

The fire hazards associated with BEVs

Hubert Rzędowski^{1,*} , Ewelina Sendek-Matysiak² 

¹ Kielce University of Technology, Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering

² Kielce University of Technology, Faculty of Management and Computer Modelling

Abstract: A key development trend in the global automotive industry is electromobility. In 2021, the number of newly registered BEVs (Battery Electric Vehicles) will reach 10.5 million, and their share will rise to nearly 13%. By comparison, 351 thousand such vehicles were sold in 2015, while in 2010 – 7.3 thousand. According to forecasts by the International Energy Agency, by 2030, the zero-emission fleet could grow to 190 million, with 41 million BEVs registered in Europe. The European Union plans that just five years later, from 2035, no new cars and vans with internal combustion engines will be allowed to be registered in any member state. The nascent e-mobility market poses several new challenges and concerns related to, among other things, the fire of electric cars. The design differences between BEVs and their conventional counterparts make it likely that the risk factors affecting fire occurrence, progression, and extinguishment will differ. This article presents the most common causes of BEV fires, the procedure, and recommendations for extinguishing them. The solutions currently used to reduce such vehicles' ignition risk are also presented. From the considerations carried out in this paper, it is clear that fires in all-electric vehicles should be considered incidental, and external factors of an extreme nature most often contribute to their occurrence. Therefore, the correct direction is to disseminate reliable knowledge about the causes of such car fires, the risk of their occurrence, and the principles of fire prevention.

Keywords: electric vehicles, batteries, electromobility

Wstęp

Mobilność i transport mają zasadnicze znaczenie dla mieszkańców Europy oraz dla samej europejskiej gospodarki. Swobodny przepływ osób i towarów wewnątrz Unii Europejskiej jest jedną z jej podstawowych swobód tworzących jednolity rynek. Transport przynosi korzyści społeczno-gospodarcze obywatelom i przedsiębiorstwom, przy jednoczesnym stale zwiększającym się negatywnym wpływie na środowisko naturalne. Negatywne oddziaływanie transportu na otoczenie związane jest przede wszystkim z [35]:



- emisją gazów cieplarnianych przyczyniających się do zmian klimatycznych,
- emisją zanieczyszczeń powietrza wpływających negatywnie na zdrowie ludzi i środowisko przyrodnicze. W pracy [44] podano, że każdego roku w Unii Europejskiej

Article citation information:

Rzędowski, H., Sendek-Matysiak, E. (2023). The fire hazards associated with BEVs, WUT Journal of Transportation Engineering, 137, 87-101, ISSN: 1230-9265, DOI: [10.5604/01.3001.0054.2538](https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.2538)

*Corresponding author

E-mail address: hrzedowski@tu.kielce.pl (H. Rzędowski), esendek@tu.kielce.pl (E. Sendek-Matysiak)

ORCID:  [0000-0001-6352-7692](https://orcid.org/0000-0001-6352-7692) (H.Rzędowski),  [0000-0003-3088-3177](https://orcid.org/0000-0003-3088-3177) (E.Sendek-Matysiak)

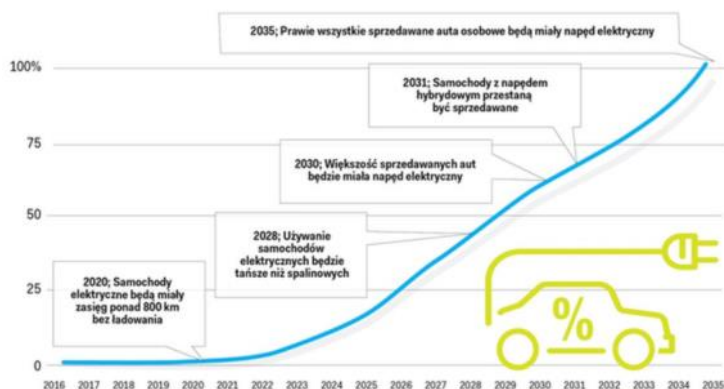
Received 9 October 2023, Revised 9 December 2023, Accepted 11 December 2023, Available online 18 December 2023

- 500 000 przedwczesnych zgonów wywołanych jest przez zanieczyszczenia,
- zajmowaniem cennych przyrodniczo terenów i rozcinaniem ich ciągłości (fragmentacja) nowobudowanymi ciągami infrastruktury technicznej, przyczyniające się do utraty różnorodności biologicznej,
 - emitowaniem hałasu zagrażającego ludzkiemu zdrowiu. Ruch drogowy jest najbardziej rozpowszechnionym źródłem hałasu w środowisku – ponad 100 mln ludzi w Europie odczuwa skutki narażenia na szkodliwy poziom hałasu [23].

W 2021 roku Komisja Europejska (KE) przyjęła pakiet legislacyjny „Fit for 55”, którego głównym założeniem jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych netto o co najmniej 55% do 2030 r. w porównaniu z poziomami z 1990 r. oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 r. [23].

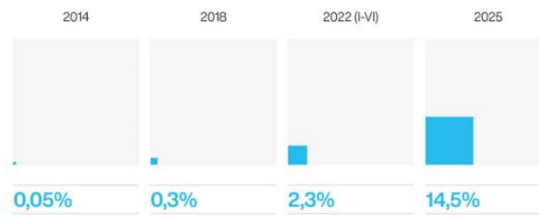
W zakresie dekarbonizacji transportu, fundamentalnym postulatem jest zobligowanie koncernów motoryzacyjnych do obniżenia (względem roku 2021) średnich emisji z nowych samochodów osobowych (M1) o 55% i 50% z lekkich pojazdów użytkowych (N1) od 2030 r. Ważną rolę w tym względzie jest wdrożenie na szeroką skalę zrównoważonych i innowacyjnych środków transportu, w tym m.in. samochodów elektrycznych typu BEV (ang. *Battery Electric Vehicle*) [10,39]. Są to pojazdy, które do napędu wykorzystują tylko i wyłącznie energię elektryczną zmagazynowaną w akumulatorze pokładowym, który musi być regularnie ładowany poprzez podłączenie do punktu ładowania przyłączonego do lokalnej sieci elektrycznej.

