The metal container is tightly closed and filled until the car is fully submerged with extinguishing agents (in most cases it is water or water with surfactant additives). Such extinguishing operations extend the cooling time of damaged battery cells, which reduces the risk of re-ignition.



Figure 11. Container for transporting electric car wrecks
Rycina 11. Kontener do transportowania wraków samochodów elektrycznych

Source / Źródło: photograph Kuzee Autologistiek, <https://40ton.net/ciezarowki-stworzone-do-topienia-aut-elektrycznych-nowy-sprzet-sluzb-ratunkowych/> [dostęp: 04.11.2021].

przybyłych zastępów straży pożarnej polegały na długotrwałym chłodzeniu pojazdu oraz ogniw akumulatorowych poprzez natarcie strumieniem wodnym [13]. Była to taktyka gaśnicza, która wymagała czasu i dużej ilości wody. W przypadku pożaru samochodu woda jest najbardziej powszechnym i dostępnym środkiem gaśniczym do odbioru energii.

Gaszenia ogniw elektrycznych nie da się rozpatrywać na zasadzie: zgaszono bądź nie zgaszono. Często można przeczytać o przypadkach ponownego pożaru wcześniej zgaszonego samochodu elektrycznego. Skandynawscy strażacy wypracowali dodatkowe procedury zabezpieczające przed ponownym zapłonem. Północne kraje Europy posiadają bardzo dużą flotę samochodów elektrycznych i hybrydowych. Popularność takiego typu pojazdów w tych państwach jest bardzo wysoka, co przekłada się na większe ryzyko pożarowe. Strażacy po wstępnym ugaszeniu pojazdu tego typu dodatkowo przewożą wrak do kontenera. Metalowy kontener jest szczelnie zamykany i wypełniany do pełnego zanurzenia samochodu środkami gaśniczymi (w większości przypadków jest to woda lub woda z dodatkami powierzchniowo czynnymi). Takie działania gaśnicze powodują wydłużenie chłodzenia się uszkodzonych ogniw akumulatorowych, co wiąże się ze zmniejszeniem ryzyka ponownego zapłonu.



Figure 12. A specialized trailer for transporting and extinguishing electric vehicles
Rycina 12. Specjalistyczna przyczepka do transportu i dogaszania pojazdów elektrycznych

Source / Źródło: <https://motoryzacja.interia.pl/raporty/raport-samochody-elektryczne/samochodyelektryczne/news-jak-ugasic-pozar-elektrycznego-auta-ten-sprzet-robi-wrazenie,nld,5376097/> [dostęp: 04.11.2021].

An interesting solution is the use of a cloth for extinguishing vehicles with electric motors. They are used in part by German firefighters – as a defensive tactic for other objects or vehicles. Most fires to fully electric cars occur while they are being charged. The solution protecting other objects will in no way cause a faster extinction of the burning vehicle and is only an additional measure.

Ciekawym rozwiązaniem jest wykorzystanie podczas gaszenia pojazdów z silnikami elektrycznymi płachty gaśniczej. Stosują je częściowo niemieccy strażacy – jako taktykę obronną innych obiektów lub pojazdów. Większość przypadków pożarów samochodów w pełni elektrycznych następuje podczas ich ładowania. Rozwiązanie chroniące inne obiekty w żaden sposób nie spowoduje szybszego ugaszenia palącego się pojazdu i jest tylko działaniem dodatkowym.



Figure 13. Extinguishing an electric vehicle with a fire cloth
Rycina 13. Gaszenie pojazdu elektrycznego płachtą gaśniczą

Source / Źródło: <https://whatsnext.pl/wielki-koc-do-gaszenia-elektrycznych-samochodow/> [dostęp: 04.11.2021].

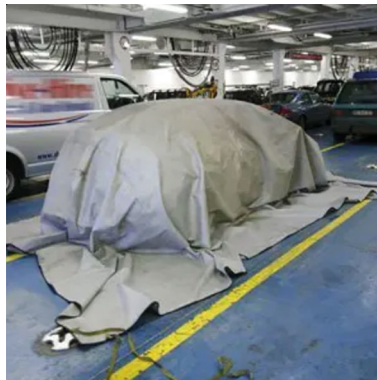


Figure 14. View of an electric vehicle secured with a fire cloth
Rycina 14. Widok pojazdu elektrycznego zabezpieczonego płachtą gaśniczą

Source / Źródło: <https://safetech.net.pl/produkty-lista/koc-gasniczy/> [dostęp: 04.11.2021].

