

Ilona Majka^{a)*}, Jacek Zboina^{a)}

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

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

Testing the Fire Safety of Electric Vehicles

Badania bezpieczeństwa pożarowego pojazdów elektrycznych

ABSTRACT

Aim: The aim of the article is to discuss, using literature on the subject, the results of scientific research and fire tests devoted to lithium-ion batteries and electric-powered vehicles, as well as various methods and techniques for extinguishing them. The presentation of these issues is important in terms of identifying the hazards present in construction objects where electric vehicles are parked and charged, as well as conducting effective and safe rescue operations during incidents involving them.

Introduction: The development of electromobility, including the growing number of electric vehicles, poses new challenges for fire protection, both in the context of conducting rescue operations and the safety of parking and charging these vehicles at construction objects. Fires on lithium-ion batteries used in electric vehicles follow a different pattern than fires on conventional energy sources. This includes the causes of their origin, the course and methods of extinguishing them, as well as the dangers to those in their zone, including from the toxic products of combustion that are emitted. Consideration of the occurrence of these risks is particularly important in underground infrastructure, where firefighting is more difficult and the ability to eliminate the toxic products is limited. The article discusses the results of scientific research and fire tests involving lithium-ion batteries and electric vehicles, taking into account different methods and techniques for extinguishing them, conducted in Germany, Austria, Switzerland, Sweden, South Korea, the United States of America and Poland, among others.

Methodology: The authors prepared the article based on a review and analysis of the results of scientific and experimental research, as well as on the literature.

Conclusions: The growing number of electric vehicles increases the likelihood of accidents and fires involving them. This poses a challenge for rescue operations involving the vehicles mentioned above. An analysis of the literature on the subject leads to the conclusion that the catalogue of risks during rescue operations involving electric vehicles is different from that of conventionally powered vehicles. These risks require research, analysis, evaluation and validation.

Keywords: fire safety, fire protection, electric vehicles, lithium-ion battery, rescue operations

Type of article: review article

Received: 22.11.2023; **Reviewed:** 01.12.2023; **Accepted:** 01.12.2023;

Authors' ORCID IDs: I. Majka – 0000-0001-6705-7165; J. Zboina – 0000-0002-9436-5830;

Percentage contribution: I. Majka – 60%; J. Zboina – 40%;

Please cite as: SFT Vol. 62 Issue 2, 2023, pp. 86–111, <https://doi.org/10.12845/sft.62.2.2023.5>;

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 omówienie – z wykorzystaniem literatury przedmiotu – wyników badań naukowych i testów pożarowych poświęconych bateriom litowo-jonowym oraz pojazdom z napędem elektrycznym, a także różnym metodom i technikom ich gaszenia. Przedstawienie tych zagadnień jest istotne z punktu widzenia identyfikacji zagrożeń występujących w obiektach budowlanych, w których parkowane i ładowane są pojazdy elektryczne, a także prowadzenia skutecznych i bezpiecznych działań ratowniczych podczas zdarzeń z ich udziałem.

Wprowadzenie: Rozwój elektromobilności, w tym rosnąca liczba pojazdów elektrycznych, stawia przed ochroną przeciwpożarową nowe wyzwania, zarówno w kontekście prowadzenia działań ratowniczych, jak i bezpieczeństwa parkowania i ładowania tych pojazdów w obiektach budowlanych. Pożary baterii litowo-jonowych stosowanych w pojazdach elektrycznych przebiegają inaczej niż pożary konwencjonalnych źródeł energii. Dotyczy to przyczyn ich powstania, przebiegu i metod gaszenia oraz zagrożeń dla osób przebywających w ich strefie, m.in. ze strony wydzielających się toksycznych produktów spalania. Rozważenie wystąpienia tych zagrożeń jest szczególnie istotne w podziemnej infrastrukturze, gdzie gaszenie pożarów jest trudniejsze, a możliwości eliminowania toksycznych produktów spalania są ograniczone. W artykule omówiono wyniki badań naukowych i testów

pożarowych z udziałem baterii litowo-jonowych oraz pojazdów elektrycznych, uwzględniających różne metody i techniki ich gaszenia, prowadzonych m.in. w Niemczech, Austrii, Szwajcarii, Szwecji, Korei Południowej, Stanach Zjednoczonych Ameryki oraz Polsce.

Metodologia: Autorzy opracowali artykuł, opierając się na przeglądzie i analizie wyników badań naukowych, eksperymentalnych, a także na literaturze przedmiotu.

Wnioski: Rosnąca liczba pojazdów elektrycznych zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia wypadków i pożarów z ich udziałem. Stanowi to wyzwanie w zakresie działań ratowniczych prowadzonych z udziałem pojazdów, o których mowa powyżej. Analiza literatury przedmiotu prowadzi do wniosku, iż katalog zagrożeń podczas prowadzenia działań ratowniczych z udziałem pojazdów elektrycznych jest inny niż w przypadku pojazdów z napędem konwencjonalnym. Zagrożenia te wymagają badań, analizy, oceny i walidacji. Na podstawie przeprowadzonej analizy dostępnych wyników badań naukowych, danych empirycznych i rzeczywistych zdarzeń można stwierdzić, iż w porównaniu z pożarami pojazdów spalinowych pożary pojazdów elektrycznych mają inną dynamikę rozwoju i mogą w związku z tym stanowić inne, nieznanne dotąd strażakom zagrożenia.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo pożarowe, ochrona przeciwpożarowa, pojazdy z napędem elektrycznym, bateria litowo-jonowa, działania ratownicze
Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Przyjęty: 22.11.2023; **Zrecenzowany:** 01.12.2023; **Zaakceptowany:** 01.12.2023;

Identyfikatory ORCID autorów: I. Majka – 0000-0001-6705-7165; J. Zboina – 0000-0002-9436-5830;

Procentowy wkład merytoryczny: I. Majka – 60%; J. Zboina – 40%;

Proszę cytować: SFT Vol. 62 Issue 2, 2023, pp. 86–111, <https://doi.org/10.12845/sft.62.2.2023.5>;

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

Introduction

Alternative propulsion technologies are becoming increasingly common. The market share of electric vehicles powered by lithium-ion batteries is growing worldwide with the global trend of green technology [1]. In Poland, according to press reports, 87,724 electric passenger cars were registered at the end of September 2023, of which 45,198 were all-electric cars (up 51.04% year-on-year) and 42,526 were plug-in hybrid cars (up 26.35% year-on-year). In contrast, the number of electric vans and trucks was 5212 units, and hybrid cars and vans numbered 619,122 units. At the end of September 2023, 18,922 mopeds and motorcycles and 1006 electric buses were also registered [2].

The increase in the number of electric-powered vehicles currently being observed worldwide, including in Poland, also poses a challenge in terms of fire safety, among other things, both in terms of the rescue operations being carried out and parking safety, and most importantly the charging of these vehicles using charging stations located at construction sites. Currently, there are no additional requirements in Poland's fire protection regulations for construction facilities where parking and charging of electric vehicles is expected.

The actual dangers that can occur in the event of an accident or fire involving an electric vehicle are still relatively unknown. On the other hand, it is known that the energy storage systems used in electric vehicles, based on lithium-ion technology, behave differently in the event of a fire than conventional vehicle drive sources. In order to expand the knowledge of the behaviour of electric-powered vehicles and their batteries under fire conditions and to determine their impact on safety, including the fire protection of garages, research work of various subject areas is being carried out in Poland and around the world. It can be expected that they will be further popularized, as the problem of operating

Wprowadzenie

Alternatywne technologie napędowe są coraz bardziej powszechne. Udział w rynku pojazdów z napędem elektrycznym, zasilanych bateriami litowo-jonowymi, rośnie na całym świecie wraz z globalnym trendem ekologicznej technologii [1]. W Polsce, według informacji podanych w prasie, pod koniec września 2023 r. zarejestrowanych było 87 724 samochodów osobowych z napędem elektrycznym, z czego 45 198 stanowiły samochody w pełni elektryczne (co oznacza wzrost o 51,04% w skali rocznej), a 42 526 samochody hybrydowe plug-in (co oznacza wzrost o 26,35% w skali rocznej). Liczba samochodów dostawczych i ciężarowych z napędem elektrycznym wynosiła natomiast 5212 sztuk, a hybrydowych samochodów osobowych i dostawczych było 619 122 sztuki. Na koniec września 2023 r. zarejestrowano również 18 922 motorowery i motocykle oraz 1006 autobusów elektrycznych [2].

Obserwowany obecnie na świecie, w tym w Polsce, wzrost liczby pojazdów z napędem elektrycznym stanowi także wyzwanie między innymi w aspekcie bezpieczeństwa pożarowego, zarówno w odniesieniu do prowadzonych działań ratowniczych, jak i bezpieczeństwa parkowania, a przede wszystkim ładowania tych pojazdów z wykorzystaniem stacji ładowania zlokalizowanych w obiektach budowlanych. Aktualnie w przepisach dotyczących ochrony przeciwpożarowej w Polsce nie ma dodatkowych wymagań dla obiektów budowlanych, w których przewiduje się parkowanie i ładowanie pojazdów z napędem elektrycznym.

Rzeczywiste zagrożenia mogące wystąpić w przypadku wypadku lub pożaru z udziałem pojazdu z napędem elektrycznym są jeszcze stosunkowo mało znane. Wiadomo natomiast, że stosowane w pojazdach elektrycznych systemy magazynowania energii, oparte na technologii litowo-jonowej, w przypadku pożaru zachowują się inaczej niż źródła napędów pojazdów konwencjonalnych. W celu poszerzenia wiedzy na temat zachowania się pojazdów

electric vehicles is extremely important. The analysis of literature allows us to conclude that the results of the research so far have a large spectrum and include a range of data on hazards, safeguards, parameters, dangerous incidents, firefighting activities, as well as losses and revealed problems.

Accordingly, the remainder of this article presents the results of scientific, experimental and actual fire tests conducted with lithium-ion batteries and electric vehicles, respectively, by research teams in various countries such as Germany, Austria, Switzerland, Sweden, South Korea and the United States of America. Various techniques and methods were used to extinguish these fires. Also presented are the results of research in this area conducted in Poland by CNBOP-PIB in cooperation with partners.

Definitions and abbreviations

Lithium batteries – batteries with substances containing lithium. There is a basic difference between lithium-metal and lithium-ion batteries. Lithium-metal batteries contain pure lithium in small amounts, while lithium-ion batteries usually contain lithium dissolved in other substances [3].

BEV – battery electric vehicle.

FCEV – fuel cell electric vehicle.

HF – hydrogen fluoride.

HEV – hybrid electric vehicle.

HCl – hydrochloric acid.

HCN – hydrogen cyanide.

HRR – heat release rate.

IR – infrared radiation.

ICEV – internal combustion engine vehicle.

LFP – lithium-iron-phosphate battery.

LIB – lithium-ion battery.

LTO – lithium-titanium-oxide battery.

Charging – electricity consumption for propulsion by: electric vehicle, plug-in hybrid vehicle, zero-emission bus,

z napędem elektrycznym i ich baterii w warunkach pożaru oraz określenia ich wpływu na bezpieczeństwo, w tym ochronę przeciwpożarową garaży, w Polsce i na świecie prowadzone są prace badawcze o różnym zakresie przedmiotowym. Można oczekiwać, że będą one dalej upowszechniane, ponieważ problem eksploatacji pojazdów z napędem elektrycznym jest niezwykle ważny. Analiza literatury pozwala stwierdzić, że dotychczasowe wyniki badań mają duże spektrum i zawierają szereg danych dotyczących zagrożeń, zabezpieczeń, parametrów, groźnych zdarzeń, działań straży pożarnej, a także strat i ujawnianych problemów.

W związku z powyższym w dalszej części artykułu zaprezentowano wyniki badań naukowych, doświadczalnych oraz rzeczywistych testów pożarowych prowadzonych z udziałem baterii litowo-jonowych i pojazdów z napędem elektrycznym odpowiednio przez zespoły badawcze w różnych państwach takich jak: Niemcy, Austria, Szwajcaria, Szwecja, Korea Południowa, Stany Zjednoczone Ameryki. Wykorzystano w nich różne techniki i metody gaszenia tych pożarów. Przedstawiono również wyniki badań w tym zakresie prowadzone w Polsce przez CNBOP-PIB we współpracy z partnerami.

Definicje i skróty

Baterie litowe – baterie z substancjami zawierającymi lit. Istnieje podstawowa różnica pomiędzy bateriami litowo-metalowymi, a litowo-jonowymi. Baterie litowo-metalowe zawierają czysty lit w małych ilościach, natomiast baterie litowo-jonowe zwykle zawierają lit rozpuszczony w innych substancjach [3].

BEV – pojazd elektryczny.

FCEV – pojazd elektryczny z ogniwem paliwowym.

HF – fluorowodór.

HEV – pojazd hybrydowy.

HCl – kwas solny.

HCN – cyjanowodór.

HRR – szybkość wydzielania ciepła.

IR – promieniowanie podczerwone.

ICEV – pojazd z napędem konwencjonalnym.

LFP – bateria litowo-żelazowo-fosforanowa.

LIB – bateria litowo-jonowa.

LTO – bateria litowo-tytanowo-tlenkowa.

Ładowanie – pobór energii elektrycznej na potrzeby napędu przez: – pojazd elektryczny, pojazd hybrydowy plug-in, autobus

non-electric vehicle motor vehicle, moped, bicycle or bicycle cart, as defined by the Law of 20 June 1997 – Traffic Law [5].

Thermal runaway – a phenomenon that leads to the uncontrolled decomposition of batteries due to the release of a large amount of heat and gases resulting from chemical reactions occurring in the battery cell. The phenomenon can occur as a result of damage (e.g. fire or mechanical impact), excessive or insufficient discharge and overheating of the battery. As a result, the battery may burn or explode [4].

NMC – nickel-manganese-carbide battery.

PH₃ – phosphine.

PHEV – plug-in hybrid electric vehicle.

pHRR – peak heat release rate.

Electric vehicle – a vehicle with a battery as the only energy storage, equipped with an electric motor or several such motors and having a connection for charging the battery from an external power source [3].

Hybrid vehicle – a vehicle with an electric drive and an internal combustion engine, in which a high-voltage energy storage system is charged by the internal combustion engine [3].

Plug-in hybrid vehicle – a type of hybrid vehicle in which the high-voltage battery can be charged from an external power source.

SOC – state of charge.

THR – total heat released.

TR – thermal runaway.

Research work

Not as of today, numerous scientific researches and fire tests have been conducted around the world to analyse the impact that electrically powered vehicle fires have on the fire safety of structures (including underground infrastructure) and the safety of rescue operations, as well as to evaluate methods and techniques for extinguishing such fires. Some of them are discussed in this article.

The German research project entitled "SUVEREN – Enhancing Safety in Underground Urban Areas with New Energy Sources" (German: *Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen urbanen Räumen bei Einsatz neuer Energieträger*), funded by the Federal Ministry for Research and Education (German: *Bundesministerium für Forschung und Bildung*, BMBF), addressed new risks and future safety concepts for alternative energy sources in vehicles. One of its

zeroemisyjny, niebędący pojazdem elektrycznym pojazd silnikowy, motorower, rower lub wózek rowerowy, w rozumieniu ustawy z dnia 20 czerwca 1997 r. – Prawo o ruchu drogowym [5].

Niestabilność termiczna – zjawisko prowadzące do niekontrolowanego rozkładu baterii na skutek wydzielania dużej ilości ciepła oraz gazów powstałych w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w ogniwie baterii. Do zjawiska może dojść w wyniku uszkodzenia (np. pożar lub uderzenie mechaniczne), nadmiernego lub niedostatecznego rozładowania oraz przegrzania baterii. W rezultacie bateria może ulec spaleni lub wybuchnąć [4].

NMC – bateria niklowo-manganowo-kolbatowa.

PH₃ – fosforowodór.

PHEV – pojazd hybrydowy plug-in.

pHRR – szczytowa szybkość wydzielania ciepła.

Pojazd elektryczny – pojazd z baterią jako jedynym magazynem energii, wyposażony w silnik elektryczny lub kilka takich silników oraz posiadający przyłącze do ładowania baterii z zewnętrznego źródła zasilania [3].

Pojazd hybrydowy – pojazd z napędem elektrycznym i silnikiem spalinowym, w którym wysokonapięciowy system magazynowania energii jest ładowany przez silnik spalinowy [3].

Pojazd hybrydowy plug-in – typ pojazdu hybrydowego, w którym wysokonapięciowa bateria może być ładowana z zewnętrznego źródła zasilania.

SOC – stan naładowania baterii.

THR – całkowite wydzielone ciepło.

TR – niestabilność termiczna.