Zgodnie z realizowaną przez Unię Europejską polityką transportową, takie samochody mają w przyszłości stanowić najważniejszy środek transportu. Według najbardziej optymistycznych prognoz w 2035 r. wszystkie sprzedawane w tym czasie nowe samochody osobowe mają być w pełni elektryczne (Rys. 1) [32].

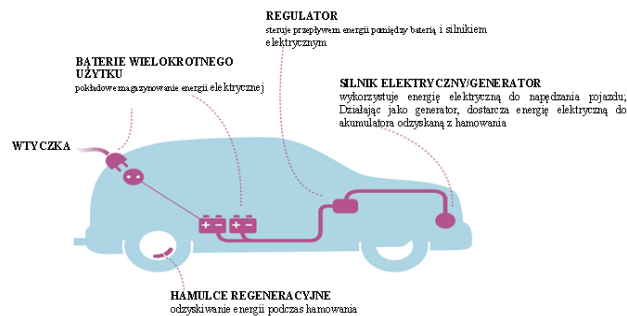


Rys. 1. Prognozy rozwoju rynku BEV w Unii Europejskiej w perspektywie 2035 roku (źródło: [32])

W Polsce przewiduje się, że w 2025 roku udział BEV w rynku motoryzacyjnym wyniesie 14,5% (Rys. 2) [14]. Samochody elektryczne typu BEV charakteryzują się najprostszą konstrukcją spośród samochodów elektrycznych. W pojeździe tego typu znajdują się akumulatory trakcyjne, zbudowane najczęściej z ogniw litowo-jonowych (Li-Ion) stanowiące źródło energii oraz silnik elektryczny jako jednostka napędowa. Znacznie prostsze niż w pojeździe spalinowym są również urządzenia powiązane z silnikiem: na przykład silnik elektryczny nie wymaga systemu chłodzenia (Rys. 3).



Rys. 2. Udział samochodów elektrycznych BEV w rejestracji nowych pojazdów osobowych (źródło: [14])



Rys. 3. Podstawowe części samochodu elektrycznego typu BEV (źródło: [24]).

Odmienność konstrukcyjna samochodu wyłącznie elektrycznego w porównaniu z pojazdem z silnikiem spalinowym (ICE – ang. *Internal Combustion Engine*) powoduje, że dla obu kategorii pojazdów różne są czynniki ryzyka w tym te wpływające na możliwość wystąpienia pożaru. Można domniemywać zatem, że różne też będzie postępowanie związane z gaszeniem ognia oraz ryzyko ewentualnego samozapłonu po ugaszeniu pierwotnego pożaru.

W niniejszym artykule przedstawiono rzeczywiste najczęstsze czynniki mogące doprowadzić do pożaru samochodu elektrycznego BEV oraz sposób postępowania w przypadku jego zaistnienia. Omówiono również rozwiązania mające zmniejszyć ryzyko zapalenia się takiego pojazdu.

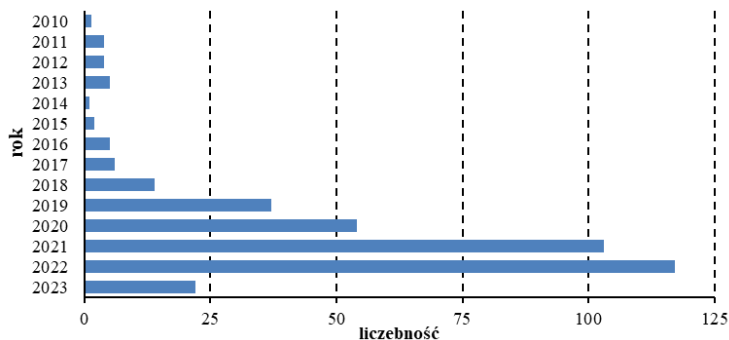
2. Liczba pożarów BEV

Pożar zawsze jest zjawiskiem niebezpiecznym. Gdy dotyczy on samochodu szczególnie zagrożeni stają się kierowca i pasażerowie. Skutki pożaru potęguje wystąpienie dodatkowych niekorzystnych okoliczności jak: kolizja, zapłon w czasie jazdy, czy szczególne miejsce jak np. tunel.

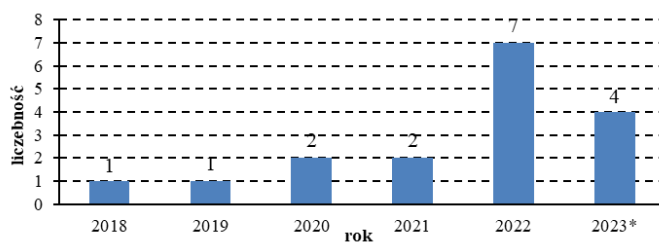
Systematycznie rosnąca liczba samochodów elektrycznych BEV powoduje, że rośnie również liczba pożarów takich pojazdów. Na świecie od 2010 roku odnotowano ich około 390 (Rys. 4) [25]. W Polsce w 2018 r. wystąpiło tylko jedno takie zdarzenia, ale w 2022 r. było ich już 7 (Rys. 5). Nadal jest to znikoma ich liczba w porównaniu z pożarami samochodów z silnikiem konwencjonalnym - 2022 rok to 8333 takich przypadków (Rys. 6).