The General Headquarters of the State Fire Service has developed a document containing standard rules of conduct during incidents involving passenger electric cars. The following scenario for firefighters-rescuers is described in sheet “Z2” regarding rescue actions for a fire that has occurred:

1. Set up emergency vehicles to secure the site of the operations. Follow the standard tactic for passenger car rescue operations in this regard.
2. Designate a safe zone.
3. Use respiratory protection equipment.
4. Evacuate people from the danger zone in the event of an immediate threat to life.
5. Perform a detailed diagnosis for the presence of an electric drive. Get information about the car model. Support yourself with all available sources of information: vehicle

Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej wypracowała dokument, zawierający standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami osobowymi z napędem elektrycznym. W karcie „Z2” dotyczącej działań ratowniczych dla zaistniałego pożaru opisano następujące scenariusze postępowania dla strażaków-ratowników:

1. Ustaw pojazdy ratownicze tak, aby zabezpieczyć miejsce przeprowadzonych działań. Postępuj w tym zakresie zgodnie ze standardową taktyką działań ratowniczych dla samochodów osobowych.
2. Wyznacz strefę bezpieczną.
3. Stosuj sprzęt ochrony układu oddechowego.
4. Przeprowadź ewakuację osób ze strefy zagrożenia w przypadku bezpośredniego zagrożenia życia.
5. Przeprowadź szczegółowe rozpoznanie pod kątem

rescue card, rescue applications, steering position assistance, etc.