Prace badawcze

Nie od dziś na całym świecie prowadzone są liczne badania naukowe oraz testy pożarowe mające na celu analizę wpływu, jaki na bezpieczeństwo pożarowe obiektów budowlanych (w tym infrastruktury podziemnej) i bezpieczeństwo działań ratowniczych mają pożary pojazdów z napędem elektrycznym, a także ocenę metod i technik gaszenia tego rodzaju pożarów. Część z nich omówiono w niniejszym artykule.

Realizowany w Niemczech projekt badawczy pt. „SUVEREN – Zwiększenie bezpieczeństwa w podziemnych obszarach miejskich z wykorzystaniem nowych źródeł energii” (niem. *Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen urbanen Räumen bei Einsatz neuer Energieträger*), finansowany przez Federalne Ministerstwo Badań i Edukacji (niem. *Bundesministerium für Forschung und Bildung*, BMBF) dotyczył nowych zagrożeń i przyszłych koncepcji bezpieczeństwa

main points was to conduct fire tests with lithium-ion batteries. The purpose of the ongoing research was to determine whether and what effect the behaviour of lithium-ion batteries under conditions similar to a real fire has on the safety and fire protection of underground garages. A total of three series of tests have been conducted, resulting in data on the fire behaviour of modern vehicles, including electric vehicles and their batteries [6].

The first series of research was conducted in May and June of 2019. Its main objective was to study the behaviour of lithium-ion batteries during a fire, in terms of heat release rate (HRR) and the resulting combustion products. The tests were performed in a specially configured calorimeter that was mechanically ventilated. Spatial and temporal temperature distribution was measured using thermocouples placed inside the calorimeter and on the applied fire load. The research was recorded using two optical cameras and two infrared cameras. Various combustion product detection systems were also used, including an FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) spectrometer. A high-pressure water mist system has been installed in the calorimeter in order to gain knowledge of effective methods for extinguishing electric vehicle fires. The lithium-ion batteries tested contained prismatic or cylindrical cells with a capacity of 24 kWh and were from the same manufacturer [7]. As part of the ongoing research, several methods of battery ignition were tested. Mechanical penetration into the link using a drill proved to be the most effective. Overcharging and spot flame heating during these tests did not ignite the batteries, or were not sufficiently reproducible [8].

Conducted tests have shown large differences in the behaviour of lithium-ion batteries during a fire. Prismatic cell batteries underwent much slower thermal decomposition than cylindrical cell batteries. The cylindrical cell battery (A) reached a high temperature in a very short time interval and completely burned up in less than 20 minutes after ignition. In case of prismatic cell batteries (B), lower temperatures and much longer burn times were achieved. This battery burned with several temperature spikes and contained low-temperature phases until it burned completely (see Figure 1). These phases were caused by the combustion of components made of plastic, i.e. the battery cover or other parts of the battery compartment [9].

alternatywnych źródeł energii w pojazdach. Jednym z jego głównych punktów było przeprowadzenie testów pożarowych z bateriami litowo-jonowymi. Celem prowadzonych badań było określenie, czy i jaki wpływ na bezpieczeństwo oraz na ochronę przeciwpożarową garaży podziemnych ma zachowanie się baterii litowo-jonowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistego pożaru. Przeprowadzono w sumie trzy serie badań, w wyniku których uzyskano dane na temat zachowania się w warunkach pożaru nowoczesnych pojazdów, w tym pojazdów elektrycznych i ich baterii [6].

Pierwszą serię badań przeprowadzono w maju i czerwcu 2019 r. Jej głównym celem było zbadanie zachowania się baterii litowo-jonowych podczas pożaru, pod względem szybkości wydzielania ciepła (HRR) oraz powstających produktów spalania. Badania wykonano w specjalnie skonfigurowanym kalorymetrze, który był wentylowany mechanicznie. Przestrzenny i czasowy rozkład temperatury mierzono za pomocą termopar umieszczonych wewnątrz kalorymetru i na zastosowanym obciążeniu ogniowym. Badania rejestrowane były za pomocą dwóch kamer optycznych oraz dwóch kamer na podczerwień. Zastosowano również różne systemy wykrywania produktów spalania, w tym spektrometr FTIR (spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera). W celu uzyskania wiedzy na temat skutecznych metod gaszenia pożarów pojazdów z napędem elektrycznym, w kalorymetrze zainstalowano system wysokociśnieniowej mgły wodnej. Badane baterie litowo-jonowe zawierały pryzmatyczne lub cylindryczne ogniwa o pojemności 24 kWh i pochodziły od tego samego producenta [7]. W ramach prowadzonych badań przetestowano kilka metod zapłonu baterii. Najskuteczniejszą z nich okazała się mechaniczna penetracja w ogniwo za pomocą wiertarki. Przeładowanie i punktowe ogrzewanie płomieniem podczas tych badań nie spowodowało zapłonu baterii, bądź nie było wystarczająco powtarzalne [8].

Przeprowadzone badania wykazały duże różnice w zachowaniu baterii litowo-jonowych podczas pożaru. Baterie z ogniwami pryzmatycznymi ulegały znacznie wolniejszemu rozkładowi termicznemu niż baterie z ogniwami cylindrycznymi. Bateria z ogniwami cylindrycznymi (A) osiągnęła wysoką temperaturę w bardzo krótkim przedziale czasu i w mniej niż 20 minut po zapłonie uległa całkowitemu spalaniu. W przypadku baterii z ogniwami pryzmatycznymi (B) osiągnięto niższe temperatury i znacznie dłuższy czas spalania. Bateria ta spalała się z kilkoma skokami temperatury i zawierała fazy niskich temperatur, aż do jej całkowitego spalania (zob. ryc. 1). Fazy te spowodowane były spalaniem elementów wykonanych z tworzyw sztucznych, tj. pokrycia baterii lub innych części komory baterii [9].

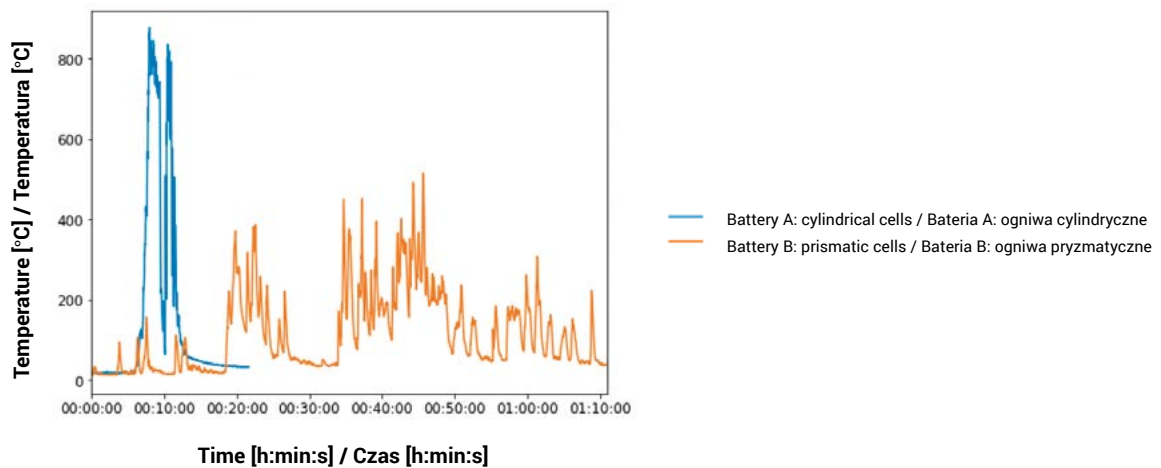


Figure 1. Temperature inside the outlet channel during fire tests of lithium-ion batteries with cylindrical and prismatic cells
Rycina 1. Temperatura wewnątrz kanału wylotowego podczas testów pożarowych baterii litowo-jonowych z ogniwami cylindrycznymi i pryzmatycznymi
Source / Źródło: Kutschenreuter M., Klüh S., Fast L., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *Fire Safety of Lithium-Ion Traction Batteries*, International Conference on Fires in Vehicles (FIVE), 2020 [9].

The tests also proved that the battery cover has an impact on at least the early spread of fire. The heat released by the first cracked cells was trapped inside the battery, as the cover was still in place at the time – even though it was starting to burn itself. The development of a lithium-ion battery fire also depended on ventilation conditions. In addition, it was observed that in the absence of fire extinguishing measures, the uncontrolled temperature rise spread to all cells and battery modules. This propagation was interrupted using a water mist system [6]. Moreover, FTIR-measured concentrations of toxic substances in the exhaust air stream confirmed high concentrations of hydrofluoric acid (HF), hydrogen cyanide (HCN) and hydrochloric acid (HCl) (see Figure 2). However, the obtained data did not reflect real-world conditions. This is because the flow of air through the calorimeter (a total of 8325 m³) during testing caused dilution of the emitted gases [7]. Measured concentrations can be considered critical by comparing, for example, the measured HF concentration to the threshold value of 500 ppm given in [10].

W testach dowiedziono także, że osłona baterii ma wpływ przynajmniej na wczesne rozprzestrzenianie się ognia. Ciepło uwalniane przez pierwsze pękające ogniwa było zatrzymywane wewnątrz baterii, ponieważ w tym czasie osłona nadal znajdowała się na swoim miejscu – pomimo że sama zaczynała się palić. Rozwój pożaru baterii litowo-jonowej uzależniony był również od warunków wentylacji. Dodatkowo zaobserwowano, że w przypadku braku zastosowania środków gaśniczych niekontrolowany wzrost temperatury rozprzestrzeniał się na wszystkie ogniwa i moduły baterii. Propagacja ta została przerwana przy zastosowaniu systemu mgły wodnej [6]. Ponadto zmierzone za pomocą spektrometru FTIR stężenia substancji toksycznych w strumieniu powietrza wylotowego potwierdziły wysokie stężenia kwasu fluorowodorowego (HF), cyjanowodoru (HCN) i kwasu solnego (HCl) (zob. ryc. 2). Uzyskane dane nie odzwierciedlały jednak warunków rzeczywistych. Przepływ powietrza przez kalorymetr (łącznie 8325 m³) podczas testów powodował bowiem rozcieńczenie emitowanych gazów [7]. Zmierzone stężenia można uznać za krytyczne, porównując na przykład zmierzone stężenie HF do wartości progowej 500 ppm podanej w [10].

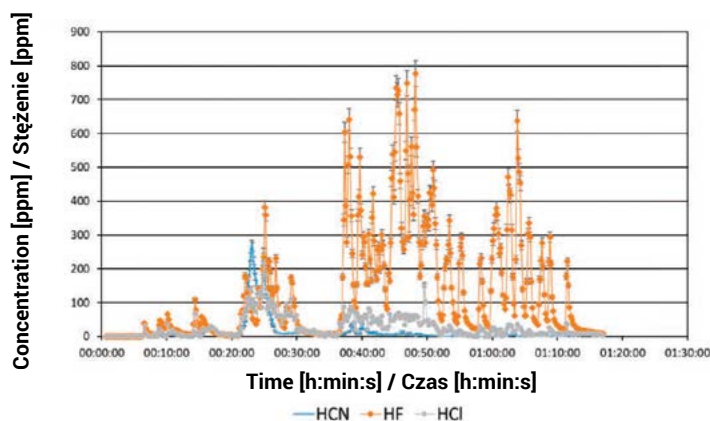


Figure 2. Measured concentrations of hydrogen cyanide (HCN), hydrofluoric acid (HF) and hydrochloric acid (HCl) with error factors
Rycina 2. Zmierzone stężenia cyjanowodoru (HCN), kwasu fluorowodorowego (HF) i kwasu solnego (HCl) ze współczynnikami błędów
Source / Źródło: Kutschenreuter M., Feltmann A., Usner T., Leismann F., *Brandschutz in Tunnelanlagen bei Fahrzeugen mit neuen Energieträgern (NET): Erste Erkenntnisse aus Realbrandversuchen*, Forschung + Praxis 53, STUVA-Tagung 2019 in Frankfurt am Main, 2019, s. 396 [7].

The second series of tests, conducted in December 2019 and January 2020, compared the effectiveness of various fire extinguishing and systems agents in extinguishing lithium-ion battery fires. These included sprinklers, high and low pressure water mist, F-500, firefighting foam, aerosol, inert gases (nitrogen and carbon dioxide) and NOVEC [8]. Several commercial detection systems were installed during the fire tests. This made it possible to compare and calibrate the results of commercial detection systems with scientific measurements [9]. For this series of tests, the calorimeter was modified and equipped with a flat roof to provide a more realistic scenario for detection systems. In addition, the walls of the calorimeter were equipped with openings – the test stand could be used as a closed or open room – thus allowing passive ventilation. Artificial ventilation was also not provided. The battery's fire load was identical in all the tests. Lithium-ion batteries consisting of two adjacent cylindrical cell modules with a total capacity of 5 kWh were studied [8]. During the tests, one module was ignited by forced electrical overload, while the spread of fire to an adjacent module was to be prevented by the fire extinguishing agents tested [6].

A total of 13 fire tests were conducted with identical fire loads, including two free burning tests – one in a closed and the other in an open test room. Before the activation of the extinguishing systems, the conditions in all battery fire tests were the same as in the free burning test [9]. Testing of various extinguishing agents (gas and water) has shown the particular effectiveness of water in extinguishing lithium-ion battery fires, due to its high cooling effect. It is particularly relevant to fires involving lithium-ion batteries [11].

The third series of surveys was conducted in October 2020. It focuses on examining the impact of an electric car fire on the building structure and evacuation conditions, as well as evaluating stationary firefighting. In order to obtain reference data, a design fire load consisting of a mock-up loaded with 24 wooden pallets was used to evaluate the numerical models developed in this project. The model reproduced a passenger car with a roof and front cover made of sheet steel [8]. The energy content of the car's reference fire load followed the fire curve developed in this project, with a maximum heat release of 7 MW. The vehicle fire was triggered using a reference battery fire load. The fire tests compared different extinguishing systems: sprinklers and high-pressure water mist, as well as automatic and open systems. In order to assess the spread of fire, or rather the possibility of limiting it, a target fire load was distributed around the vehicle and temperatures were measured near the vehicle, especially under the ceiling [6].

Conducted tests showed that a sprinkler system and a high-pressure water mist system with four nozzles were able to control the spread of fire. During the conducted tests, the development of the temperature under the ceiling was observed (see Figures 3 and 4). The temperature distribution shown in Figure 3 over time, at measurement points about 10 cm below the ceiling, illustrates the lower temperatures when high-pressure water mist was applied, measured over the entire test time considered (after 30 minutes, manual extinguishing had already begun). The high-pressure water mist system was able to keep the temperature below 200 degrees Celsius and thus protect the ceiling structure.

W drugiej serii badań, przeprowadzonej w grudniu 2019 r. i w styczniu 2020 r., porównano skuteczność różnych środków i systemów gaśniczych w gaszeniu pożarów baterii litowo-jonowych. Były to: tryskacze, mgła wodna pod wysokim i niskim ciśnieniem, F-500, piana gaśnicza, aerosol, gazy obojętne (azot i dwutlenek węgla) oraz NOVEC [8]. Podczas testów pożarowych zainstalowano kilka komercyjnych systemów detekcji. Umożliwiło to porównanie i kalibrację wyników komercyjnych systemów detekcji z pomiarami naukowymi [9]. Na potrzeby tej serii badań kalorymetr został zmodyfikowany i wyposażony w płaski dach, aby zapewnić bardziej realistyczny scenariusz dla systemów detekcji. Ponadto ściany kalorymetru zostały wyposażone w otwory – stanowisko testowe mogło być używane jako pomieszczenie zamknięte lub otwarte – umożliwiając tym samym bierną wentylację. Nie zapewniano również sztucznej wentylacji. Obciążenie ogniowe baterii było identyczne we wszystkich testach. Badano baterie litowo-jonowe składające się z dwóch sąsiadujących modułów z ogniwami cylindrycznymi o łącznej pojemności 5 kWh [8]. Podczas badań jeden z modułów był zapalany poprzez wymuszone przeładowanie elektryczne, natomiast rozprzestrzenianiu się ognia na sąsiedni moduł miały zapobiegać testowane środki gaśnicze [6].

Łącznie przeprowadzono 13 testów pożarowych z identycznymi obciążeniami ogniowymi, w tym dwa testy swobodnego spalania – jeden w zamkniętym, a drugi w otwartym pomieszczeniu testowym. Przed aktywacją systemów gaszenia warunki we wszystkich testach pożarowych baterii były takie same, jak w teście swobodnego spalania [9]. Przetestowanie różnych środków gaśniczych (gazowych i wodnych) wykazało szczególną skuteczność wody w gaszeniu pożarów baterii litowo-jonowych, co wynika z jej wysokiego efektu chłodzenia. Ma ono wyjątkowo duże znaczenie w przypadku pożarów baterii litowo-jonowych [11].