Po przeliczeniu jednak liczby pożarów na 100 tys. samochodów, liczba pożarów dotyczących BEV i samochodów spalinowych w Polsce staje się porównywana (Rys. 7). Można przypuszczać, że jest to wynikiem ogólnie małej liczby samochodów typu BEV

i importu do Polski używanych samochodów elektrycznych. W krajach skandynawskich (Szwecja, Norwegia), w których udział samochodów elektrycznych w rynku motoryzacyjnym jest istotny, samochody elektryczne palą się nawet 8 razy rzadziej niż spalinowe (Rys. 8, 9).

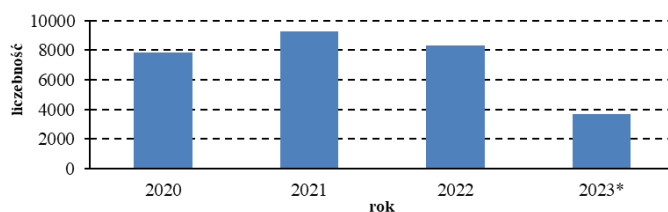


Rys. 4. Liczba pożarów samochodów BEV na świecie (źródło: [25])



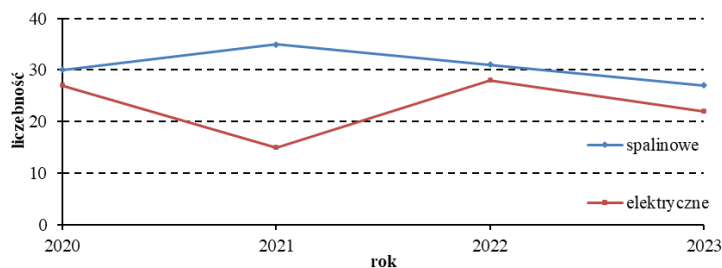
2023* stan na 30.06.2023

Rys. 5. Liczba pożarów samochodów elektrycznych BEV w Polsce (źródło: opracowanie własne na podstawie [9,11,18,20,33])

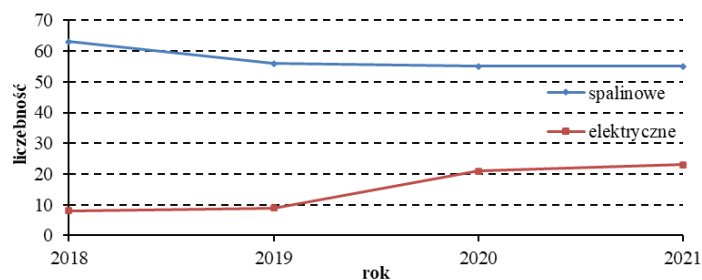


2023* stan na 30.06.2023

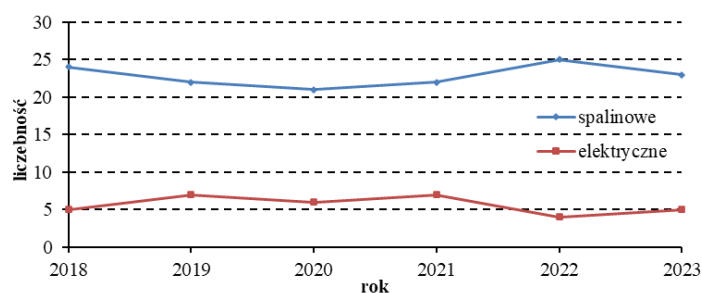
Rys. 6. Liczba pożarów samochodów z silnikiem konwencjonalnym w Polsce (źródło: opracowanie własne na podstawie [9,11,18,20])



Rys. 7. Liczba pożarów na 100 000 samochodów zarejestrowanych w Polsce (źródło: opracowanie własne na podstawie [33])



Rys. 8. Liczba pożarów na 100 000 samochodów zarejestrowanych w Szwecji (źródło: opracowanie własne na podstawie [33])



Rys. 9. Liczba pożarów na 100 000 samochodów zarejestrowanych w Norwegii (źródło: opracowanie własne na podstawie [33])

W pracy [11,25] wykazano, że prawdopodobieństwo zapalenia się pojazdu elektrycznego BEV wynosi 0,03%, natomiast z silnikiem spalinowym 1,5%.

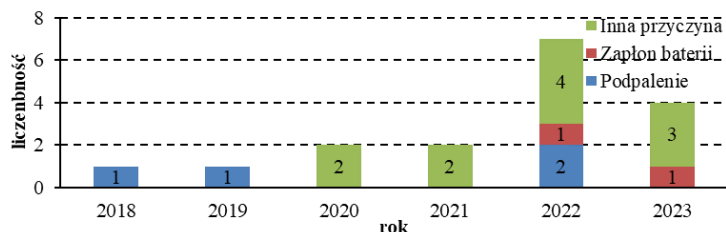
3. Przyczyny pożarów pojazdów

Najczęstszymi przyczynami powstania pożarów pojazdów wg [28] są: nieprawidłowe użytkowanie (np. zbyt niski poziom płynu w chłodnicy, zapłon spowodowany jazdą z zaciągniętym hamulcem ręcznym, brak konserwacji – np. zatarte łożyska), nieprawidłowo wykonywane prace naprawcze (np. spawanie elementów pojazdu, ingerencja w układ LPG), podpalenia (np. w wyniku protestów, porachunków grup przestępczych), samozapłon substancji ropopochodnych (które wyciekły w wyniku wypadku), awarie instalacji elektrycznej lub układu paliwowego i wydechowego.