6. Start putting out the fire:
 - a) small fires can be extinguished with fire extinguishers, preferably powder (ABC) or foam (AB), keeping the distance indicated on the extinguisher's label as for extinguishing electrical devices;
 - b) a developed car fire should be extinguished with water, compressed foam (CAFS) or extinguishing powder;
 - c) water, compressed foam (CAFS) or extinguishing dry powder should be carried out without disconnecting the high voltage system in the car. When using scattered water currents or compressed foam (CAFS), dry powder, keep a minimum distance of 1 m between the fire and the extinguishing agent jet. When using compact water or compressed foam (CAFS) currents, keep a minimum distance of 5 m between the fire and the extinguishing agent jet. One should be especially careful when handling the extinguishing agents (according to DIN VDE 0132).
 7. Classic heavy or medium foam currents should not be used.
 8. In the event of a battery catching fire, it is necessary to provide on-site more extinguishing agents with cooling effect than in the case of a fire in a combustion engine car. In the event of a battery catching fire, it is necessary to provide more extinguishing agents with the cooling effect on-site than in case of a fire in a combustion engine car. Extinguishing a fire of an electric passenger car, including battery flames, may require up to 10 m³ of water or water with additives. The stream of the extinguishing agent should be applied directly to the burning battery in order to cool it effectively. The process of cooling the battery, even after the smoking signs are removed, may take to several hours (on average it is about 7 hours, there are known cases of smoking recurrence even after 20 hours). Battery cooling is difficult due to its special design. The structure of the battery must not be tampered with under any circumstances, as it may result in electric shock. The extinguishing and cooling effects of the battery should be monitored using a thermal imaging camera or a pyrometer. In the event of a car fire with a battery ignited, extinguishing powders and carbon dioxide will be ineffective due to the lack of a cooling effect.
 9. After the fire is extinguished, it is necessary to:
 - a) deactivate the car in accordance with the procedure "Deactivating and securing a car";
 - b) check the condition of the car's high-voltage battery housing for possible damage and leaks, use a standard sorbent to collect the liquid;
 - c) check the battery housing for increased temperature, an increase in battery temperature after extinguishing the fire means a risk of battery fire; the cells should then be cooled until it is found
- występowania napędu elektrycznego. Uzyskaj informację co do modelu samochodu. Wspomagaj się wszelkimi dostępnymi źródłami informacji: karta ratownicza pojazdu aplikacje ratownicze, pomoc stanowiska kierowania, itd.
6. Przystąpienie do gaszenia pożaru:
 - a) niewielkie pożary można gasić przy pomocy gaśnic, najlepiej proszkowych (ABC) lub pianowych (AB) z zachowaniem odległości wskazanej na etykiecie gaśnicy jak przy gaszeniu urządzeń elektrycznych;
 - b) rozwinięty pożar samochodu należy gasić wodą, pianą sprężoną (CAFS) lub proszkiem gaśniczym;
 - c) gaszenie wodą, pianą sprężoną (CAFS) lub proszkiem gaśniczym należy przeprowadzić nawet bez odłączania instalacji wysokiego napięcia w samochodzie. W przypadku stosowania rozproszonych prądów wody lub piany sprężonej (CAFS), proszku gaśniczego, zachować minimalną odległość 1 m pomiędzy pożarem i wylotem strumienia środka gaśniczego. W przypadku stosowania zwartych prądów wody lub piany sprężonej (CAFS) zachować minimalną odległość 5 m pomiędzy pożarem i wylotem strumienia środka gaśniczego. Podczas podawania środków gaśniczych zachować szczególną ostrożność (zgodnie z zapisami DIN VDE 0132).
 7. Nie należy stosować klasycznych prądów piany ciężkiej lub średniej.
 8. W przypadku zapalenia się baterii niezbędne jest zapewnienie na miejscu działań większej ilości środków gaśniczych o działaniu chłodzącym niż w przypadku pożaru samochodu z napędem spalinowym. Ugaszenie pożaru elektrycznego samochodu osobowego, w tym płomieni baterii, może wymagać zastosowania nawet 10 m³ wody lub wody z dodatkami. Strumień środka gaśniczego należy podawać bezpośrednio na płonąca baterię, w celu jej skutecznego chłodzenia. Proces chłodzenia baterii, nawet po zlikwidowaniu oznak palenia, może zająć nawet od kilku do kilkunastu godzin (średnio to ok. 7 godzin, znane są przypadki nawrotu palenia nawet po 20 godzinach). Chłodzenie baterii jest utrudnione ze względu na jej szczególną zabudowę. W żadnym wypadku nie wolno ingerować w strukturę baterii, gdyż grozi to porażeniem prądem elektrycznym. Efekty gaszenia i chłodzenia baterii należy kontrolować przy użyciu kamery termowizyjnej lub pirometru. W przypadku pożaru samochodu z zapaleniem baterii nieskuteczne będą proszki gaśnicze i dwutlenek węgla ze względu na brak działania chłodzącego.
 9. Po ugaszeniu pożaru należy:
 - a) przeprowadzić dezaktywację samochodu zgodnie z procedurą „Dezaktywacja i zabezpieczenie samochodu”;
 - b) skontrolować stan obudowy baterii wysokonapięciowej napędu samochodu pod kątem ewentualnych uszkodzeń i wycieków, do zbierania cieczy wykorzystaj standardowo dostępny sorbent;
 - c) skontrolować obudowę baterii pod kątem utrzymywania się podwyższonej temperatury, wzrost temperatury

that the battery will not undergo any further self-heating [14].

The document developed above is good material for a trained firefighter-rescuer who will come into contact with such a specific fire for the first time. The material introduces step by step what needs to be performed. At the moment, it is the fastest and easiest way to fight a fire in an electric car.

NFPA has undertaken a real-scale study of electric car breakdowns and hazards. US researchers tested batteries from two car manufacturers. The test samples were marked as battery A and battery B. Both purchased Li-ion batteries are currently used in vehicle manufacturing in the United States. Battery A is a battery with a capacity of 4.4 kWh, mounted under the luggage compartment of the vehicle. Battery B has a capacity of 16 kWh. It is installed under the floor of the vehicle and extends almost the entire length of the vehicle – from the rear axle to the front axle in a T-shaped configuration. Battery A and Battery B cover a wide range of sizes, positions and mounting locations in the vehicle. The aim of the test was to simulate various hazards that may be encountered by the rescuers in the field during real electric car fire incidents. As part of the agreement with the vehicle manufacturers who donated the batteries, vehicle cells were not opened, changed or tampered with before, during or after the fire tests.

Six tests were performed: three for battery A and three for battery B. For each cell type, two of the tests were performed with only the battery pack placed inside a car simulation (VFT) test bench. One test was conducted with a typical interior trim (i.e. car seats, carpet, dashboard, etc.). Additional trim elements were installed on the VFT to simulate a fuel load more typical of a vehicle fire.

baterii po ugaszeniu pożaru oznacza zagrożenie pożarem baterii; należy wówczas chłodzić ogniwa aż do stwierdzenia, że nie ulega ona dalszemu samonagrzewaniu [14].