Trzecią serię badań przeprowadzono w październiku 2020 r. Skupiono się w niej na zbadaniu wpływu pożaru samochodu elektrycznego na konstrukcję budynku i warunki ewakuacji oraz ocenie stacjonarnego gaszenia pożaru. W celu uzyskania danych referencyjnych, do oceny modeli numerycznych opracowanych w ramach przedmiotowego projektu zastosowano projektowe obciążenie ogniowe składające się z makiety załadowanej 24 drewnianymi paletami. Makieta odwzorowała samochód osobowy z dachem i przednią pokrywą z blachy stalowej [8]. Zawartość energetyczna referencyjnego obciążenia ogniowego samochodu była zgodna z krzywą pożaru opracowaną w niniejszym projekcie, z maksymalnym wydzielaniem ciepła 7 MW. Pożar pojazdu wywołano za pomocą referencyjnego obciążenia ogniowego baterii. W testach pożarowych porównano różne systemy gaśnicze: tryskacze i wysokociśnieniową mgłę wodną oraz systemy automatyczne i otwarte. W celu oceny rozprzestrzeniania się ognia, a raczej możliwości jego ograniczenia, wokół pojazdu rozmieszczono docelowe obciążenie ogniowe i zmierzono temperatury w pobliżu pojazdu, zwłaszcza pod sufitem [6].

Przeprowadzone badania wykazały, że instalacja tryskaczowa oraz system wysokociśnieniowej mgły wodnej z czterema dyszami były w stanie zapewnić kontrolę rozprzestrzeniania się ognia. Podczas prowadzonych testów obserwowano rozwój temperatury pod stropem (zob. ryc. 3 i 4). Przedstawiony na rycinie 3 rozkład temperatury w czasie, w punktach pomiarowych około

10 cm poniżej sufitu, obrazuje niższe temperatury w przypadku zastosowania wysokociśnieniowej mgły wodnej, mierzone przez cały rozpatrywany czas testów (po 30 minutach przystąpiono już do gaszenia ręcznego). System wysokociśnieniowej mgły wodnej był w stanie utrzymać temperaturę poniżej 200°C, a tym samym zapewnić ochronę konstrukcji stropu.

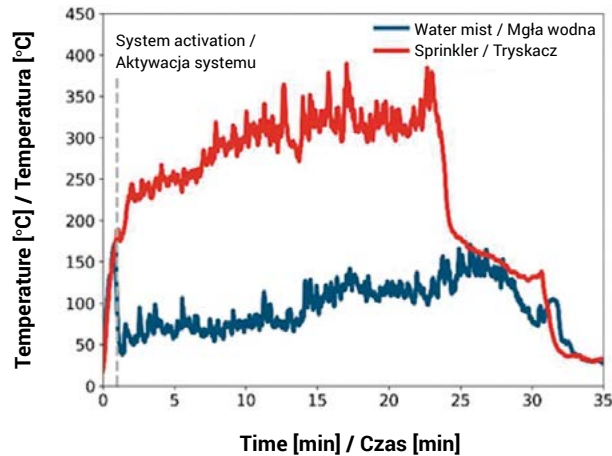


Figure 3. Temperature curve under the ceiling during a simulated electric vehicle fire (solid fuel fire), using a system of fixed firefighting equipment
Rycina 3. Krzywa temperatury pod sufitem podczas symulowanego pożaru pojazdu elektrycznego (pożar paliwa stałego), przy zastosowaniu systemu stałych urządzeń gaśniczych

Source / Źródło: *Fire Protection Guideline for Car Parks*, IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH, Version: 2.0, 2023, s. 6 [11].

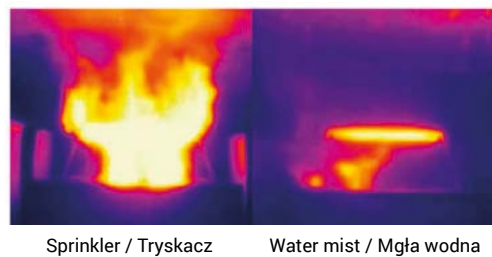


Figure 4. Comparison of sprinkler and high-pressure water mist system performance – thermal imaging (IR) image taken about 10 minutes after the start of extinguishing a simulated electric vehicle fire

Rycina 4. Porównanie działania instalacji tryskaczowej i wysokociśnieniowej mgły wodnej – obraz termowizyjny (IR) wykonany około 10 minut po rozpoczęciu gaszenia symulowanego pożaru pojazdu elektrycznego

Source / Źródło: *Fire Protection Guideline for Car Parks*, IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH, Version: 2.0, 2023, s. 7 [11].

The use of a high-pressure water mist system also resulted in the use of significantly less firefighting water, which can be contaminated with various heavy metals in the event of a lithium-ion battery fire. Research conducted as part of the SUVEREN project has confirmed that the firefighting water (which comes from the high-pressure water mist system) is contaminated with various heavy metals that come from the battery cells. Analyses of water samples from firefighting tests (collected at 3 different locations – next to the faucet, on the floor, and directly under the faucet) showed concentrations of some heavy metals (especially cobalt and manganese) well above standards. Table 1 shows the measured values of the substances in the firefighting water with a coefficient (in parentheses) indicating how many times they were higher compared to the reference sample [8].

Zastosowanie systemu wysokociśnieniowej mgły wodnej skutkowało również wykorzystaniem znacznie mniejszej ilości wody gaśniczej, która w przypadku pożaru baterii litowo-jonowej może być zanieczyszczona różnymi metalami ciężkimi. Badania przeprowadzone w ramach projektu SUVEREN potwierdziły, że woda gaśnicza (z systemu wysokociśnieniowej mgły wodnej) jest zanieczyszczona różnymi metalami ciężkimi, które pochodzą z ogniw baterii. Analizy próbek wody z testów gaśniczych (zbieranych w 3 różnych miejscach – obok baterii, na podłodze oraz bezpośrednio pod baterią) wykazały stężenia niektórych metali ciężkich (zwłaszcza kobaltu i manganu) znacznie przekraczające normy. Tabela 1 zawiera zmierzone wartości substancji w wodzie gaśniczej ze współczynnikiem (w nawiasie) oznaczającym, ile razy były one wyższe w porównaniu z próbką odniesienia [8].

Table 1. Amount of substances measured in firefighting water during research conducted as part of the SUVEREN project
Tabela 1. Ilość substancji zmierzonych w wodzie gaśniczej podczas badań prowadzonych w ramach projektu SUVEREN

Substance / Substancja	Next to the battery / Obok baterii	Floor / Podłoga	Under the battery / Pod baterią
Fluoride / Fluor [mg/l (-)]	20.1 (104)	18.0 (89)	35.0 (174)
Cobalt / Kobalt [mg/l (-)]	48.0 (639)	22.1 (294)	20.8 (276)
Nickel / Nikiel [mg/l (-)]	47.9 (162)	26.9 (90)	24.6 (82)
Manganese / Mangan [mg/l (-)]	43.0 (433)	22.0 (221)	26.0 (262)

Source / Źródło: Kutschenreuter M., Klüh S., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *How electric vehicles change the fire safety design in underground structures*, Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany, 2020, s. 415 [8].

On the other hand, the results of research conducted within the framework of the "ETOX – Toxic Gases from Electric Vehicle Fires" research project, funded by the Swedish Energy Agency (SEA) also showed the release of higher amounts of hydrogen fluoride (HF) and some metals – nickel, cobalt, lithium and manganese – during an electric vehicle fire [12].

In contrast, research conducted as part of the AGT 2018/006 research project of the Swiss Tunnel Research Working Group (German: *Arbeitsgruppe Tunnelforschung*, AGT) found that electric vehicle fires lead to new forms of emissions and alter toxicological risks in underground infrastructure (in underground parking lots and road tunnels). The results of the NMC battery test showed that the pollutants produced during an electric vehicle fire differ from the emissions produced by a conventional vehicle fire – special attention should be paid to additional toxic and partially carcinogenic substances, such as fluorine phosphate salts in the electrolyte, which are non-flammable but hazardous to health. It should also be emphasized that the toxic substances generated by an electric vehicle fire can cause severe soiling of the clothes and protective equipment of firefighters [13, 14].

Research on the impact of fires caused by electric vehicles on the safety of tunnel users was also conducted in Austria in 2019–2021. Within the framework of the BRAFA research project – *Effects of Fire on Vehicles with Alternative Propulsion Systems* (German: *Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen*), various methods of extinguishing electric car fires were tested. Single-cell battery tests were conducted, followed by larger-scale fire tests of battery modules and full-scale fire tests of electric vehicles. All experiments took place in a full-size research tunnel under realistic ventilation conditions [15].

As a result of the tests, a clear difference was observed between the NMC battery set fire (13 cells per module with a capacity of 60 Ah; 27 modules in total) and the LFP battery set fire (40 cells per module with a capacity of 20 Ah; 18 modules in total). The state of charge (SOC) of the NMC battery modules was 100%, while that of the LFP battery modules was not precisely known. Compared to nickel-manganese-cobalt batteries, lithium-iron-phosphate batteries had much lower fire dynamics. In case of LFP cells, the phenomenon of thermal instability (thermal runaway) occurred about 40 minutes after the battery was exposed to an external heat source, while in NMC modules, thermal instability began after just 10 minutes of battery exposure

Z kolei wyniki badań prowadzonych w ramach projektu badawczego „ETOX – Toksyczne gazy pochodzące z pożarów pojazdów elektrycznych”, finansowanego przez Szwedzką Agencję Energii (SEA) również wykazały wydzielanie się podczas pożaru pojazdu elektrycznego większych ilości fluorowodoru (HF) oraz niektórych metali – niktu, kobaltu, litu i manganu [12].

Natomiast badania przeprowadzone w ramach projektu badawczego AGT 2018/006 Grupy Roboczej ds. Badań Tuneli w Szwajcarii (niem. *Arbeitsgruppe Tunnelforschung*, AGT) dowiodły, że pożary pojazdów elektrycznych prowadzą do nowych form emisji zanieczyszczeń i zmieniają ryzyko toksykologiczne w podziemnej infrastrukturze (w parkingach podziemnych i tunelach drogowych). Wyniki badań baterii NMC wykazały, że zanieczyszczenia powstałe podczas pożaru pojazdu z napędem elektrycznym różnią się od emisji zanieczyszczeń powstałych w przypadku pożaru pojazdu z napędem konwencjonalnym – szczególną uwagę należy zwrócić na dodatkowe substancje toksyczne i częściowo rakotwórcze, np. sole fosforanu fluoru w elektrolicie, które są niepalne, ale niebezpieczne dla zdrowia. Podkreślenia wymaga również fakt, iż powstające w wyniku pożaru pojazdów elektrycznych toksyczne substancje mogą powodować silne zabrudzenie ubrań oraz sprzętu ochronnego strażaków [13, 14].

Badania w zakresie wpływu pożarów wywołanych przez pojazdy elektryczne na bezpieczeństwo użytkowników tunelu prowadzono również w Austrii w latach 2019–2021. W ramach projektu badawczego pt. „BRAFA – Skutki pożaru pojazdów z alternatywnymi układami napędowymi” (niem. *Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen*) testowano różne metody gaszenia pożarów samochodów elektrycznych. Przeprowadzono badania na pojedynczych ogniwach baterii, a w kolejnym etapie – na większą skalę – testy pożarowe modułów bateryjnych oraz pełnowymiarowe testy pożarowe pojazdów z napędem elektrycznym. Wszystkie eksperymenty miały miejsce w pełnowymiarowym tunelu badawczym w realistycznych warunkach wentylacji [15].

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano wyraźną różnicę pomiędzy pożarem zestawu baterii NMC (13 ogniw na moduł o pojemności 60 Ah; łącznie 27 modułów) a pożarem zestawu baterii LFP (40 ogniw na moduł o pojemności 20 Ah; łącznie 18 modułów). Stan naładowania (SOC) modułów baterii NMC wynosił 100%, natomiast w przypadku modułów baterii LFP nie był dokładnie znany. W porównaniu do baterii niklowo-manganowo-kobaltowych, baterie litowo-żelazowo-fosforanowe miały

to the same external heat source. The NMC battery fire lasted about 30 minutes, and the LFP battery modules lasted more than 3 hours [16].

The research also showed that in battery electric vehicle (BEV) fires, the heat release rate (HRR) increases slightly compared to fires of similar-sized internal combustion engine vehicles (ICEVs). The maximum heat release rate of the BEV observed during the tests was about 1.0–1.5 MW higher than that of an ICEV of the same size (see Figure 5). In addition, tests have shown that higher battery charge levels correspond to faster total heat release (THR) and higher peak heat release rate (pHRR) [16].

znacznie mniejszą dynamikę pożaru. W przypadku ogniw LFP do zjawiska niestabilności termicznej doszło po ok. 40 minutach od ekspozycji baterii na zewnętrzne źródło ognia, natomiast w modułach NMC niestabilność termiczna rozpoczęła się już po 10 minutach ekspozycji baterii na to samo zewnętrzne źródło ciepła. Pożar baterii NMC trwał około 30 minut, a modułów baterii LFP ponad 3 godziny [16].

Badania wykazały również, że w przypadku pożarów samochodów elektrycznych osobowych (BEV) szybkość wydzielania ciepła (HRR) wzrasta nieznacznie w porównaniu do pożarów podobnej wielkości samochodów konwencjonalnych (ICEV). Maksymalna szybkość wydzielania ciepła pojazdu BEV zaobserwowana podczas badań była wyższa o około 1,0–1,5 MW w porównaniu z pojazdem ICEV o tej samej wielkości (zob. ryc. 5). Ponadto przeprowadzone testy dowiodły, że wyższy poziom naładowania baterii odpowiada szybszemu całkowitemu wydzielaniu ciepła (THR) i wyższej szczytowej szybkości wydzielania ciepła (pHRR) [16].

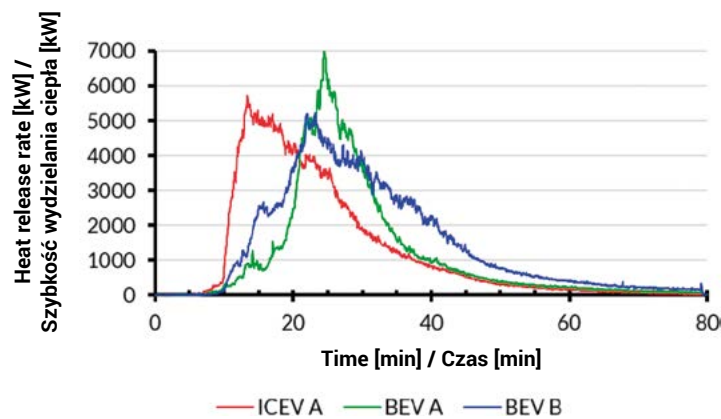


Figure 5. Diagram of the dependence of the rate of heat from time release during a fire of a conventional vehicle (red line) and an electric vehicle (green and blue lines)

Rycina 5. Wykres zależności szybkości wydzielania ciepła od czasu podczas pożaru pojazdu konwencjonalnego (linia czerwona) oraz pojazdu z napędem elektrycznym (linia zielona i niebieska)

Source / Źródło: Sturm P., Föbleitner P., Fruhwirt D., Galler R., Wenighofer R., Heindl S. F., Krausbar S., Heger O., *Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels*, "Fire Safety Journal" 2022, Vol. 134, 103695, s. 6 [16].

Studies conducted as part of the BRAFA research project also showed that an electric vehicle fire produces about 60–80% more hydrogen fluoride than a conventional vehicle fire. Therefore, hydrogen fluoride is an additional critical component of fire gases produced during electric vehicle fires. In addition to HF, cobalt, lithium, manganese, F-aerosols and hydrogen phosphide (PH_3) were also found [16].

In all fire tests of electric vehicles conducted under the BRAFA project, fire suppression was attempted. Water proved to be the most effective extinguishing agent, as was the case with the SUVEREN project. The experiments also showed that lithium-ion batteries will be fully extinguished if water reaches their interior. External cooling of a burning but only slightly damaged battery is not very effective. If water manages to penetrate the battery housing, the cooling effect increases and the water demand decreases [16].