W przypadku pojazdów elektrycznych zagrożenia pożarowe można sklasyfikować jako:

- podpalenia,
- zapłon baterii trakcyjnej,
- inne.

W Polsce dominuje ten ostatni typ zagrożeń – „inne”. Ponad 85% pożarów samochodów elektrycznych wynika np. z zaprószenia ognia przez samego użytkownika, nieautoryzowanych źle wykonanych napraw, które mogą skutkować osłabieniem izolacji, korzystania ze złej jakości zewnętrznych urządzeń wpinanych do instalacji 12 V (np. gniazdo zapalniczki) czy zwykłych akumulatorów kwasowo-ołowiowych [30]. Co najmniej cztery pożary samochodów elektrycznych w Polsce w latach 2018–2022 było efektem podpalenia (Rys. 10) [13].



Rys. 10. Przyczyny pożarów samochodów elektrycznych w Polsce w latach 2018–2023 (źródło: opracowanie własne na podstawie [27])

W 2022 r. poza jednym pożarem samej baterii, w pozostałych przypadkach paliły się podszybie, wnętrze, silnik, przód i deska rozdzielcza, komora silnika, deska rozdzielcza.

Podobne przyczyny pożarów BEV w 2018–2022 roku wystąpiły w Szwecji. W [19] wskazano, że prawdopodobnymi przyczynami pożarów pojazdów elektrycznych było m.in. ogrzewanie fotela, zapalenie się reflektora, spięcie w instalacji 12 V czy zajęcie się od płonącego samochodu zaparkowanego obok. Kilka pożarów wybuchło także z uwagi na specyfikę BEV: poprzez upuszczenie jednego akumulatora na drugi w warsztacie samochodowym, czy podczas przerabiania klasycznego samochodu na elektryczny w przydomowym warsztacie. Część to prawdopodobnie podpalenia. Pojedyncze przypadki wynikały z zapalenia się ogniw trakcyjnych podczas jazdy lub postoju.

Bateria trakcyjna nie tylko rzadko jest powodem pożaru BEV, ale również bardzo rzadko w nim uczestniczy [26]. W Polsce ryzyko, że pożar obejmie także baterię trakcyjną wynosi 0,006%, natomiast, że wystąpi choćby niewielki wybuch oparów z baterii – 0,0003% [30].

Na rysunku 11 przedstawiono mechanizm powstania zapłonu baterii litowo-jonowej.



Rys. 11. Mechanizm powstania zapłonu baterii litowo-jonowej (źródło: [22])

Jednakże istnieją czynniki zewnętrzne o charakterze ekstremalnym mogące doprowadzić do pożaru samochodu elektrycznego w wyniku zapalenia się akumulatora BEV. Przyczyny te można usystematyzować, wyróżniając takie pożary samochodów elektrycznych jak:

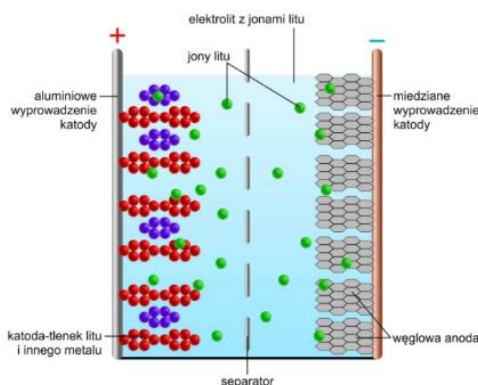
- BEV zapala się podczas postoju (tzw. samozapłon), co może być związane z ekstremalnymi warunkami atmosferycznymi, np. skrajnie niskie lub wysokie temperatury, anomalie pogodowe itp.
- BEV zapala się podczas ładowania, co może być związane z awarią akumulatora z powodu przeładowania, ale znacznie częściej wiąże się z wadliwymi lub niezabezpieczonymi stacjami ładowania lub kablami. Jest to główna przyczyna pożarów

innych urządzeń elektrycznych posiadających akumulatory litowo-jonowe, np. smartfonów.

- Akumulator pojazdu elektrycznego został uszkodzony, np. w wyniku wypadku drogowego. Uszkodzenia akumulatora są tak poważne, że zapala się on podczas wypadku lub bezpośrednio po nim.
- Ewentualny ponowny zapłon po ugaszeniu początkowego pożaru. Nie można zajrzeć do środka akumulatora, dlatego sensowne jest, by umieścić go pod wodą dla pełnego bezpieczeństwa.
- Czynniki zewnętrzne, takie jak podpalenie, pożary towarzyszące [15].

4. Rozwiązania zmniejszające ryzyko pożaru BEV

W celu zwiększenia bezpieczeństwa pojazdów BEV nieustannie prowadzone są prace rozwojowe dotyczące m.in. akumulatorów trakcyjnych. Baterie litowo-jonowe, czyli te najczęściej instalowane w pojazdach elektrycznych, gromadzą energię w pojedynczych ogniwach. Każde z nich ma jeden biegun dodatni i jeden ujemny. Są one połączone cienką folią, która wykonana jest z materiału aktywnego elektrochemicznie. Jest on aktywny po stronie ujemnej (anoda) i dodatniej akumulatora (katoda) (Rys. 12).