Wypracowany powyżej dokument jest dobrym materiałem dla szkolącego się strażaka-ratownika, który pierwszy raz będzie miał styczność z tak specyficznym pożarem. Materiał wprowadza krok po kroku czynności, które należy przeprowadzić. Na chwilę obecną jest to najszybsza i najprostsza procedura walki z pożarem samochodu o napędzie elektrycznym.

NFPA podjęło badania w skali rzeczywistej, jeśli chodzi o awarie i zagrożenia związane z samochodami elektrycznymi. Amerykańscy badacze poddali testom akumulatory od dwóch producentów samochodów. Próbkę do badań oznaczono jako akumulator A i akumulator B. Oba zakupione akumulatory oparte na technologii Li-ion są obecnie wykorzystywane w produkcji pojazdów w Stanach Zjednoczonych. Akumulator A to akumulator o pojemności 4,4 kWh, montowany pod bagażnikiem pojazdu. Akumulator B ma pojemność 16 kWh. Jest instalowany pod płytą podłogową pojazdu i rozciąga się na prawie całej długości pojazdu – od osi tylnej do osi przedniej w konfiguracji w kształcie litery T. Akumulator A i akumulator B obejmują szeroki zakres rozmiarów, pozycji oraz miejsca montażu w pojeździe. Celem badań było zasymulowanie różnych zagrożeń, z jakimi mogą spotkać się ratownicy w terenie podczas rzeczywistych incydentów pożarowych samochodów elektrycznych. W ramach umowy z producentami pojazdów, którzy przekazali akumulatory, ogniwa do pojazdów nie były otwierane, zmieniane ani manipulowane przed, w trakcie lub po testach pożarowych.

Przeprowadzono sześć testów: trzy dla akumulatora A i trzy dla akumulatora B. Dla każdego typu ogniwa dwa z testów zostały przeprowadzone tylko z zestawem akumulatorów umieszczonym wewnątrz stanowiska, symulującego samochód (VFT). Jeden test został przeprowadzony z typowym wykończeniem wnętrza (tj. fotele samochodowe, wykładzina, deska rozdzielcza itp.). Dodatkowe elementy wykończenia zostały zainstalowane w VFT, aby symulować ładunek paliwa bardziej typowy dla pożaru pojazdu.



Figure 15. View of the stand imitating a vehicle for testing
Rycina 15. Widok stanowiska imitujące pojazd do testów

Source / Źródło: R. Jr. Thomas Long, A.F. Blum, T.J. Bress, B.R.T. Cotts, *Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards, A Report on Full-Scale Testing Results*, Fire Protection Research Foundation, June 2013 [15].

The firefighting operation was carried out by firefighters from the Maryland Fire and Rescue Institute (MFRI), who had not been given any tactical guidance to suppress the fire. They were instructed to fight the fire as if they were approaching a standard vehicle fire with an extinguishing current. Any tactics or modifications to these tactics during the fire tests were based solely on their many years of experience. For safety reasons, the extinguishing unit could not use any tools to access the VFT and the battery. However, due to the test configuration, there were two limitations to the activities of the MFRI. The firefighters could not extinguish the fire:

- from the east of the VFT, as the instrumentation wires and cables in this area posed a hazard of tripping;
- from the underside of the VFT (i.e. water attack on the vehicle chassis) due to the presence of four propane burners.

These two limitations did not significantly affect the tactic of the MFRI as the VFT was designed to provide ample access to the interior of the vehicle. Each VFT window was opened to the air, mimicking a scenario where all windows would be broken prior to the arrival of the fire department or by on-site first aiders. In addition, the rear hatch was left open for better access to the batteries during the test. Firefighters said that under real conditions they would try to open the tailgate or the trunk first. For safety reasons, firefighters were to stand at a greater distance from a potentially burning car.

Two firefighters donned full respiratory protective equipment and firefighting equipment prior to the start of the test. They only took off breathing apparatus when they had to replace the cylinder or when the fire was deemed to have been extinguished.