Fire blankets and extinguishing lances were also tested as alternative methods for extinguishing an electric vehicle fire. Fire

Przeprowadzone w ramach projektu badawczego BRAFA badania wykazały również, iż podczas pożaru pojazdu elektrycznego powstaje ok. 60–80% więcej fluorowodoru niż w przypadku pożaru pojazdu z napędem konwencjonalnym. Fluorowódor jest zatem dodatkowym krytycznym składnikiem gazów pożarowych wytwarzanych podczas pożarów pojazdów elektrycznych. Poza HF stwierdzono również obecność kobaltu, litu, manganu, F-aerozoli i fosforowodoru (PH_3) [16].

We wszystkich testach pożarowych pojazdów elektrycznych, prowadzonych w ramach projektu BRAFA, podejmowano próby gaszenia pożaru. Najskuteczniejszym środkiem gaśniczym, podobnie jak w przypadku projektu SUVEREN, okazała się woda. Przeprowadzone eksperymenty pokazały również, że baterie litowo-jonowe zostaną w pełni ugaszone, jeżeli woda dotrze do ich wnętrza. Zewnętrzne chłodzenie płonącej, lecz tylko nieznacznie uszkodzonej baterii jest mało skuteczne. Jeżeli woda zdoła przeniknąć do wnętrza obudowy baterii, efekt chłodzenia wzrasta, a zapotrzebowanie na wodę maleje [16].

blankets minimize the oxygen content in the fire area, thereby suppressing the fire. The conducted tests showed that the use of a fire blanket has an effect on reducing the rate of heat release during an electric vehicle fire (see Figure 6). However, in case of a fully developed fire, due to its dynamics and the battery's oxygen self-sufficiency, it is not an effective method of extinguishing a BEV [16].

Jako alternatywne metody gaszenia pożaru pojazdu elektrycznego testowane były również koce gaśnicze oraz lance gaśnicze. Koce gaśnicze minimalizują zawartość tlenu w obszarze pożaru, a tym samym tłumią ogień. Przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie koca gaśniczego wpływa na zmniejszenie szybkości wydzielania ciepła podczas pożaru pojazdu elektrycznego (zob. ryc. 6). Jednak w przypadku pożaru w pełni rozwiniętego, z uwagi na jego dynamikę i samowystarczalność tlenową baterii, nie stanowi on skutecznej metody gaszenia pojazdu BEV [16].

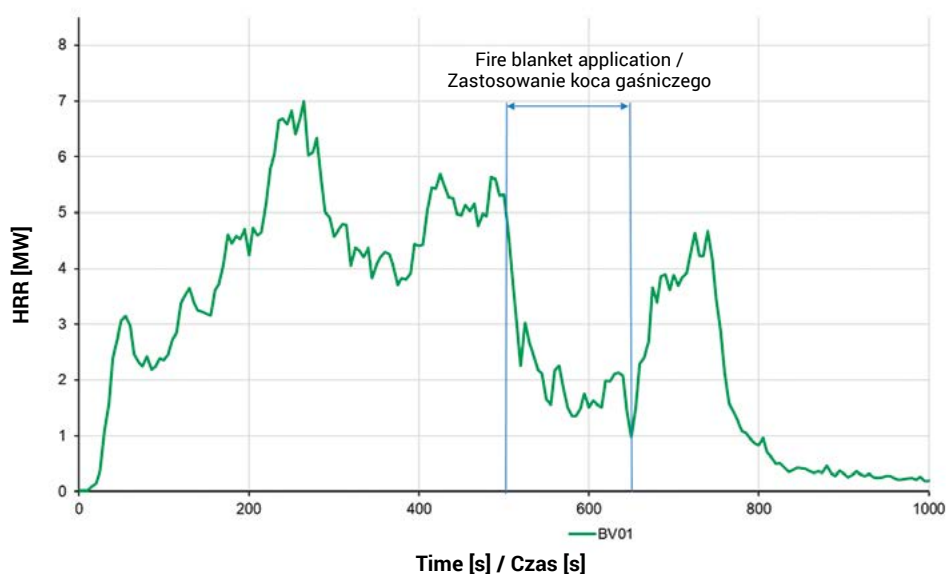


Figure 6. Effect of using a fire blanket on the rate of heat release during an electric vehicle fire

Rycina 6. Wpływ zastosowania koca gaśniczego na szybkość wydzielania ciepła podczas pożaru pojazdu elektrycznego

Source / Źródło: Sturm P., Föbleitner P., Fruhwirt D., Galler R., Wenighofer R., Heindl S. F., Krausbar S., Heger O., *Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels*, "Fire Safety Journal" 2022, Vol. 134, 103695, s. 9 [16].

The use of an extinguishing lance, with which the battery housing was pierced and a small amount of water was introduced, allowed the fire to be completely extinguished in 2 minutes [16]. However, operating the firefighting lance proved difficult and proved that it is necessary to have practical experience and knowledge of its operation, as well as the possible dangers. Thus, the conducted tests proved that the use of a firefighting lance is an effective method for extinguishing electric car fires, but it requires adequate preparation and training of firefighters [15].

Real-world testing of electric vehicles has also been conducted in South Korea as part of a research and development program funded by the National Fire Agency (NTA) and the Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT). Three electric vehicles (BEVs) manufactured in 2020 were tested (with battery capacities of 39 kWh and 64 kWh), an internal combustion engine vehicle (ICEV) and a hydrogen fuel cell electric vehicle (FCEV). The electric vehicle model was developed on an identical production platform to that used in the ICEV version. A total of six full-scale fire tests were conducted using large-scale cone

Zastosowanie lancy gaśniczej, za pomocą której przebito obudowę baterii i wprowadzono do jej wnętrza niewielką ilość wody, pozwoliło na całkowite ugaszenie pożaru w ciągu 2 minut [16]. Operowanie lancą gaśniczą okazało się jednak trudne i dowiodło, że konieczne jest posiadanie doświadczenia praktycznego oraz wiedzy na temat jej obsługi, a także możliwych zagrożeń. Przeprowadzone testy dowiodły zatem, że zastosowanie lancy gaśniczej stanowi skuteczną metodę gaszenia pożarów samochodów elektrycznych, jednak wymaga odpowiedniego przygotowania i wyszkolenia strażaków [15].

Badania pojazdów elektrycznych w warunkach rzeczywistych przeprowadzono również w Korei Południowej w ramach programu badawczo-rozwojowego finansowanego przez Krajową Agencję Straży Pożarnej (NTA) i Koreański Instytut Oceny Technologii Przemysłowych (KEIT). Testowano trzy pojazdy elektryczne (BEV) wyprodukowane w 2020 r. (z pojemnością baterii 39 kWh i 64 kWh), pojazd z silnikiem spalinowym (ICEV) oraz pojazd elektryczny z wodorowym ogniwem paliwowym (FCEV). Model pojazdu elektrycznego został opracowany na identycznej platformie produkcyjnej, jak ta stosowana

calorimetry on an instrumented test stand at the Korea Conformity Laboratories (KCL). In the first and second tests, the lithium-ion battery packs (LIB packs) and the BEV body were tested individually after physically removing the fully charged batteries. The third and fourth tests examined fires generated by two fully charged BEVs (BEV#2 and BEV#3) with different energy capacities. ICEVs and FCEVs were tested in the fifth and sixth experiments to investigate differences in thermal characteristics between BEVs, ICEVs and FCEVs [1].

The duration of the BEV test fires was about 70 min, until complete burnout in an open-air environment. The maximum heat release rates (pHRR) during fires on these vehicles were measured. They ranged from 6.51 to 7.25 MW and were slightly lower than the ICEV fire (7.66 MW), but higher than the FCEV fire (5.99 MW). The values of total heat release (THR) from the BEV fires ranged from 8.45 to 9.03 GJ and were higher than those of the ICEV vehicle fire (8.08 GJ) and smaller than the values measured for the FCEV vehicle fire (10.82 GJ). The dependence of heat release rate (HRR) and total heat release (THR) from time during the fires of the test vehicles is shown in Figure 7.

At a very early stage of the fire (about 1–2 min), a rapid increase in HRR was observed in the case of a vehicle body (BEV body) fire, as well as BEV#2 and ICEV vehicles. These rapid increases were due to the activation of the ignition stimuli (propane burner or heptane tray), rather than the rapid combustion of the samples. During the growth phase of the fire, the ignited vehicles generated gradually increasing heat and peaked (pHRR) after about 11–17 minutes. The fully developed stages of the fire were not maintained for long, except for the FCEV. The fires then went into a fading phase with a gradual decrease in HRR. At this stage, HRR fluctuations were observed in the BEV#2 and BEV#3 vehicle tests – due to a series of thermal runaway (TR) instability events. The HRR and THR values of the battery pack were lower than in the case of the fires of the vehicles tested, but here, too, there were fluctuations due to the phenomenon of thermal instability.

w wersji pojazdu ICEV. Łącznie przeprowadzono sześć testów pożarowych w pełnej skali przy użyciu wielkoskalowej kalymetrii stożkowej na oprzyrządowanym stanowisku testowym w Koreańskim Laboratorium Zgodności (KCL). W pierwszym i drugim teście pakiety baterii litowo-jonowych (ang. *LIB pack*) i nadwozie pojazdu BEV (ang. *BEV body*) zostały przetestowane indywidualnie po fizycznym demontażu całkowicie naładowanych baterii. W trzecim i czwartym teście badano pożary generowane przez dwa w pełni naładowane pojazdy BEV (BEV#2 i BEV#3) o różnych pojemnościach energetycznych. Pojazdy ICEV i FCEV zostały przetestowane w piątym i szóstym eksperymencie, celem zbadania różnic w charakterystyce termicznej między pojazdami BEV, ICEV i FCEV [1].

Czas trwania pożarów testowych pojazdów BEV wyniósł około 70 minut, aż do całkowitego wypalenia w środowisku otwartej przestrzeni. Zmierzono maksymalne wartości szybkości wydzielania ciepła (pHRR) podczas pożarów tych pojazdów. Zawierały się one w zakresie od 6,51 do 7,25 MW i były nieco niższe niż w przypadku pożaru pojazdu ICEV (7,66 MW), ale wyższe niż w przypadku pożaru pojazdu FCEV (5,99 MW). Wartości całkowitego wydzielonego ciepła (THR) z pożarów pojazdów BEV wynosiły od 8,45 do 9,03 GJ i były większe niż w przypadku pożaru pojazdu ICEV (8,08 GJ) oraz mniejsze od wartości zmierzonych w przypadku pożaru pojazdu FCEV (10,82 GJ). Zależność szybkości wydzielania ciepła (HRR) i całkowitego wydzielonego ciepła (THR) od czasu podczas pożarów testowanych pojazdów przedstawiono na rycinie 7.

Na bardzo wczesnym etapie pożaru (około 1–2 min) szybki wzrost HRR zaobserwowano w przypadku pożaru nadwozia pojazdu oraz pojazdów BEV#2 i ICEV. Te szybkie wzrosty były spowodowane aktywacją bodźców zapłonowych (palnika propanowego lub tacy z heptanem), a nie szybkim spalaniem próbek. W fazie wzrostu pożaru zapalone pojazdy generowały stopniowo rosnące ciepło i osiągały wartości szczytowe (pHRR) po około 11–17 minutach. W pełni rozwinięte stadia pożaru nie były utrzymywane przez długi czas, za wyjątkiem pojazdu FCEV. Następnie pożary przeszły w fazę zaniku ze stopniowym spadkiem HRR. Na tym etapie zaobserwowano wahania HRR w testach pojazdów BEV#2 i BEV#3 – z powodu serii zdarzeń niestabilności termicznej (TR). Wartości HRR i THR pakietu baterii były mniejsze niż w przypadku pożarów badanych pojazdów, ale również i tu odnotowano wahania spowodowane zjawiskiem niestabilności termicznej.

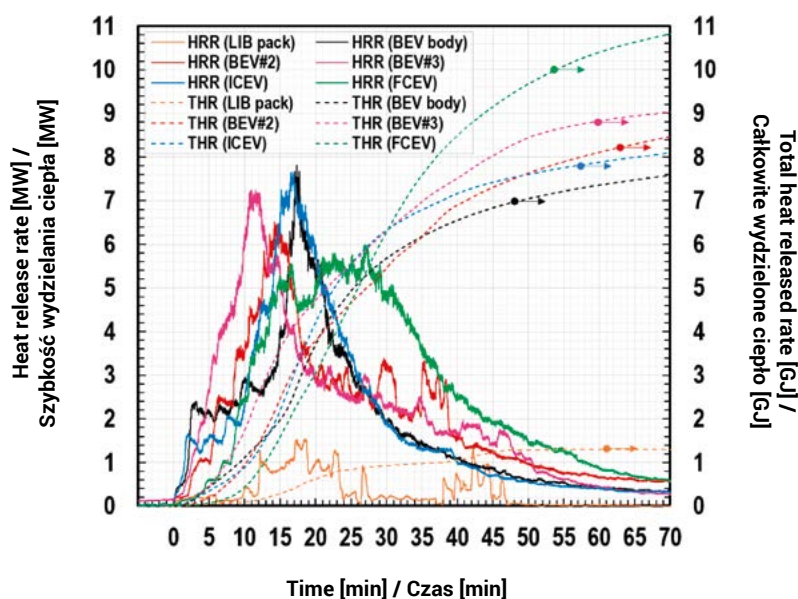


Figure 7. Dependence of HRR and THR on the fire run time of the tested BEV, ICEV, FCEV and battery pack.

Rycina 7. Zależność HRR i THR od czasu przebiegu pożaru badanych pojazdów BEV, ICEV, FCEV i pakietu baterii

Source / Źródło: Kang S., Kwon M., Choi J. Y., Choi S., *Full-scale fire testing of battery electric vehicles*, „Applied Energy” 2023, Vol. 332, 120497, s. 7 [1].

Observation of the research in question led to the conclusion that the body of the electric vehicle had a greater impact on the fire in terms of pHRR and THR than the lithium-ion battery pack. However, the intense jetting of flames from the LIB package accelerated the spread of the fire to neighbouring combustible components, thus leading to the rapid growth of the entire vehicle fire.

The research concludes that first responders should exercise far-reaching caution when approaching the scene of an electric vehicle accident. This is because damage to a lithium-ion battery is impossible to observe from outside the vehicle, and the activation of thermal instability (TR) is unpredictable. Moreover, once it is triggered, the fire develops very quickly.

Project fire curve of a passenger vehicle

Observation, analysis and scientific studies of modern cars have shown that they burn more intensely and can release large amounts of heat in a short period of time. This is mainly due to the larger size of the cars, as well as a change in their production technology. In modern vehicles, heavy metals have been replaced by lightweight materials (plastics, composite materials, light metal alloys), which has increased the amount of combustible materials. Nowadays, plastics and composite materials account for about 50% of a car's volume. These changes are also reflected in the increased risk of fire spreading to neighbouring vehicles and the occurrence of increased fire load in garages [11]. The issue of the increasing amount of plastics in modern cars has been addressed in many publications [11, 17, 18, 19]. The U.S. National Fire Protection Association (NFPA), in its report on the fire hazards of modern vehicles [17], stresses that older units should not be used to assess fires in garages.

Obserwacja przedmiotowych badań doprowadziła do wniosku, że większy wpływ na pożar pojazdu elektrycznego pod względem pHRR i THR miało jego nadwozie aniżeli pakiet baterii litowo-jonowych. Jednak intensywny wyrzut płomieni z pakietu LIB przyspieszył rozprzestrzenianie się pożaru na sąsiednie elementy palne, prowadząc w ten sposób do szybkiego wzrostu pożaru całego samochodu.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano wniosek, iż osoby udzielające pierwszej pomocy powinny zachować daleko idącą ostrożność podczas zbliżania się do miejsca wypadku pojazdu elektrycznego. Wynika to z faktu, iż uszkodzenie baterii litowo-jonowej jest niemożliwe do zaobserwowania z zewnątrz pojazdu, a aktywacja niestabilności termicznej (TR) jest nieprzewidywalna. Ponadto po jej wyzwoleniu pożar rozwija się bardzo szybko.

Projektowa krzywa pożaru pojazdu osobowego

Obserwacje, analizy i badania naukowe nowoczesnych samochodów wykazały, że palą się one intensywniej i w krótkim czasie mogą uwolnić duże ilości ciepła. Spowodowane jest to przede wszystkim większym rozmiarem samochodów, jak również zmianą technologii ich produkcji. W nowoczesnych pojazdach metale ciężkie zostały zastąpione materiałami lekkimi (tworzywami sztucznymi, materiałami kompozytowymi, stopami metali lekkich), co wpłynęło na wzrost ilości materiałów palnych. Obecnie tworzywa sztuczne i materiały kompozytowe stanowią około 50% objętości samochodu. Te zmiany mają również odzwierciedlenie w zwiększonym ryzyku rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie pojazdy oraz występowaniu zwiększonego obciążenia ogniowego w garażach [11]. Problematyka rosnącej ilości tworzyw sztucznych w nowoczesnych samochodach poruszana jest w wielu publikacjach [11, 17, 18, 19]. Amerykańskie

Based on fire test data and analysis of combustible materials – as part of the SUVEREN research project mentioned above – a new design fire curve was developed for conventionally and electrically powered passenger cars (see Figure 8). This curve illustrates the time dependence of the heat release rate (HRR). The peak heat release rate (pHRR) value of 7 MW is reached in 420 seconds.