Rys. 12. Budowa ogniwa litowego (źródło: [8])

Gdy akumulator jest rozładowywany, prąd elektryczny przepływa do anody i wypływa z katody. W zależności od geometrii ogniwa, kolektory prądu są sprasowane lub zwinięte razem z separatorami polimerowymi i zanurzone w elektrolicie. Jest to medium przewodzące prąd elektryczny, które umożliwia transport jonów litu z jednej strony na drugą. Przeniesienie ich z jednej strony na drugą, poprzez materiał oddzielający, powoduje reakcje chemiczne, w wyniku których powstaje prąd elektryczny. Kierunek prądu zależy od tego, czy akumulator jest rozładowywany, czy ładowany.

W celu zapewnienia bezpiecznego działania ogniwa litowo-jonowego obecnie stosuje się kilka systemów oraz rozwiązań, które można podzielić na fizyczne i chemiczne oraz wewnętrzne i zewnętrzne [17]. Dodatkowo część z nich jest dostosowana do działania na odpowiednim poziomie systemowym tzn. na poziomie pojedynczego ogniwa, modułu czy też paku do samochodu elektrycznego [48].

Rozwiązania chemiczne są to substancje chemiczne dodawane do elektrolitu w celu zmiany jego właściwości (np. palności) i są ściśle powiązane z rodzajem katody (tj. NMC

czy LFP) (Tabela 1). Ta powszechnie stosowana (tlenek litowo-kobaltowy) w urządzeniach konsumenckich, nie jest brana pod uwagę w przypadku pojazdów. Choć jest stosunkowo prosta w produkcji, to istnieją poważne obawy związane z bezpieczeństwem, zwłaszcza w warunkach wysokiej temperatury i przeładowania.

Dlatego w przypadku pojazdów akumulatorowych wykorzystuje się bezpieczniejsze materiały katodowe, takie jak fosforan litowo-żelazowy (LFP), tlenek litowo-niklowo-manganowo-kobaltowy (NMC), tlenek litowo-manganowy (LMO) lub inne mieszanki różnych materiałów katodowych. Obecnie najczęściej stosowanym wariantem jest NMC, czyli litowo-niklowo-kobaltowo lub NCA – nikiel-kobalt-glin. Coraz popularniejsze stają się również mieszaniny dwóch lub więcej materiałów aktywnych. Przykładem może być choćby wspomniany LFP ze znaczącą przewagą litu i żelaza fosforowego. W efekcie prac nad tym rozwiązaniem udało się producentom osiągnąć lepszą stabilność chemiczną w LFP niż w przypadku NMC. Temperatura egzotermicznego rozpadu struktur katody dla NMC wynosi 150°C, podczas gdy dla LFP 310°C. LFP uważane jest za bardziej stabilne, a co za tym akumulatory są bezpieczniejsze – praktycznie nigdy nie wytwarzają mocnego i skoncentrowanego płomienia tak jak NMC [5,40].

Tabela 1. Powszechnie stosowane materiały katodowe [1]

	Energia właściwa [Ah/kg]	Napięcie przy 50% SOC [V]	Żywotność	Bezpieczeństwo	Koszty
LFP	160	3,4	Wysoka	Wysokie	Średnie
LMO	100-120	4	Niska	Średnie	Niskie
LCO	155	3,9	Średnia	Niskie	Średnie
NCA	180	3,7	Średnia	Niskie	Wysokie
NMC	160	3,8	Wysoka	Średnie	Wysokie

Kolejną ważną kwestią w przypadku akumulatorów trakcyjnych jest wykorzystany elektrolit, który umożliwia transport jonów między elektrodami (dodatnią i ujemną).

Elektrolit w akumulatorze składa się głównie z soli litu rozpuszczonych w niewodnym rozpuszczalniku. Jedną z przyczyn, dla których akumulatory litowo-jonowe wytwarzają ogień jest to, iż zastosowany elektrolit jest związkami łatwopalnymi. Aby podnieść stabilność termiczną tego układu, chronić akumulator przed przepięciem oraz obniżyć palność stosuje się różnego rodzaju dodatki chemiczne. Modyfikatory te zazwyczaj stanowią ok 5% elektrolitu i nie powinny obniżać sprawności całego systemu.

Zastosowanie modyfikatorów ma na celu najczęściej:

- wprowadzenie transporterów elektronów w reakcji redoks (ang. *redox shuttles*), które mogą się utleniać, aby przeciwdziałać wzrostowi napięcia do zbyt wysokich potencjałów; ułatwiać produkcję gazów podczas przepięć, aby wymusić działanie innych systemów,
- spolimeryzować elektrolit, aby zablokować swobodny przepływ jonów czy stworzyć warstwę izolacyjną, aby zatrzymać proces spalania.

Dostępnych jest wiele różnych rodzajów elektrolitów, ale nie wszystkie są kompatybilne z innymi komponentami akumulatora lub są w stanie utrzymać ładunek elektryczny. W zależności od wykorzystanego elektrolitu, inne są parametry jego pracy. Należy zaznaczyć, że niewłaściwy dobór elektrolitu może doprowadzić m.in. do pożaru (tabela 2).

W [1] wskazano, że najbardziej łatwopalny jest octan etylu (EA). Wpływa na to efekt niskiej temperatury zapłonu. Pod wpływem temperatury poniżej 0°C EA wydziela

wystarczającą ilość pary, by podtrzymać palenie w przypadku zapalenia się od iskry lub płomienia. W raporcie podkreślono, że jest on w porównaniu z benzyną stosunkowo bezpieczny. W dokumencie podano również, że dodatki i składniki elektrolitu obniżają lub spowalniają degradację termiczną elektrolitu.