When testing type A battery after approximately 14 minutes, a firefighter in a firefighting rota said, "We can't get the water where it should be." This was confirmed by the firefighters during discussions after the tests. They assessed that the greatest challenge they had to face was to give water to the places where the fire had started. Since firefighters could not gain direct access to the inside of the battery, their main tactic was to occasionally add water to the flames, which would reignite after initial suppression. Although this intermittent application reduced the overall volume of the dispensed water, the constant flow could cool the metal casing of the battery, thus reducing the chance of further uncontrolled temperature build-up [15].

When testing battery B, it was observed that extinguishing was much more difficult than in case of battery A. As in the previous tests (tests of the A series cells), firefighters indicated that the biggest challenge they faced was trying to give water in the place where the fire actually started – in the center of the chambers. This was deliberately complicated during the B1 test by being placed above the steel floor plate. Additionally, due to the size and geometry of the B cells, firefighters chased the fire back and forth (i.e. front to back) as only one extinguishing current was used for the test. The firefighters could not gain direct access to the inside of the cells, so they used a tactic of cooling the floor surface with a fog nozzle. In all the tests, the fire was extinguished and the batteries were safely removed from the vehicles. In one test series, the cell reignited after being removed and stored for 22 hours after being extinguished.

Działaniami gaśniczymi zajmowali się strażacy z Maryland Fire and Rescue Institute (MFRI), którym nie udzielono żadnych wskazówek odnośnie postępowania taktycznego, aby stłumić pożar. Byli poinstruowani, aby walczyć z ogniem, tak jakby zbliżaliby się z prądem gaśniczym do standardowego pożaru pojazdu. Wszelkie taktyki lub modyfikacje tych taktyk podczas testów ogniowych były oparte wyłącznie na ich wieloletnim doświadczeniu. Zespół gaszący ze względów bezpieczeństwa nie mógł używać żadnych narzędzi w celu uzyskania dostępu do VFT i akumulatora. Natomiast ze względu na konfigurację testów istniały dwa ograniczenia dla działań MFRI. Strażacy nie mogli gasić pożaru:

- od wschodniej strony VFT, ponieważ przewody i kable oprzyrządowania w tym obszarze stwarzały ryzyko potknięcia;
- od spodu VFT (tj. natarcie wodą na podwozie pojazdu) ze względu na obecność czterech palników propanowych.

Te dwa ograniczenia nie wpłynęły znacząco na taktykę MFRI, ponieważ VFT został zaprojektowany tak, aby zapewnić swobodny dostęp do wnętrza pojazdu. Każde okno VFT było otwarte, naśladując scenariusz, w którym wszystkie okna zostałyby wybite przed przyjazdem straży pożarnej lub przez osoby udzielające pierwszej pomocy na miejscu zdarzenia. Ponadto tylny właz pozostawiono otwarty, aby zapewnić lepszy dostęp do akumulatorów podczas testu. Strażacy stwierdzili, że w realnych warunkach próbowaliby w pierwszej kolejności otworzyć tylną klapę lub bagażnik. Ze względów bezpieczeństwa strażacy mieli stanąć w większej odległości od potencjalnie palącego się samochodu.

Dwóch strażaków założyło przed rozpoczęciem testu pełny sprzęt ochrony dróg oddechowych i sprzęt przeciwpożarowy. Zdejmowali aparaty oddechowe tylko wtedy, gdy musieli wymienić butlę lub kiedy pożar został uznany za wygasły.

Podczas próby akumulatora A po ok. 14 min. strażak w rocie gaśniczej stwierdził: „Nie możemy dostarczyć wody tam, gdzie powinna być”. Potwierdzały to dyskusje ze strażakami po testach. Ocenili, że największym wyzwaniem, z jakim musieli się zmierzyć, było podanie wody do miejsc, gdzie pożar został zainicjowany. Ponieważ strażacy nie mogli uzyskać bezpośredniego dostępu do wnętrza akumulatora, ich główną taktyką było sporadyczne podawanie wody do płomieni, które ponownie rozpały się po początkowym stłumieniu. Chociaż ta przerywana aplikacja zmniejszyła ogólną objętość podawanej wody, stały przepływ mógł ochłodzić metalową obudowę akumulatora, zmniejszając w ten sposób szansę na dalsze niekontrolowane zwiększanie temperatury [15].