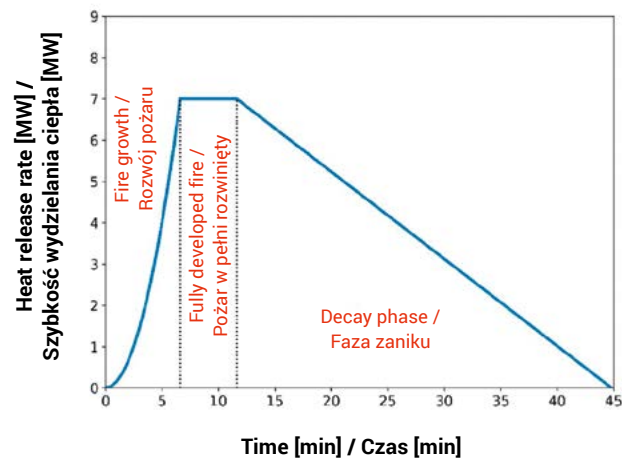


Figure 8. Projected fire curve for vehicles with conventional and electric propulsion systems

Rycina 8. Projektowa krzywa pożaru dla pojazdów z napędem konwencjonalnym i elektrycznym

Source / Źródło: IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH, *Fire Protection Guideline for Car Parks*, Version: 2.0, 2023, s. 3 [11].

Data obtained from fire tests conducted with conventionally powered and electrically powered vehicles provided a reference point for the new design fire curve (see Figure 9) [8].

Dane otrzymane z testów pożarowych prowadzonych z udziałem pojazdów z napędem konwencjonalnym oraz z napędem elektrycznym stanowiły punkt odniesienia dla nowej projektowej krzywej pożaru (zob. ryc. 9) [8].

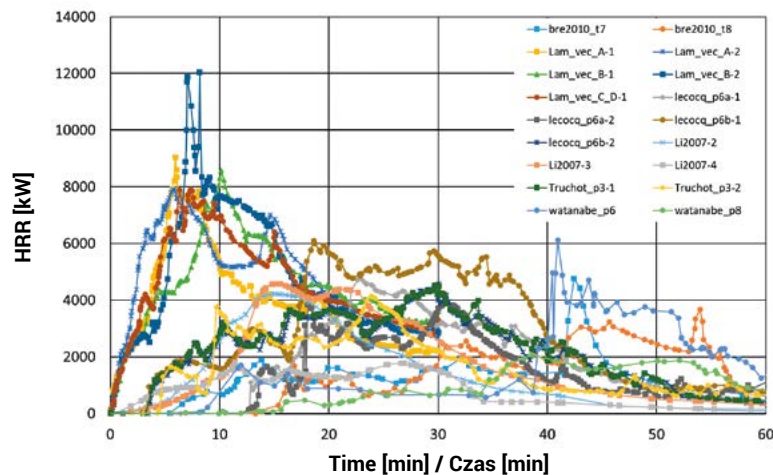


Figure 9. Dataset of fire tests of heat release rates of vehicles with conventional and electric propulsion systems based on literature studies [20–26].

Rycina 9. Zbiór danych z testów pożarowych szybkości wydzielania ciepła pojazdów z napędem konwencjonalnym i elektrycznym na podstawie badań literaturowych [20–26].

Source / Źródło: Kutschenreuter M., Klüh S., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *How electric vehicles change the fire safety design in underground structures*, Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany, 2020, s. 409 [8].

In turn, the figure below shows a comparison of the new design fire curve and HRR values from selected reference test fires. More than 90% of the experimental data is covered by the new design fire curve in terms of the rate of heat release and its maximum value [8].

Z kolei poniższa rycina przedstawia porównanie nowej projektowej krzywej pożaru i wartości HRR z wybranymi referencyjnymi pożarami testowymi. Ponad 90% danych eksperymentalnych jest objętych nową projektową krzywą pożaru pod względem szybkości wydzielania ciepła i jej wartości maksymalnej [8].

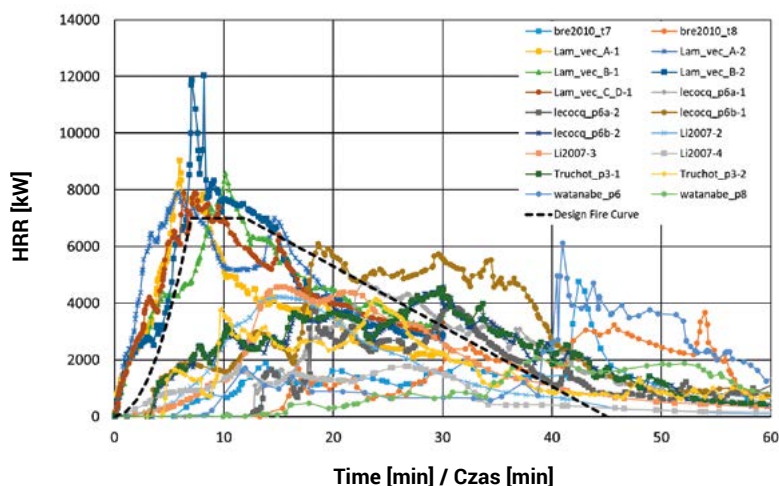


Figure 10. Comparison of the new projected fire curve and literature survey data

Rycina 10. Porównanie nowej projektowej krzywej pożaru oraz danych z badań literaturowych

Source / Źródło: Kutschenreuter M., Klüh S., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *How electric vehicles change the fire safety design in underground structures*, Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany, 2020, s. 409 [8].

CNBOP-PIB's own research

The Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute in Józefów conducts tests on electric vehicle batteries in terms of fire safety. The purpose of this research is, among other things, to evaluate the possibility of damage to batteries subjected to prolonged charging, external flame heating and hotplate heating, as well as to assess the possibility of extinguishing them using water, firefighting equipment and fire blankets. Research has mainly focused on NMC and LTO type modules, which have a long life and very high energy density [27].

The first series of tests was conducted with the LTO module. One of the three tests conducted was to overload the LTO module with 10C current. During the test, an initial light smoke could be observed coming out of the cells, followed by a burst, which was followed by sparks and then flame. The average velocity of gas outflow was 3–5 m/s, while the maximum explosion pressure generated when the safety valve was opened was about 6 bar.

In another test, the LTO module was exposed to a 12–15 kW propane burner fire (the flame from the burner was directed at the side wall of the prismatic cell). During the test, temperatures were measured at 3 points. Its maximum values were respectively:

- $T_{1max} = 369^{\circ}\text{C}$ – for the outer wall of the cell housing on the opposite side of the burner,
- $T_{2max} = 375^{\circ}\text{C}$ – for ejection gases (measurement at a height of 200 mm above the surface of the safety valve),
- $T_{3max} = 121^{\circ}\text{C}$ – for the bottom wall of the cell housing.

As in the previous test, smoke, sparks, flame and a large

Badania własne CNBOP-PIB

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwożarowej – Państwowy Instytut Badawczy w Józefowie prowadzi badania baterii pojazdów elektrycznych pod kątem bezpieczeństwa pożarowego. Celem tych badań jest m.in. ocena możliwości wystąpienia uszkodzenia baterii poddawanych długotrwałemu ładowaniu, ogrzewaniu płomieniem zewnętrznym oraz ogrzewaniu płytą grzewczą, jak również ocena możliwości ich ugaszenia z wykorzystaniem wody, urządzeń gaśniczych, płacht/koców gaśniczych. Badania skupiają się głównie na modułach typu NMC oraz LTO, które charakteryzują się dużą żywotnością i bardzo wysoką gęstością energii [27].

Pierwszą serią badań przeprowadzono z modulem LTO. Jednym z trzech przeprowadzanych testów było przeładowanie modułu LTO prądem 10C. Podczas badania można było zaobserwować wstępnie lekkie zadymienie wydobywające się z ognia, po czym doszło do jego rozerwania, w następstwie czego pojawiły się iskry, a następnie płomień. Średnia prędkość wypływu gazu wyniosła 3–5 m/s, natomiast ciśnienie maksymalne wybuchu wygenerowane podczas otwarcia zaworu bezpieczeństwa wyniosło około 6 barów.

W kolejnym teście moduł LTO został poddany oddziaływaniu ognia z palnika propanowego o mocy 12–15 kW (płomień z palnika został skierowany na boczną ścianę ogniwa pryzmatycznego). W trakcie badania dokonywano pomiaru temperatur w 3 punktach. Jej maksymalne wartości wyniosły odpowiednio:

- $T_{1max} = 369^{\circ}\text{C}$ – dla zewnętrznej ściany obudowy ogniwa po przeciwnej stronie palnika,

release of gas could be seen. At the end of the test, the cell was not damaged, although it remained “swollen” following exposure to thermal radiation. Based on this, it can be concluded that the safety valve used in the cell worked properly.

In the third test, the LTO module was heated using a 5 kW hotplate set up under the module. The obtained results showed an increase in flame temperature during the test to about 950°C. The maximum temperature of the module’s outer casing was 183°C. At the beginning of the test, the release of gaseous thermal decomposition products was evident, followed by ignition and the spread of flame to adjacent cells. The flame reached about 3 meters in height during the test [27].

A second series of tests was conducted with the NMC module. In the first test, a 12–15 kW propane burner was used to verify the effects of fire on the underside of the module. The test was accompanied by a lot of noise created by the flowing gas. The gas emission velocity reached about 12 m/s (measured at a distance of 500 mm). After the test was completed, the module housing was not “swollen” and the module itself remained undamaged.

Another test involved heating the NMC module with a 5 kW hotplate. Measured at 5 measurement points, the maximum temperature values were respectively:

- $T_{1max} = 460^{\circ}\text{C}$ – for the outer casing of the module,
- $T_{2max} = 600^{\circ}\text{C}$ – for the outer wall of the cell,
- $T_{3max} = 932^{\circ}\text{C}$ – for the flame and 300–450°C for the ejection gases (measurement 200 mm above the surface of the safety valve),
- $T_{4max} = 730^{\circ}\text{C}$ – for the outer casing of the module;
- $T_{5max} = 900^{\circ}\text{C}$ – for the module heater from the heating system.

During the test, there were significant volumes of gases coming out of the module, then the safety valve was activated to reduce the internal pressure. Moreover, a violent flame appeared, and after it was blown out, re-ignition occurred due to the escaping gases [27].

The next stage of the research involved evaluating the effectiveness of the extinguishing methods and agents used during the fire of LTO and NMC modules on the production line. The obtained results are shown in Table 2.

Based on the results of the extensive battery testing

- $T_{2max} = 375^{\circ}\text{C}$ – dla gazów wyrzutowych (pomiar na wysokości 200 mm nad powierzchnią zaworu bezpieczeństwa),
- $T_{3max} = 121^{\circ}\text{C}$ – dla dolnej ściany obudowy ogniwa.

Podobnie jak w poprzednim teście, można było dostrzec zadymienie, iskry, płomień i duże uwolnienie gazu. Po zakończeniu badania ogniwo nie było uszkodzone, mimo że pozostało „spęczniałe” w następstwie oddziaływania promieniowania cieplnego. Na tej podstawie można stwierdzić, że zastosowany w ogniwie zawór bezpieczeństwa zadziałał prawidłowo.

W trzecim teście moduł LTO został podgrzany za pomocą płyty grzewczej o mocy 5 kW, ustawionej pod modułem. Otrzymane wyniki wykazały wzrost temperatury płomienia w trakcie testu do około 950°C. Maksymalna temperatura zewnętrznej obudowy modułu wyniosła 183°C. Na początku badania widoczne było uwolnienie gazowych produktów rozkładu termicznego, następnie doszło do zapłonu i rozprzestrzenienia się płomienia na przyległe ogniwa. Płomień w trakcie badania osiągnął około 3 m wysokości [27].

Drugą serię badań przeprowadzono z modułem NMC. W pierwszym teście, do weryfikacji oddziaływania ognia na spodnią część modułu, wykorzystano palnik propanowy o mocy 12–15 kW. Badaniu towarzyszył duży hałas tworzący się wskutek wypływającego gazu. Prędkość emisji gazu dochodziła do około 12 m/s (pomiar w odległości 500 mm). Po zakończonym badaniu obudowa modułu nie była „spuchnięta”, a sam moduł pozostał nieuszkodzony.

Kolejny test polegał na podgrzaniu modułu NMC za pomocą płyty grzewczej o mocy 5 kW. Zmierzone w 5 punktach pomiarowych maksymalne wartości temperatur wyniosły odpowiednio:

- $T_{1max} = 460^{\circ}\text{C}$ – dla zewnętrznej obudowy modułu,
- $T_{2max} = 600^{\circ}\text{C}$ – dla zewnętrznej ścianki ogniwa,
- $T_{3max} = 932^{\circ}\text{C}$ – dla płomienia oraz 300–450°C dla gazów wyrzutowych (pomiar 200 mm nad powierzchnią zaworu bezpieczeństwa),
- $T_{4max} = 730^{\circ}\text{C}$ – dla zewnętrznej obudowy modułu;
- $T_{5max} = 900^{\circ}\text{C}$ – dla grzejnika modułu z układu grzewczego.

W trakcie badania pojawiły się znaczne objętości gazów wydobywających się z modułu, następnie uruchomił się zawór bezpieczeństwa, który redukowało ciśnienie wewnętrzne. Ponadto pojawił się gwałtowny płomień, a po jego zdmuchnięciu doszło do ponownego zapłonu z uwagi na wydobywające się gazy [27].

Następny etap badań dotyczył oceny skuteczności zastosowanych metod i środków gaśniczych podczas pożaru modułów LTO i NMC na linii produkcyjnej. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Table 2. Results of tests conducted on LTO and NMC modules
Tabela 2. Wyniki badań przeprowadzonych na modułach LTO i NMC

Test No. / Nr testu	Module type / Rodzaj modułu	Description of firefighting activities / Opis działań gaśniczych	Results / Wyniki
I	LTO	A dense stream of water was applied to the burning module for 2 minutes, the average water output from the Ø 25 mm hose was 55 dm ³ /min, water fed from three sides of the module / Na płonący moduł podano przez 2 minuty zwarty strumień wody, średni wydatek wody z węża Ø 25 mm wynosił 55 dm ³ /min, woda podawana z trzech stron modułu	<ul style="list-style-type: none"> – there was a flame covering the surface of the module, – during the fire, flames appeared with a range of about 80–150 cm, resulting from the unsealing of the cells, <ul style="list-style-type: none"> – fire was extinguished in less than 2 s, – after the flame was extinguished, the module emitted a limited volume of white-coloured gases, the amount of which decreased with time, – after 2 minutes of water administration, the volume of gases formed did not increase (decreasing trend), – the temperature of the module after extinguishing increased to a maximum value approximately 70°C, <ul style="list-style-type: none"> – in two consecutive tests, similar results were obtained / – występował płomień obejmujący powierzchnię modułu, – w trakcie pożaru pojawiały się płomienie o zasięgu około 80–150 cm, powstające wskutek rozszczelnienia się ogniw, <ul style="list-style-type: none"> – pożar został ugaszony w czasie poniżej 2 s, – po ugaszeniu płomienia moduł wydzielał ograniczoną objętość gazów koloru białego, których ilość zmniejszała się z czasem, <ul style="list-style-type: none"> – po 2 minutach podawania wody objętość powstających gazów nie zwiększała się (tendencja malejąca), – temperatura modułu po zakończeniu gaszenia wzrosła do maksymalnej wartości około 70°C, – w dwóch kolejnych testach uzyskano zbliżone efekty
II	NMC	A diffuse/constant stream of water was applied to the burning module for 2 minutes, average water output from the hose Ø 25 mm was 55 dm ³ /min, water fed from three sides of the module, water was administered 2 times / Na płonący moduł podano przez 2 minuty rozproszony/zwarty strumień wody, średni wydatek wody z węża Ø 25 mm wynosił 55 dm ³ /min, woda podawana z trzech stron modułu, wodę podawano 2 razy	<ul style="list-style-type: none"> – during the fire, there were flames with a range of about 120–150 cm, resulting from the unsealing of the cells, accompanied by a loud, high-pitched sound, <ul style="list-style-type: none"> – fire was extinguished in less than 5 s, – after the flame was extinguished, the module emitted a significant volume of white-coloured gases, the volume of which increased over time, – during the administration of water, the cells were unsealed, accompanied by an explosion effect, – after 5.5 minutes after the end of the water supply, the cell was unsealed and the discharge of gases formed from the decomposing electrolyte, the volume of the resulting gases increases (increasing trend), – the temperature of the module after extinguishing increased to a maximum value approximately 350°C, – after about 8.5 minutes, water was administered a second time to cool the module./ <ul style="list-style-type: none"> – w trakcie pożaru pojawiały się płomienie o zasięgu około 120–150 cm, powstające wskutek rozszczelnienia się ogniw, towarzyszył temu głośny, wysoki dźwięk, – pożar został ugaszony w czasie poniżej 5 s, – po ugaszeniu płomienia moduł wydzielał znaczną objętość gazów koloru białego, których objętość zwiększała się w czasie, – podczas podawania wody nastąpiło rozszczelnienie ogniw, towarzyszył temu efekt wybuchu, – po 5,5 minutach od zakończenia podawania wody nastąpiło rozszczelnienie się ogniw i wyrzut gazów powstających z rozkładającego się elektrolitu, objętość powstających gazów zwiększa się (tendencja rosnąca), – temperatura modułu po zakończeniu gaszenia wzrosła do maksymalnej wartości około 350°C, – po około 8,5 minutach podano po raz drugi wodę w celu schłodzenia modułu

Source / Źródło: Pietrzak M., Bąk D., Twardowski M., Majka I., Chmiel M., Zboina J., *Raport z I Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Bezpieczeństwo pożarowe instalacji fotowoltaicznych, magazynów energii, pojazdów elektrycznych, ich punktów i stacji ładowania, rozwiązań inteligentnego domu”*. Wnioski i rekomendacje, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2023, s. 11 [27].

conducted by the Laboratory of Combustion Processes and Explosions at CNBOP-PIB, the following conclusions have been made.