Tabela 2. Dane dotyczące palności rozpuszczalnika elektrolitu w ogniach Li-Ion oraz dane dla konwencjonalnych paliw samochodowych w celu porównania [1]

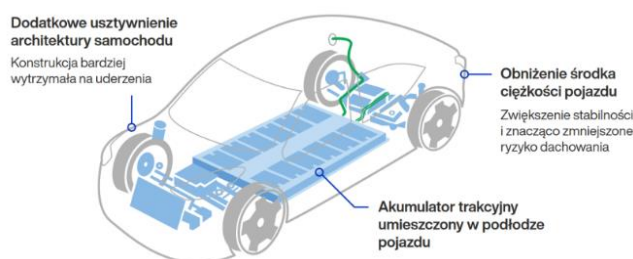
Organiczne rozpuszczalniki elektrolitów	Temperatura wrzenia [°C]	Temperatura samozapłonu [°C]	Punkt zapłonu [°C]	Granice palności Dolna/Górna [%]
Octan etylu (EA)	77	427	-3	2,2/9
Węglan dimetylu (DMC)	91	458	16	4,4/12,87
Węglan etylowo-metylowy (EMC)	110	440	24	-/-
Węglan dietylu (DEC)	126	445	25	1,4/14,3
Węglan etylenu (EC)	248	4665	143	3,6/16,1
Węglan propylenu (PC)	242	455	132	1,8/14,3
Benzyna bezołowiowa	30 to 210	>350	<-40	1,4/7,6
Diesel	>180	240	>61,5	0,7/5

Kolejnym istotnym elementem w przypadku akumulatorów jest separator. Zdolnością niektórych separatorów jest możliwość „zablokowania” reakcji między dwoma elektrodami. Gdy temperatura wewnątrz osiąga niebezpieczne poziomy, taki separator zaczyna się topić lub odkształcać tworząc fizyczną barierę i tym samym blokując przepływ jonów [34,37].

Do fizycznych rozwiązań zmniejszających zagrożenie pożarowe BEV zaliczamy także typ budowy (obudowy) akumulatora (paluszek, pryzmatyczny czy kopertowy). Budowa ale również użyte materiały mają istotny wpływ na parametry akumulatora takie jak sztywność, odprowadzanie ciepła czy możliwość zastosowania dodatkowych systemów bezpieczeństwa np.: otworów wentylacyjnych dla gazu czy urządzeń przerywających obwód elektryczny [3].

Ponadto, takie akumulatory wyposażone są w:

- zaporę ogniową – oddziela moduły akumulatora, ogranicza potencjalne szkody i zabezpiecza pozostałe podzespoły pojazdu przed zapłonem,
- wzmocnioną obudowę ochronną – zapobiega uszkodzeniom mechanicznym (Rys. 13).



Rys. 13. Wzmocniona budowa BEV (źródło: [16])

Systemy zewnętrzne są bardziej powiązane ze skalowaniem akumulatora tzn. przechodząc z pojedynczego ogniwa na poziom modułu (czyli zespołu ogniów) czy z modułu na poziom paku bateryjnego (czyli zespołu modułów). W ich skład mogą wchodzić:

- system zarządzania bateriami BMS (ang. *Battery Management System*) – zabezpieczający ładowanie oraz kontrole temperatur w poszczególnych ogniach akumulatora,

- system zarządzania ciepłem TMS (ang. *Thermal Management System*) – chroni akumulator przed wpływem skrajnie niskich temperatur ogrzewając go lub skrajnie wysokich odbierając od niego ciepło,
- nadzorowany proces ładowania, który dostosowuje parametry ładowania akumulatora w zależności od napięcia poszczególnych ogniw, oraz ich temperatur,
- styczniki rozłączające akumulator, które w obecnie produkowanych pojazdach wykorzystują ładunki pirotechniczne i w ciągu ułamków sekund odcinają napięcie elektryczne w skrajnych sytuacjach, np. w czasie wypadku,
- pomiar rezystancji izolacji, która pozwala rozpoznać zbyt małą rezystancję izolacji komponentów wysokonapięciowych oraz przewodów,
- obwód, który w czasie postoju separuje napięcie akumulatora wysokiego napięcia (HV) od reszty instalacji elektrycznej pojazdu – w znaczący sposób zwiększa to bezpieczeństwo, kiedy pojazd nie jest użytkowany.

Większość wymienionych wyżej elementów jest aktywna w pojeździe niezależnie od tego, czy samochód jest uruchomiony (włączony zapłon), czy jest zaparkowany z wyłączonym zapłonem. Ponadto, samochody elektrycznie podlegają stałemu monitoringowi jakości produktu podczas eksploatacji. Komponenty HV oraz akumulatory są diagnozowane podczas przeglądów w autoryzowanych stacjach. Analizowane są również wszystkie zgłaszane przez klientów reklamacje i na ich podstawie producenci optymalizują konstrukcje akumulatorów podczas bezpłatnych akcji fabrycznych. Te działania obejmują nie tylko pojazdy objęte gwarancją, ale również te kilkunastoletnie.

Zabezpieczenia chroniące przed pożarem BEV występują również po stronie samych ładowarek BEV. Posiadają one m.in. systemy zarządzania mocą, zabezpieczenia przed spięciami i przepięciami. Ponadto wszystkie ogólnodostępne stacje ładowania muszą uzyskać odbiór przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT), by mogły być uruchomione.