Podczas próby akumulatora B zaobserwowano o wiele trudniejsze gaszenie niż w przypadku akumulatora A. Podobnie jak w poprzednich testach (testy ogniw serii A), strażacy wskazali, że największym wyzwaniem, z jakim musieli się zmierzyć, była próba podania wody w miejscu, w którym faktycznie wybuchł pożar – w środku komór. Zostało to celowo skomplikowane podczas testu B1 poprzez umieszczenie powyżej stalowej płyty podłogowej. Dodatkowo ze względu na rozmiar i geometrię ogniw B strażacy ścigali ogień tam i powrotem (tj. od przodu do tyłu), ponieważ do testu wykorzystano tylko jeden prąd gaśniczy. Strażacy nie mogli uzyskać bezpośredniego dostępu do wnętrza ogniw, w związku z czym zastosowali taktykę chłodzenia powierzchni podłogowej za pomocą dyszy mgłowej. We wszystkich testach

pożar ugaszono, a akumulatory zostały bezpiecznie wyjęte z pojazdów. W jednej z serii testowych ogniwo ponownie zapaliło się po wyjęciu i przechowywaniu przez 22 godziny po zgaszeniu.

Summary and conclusions

The previous studies of lithium-ion cells indicate that the thermal runaway phenomenon is strongly limited in a situation where the cell housing maintains its integrity. If no remedial measures are taken to limit the temperature increase inside the cells, the designed covers may be damaged, which will accelerate the combustion processes. This is due to, among others, the increasing of the supply of oxygen from the atmospheric air to areas subject to exothermic chemical reaction. In extremely unfavourable cases, there might even be an explosion.

The extinguishing methods currently used are based on the use of a significant amount of water, which is not beneficial, although the desired effect of suppressing and extinguishing a fire is achieved. Nevertheless, the results obtained as part of the research work are promising and indicate the directions for further considerations. Particularly important conclusions arise from the results of the NFPA research, which indicate that it is difficult for the firefighters to reach the source of the fire. Quick access to the source of the fire can shorten the time of dispensing water, and thus reduce the amount of water.

Fires of hybrid and electric vehicles do not require special extinguishing equipment. Standard tactics and firefighting equipment were used during trials and real events. Despite this, all fires of electric car batteries were extinguished. All tests ended in extinguishing the fire and the batteries were safely removed from the vehicles. A significant challenge is the risk of re-ignition even several dozen hours after extinguishing.

The current versions of the various fire protection guidelines in the field of extinguishing tactics for fires in electric cars are consistent with each other. The simplest and most accessible method and extinguishing agent is to attack the fire with a water extinguisher jet. Standard procedures for extinguishing conventional cars should be modified and adapted to cars with electric drives. The biggest challenge for modern rescuers is to protect the health and life of people in close proximity to the incident and to secure the vehicle after it is extinguished.

Fires of Li-Ion cells and vehicles equipped with them are a new phenomenon that is more difficult to combat, because – due to the fire characteristics of the cells themselves – it requires much more extinguishing agents or unusual solutions than in case of vehicles with internal combustion engines. So far, no effective method has been developed that would allow a fire to be extinguished in a short time, and efforts are now focused on minimizing the effects or trying to minimize the use of water during a firefighting operation. There is still a need to search for new technical and tactical solutions in order to optimize the procedures leading to more effective operations of the services.

Podsumowanie i wnioski

Dotychczasowe badania ogniw litowo-jonowych wskazują, iż zjawisko *thermal runaway* jest silnie ograniczone w sytuacji, w której obudowa ogniwa zachowuje integralność. W przypadku braku podjęcia środków zaradczych ograniczających wzrost temperatury wewnątrz ogniwa może dojść do uszkodzenia zaprojektowanych osłon, co doprowadzi do przyspieszenia procesów spalania. Jest to spowodowane m.in. zwiększeniem dopływu tlenu z powietrza atmosferycznego do obszarów objętych egzotermiczną reakcją chemiczną. W skrajnie niekorzystnych przypadkach może dojść nawet do wybuchu.

Obecnie stosowane metody gaszenia bazują na wykorzystaniu znacznej ilości wody, co nie jest korzystne, pomimo że pożądany skutek w postaci stłumienia i ugazzenia pożaru zostaje osiągnięty. Niemniej jednak, uzyskane wyniki w ramach prac badawczych są obiecujące i wskazują kierunki dalszych rozważań. Szczególnie istotne wnioski wypływają z wyników badań NFPA, wskazujących na aspekt trudności dotarcia przez strażaków do źródła pożaru. Szybkie dotarcie do źródła pożaru może skrócić czas podawania wody, a tym samym ograniczenia jej ilości.