- NMC modules, compared to LTO modules, burn more violently and are more difficult to extinguish regardless of the type of action taken and the extinguishing agents used,
- a relatively short distance between the nozzle and the source of the fire is required to achieve effective extinguishment with an extinguishing device. Increasing the number of firefighting currents reduces the time it takes to extinguish a battery fire. Experience in extinguishing this type of fire is required (there are physical explosions, fragmentation),
- water makes it possible to extinguish a module fire in a few seconds (LTO modules) or tens of seconds (NMC modules) with a visible cooling effect,
- after extinguishing the fire of NMC and LTO modules with water, there was no re-ignition of “exhaust” gases (no fire appeared),
- the tight application of a fire blanket (intended for batteries) on the module requires personal protective equipment and the presence of at least two trained persons (physical explosions and minor fragmentation occur),
- covering the pre-extinguished module with a fire blanket is an effective way to reduce thermal radiation, the physical effects of cell leakage and, to some extent, the spread of gases,
- fiberglass fire blanket does not exhibit characteristics useful for reducing the effect of fire for NMC modules [27].

Another study conducted by CNBOP-PIB was aimed at acquiring selected fire parameters, i.e. temperatures and thermal radiation fluxes. The tests were conducted for two vehicle fire scenarios simulating an electric vehicle, located in a three-station facility replicating a garage room. Four NMC-type battery modules with a capacity of 102 Ah (each) were used to orchestrate an electric vehicle fire, which were placed under the vehicle. In both scenarios, the simulated electric vehicle was located in the middle position. The neighbouring sites were occupied by conventionally powered vehicles. The first test scenario involved an electric vehicle fire with the participation of an automatically activated local firefighting system, consisting of water distribution piping, a water control and supply system, sprinklers and fire detection, while the second involved an electric vehicle fire without the participation of a firefighting system. The results of the conducted tests authorize the conclusion that the effect of the extinguishing system was a significant reduction in the values of the measured parameters (i.e. temperature and heat flux, along with visible band and IR imaging), relative to the reference fire. As a result, the fire developed in a controlled manner and did not spread to vehicles parked nearby [4].

CNBOP-PIB also tested fire blankets (as part of the assessment of their suitability for use in rescue operations – according to the procedure for testing innovative products) and conducted prototype tests of these products.

The subject of the test was a fire blanket made of silicone-coated fiberglass, which, according to the manufacturer’s statement, can be used as equipment for surface and underground parking lots,

Na podstawie wyników szeroko zakrojonych badań baterii prowadzonych przez Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w CNBOP-PIB sformułowano następujące wnioski:

- moduły NMC, w porównaniu z modułami LTO, palą się gwałtowniej i są trudniejsze do ugaszenia bez względu na rodzaj podejmowanych działań i użyte środki gaśnicze,
- do osiągnięcia skutecznego gaszenia za pomocą urządzenia gaśniczego wymagana jest stosunkowo niewielka odległość dyszy od źródła ognia. Zwiększenie liczby prądów gaśniczych skraca czas ugaszenia pożaru baterii. Wymagane jest doświadczenie w gaszeniu tego typu pożarów (występują wybuchy fizyczne, odłamkowanie),
- woda umożliwia ugaszenie pożaru modułów w ciągu kilku sekund (moduły LTO) lub kilkudziesięciu sekund (moduły NMC) z widocznym efektem chłodzącym,
- po ugaszeniu pożaru modułów NMC i LTO wodą nie dochodziło do ponownego zapłonu gazów „wylotowych” (nie pojawiał się ogień),
- nałożenie w sposób szczelny koca gaśniczego/płachty gaśniczej (przeznaczonej do baterii) na moduł wymaga zastosowania środków ochrony osobistej i obecności co najmniej dwóch przeszkolonych osób (występują wybuchy fizyczne i drobne odłamkowanie),
- przykrycie płachtą wstępnie ugaszonego modułu jest skutecznym sposobem ograniczenia promieniowania cieplnego, fizycznych efektów rozszechnienia ogniwi oraz w pewnym stopniu rozprzestrzeniania się gazów,
- koc gaśniczy wykonany z włókna szklanego nie wykazuje cech przydatnych do ograniczenia efektu pożaru dla modułów NMC [27].

Kolejne badania przeprowadzone przez CNBOP-PIB miały na celu akwizycję wybranych parametrów pożarowych, tj. temperatur i strumieni promieniowania cieplnego. Badania przeprowadzono dla dwóch scenariuszy pożarów pojazdów symulujących pojazd elektryczny, zlokalizowanych w trzystanowiskowym obiekcie odwzorowującym pomieszczenie garażu. Do zaaranżowania pożaru pojazdu elektrycznego użyto czterech modułów baterii typu NMC o pojemności 102 Ah (każdy), które zostały ustawione pod pojazdem. W obu scenariuszach symulowany pojazd elektryczny umiejscowiony był na stanowisku środkowym. Na miejscach sąsiednich znajdowały się pojazdy zasilane konwencjonalnie. Pierwszy scenariusz badań przewidywał pożar pojazdu elektrycznego z udziałem automatycznie uruchomionego miejscowego systemu gaśniczego, składającego się z rurociągów rozprowadzających wodę, systemu sterowania i zasilania w wodę, zraszaczy oraz detekcji pożaru, natomiast drugi dotyczył pożaru pojazdu elektrycznego bez udziału systemu gaśniczego. Wyniki przeprowadzonych badań upoważniają do wniosku, że efektem działania systemu gaśniczego było znaczne obniżenie wartości mierzonych parametrów (tj. temperatury i strumienia cieplnego wraz z obrazem w paśmie widzialnym oraz IR), względem pożaru odniesienia. Dzięki temu pożar rozwinął się w sposób kontrolowany i nie rozprzestrzenił się na zaparkowane obok pojazdy [4].

CNBOP-PIB testowało również płachty gaśnicze (w ramach oceny ich przydatności do stosowania w działaniach ratowniczych – według procedury testowania wyrobów innowacyjnych) oraz prowadziło badania prototypowe tych produktów.

tunnels and electric vehicle charging stations, among other things. The “dry” testing of the fire blanket took place on the premises of the Fire and Rescue Unit of the State Fire Service in Oława, while the fire tests were carried out on the premises of the Centrozłom Plant in Oława. In both cases, the same fire blanket was tested [28].

The testing schedule included:

- placing the fire blanket over vehicles parked in different arrangements – to simulate situations possible in reality, for example, in parking lots or garages,
- multiple unfolding and folding of the fire blanket into the transport package,
- conducting fire tests of passenger cars using fire suppression sheeting and evaluating the performance of the fire blanket,
- washing the fire blanket after application, followed by visual inspection and evaluation of its reusability [28].

The fire drill included fires in two passenger cars. The first test involved a conventional passenger vehicle fire. The wrecked Fiat Siena was used for the project. The car was complete, except for the removed fuel tank. In order to increase the fire load and burning intensity, a tire was placed inside the vehicle, and the rear seat was soaked in about 3 dm³ of unleaded gasoline. Another car was parked nearby so as to impede access to the test vehicle [28].

The fire was initiated by setting fire to the rear couch with a gas burner. Approximately 4 minutes into the test, when the fire was developed and its temperature exceeded 650°C (the maximum measurement range of the thermal imaging camera), a fire blanket was applied to the vehicle and then pressed against the vehicle and the ground to seal the cover and limit oxygen access (the first method of application). The fire blanket was kept on the vehicle for 30 minutes (as recommended by the manufacturer). During this time, the temperature was measured at 5-minute intervals using a thermal imaging camera. After 30 minutes, the fire blanket was removed and the vehicle was observed for visible flames and recurrence of burning. The flames were not visible, but after about 30 seconds a recurrence of flame combustion was noticed in the tire, which was on the rear bench seat. No recurrence of flame combustion was observed on other vehicle components. After the fire test, the fire blanket was visually inspected to detect any damage or burn-through. It was then washed with water and prepared for reuse in a second test fire [28].

A Seat Toledo vehicle (complete, but with the fuel tank removed) was used for the second fire test. No additional combustible materials were put inside it, nor was the rear bench seat soaked in flammable liquid, but in order to make it look like an electric vehicle fire, 4 NMC-type lithium-ion batteries with a capacity of 102 Ah were placed under the wrecked vehicle on concrete pedestals. The batteries were set up so that the safety valves, hidden under a plastic cover, were arranged in different directions – to allow observation during a fire of the gases escaping from them. A hole was made in the body of the test vehicle, under the rear bench seat, so that the fire gases escaping from one battery would cause the fire to spread to the interior of the vehicle (this was a simulation of fire entering the interior, since electric vehicles have batteries with a larger capacity than those used in the tests). The fire was initiated by acting on the batteries with

Przedmiotem testowania była płachta wykonana z włókna szklanego pokrytego silikonem, która zgodnie z deklaracją producenta może stanowić m.in. wyposażenie parkingów naziemnych i podziemnych, tuneli oraz stacji ładowania pojazdów elektrycznych. Testowanie płachty „na sucho” odbyło się na terenie Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej PSP w Oławie, natomiast testy pożarowe przeprowadzono na terenie Zakładu Centrozłom w Oławie. W obu przypadkach testowano tę samą płachtę gaśniczą [28].

Program testowania przewidywał:

- nakładanie płachty na pojazdy zaparkowane w różnych układach – w celu zasymulowania możliwych w rzeczywistości sytuacji np. na parkingach lub garażach,
- wielokrotne rozkładanie i składanie płachty gaśniczej do opakowania transportowego,
- przeprowadzenie testów pożarowych samochodów osobowych z zastosowaniem płachty gaśniczej do tłumienia pożaru oraz ocenę właściwości użytkowych płachty,
- mycie płachty po zastosowaniu, a następnie jej oględziny i ocenę możliwości ponownego wykorzystania [28].

Ćwiczenia pożarowe obejmowały pożary dwóch samochodów osobowych. Pierwszy test dotyczył pożaru pojazdu osobowego z napędem konwencjonalnym. Wykorzystano do niego wrak Fiata Sieny. Samochód był kompletny, z wyjątkiem wymontowanego zbiornika paliwa. Celem zwiększenia obciążenia ogniowego oraz intensywności palenia do wnętrza pojazdu włożono oponę, a tylną kanapę nasączono benzyną bezołowiową w ilości ok. 3 dm³. W pobliżu zaparkowany został inny samochód, tak by utrudnić dostęp do testowanego pojazdu [28].

Pożar zainicjowany został przez podpalenie tylnej kanapy palnikiem gazowym. Po około 4 minutach od rozpoczęcia testu, kiedy pożar był rozwinięty, a jego temperatura przekraczała 650°C (maksymalny zakres pomiaru kamery termowizyjnej), na samochód nałożono płachtę gaśniczą, a następnie dociśnięto ją do pojazdu i podłóża, by uszczelnić przykrycie i ograniczyć dostęp tlenu (pierwszy sposób zastosowania). Płachta była utrzymywana na pojeździe przez 30 minut (zgodnie z zaleceniami producenta). W tym czasie za pomocą kamery termowizyjnej mierzono temperaturę w odstępach 5-minutowych. Po 30 minutach płachtę zdjęto i obserwowano pojazd pod kątem widocznych płomieni oraz nawrotu palenia. Płomienie nie były widoczne, ale po upływie około 30 sekund zauważono nawrót spalania płomieniowego opony, która znajdowała się na tylnej kanapie. Na pozostałych elementach pojazdu nawrotów spalania płomieniowego nie zaobserwowano. Po przeprowadzonym teście pożarowym płachtę poddano oględzinom, celem wykrycia ewentualnych uszkodzeń i przepaleń. Następnie przemyto ją wodą oraz przygotowano do ponownego użycia w drugim pożarze testowym [28].

Do drugiego testu pożarowego wykorzystano pojazd marki Seat Toledo (kompletny, lecz z wymontowanym zbiornikiem paliwa). Do jego wnętrza nie wkładano dodatkowych materiałów palnych, ani nie nasączono tylnej kanapy cieczą palną, jednak celem upozorowania pożaru pojazdu elektrycznego, pod wrakiem pojazdu, na betonowych cokołach, ustawiono 4 baterie litowo-jonowe typu NMC o pojemności 102 Ah. Baterie ustawiono w taki sposób, aby zawory bezpieczeństwa, ukryte pod pokrywą z tworzywa sztucznego, były ułożone w różną stronę – celem umożliwienia obserwacji podczas

three gas burners for about 3.5 minutes. After a minute of heating, the phenomenon of thermal instability (TR) was observed in one of the batteries, and the process followed in subsequent cells stacked under the vehicle. After about 4 minutes, the burners were moved away and the fire was observed to develop, and after another 3 minutes, the car's right front window was broken to bring oxygen to the vehicle's interior and cause the fire to develop further. Approximately 7 minutes into the test, when the vehicle's fire was already developed and the fire temperature exceeded 650°C¹, a fire blanket was applied to the vehicle and spread on the ground to increase the tightness of the cover and limit the access of oxygen (the second method of application). The same blanket was used a second time, applying it with the same side. The fire blanket was kept on the vehicle for 30 minutes. During this time, temperature measurements were taken with a thermal imaging camera at 5-minute intervals. After 30 minutes, the fire blanket was removed and the vehicle was observed for visible flames and recurrence of burning. The flames were not visible, and there was no recurrence of burning for 5 minutes and 30 seconds. The batteries underneath the vehicle continued to maintain a temperature of more than 350°C and required further cooling. For this purpose, they were immersed in a metal tank with water (volume of 1 m³) for about 24 hours [28].

Fire tests have shown that the fire blanket effectively isolates oxygen access to the combustion zone and suppresses the vehicle fire, as well as isolating the impact of the fire on the surrounding area. In addition, it was not damaged or burned (the fire blanket showed traces of sooting and exposure to high temperatures) and, after cleaning, is reusable – it can be used repeatedly for rescue operations. Once the blanket is removed, it is necessary to observe the vehicle for recurring smoke and, if necessary, cool it down and extinguish it with water. In case of electrically-powered vehicles, further temperature monitoring and battery cooling is required after the blanket is removed [28].

Prototype tests of fire blankets conducted at CNBOP-PIB consisted of covering the fire source with them and measuring temperature and thermal radiation. Several fire tests were performed – on test stands with a cage and on a test stand with a wrecked vehicle [30].

The first test was conducted on a testing ground with a cage. The test used 20 litres of heptane, which burned freely for 1 minute. After that, a fire blanket was applied and then removed after 10 minutes. The flame did not appear.

The second test was carried out on a cage testing ground, using 20 litres of heptane, 2 lithium-ion batteries (charged to 60%) and several pine beams. Heptane burned freely for 90 seconds, after which the batteries began to burn. After that, a fire blanket was applied, which was removed after about 22 minutes. After the fire blanket was removed, flames appeared.