5. Procedury postępowania w przypadku pożaru

Samochody elektryczne są jeszcze nowością na rynku i postępowania z nimi, oraz odmienności względem samochodów konwencjonalnych, uczą się zarówno użytkownicy, jak i odpowiednie służby – w tym ratownictwo medyczne, policja, straż pożarna.

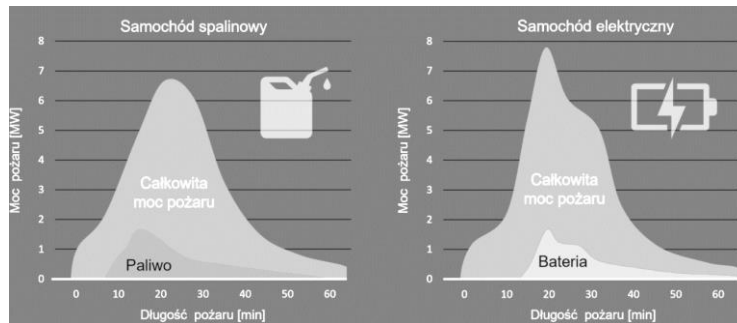
W przypadku zapalenia się pojazdu, niezależnie czy z silnikiem spalinowym czy elektrycznym, głównym zadaniem kierującego jest ochrona zdrowia i życia własnego oraz współpodróżnych. Z tego względu przy jakichkolwiek oznakach prawdopodobnego zapalenia się samochodu, powinien on natychmiast się zatrzymać w bezpiecznym miejscu (nie wskazany jest parking obok innych pojazdów czy miejsce w tłumie ludzi), zadbanie o to by każdy opuścił samochód i powiadomił m.in. straż pożarną [36].

Z przeprowadzonych badań wynika, że pożary pojazdów elektrycznych nie różnią się istotnie co do mocy i czasu jego trwania od pożaru pojazdów spalinowych (Rys. 14) [7].

W sytuacji kiedy bateria trakcyjna samochodu elektrycznego nie zapali się (dotychczas 88% przypadków w Polsce) gaszenie pojazdu BEV realizowane jest i trwa tyle samo czasu co samochodu z silnikiem konwencjonalnym – kilkanaście minut [16,21].

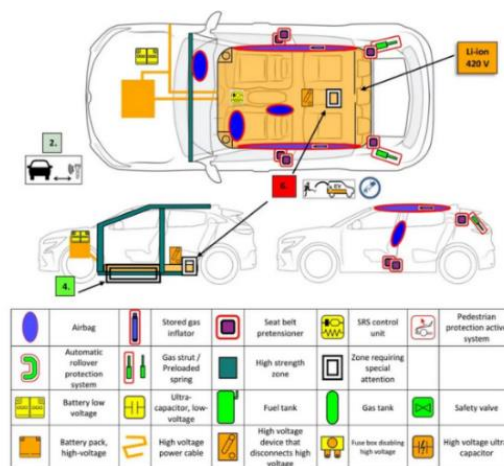
W przypadku zapłonu baterii, głównym zadaniem w celu stłumienia pożaru BEV jest obniżenie jej temperatury. Według [31] do chłodzenia zewnętrznych elementów baterii należy wykorzystać wodę (np. przy użyciu prądu rozproszonego lub kurtyny wodnej). Testy

wykazały, że w zależności od jej rozmiaru i umiejscowienia w BEV, do ugaszenia pożaru pojazdu oraz chłodzenia baterii może być potrzebne od 4 do 30 tys. litrów wody (inne źródła podają zużycie wody w przedziale od ok. 1 do 6,7 tys. litrów [6,27,36]).



Rys. 14. Moc i czas pożaru samochodu z silnikiem Diesla vs elektrycznego (źródło: [38,41,41,42,46])

Aby gaszenie baterii trakcyjnej było jak najbardziej skuteczne, woda powinna jak najszybciej trafić do jej środka [4,45]. Efektywne rozwiązanie w tej kwestii zastosowano w samochodach elektrycznych produkowanych przez Renault. Konstrukcja baterii i płyty podłogowej – „Fireman Access”, zaprojektowane zostały w taki sposób aby możliwe było natychmiastowe zalanie wnętrza akumulatora i przerwania ucieczki termicznej ogniów. U góry baterii zainstalowano metalowe wieczko z cienkiego aluminium, a pod tylną kanapą zaślepkę z plastiku. Obie wytapiają się pod wpływem ciepła emitowanego w trakcie pożaru, umożliwiając dostęp do akumulatora. Do zalania i całkowitego schłodzenia baterii w ten sposób wystarczy minuta (bez takiego systemu od 1h do 15 minut [50]) i kilkadziesiąt litrów wody. Takie rozwiązanie stosowane jest między innymi w modelu Megane E-Tech, a jego dokładna lokalizacja została umieszczona w karcie ratowniczej pojazdu (Rys. 15) [29].



Rys. 15. Karta ratownicza Megane E-Tech 100% Electric (źródło: [29])

Zgodnie z „Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami z napędem elektrycznym oraz hybrydowym” Komendanta Głównego Państwowej Straży Pożarnej (KG PSP) baterię należy schładzać przez co najmniej 10 minut, następnie przez 3 minuty kontrolować czy jej temperatura nigdzie nie przekracza 50°C. Ucieczka termiczna

w ogniach rozpoczyna się w temperaturze ponad 100°C wewnątrz. Przyjęto, że zostaje ona powstrzymana jeżeli temperatura na obudowie przez 0,5h utrzymuje się poniżej 50°C. Jeżeli w ciągu 0,5h temperatura ponownie zaczęłaby rosnąć, strażacy powinni ponownie schładzać baterię przez 10 minut [31].