Požary pojazdów hybrydowych i elektrycznych nie wymagają specjalnego sprzętu do gaszenia. Podczas prób i realnych zdarzeń używano standardowych taktyk i sprzętu gaśniczego. Pomimo tego udało się zgasić wszystkie pożary akumulatorów samochodów elektrycznych. Wszystkie testy zakończyły się ugazaniem pożaru, a akumulatory zostały bezpiecznie wyjęte z pojazdów. Istotnym wyzwaniem jest niebezpieczeństwo pojawienia się ponownego zapłonu nawet po kilkudziesięciu godzinach od ugaznienia.

Aktualne wersje różnych wytycznych przeciwpożarowych w obszarze taktyki gaśniczej przy pożarze samochodów o napędzie elektrycznym są ze sobą zgodne. Najprostszym, najbardziej dostępnym sposobem i środkiem gaśniczym jest natarcie strumieniem gaśniczym przy użyciu wody. Standardowe postępowanie przy gaszeniu samochodów konwencjonalnych należy zmodyfikować i dostosować do samochodów o napędach elektrycznych. Największym wyzwaniem dla współczesnych ratowników jest ochrona zdrowia i życia osób w bliskiej odległości od zdarzenia oraz zabezpieczenie pojazdu po jego ugazieniu.

Požary ogniw Li-Ion oraz wyposażonych w nie pojazdów to nowe zjawisko, które jest trudniejsze do zwalczania, ponieważ – ze względu na charakterystykę pożarową samych ogniw – wymaga znacznie większej ilości środków gaśniczych lub nietypowych rozwiązań niż ma to miejsce w przypadku pojazdów z silnikami spalinowymi. Dotąd nie opracowano skutecznej metody, która pozwoliłaby na ugazenie pożaru w krótkim czasie, a działania skupiają się obecnie na minimalizacji skutków lub próbach zminimalizowania wykorzystania wody podczas akcji gaśniczej. W dalszym ciągu istnieje potrzeba szukania nowych rozwiązań technicznych i taktycznych w celu optymalizacji procedur prowadzących do bardziej efektywnych działań służb.

Literature / Literatura

- [1] <https://greenwaypolska.pl/blog-section/akumulatory-stosowane-w-samochodach-elektrycznych/> [dostęp: 28.10.2021].
- [2] Wakihara M., *Recent developments in lithium ion batteries*, „Materials Science and Engineering” 2021, 33, 109–134, [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(01\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(01)00030-4).
- [3] Wang Q., Ping P., Zhao X., Chu G., Sun J., Chen C., *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery*, „Journal of power sources” 2012, 208, 210–224, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.038>.
- [4] Wang Q., Sun J., Chu G., *Lithium ion battery fire and explosion*, „Fire Safety Science” 2005, 8, 375–382, <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-375>.
- [5] Larsson F., Blomqvist P., Loren A., Andersson P., *Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests*, „Journal of Power Sources” 2014, 271, 414–420, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.027>.
- [6] Wang Q., Xinyan B., Peifeng H., et al., *The fire hazard classification of lithium-ion battery*, China Fire Science and Technology Association Annual Conference, 2015, 226–232.
- [7] Maloney T., *Extinguishment of Lithium-Ion and Lithium-Metal Battery Fires*, US Department of Transportation, Technical Report, Federal Aviation Administration 2014, 46–51, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20919.24487>.
- [8] Rao H., Huang Z., Zhang H., Xiao S., *Study of fire tests and fire safety measures on lithium ion battery used on ships*, 2015 International Conference on Transportation Information and Safety, <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2015.7232158>.
- [9] Wang Q., Shao G., Duan Q., Man C., Li Y., Wu K., Peng P., Sun J., *The Efficiency of Heptafluoropropane Fire Extinguishing Agent on Suppressing the Lithium Titanate Battery Fire*, „Fire Technology” 2016, 52, 389–396, <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0531-9>.
- [10] Russoa P., Di Barib C., Mazzaroc M., De Rosac A., Morriellod I., *Effective Fire Extinguishing Systems for Lithium-ion Battery Morriellod*, „Chemical Engineering Transactions” 2018, vol. 67, 727–732, <https://doi.org/10.3303/CET1867122>.
- [11] Thomas Long R. Jr, Misera A.M., *Sprinkler Protection Guidance for Lithium-Ion Based Energy Storage Systems*, Fire Protection Research Foundation report 2019, <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Suppression/Sprinkler-Protection-Guidance-for-Lithium-Ion-Based-Energy-Storage-Systems> [dostęp: 28.10.2021].
- [12] Un C., Aydin K., *Thermal Runaway and Fire Suppression Applications for Different Types of Lithium Ion Batteries*, „Vehicles” 2021, 3, 480–497, <https://doi.org/10.3390/vehicles3030029>.
- [13] <https://www.auto-swiat.pl/wiadomosci/aktualnosci/hybrydowe-bmw-i8-doszczetnie-splonelo-pod-tczewem/c8pr3dj> [dostęp: 28.10.2021].
- [14] Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami osobowymi z napędem elektrycznym, KG PSP 2020, <https://www.gov.pl/web/kppsp-brzeziny/zasady-postepowania-podczas-zdarzen-z-samochodami-osobowymi-z-napedem-elektrycznym> [dostęp: 28.10.2021].
- [15] Thomas Long R. Jr., Blum A.F., Bress T.J., Cotts B.R.T., *Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards*, A Report on Full-Scale Testing Results, Fire Protection Research Foundation, June 2013.