The third test was conducted in the testing hall, using the same combustible materials as the second test, with a fire blanket used to extinguish the fire. In this test, the heptane burned freely for more than 2 minutes, after which the batteries began

pożaru wydostających się z nich gazów. W karoserii testowanego pojazdu, pod tylną kanapą wykonano otwór, tak aby gazy pożarowe wydostające się z jednej baterii spowodowały rozprzestrzenienie się pożaru do wnętrza pojazdu (była to symulacja przedostania się ognia do wnętrza, ponieważ pojazdy elektryczne mają baterie o większej pojemności, niż te wykorzystane podczas testów). Pożar zainicjowany został poprzez oddziaływanie na baterie trzema palnikami gazowymi przez około 3,5 minuty. Po minucie ogrzewania zaobserwowano zjawisko niestabilności termicznej (TR) jednej z baterii, po czym proces ten następował w kolejnych ogniwach ułożonych pod pojazdem. Po upływie około 4 minut palniki odsunięto i obserwowano rozwój pożaru, a po kolejnych 3 minutach wybito przednią prawą szybę samochodu, aby doprowadzić tlen do wnętrza pojazdu i spowodować dalszy rozwój pożaru. Po około 7 minutach od rozpoczęcia testu, kiedy pożar pojazdu był już rozwinięty, a temperatura pożaru przekraczała 650°C¹, na pojazd nałożono płachtę gaśniczą i rozłożono ją na podłożu, aby zwiększyć szczelność przykrycia oraz ograniczyć dostęp tlenu (drugi sposób zastosowania). Po raz drugi wykorzystano tę samą płachtę, nakładając ją tą samą stroną. Płachta gaśnicza była utrzymywana na pojeździe przez 30 minut. W tym czasie w odstępach 5-minutowych dokonywano pomiarów temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Po 30 minutach płachtę zdjęto i obserwowano pojazd pod kątem widocznych płomieni oraz nawrotu palenia. Płomienie nie były widoczne, a przez 5 minut i 30 sekund nie doszło do nawrotu palenia. Baterie znajdujące się pod pojazdem nadal utrzymywały temperaturę ponad 350°C i wymagały dalszego chłodzenia. W tym celu zanurzono je w metalowym zbiorniku z wodą (objętość 1 m³) na około 24 godzin [28].

Testy pożarowe wykazały, że płachta gaśnicza skutecznie izoluje dostęp tlenu do strefy spalania i tłumi pożar pojazdu, a także izoluje oddziaływanie pożaru na otoczenie. Ponadto nie uległa uszkodzeniu, ani przepaleniu (na płachcie widoczne były ślady okopcenia oraz oddziaływania wysokiej temperatury) i po oczyszczeniu nadaje się do ponownego użycia – może być wielokrotnie wykorzystywana do działań ratowniczych. Po zdjęciu płachty konieczna jest obserwacja pojazdu pod kątem nawrotów palenia i w razie potrzeby schładzanie oraz dogaszanie go wodą. W przypadku pojazdów z napędem elektrycznym, po zdjęciu płachty konieczna jest dalsza obserwacja temperatury oraz schładzanie baterii [28].

Przeprowadzone w CNBOP-PIB badania prototypowe płacht/koców gaśniczych polegały na przykrywaniu nimi źródła ognia i pomiarach temperatury oraz promieniowania cieplnego. Wykonano kilka testów pożarowych – na stanowiskach badawczych z klatką oraz na stanowisku badawczym z wrakiem pojazdu [30].

Pierwszy test przeprowadzono na poligonie badawczym z klatką. Do badania wykorzystano 20 litrów heptanu, który palił się swobodnie przez 1 minutę. Po tym czasie nałożono płachtę gaśniczą, a następnie zdjęto ją po 10 minutach. Płomień nie pojawił się.

Test drugi przeprowadzono na poligonie badawczym z klatką, przy wykorzystaniu 20 litrów heptanu, 2 baterii litowo-jonowych (naładowanych do 60%) i kilku sosnowych belek. Heptan palił się swobodnie przez 90 sekund, po czym zaczęły palić się baterie.

¹ The evaluation criterion adopted on the basis of the Latvian standard no. LVS 1071:2022 Car fire blankets [29].

¹ Kryterium oceny przyjęte na podstawie lotewskiej normy nr LVS 1071:2022 Car fire blankets [29].

to burn. After that, a fire blanket was applied, which was removed after about 25 minutes. After the fire blanket was removed, the flames reappeared.

Another fire test was conducted on a testing ground using a wrecked economy-class car, which used a tire (located in the trunk), wood and heptane (placed in trays in place of the removed seats) as fuel. Fire blankets, including one made of fiberglass, were used to extinguish the simulated fire [30].

The results of the tests confirmed that fire blankets reduce radiant heat and temperature to control the fire and prevent its spread. The tested products exhibited suppression properties – they did not extinguish the fire, but suppressed the fire source [30].

Main conclusions and generalizations based on the analysis of survey results

Scientific studies and fire tests involving lithium-ion batteries and electric-powered vehicles conducted in many countries, including Poland, show that the rate of heat release during an electric vehicle fire is similar to that of a similarly sized conventionally powered vehicle. However, it should be noted that modern cars (both conventionally and electrically powered) burn more intensely – due to the increased amounts of combustible materials used in their production. Therefore, the test results for “older” and those currently manufactured vehicles should be reflected in the fire risk assessment of garages. In order to consider the fire behaviour of modern passenger cars, a design fire curve developed by a research team within the SUVEREN research project can be used, which assumes that a peak heat release rate of 7 MW should be expected in the event of a fire in modern passenger cars (both conventionally and electrically powered).

Scientific studies have also shown that higher battery charge levels correspond to faster total heat release (THR) and higher peak heat release rate (pHRR). However, due to design differences, including the coverage of the vehicle’s battery, the development of an electric vehicle fire may be different from those of the already well-known conventionally powered vehicles. Observation of ongoing research has shown that to a greater extent, an electric vehicle’s fire – in terms of THR and pHRR – comes from its body, not from the lithium-ion battery. However, the intense jetting of flames from the battery pack accelerates the spread of the fire to adjacent combustible components, thus leading to the rapid development of a fire involving the entire electric vehicle. Tests conducted on lithium-ion batteries have shown that the thermal instability phenomenon occurring in the battery is accompanied by: an increase in temperature, great noise - due

Po tym czasie nałożono płachtę gaśniczą, którą zdjęto po około 22 minutach. Po zdjęciu płachty gaśniczej pojawiły się płomienie.

Trzeci test przeprowadzono w hali badawczej, z wykorzystaniem takich samych materiałów palnych jak w przypadku testu drugiego, przy czym do gaszenia pożaru użyto koca gaśniczego. W tej próbie heptan palił się swobodnie ponad 2 minuty, po czym zaczęły palić się baterie. Po tym czasie nałożono koc gaśniczy, który zdjęto po około 25 minutach. Po zdjęciu koca gaśniczego ponownie pojawiły się płomienie.

Kolejne testy pożarowe przeprowadzono na poligonie badawczym z wykorzystaniem wraku samochodu klasy ekonomicznej, w którym jako paliwo zastosowano oponę (umieszczoną w bagażniku), drewno oraz heptan (umieszczony na tacach w miejscu wymontowanych foteli). Do gaszenia zasymulowanego pożaru wykorzystano płachty gaśnicze, w tym jedną wykonaną z włókna szklanego [30].

Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że płachty/koce gaśnicze ograniczają promieniowanie ciepłe oraz temperaturę, co pozwala na kontrolę pożaru i zabezpieczenie przed jego rozprzestrzenieniem się. Badane produkty wykazywały właściwości tłumiące – nie gasiły pożaru, lecz tłumiły źródło ognia [30].

Główne wnioski i uogólnienia na podstawie analizy wyników badań

Przeprowadzone w wielu państwach, w tym w Polsce, badania naukowe oraz testy pożarowe z udziałem baterii litowo-jonowych oraz pojazdów z napędem elektrycznym dowodzą, że szybkość wydzielania ciepła podczas pożaru pojazdu elektrycznego jest zbliżona do szybkości wydzielania się ciepła podczas pożaru podobnej wielkości pojazdu z napędem konwencjonalnym. Zwrócenia uwagi wymaga natomiast fakt, iż nowoczesne samochody (zarówno te z napędem konwencjonalnym, jak i z napędem elektrycznym) palą się intensywniej – z uwagi na zwiększone ilości materiałów palnych wykorzystywanych do ich produkcji. Dlatego też wyniki badań dla „starszych” i tych aktualnie produkowanych pojazdów powinny znajdować odzwierciedlenie w ocenie zagrożenia pożarowego w garażach. W celu uwzględnienia zachowania się podczas pożaru nowoczesnych samochodów osobowych można wykorzystać projektową krzywą pożaru, opracowaną przez zespół badawczy w ramach projektu badawczego SUVEREN, która zakłada, iż w przypadku pożaru nowoczesnych samochodów osobowych (z napędem konwencjonalnym oraz z napędem elektrycznym) należy spodziewać się szczytowej szybkości wydzielania ciepła wynoszącej 7 MW.

Badania naukowe wykazały także, że wyższy poziom naładowania baterii odpowiada szybszemu całkowitemu wydzielaniu ciepła (THR) i wyższej szczytowej szybkości wydzielania ciepła (pHRR). Z uwagi na różnice konstrukcyjne, w tym objęcie pożarem baterii pojazdu, rozwój pożaru pojazdu elektrycznego może być jednak inny niż tych dobrze już znanych pojazdów z napędem konwencjonalnym. Obserwacja prowadzonych badań dowiodła, że w większym stopniu pożar pojazdu elektrycznego – pod względem THR i pHRR – pochodzi z jego nadwozia, a nie z baterii litowo-jonowej. Jednak intensywny wyrzut płomieni z pakietu baterii przyspiesza rozprzestrzenianie się pożaru na sąsiednie elementy palne, prowadząc

to gases escaping from the battery, and intense flame ejection, which can reach heights of up to 2–3 meters. Studies have also shown that NMC-type batteries burn more violently and are more difficult to extinguish, compared to LTO and LFP batteries. Differences were also shown in the fire behaviour of prismatic and cylindrical cell batteries – prismatic cell batteries burned much longer and reached lower temperatures, compared to cylindrical cell batteries, which burned out completely in a short time (20 minutes) during testing. The results of the tests also confirm that the battery cover has an impact on at least the early spread of a fire – the heat released by the first cracked cells is trapped inside the battery – and that the development of a lithium-ion battery fire (particularly the speed of its spread) depends on ventilation conditions.

Scientific studies and fire tests conducted in many countries also prove that the pollutants emitted during an electric vehicle fire are different from the emissions emitted during a conventional vehicle fire. Electrically powered vehicle fires cause more hydrogen fluoride emissions than conventionally powered vehicle fires. Moreover, other toxic compounds such as hydrogen phosphide, F-aerosols, fluorine phosphate salts in the electrolyte, and the metals nickel, cobalt, lithium, manganese from the battery chemistry are also released during an electric vehicle fire, which can cause severe staining of firefighters' clothing and protective equipment, as well as contamination of firefighting water. This poses a major threat to the rescuers, especially in underground infrastructure, where firefighting of these vehicles is more difficult and the ability to dilute the toxic products of combustion is limited.

During the research, it was proven that water is the most effective extinguishing agent in extinguishing electric vehicles and lithium-ion batteries, due to its cooling properties. Significant amounts are needed to extinguish an electric vehicle fire and cool the battery. The research and fire tests carried out confirm that fire suppression systems, including dedicated equipment, by reducing the temperature and heat flux, are able to ensure control of the spread of fire and meet the required protection objectives in the event of an electric vehicle fire in a building facility. The ongoing research confirms the ability not only to control the spread of an electric vehicle fire to neighbouring vehicles, but also to provide structural protection for the facility.

New methods and techniques are being refined and proposed for extinguishing electric vehicle fires. Among them studied were: the use of a fire extinguishing lance to directly cool the modules in the battery case. Studies have shown that this solution requires dedicated preparation and training of firefighters, as well as the ability to directly approach/access the fire vehicle. Research has confirmed that improper handling and use of the firefighting lance can lead to electrocution of firefighters, so additional research and training are still needed to make this extinguishing technique more widespread. An additional formal problem that needs to be solved for the use of these firefighting techniques is the interference with the design of the batteries in the vehicle – the manufacturers of batteries, as well as electric vehicles currently mostly do not specify conditions for the use of such firefighting devices.

w ten sposób do szybkiego rozwoju pożaru, obejmującego cały pojazd elektryczny. Przeprowadzone badania baterii litowo-jonowych wykazały, że zachodzącemu w baterii zjawisku niestabilności termicznej towarzyszą: wzrost temperatury, duży hałas – wskutek wydostających się z baterii gazów oraz intensywny wyrzut płomieni, które mogą osiągnąć wysokość nawet 2–3 m. Badania dowiodły również, że baterie typu NMC palą się gwałtowniej i są trudniejsze do ugaszenia, w porównaniu z bateriami LTO i LFP. Różnice wykazano także w zachowaniu się podczas pożaru baterii z ogniwami pryzmatycznymi i cylindrycznymi – baterie z ogniwami pryzmatycznymi spalają się znacznie dłużej i osiągają niższe temperatury, w porównaniu z bateriami z ogniwami cylindrycznymi, które podczas badań w niedługim czasie (20 minut) ulegały całkowitemu wypaleniu. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają także, że osłona baterii ma wpływ przynajmniej na wczesne rozprzestrzenianie się pożaru – ciepło uwalniane przez pierwsze pękające ogniwa jest zatrzymywane wewnątrz baterii – oraz że rozwój pożaru baterii litowo-jonowej (w szczególności prędkość jego rozprzestrzeniania się) uzależniony jest od warunków wentylacji.

Przeprowadzone w wielu państwach badania naukowe oraz testy pożarowe dowodzą również, że zanieczyszczenia powstałe podczas pożaru pojazdu z napędem elektrycznym różnią się od emisji zanieczyszczeń wydzielających się podczas pożaru pojazdu z napędem konwencjonalnym. Pożary pojazdów z napędem elektrycznym powodują większą niż pożary pojazdów z napędem konwencjonalnym emisję fluorowodoru. Ponadto podczas pożaru pojazdu elektrycznego wydzielają się też inne toksyczne związki takie jak: fosforowódór, F-aerozole, sole fosforanu fluoru w elektrolicie oraz pochodzące ze składu chemicznego baterii metale: nikiel, kobalt, lit, mangan, które mogą powodować silne zanieczyszczenie ubrań oraz sprzętu ochronnego strażaków, jak również zanieczyszczenie wody gaśniczej. Stanowi to duże zagrożenie dla ratowników, szczególnie w podziemnej infrastrukturze, gdzie gaszenie pożarów tych pojazdów jest trudniejsze, a możliwości rozcieńczania toksycznych produktów spalania są ograniczone.

Podczas badań udowodniono, że woda jest najskuteczniejszym środkiem gaśniczym w gaszeniu pojazdów elektrycznych oraz baterii litowo-jonowych, z uwagi na jej właściwości chłodzące. Do ugaszenia pożaru pojazdu elektrycznego i schładzania baterii potrzebne są jej znaczne ilości. Przeprowadzone badania i testy pożarowe potwierdziły, że instalacje gaśnicze, w tym dedykowane urządzenia, poprzez obniżenie temperatury i strumienia ciepłego, są w stanie zapewnić kontrolę rozprzestrzeniania się pożaru i spełnić wymagane cele ochrony w przypadku pożaru pojazdu elektrycznego w obiekcie budowlanym. Prowadzone badania potwierdzają możliwość nie tylko kontroli rozprzestrzeniania się pożaru pojazdu elektrycznego na sąsiednie pojazdy, lecz również zapewnienia ochrony konstrukcji obiektu.

Do gaszenia pożarów pojazdów z napędem elektrycznym doskonalone i proponowane są nowe metody i techniki. Wśród nich badano m.in. zastosowanie lancy gaśniczej do bezpośredniego chłodzenia modułów w obudowie baterii. Przeprowadzone badania dowiodły, że rozwiązanie to wymaga dedykowanego przygotowania i wyszkolenia strażaków, jak również możliwości bezpośredniego podejścia/dostępu do pojazdu objętego pożarem. Badania potwierdziły, że niewłaściwa obsługa i użycie lancy gaśniczej może

Fire blankets tested in Poland and around the world have demonstrated their ability to suppress and control an electric vehicle fire, but in the case of a developed fire, they may no longer be an effective means of fire control. Furthermore, after removing the fire blanket, it is necessary to continue to monitor the vehicle for recurrence of smoke, as well as to monitor the temperature of the vehicle battery and cool it down with water. In case of extinguishing a battery module fire, the fire blanket did not show characteristics useful for reducing the effect of fire for NMC battery modules. It should also be emphasized that applying a fire blanket in an airtight manner to a burning lithium-ion battery or electric vehicle involved in a fire requires the use of appropriate protective measures and teamwork by at least two trained rescuers.