JUNIOR BRIG. PIOTR LESIAK, M.SC. ENG. – he graduated from the Main School of Fire Service in Warsaw in 2002. A graduate of engineering studies in Chemistry at the Military University of Technology, he completed his post-graduate studies in Business Process Safety at the Lodz University of Technology. He works at the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute in Józefów as a Deputy Manager at the Laboratory of Combustion Processes and Explosions.

DARIUSZ PIETRZELA, M.SC. ENG. – a graduate of the Faculty of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service, and the Faculty of New Technologies and Chemistry of the Military University of Technology in the field of chemistry. Senior engineering and technical specialist at the Laboratory of Fire Extinguishing Agents and Equipment at Centrum Naukowo-Badawcze – Państwowy Instytut Badawczy, currently acting as the Deputy Manager of the Laboratory. The author's main area of interest is fixed firefighting equipment.

MŁ. BRYG. MGR INŻ. PIOTR LESIAK – w 2002 r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Absolwent studiów inżynierskich na kierunku chemia w Wojskowej Akademii Technicznej oraz studiów podyplomowych Bezpieczeństwo Procesów Przemysłowych na Politechnice Łódzkiej. Pełni służbę w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpowarowej PIB w Józefowie na Zastępcy Kierownika w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości.

MGR INŻ. DARIUSZ PIETRZELA – absolwent Wydziału Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego w Szkole Głównej Służby Pożarniczej oraz Wydziału Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej na kierunku chemia. Starszy specjalista inżynierijno-techniczny w Laboratorium Urządzeń i Środków Gaśniczych w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpowarowej – PIB, obecnie pełniący funkcję Zastępcy Kierownika Laboratorium. Głównym obszarem zainteresowań autora są stałe urządzenia gaśnicze.

PIOTR MORTKA, ENG. – graduated from the Main School of Fire Service in Warsaw. A graduate of postgraduate studies in Occupational Safety and Health at the University of Business and Health Sciences in Łódź. An employee at Centrum Naukowo-Badawcze – Państwowy Instytut Badawczy in Józefów as a specialist in the Laboratory of Fire Extinguishing Agents and Equipment. For many years he was an active firefighter in Volunteer Fire Department Stara Miłosna and Volunteer Fire Department Józefów. He also gained his firefighting experience at the Volunteer Fire Department Dąbrówka Podłęzna.

INŻ. PIOTR MORTKA – ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Absolwent studiów podyplomowych Bezpieczeństwa i Higieny Pracy na Wyższej Szkole Biznesu i Nauk o Zdrowiu w Łodzi. Pracownik w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej PIB w Józefowie na stanowisku Specjalisty w Zespole Laboratoriów Zespole Laboratoriów Urządzeń i Środków Gaśniczych. Wieloletni czynny strażak w OSP Stara Miłosna i OSP Józefów. Swoje doświadczenie pożarnicze zdobywał także w OSP Dąbrówka Podłęzna.