Conclusion

An analysis of the available results of scientific research, experimental studies, CNBOP-PIB's own research and the literature on the subject leads to the reasonable conclusion that the dangers of electrically powered vehicles are not greater than those of conventionally powered vehicles, but are to some extent different due to their use of a different power source, namely batteries. Based on an analysis of the literature on the subject and the results of research, these risks undoubtedly include fire, electrocution, inhalation and dermal penetration of toxic combustion products and compounds emitted from batteries involved in a fire, as well as the explosion of chemical compounds resulting from reactions occurring during battery failure [4]. Additional risks may also come from the charging infrastructure. In addition to the risk of electrocution or negative electrical effects on the charging vehicle (which can lead to thermal instability of the battery), a fire can also occur due to a short circuit, overload or surge at the vehicle charging site [4]. All of these risks must be taken into account both in the conduct of rescue operations involving electric vehicles and in fire safety requirements for building facilities where electric vehicles are parked and charged.

Conducting rescue operations during fires involving electrically-powered vehicles requires a new approach from the emergency services – taking into account the risks already known to conventionally-powered vehicles, as well as those completely new ones arising from the design and operation of electric propulsion. Firefighters should know these risks and how to deal with them. Properly preparing them to carry out such activities is important both in terms of helping those involved in such incidents and increasing their chances of survival, as well as ensuring their own safety.

In Poland, emergency services do not yet have much experience in carrying out this type of operation, if only because the number of fires involving electrically powered vehicles is not large

doprowadzić do porażenia prądem strażaka, dlatego dla upowszechnienia tej techniki gaszenia nadal potrzebne są dodatkowe badania i szkolenia. Dodatkowy problem formalny wymagający rozwiązania dla stosowania tych technik gaśniczych stanowi ingerencja w konstrukcję baterii w pojeździe – producenci baterii, jak i pojazdów z napędem elektrycznym aktualnie w większości nie określają warunków dla użycia takich urządzeń gaśniczych.

Testowane w Polsce i na świecie płachty/koce gaśnicze wykazały się zdolnością tłumienia i kontroli pożaru pojazdu elektrycznego, jednak w przypadku pożaru rozwiniętego mogą nie stanowić już skutecznego środka kontroli pożaru. Ponadto po zdjęciu płachty/koca gaśniczego konieczna jest dalsza obserwacja pojazdu pod kątem nawrotów palenia, a także monitorowanie temperatury baterii pojazdu i schładzanie jej wodą. W przypadku gaszenia pożaru modułu baterii koc gaśniczy nie wykazywał cech przydatnych do ograniczenia efektu pożaru dla modułów baterii NMC. Podkreślenia wymaga również fakt, iż nałożenie w sposób szczelny płachty/koca gaśniczego na palącą się baterię litowo-jonową lub pojazd elektryczny objęty pożarem wymaga zastosowania odpowiednich środków ochronnych oraz pracy zespołowej co najmniej dwóch przeszkolonych ratowników.

Podsumowanie

Analiza dostępnych wyników badań naukowych, eksperymentalnych, badań własnych CNBOP-PIB i literatury przedmiotu prowadzi do uzasadnionego wniosku, iż zagrożenia ze strony pojazdów z napędem elektrycznym nie są większe niż w przypadku pojazdów z napędami konwencjonalnymi, lecz są w pewnym zakresie odmienne z uwagi na zastosowanie w nich innego źródła zasilania, czyli baterii. Opierając się na analizie literatury przedmiotu oraz wynikach badań, do zagrożeń tych niewątpliwie zaliczyć można pożar, porażenie prądem elektrycznym, wnikanie przez drogi oddechowe oraz skórę toksycznych produktów spalania i związków wydzielających się z objętych pożarem baterii, jak również wybuch związków chemicznych powstałych w wyniku reakcji zachodzących podczas awarii baterii [4]. Dodatkowe zagrożenia mogą również pochodzić od infrastruktury ładowania. Poza zagrożeniem porażenia prądem elektrycznym bądź negatywnego oddziaływania elektrycznego na ładujący się pojazd (które może doprowadzić do niestabilności termicznej baterii), z powodu zwarcia, przeciążenia lub przepięcia, w miejscu ładowania pojazdu również może dojść do pożaru [4]. Wszystkie te zagrożenia muszą być uwzględnione zarówno podczas prowadzenia działań ratowniczych z udziałem pojazdów z napędem elektrycznym, jak i w wymaganiach w zakresie bezpieczeństwa pożarowego dla obiektów budowlanych, w których parkowane oraz ładowane są pojazdy z napędem elektrycznym.

Prowadzenie działań ratowniczych podczas pożarów pojazdów z napędem elektrycznym wymaga od służb ratowniczych nowego podejścia – uwzględnienia zagrożeń już znanych w przypadku pojazdów z napędami konwencjonalnymi, jak i tych całkowicie nowych, wynikających z konstrukcji i sposobu działania napędu elektrycznego. Strażacy powinni znać te zagrożenia i umieć sobie z nimi radzić. Odpowiednie przygotowanie ich do prowadzenia tego typu działań ma istotne znaczenie zarówno w kontekście udzielania pomocy osobom uczestniczącym w takich zdarzeniach

on a national scale [31]. Therefore, it is worthwhile to highlight the experience already gathered and the results of studies and research carried out in other countries. Undoubtedly, such a compendium of basic knowledge for rescuers can be a guide entitled *Conducting rescue operations during incidents involving electrically powered vehicles*, developed by CNBOP-PIB in cooperation with the representatives of the Headquarter of the State Fire Service, the Polish Alternative Fuels Association and the Faraday Institution of Newcastle University in the UK [4], as well as the *Standard rules of conduct during incidents with electric and hybrid vehicles* published by the National Fire Service Headquarters [32].

It should also be emphasized that the technology for the production of lithium-ion batteries that equip electric vehicles is changing dynamically, so it is crucial to continue scientific research and fire testing in the subject area.

i zwiększenia ich szans na przeżycie, jak i zapewnienia bezpieczeństwa im samym.

W Polsce służby ratownicze nie mają jeszcze zbyt bogatego doświadczenia w prowadzeniu tego rodzaju działań, chociażby z uwagi na niedużą w skali kraju liczbę pożarów z udziałem pojazdów z napędem elektrycznym [31]. Dlatego warto przybliżyć zebrane już doświadczenia i wyniki badań oraz analiz przeprowadzonych w innych państwach. Niewątpliwie takie kompendium podstawowej wiedzy dla ratowników może stanowić poradnik pt. *Prowadzenie działań ratowniczych podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem elektrycznym*, opracowany przez pracowników CNBOP-PIB we współpracy z przedstawicielami Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej, Polskiego Stowarzyszenia Paliw Alternatywnych i Instytucji Faradaya Uniwersytetu Newcastle w Wielkiej Brytanii [4] oraz opublikowane przez Komendę Główną Państwowej Straży Pożarnej *Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami z napędem elektrycznym i hybrydowym* [32].

Zwrócenia uwagi wymaga również fakt, iż technologia produkcji baterii litowo-jonowych, stanowiących wyposażenie pojazdów z napędem elektrycznym dynamicznie się zmienia, dlatego kluczowe jest kontynuowanie badań naukowych i testów pożarowych w przedmiotowym zakresie.

Literature / Literatura

- [1] Kang S., Kwon M., Choi J.Y., Choi S., *Full-scale fire testing of battery electric vehicles*, „Applied Energy” 2023, Vol. 332, 120497.
- [2] <https://wysokienapiecie.pl/krotkie-spiecie/pspa-pzpm-liczba-rejestracji-aut-osobowych-z-wtyczk-wzros-a-o-39-r-r-w-i-ix-2023/> [dostęp: 03.11.2023].
- [3] Zboina J., Kielin J., Bugaj G., Zalech J., Bąk D., *Działania ratowniczo-gaśnicze podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem alternatywnym. Pojazdy elektryczne*, SFT Vol. 60 Issue 2, 2022, 8–40.
- [4] Kielin J., Kołodziejczyk T., Majka I., Tępiński J., Zboina J., *Prowadzenie działań ratowniczych podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem elektrycznym*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2023.
- [5] Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych (Dz.U. 2023 poz. 875 z późn. zm.).
- [6] <https://www.suveren-nec.info/suveren-brandversuche/> [dostęp: 25.10.2023].
- [7] Kutschenreuter M., Feltmann A., Usner T., Leismann F., *Brandschutz in Tunnelanlagen bei Fahrzeugen mit neuen Energieträgern (NET): Erste Erkenntnisse aus Realbrandversuchen*, Forschung + Praxis 53, STUVA-Tagung 2019 in Frankfurt am Main, 2019, 392–397.
- [8] Kutschenreuter M., Klüh S., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *How electric vehicles change the fire safety design in underground structures*, Ninth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Munich, Germany, March 11–13, 2020, 405–418.
- [9] Kutschenreuter M., Klüh S., Fast L., Lakkonen M., Rothe R., Leismann F., *Fire Safety of Lithium-Ion Traction Batteries*, International Conference on Fires in Vehicles (FIVE), 2020.
- [10] Technischer Bericht vfdb TB 04-01 *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*, Vorversion 01, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), 2020.
- [11] IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH, *Fire Protection Guideline for Car Parks*, Version: 2.0, February 2023.
- [12] Hynynen J., Willstrand O., *Environmental Impact of Combustion Gases and Water Run-offs from Electric Vehicle Fires Full-scale fire tests of electric- and internal combustion engine vehicles w: Book of abstracts Nordic Fire & Safety Days*, A. Dederichs (red.), RISE Research Institutes of Sweden, Goteborg 2022, 44.
- [13] Mellert L.D., Welte U., Tuchschnid M., Held M., Hermann M., Kompatscher M., Tesson M., Nacheff L., *Risk minimisation of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures*, Federal Department of the Environment, Transport, Energy and Communications DETEC, 2020.
- [14] Held M., Tuchschnid M., Zennegg M., Figi R., Schreiner C., Mellert D. L., Welte U., Kompatscher M., Hermann M., Nacheff L., *Thermal runaway and fire of electric vehicle*

- lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2022, Vol. 165, 112474.
- [15] Sturm P.J., Föbtleitner P., Fruhwirt D., Heindl S., Kohl B., Heger O., Galler R., Wenighofer R., Krausbar S., *BRAFA Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen*, 2021.
- [16] Sturm P., Föbtleitner P., Fruhwirt D., Galler R., Wenighofer R., Heindl S.F., Krausbar S., Heger O., *Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels*, „Fire Safety Journal” 2022, Vol.134, 103695.
- [17] Boehmer H., Olenick S., Klassen M., *Modern vehicle fire hazards*, Fire Protection Research Foundation, Columbia, Maryland, USA, 2020.
- [18] Boehmer H.R., Klassen M.S., Olenick S.M., *Fire Hazard Analysis of Modern Vehicles in Parking Facilities*, „Fire Technology” 2021, Vol. 57, 2097–2127.
- [19] Boehmer H., Klassen M., Olenick S., *Modern Vehicle Hazards in Parking Structures and Vehicle Carriers*, Fire Protection Research Foundation, 2020.
- [20] Watanabe N., Sugawa O., Suwa T., Ogawa Y., Hiramatsu M., Tomonori H., Miyamoto H., Okamoto K., Honma M., *Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test*, Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicles – FIVE 2012, Chicago, USA, September 27–28, 2012, 195-205.
- [21] Lam C., MacNeil D., Kroeker R., Loughheed G., Lalime G., *Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine and Vehicles*, Proceedings from 2th International Conference on Fire in Vehicles, October 5–6, 2016, Baltimore, USA, 2016, 95–106.
- [22] Lecocq A., Bertana M., Marlair G., *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*, 2014.
- [23] Truchot B., Marlair G., *Shall we consider new design fire scenarios in tunnel fires studies to take account of fast development of electro mobility?*, Proceedings of the Second International Conference on Fires in Vehicles, September 27–28, 2012, Chicago, USA, 2012, 319–322.
- [24] Li Y., Spearpoint M., *Analysis of vehicle fire statistics in New Zealand parking building*, „Fire Technology” 2007, Vol. 43, No. 2, 93–106.
- [25] Fire spread in car parks BD2552, BRE, 2010.
- [26] Babrauskas V., *Heat Release Rates, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, ed. 3, 3–1-3–37, 2002.
- [27] Pietrzak M., Bąk D., Twardowski M., Majka I., Chmiel M., Zboina J., *Raport z I Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Bezpieczeństwo pożarowe instalacji fotowoltaicznych, magazynów energii, pojazdów elektrycznych, ich punktów i stacji ładowania, rozwiązań inteligentnego domu”*. Wnioski i rekomendacje, Wydawnictwo CNBOP-PIB, Józefów 2023.
- [28] Książkiewicz P., Marcinów B., Mroczo G., Zboina J., *Płachtą w cztery koła*, „Przegląd Pożarniczy” 2023, 6, 27–29.
- [29] LVS 1071:2022 Car fire blankets.
- [30] Mortka P., *Badania prototypowe płacht*, referat I Międzynarodowej Konferencji Naukowej pt. „Bezpieczeństwo pożarowe instalacji fotowoltaicznych, magazynów energii, pojazdów elektrycznych, ich punktów i stacji ładowania, rozwiązań inteligentnego domu”, CNBOP-PIB, Józefów 2023.
- [31] <https://motoryzacja.interia.pl/raport-samochody-elektryczne/news-pozary-samochodow-elektrycznych-to-plaga-raporty-strazakow-n,nd,7108936> [dostęp: 17.11.2023].
- [32] KG PSP, *Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami z napędem elektrycznym oraz hybrydowym*, wydanie drugie, Warszawa 2023.

ILONA MAJKA, M.SC. ENG. – Graduated with an engineering degree and a master’s degree from the Department of Fire Safety Engineering at the Main School of Fire Service (currently the Fire Academy). Main engineering and technical specialist at the Certification Department of the Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute. Co-author of CNBOP-PIB publications and standards, as well as articles in the area of marketing and admittance for use of products applied in fire protection, published in trade magazines.

SEN. BRIG. JACEK ZBOINA, D.SC. – Deputy Director for Certification and Acceptance at CNBOP-PIB. He graduated from the Main School of Fire Service, the Warsaw School of Economics and the Polish Naval Academy in Gdynia. In 2023 he obtained habilitation in the field of social sciences in the discipline of health sciences at the Faculty of Command and Naval

MGR INŻ. ILONA MAJKA – absolwentka studiów inżynierskich i magisterskich na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarniczej (aktualnie Akademii Pożarniczej). Główny specjalista inżynierijno-techniczny w Jednostce Certyfikującej Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpowarowej – Państwowego Instytutu Badawczego. Współautor publikacji i standardów CNBOP-PIB oraz artykułów z zakresu wprowadzania do obrotu oraz dopuszczania do użytkowania wyrobów stosowanych w ochronie przeciwpożarowej, wydawanych na łamach czasopism branżowych.

ST. BRYG. DR HAB. INŻ. JACEK ZBOINA – Z-ca Dyrektora ds. Certyfikacji i Dopuszczeń CNBOP-PIB. Absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej, Szkoły Głównej Handlowej w Warszawie oraz Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. W 2023 roku uzyskał stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk społecznych w dyscyplinie nauk o bezpieczeństwie na

Operations of the Naval Academy in Gdynia. He worked as Fire Risk Surveyor under the Chief Commandant of the State Fire Service. His research and professional interests include safety, fire protection, technical fire security systems, and compliance assessment. He is the author or co-author of several dozen scientific and specialist papers on safety, fire protection, technical security systems, product testing and certification, the practical use of new technologies, and the development of innovations. He has been involved in the implementation and management of research and research & development projects.

Wydziale Dowodzenia i Operacji Morskich Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni. Rzeczoznawca Komendanta Głównego PSP ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych. Jego zainteresowania badawcze oraz praca zawodowa obejmują: bezpieczeństwo, ochronę przeciwpożarową, techniczne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych oraz ocenę zgodności. Autor i współautor kilkudziesięciu publikacji naukowych oraz branżowych w zakresie bezpieczeństwa, ochrony przeciwpożarowej, technicznych systemów zabezpieczeń, badań, testowania i certyfikacji wyrobów, a także wykorzystania w praktyce nowych technologii i tworzenia innowacji. W działalności badawczej i zawodowej uczestniczy w pracach w projektach badawczych i badawczo-rozwojowych – zarówno w roli wykonawcy, jak i kierownika.