W opinii publicznej istnieje przekonanie, że jedyną metodą radzenia sobie z pożarem samochodu elektrycznego jest jego zatopienie w wodzie w specjalnym kontenerze gaśniczym. Zasady postępowania z takimi pożarami, wprowadzone w 2023 roku przez Komendanta Głównego PSP, mówią jednak, że wykorzystanie kontenera w celu zatopienia BEV może być stosowane tylko w uzasadnionych przypadkach. Prewencyjne zatopienie pojazdu nie jest zalecane. Przyczyną tego jest m.in. duży wysiłek logistyczny, duże koszty utylizacji zanieczyszczonej wody jako odpadu specjalnego/niebezpiecznego i nieuniknione zwiększenie szkód ogólnych [31]. Na rysunku 16 przedstawiono jeden z trzech specjalistycznych pojazdów z kontenerem do gaszenia pojazdów elektrycznych Państwowej Straży Pożarnej w Polsce.



Rys. 16. Pojazd z kontenerem gaśniczym (źródło: [12])

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej prowadzi natomiast badania dotyczące wykorzystania płacht gaśniczych nakładanych na pojazdy elektryczne. Na podstawie przeprowadzonych tam testów stwierdzono, że sama płachta pożaru nie ugasi, ale może być wykorzystana do jego tłumienia i kontrolowania, ograniczenia rozwoju pożaru, produktów spalania a także zabezpieczenia sąsiednich pojazdów na parkingu, czy innych dodatkowych czynności ratowniczych wg potrzeb np. ochrony poszkodowanych w czasie ich wydobywania z pojazdu [47].

6. Rekomendacje i wnioski

Požary środków transportu – w tym pojazdów drogowych – występowały od początku ich wynaleźenia i użytkowania przez człowieka. Obecnie wśród tych zdarzeń wyróżnić można ich nowy rodzaj – pożary pojazdów z napędem elektrycznym. Każdy przypadek takiego pożaru wzbudza zainteresowanie, a nawet obawy, niepokój. Niepotwierdzone informacje lub domniemania stanowią duży problem i podważają wiarygodność bezpieczeństwa pojazdów BEV. Tymczasem, w odniesieniu do ogólnej liczby sprzedawanych samochodów elektrycznych, ich pożary należy uznać za incydentalne. W 2022 roku Państwowa Straż Pożarna odnotowała ponad 8000 pożarów pojazdów drogowych w Polsce, w tym 7 samochodów w pełni elektrycznych, co stanowi około 0,4 promila wszystkich zarejestrowanych pojazdów.

Pojazdy elektryczne stwarzają o wiele mniejsze ryzyko pożaru niż samochody wyposażone w silniki spalinowe. BEV nie posiadają układu wylotowego (przez co nie może

dojść do pożaru od zbyt wysokiej temperatury), nie posiadają przewodów zapłonowych oraz zbiorników paliwa. Nie można więc w ich przypadku obawiać się wycieku paliwa, który jest nader niebezpieczny np. w kontakcie z nagrzanymi elementami osprzętu silnika (np. turbosprężarką) i może doprowadzić do wybuchu.

Dodatkowo, są standardowo wyposażane w wiele elementów zwiększających poziom bezpieczeństwa, takich jak m.in. systemy nadzorujące proces ładowania, zaawansowane protokoły nadzoru napięcia i temperatury ogniw w akumulatorze. Przypadki związane z pojawieniem się ognia są najczęściej wynikiem czynnika zewnętrznego czy tzw. błędu ludzkiego, a metody i procedury gaszenia nie różnią się zasadniczo od gaszenia pożaru samochodu z silnikiem konwencjonalnym - wykorzystywany jest ten sam sprzęt i środki gaśnicze. Przeprowadzone dotychczas badania dowiodły, że najefektywniejszym środkiem tłumienia pożaru BEV jest woda, ponieważ nie tylko gasi pożar, ale również chłodzi baterię, przeciwdziałając jej dalszemu rozkładowi. Obecnie ugaszenie pożaru pojazdu z napędem elektrycznym wymaga jej dużej ilości (potrzeba podawania wody przez dłuższy czas, celem chłodzenia baterii). W związku z powyższym, aby środek gaśniczy mógł jak najszybciej dotrzeć do źródła ognia we wnętrzu baterii (ograniczając tym samym jego ilość), niektórzy producenci samochodów (np. Renault) zaprojektowali w jej obudowie otwory *fireman access*, co umożliwi zalanie i całkowite schłodzenie baterii w ciągu 1 minuty.

Podsumowując, praktyka ale również prowadzone badania i ekspertyzy wykazują, że samochody z napędem elektrycznym typu BEV są równie bezpieczniejsze jak ich spalinowe odmiany. Właściwym kierunkiem jest zatem upowszechnianie rzetelnej wiedzy na temat przyczyn pożarów takich samochodów, ryzyka ich powstania i zasad profilaktyki przeciwpożarowej. Edukacja taka przyczyni się do popularyzacji elektromobilności pokazując ją jako bezpieczny i ekologiczny rodzaj transportu.

Bibliografia

1. Bisshop, R., Willstrand, O., Amon, F., Rosengren, M. (2019). Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles, Safety&Transport Fire Research.
2. Boulanger, C., Thomazo, J., Azmi, B., Labadie, O., Poutrain, B., Gentileau, M., Bazin, H. (2015). A partnership between Renault and French first responders to ensure safe intervention on crash or fire-damaged electrical vehicles. Engineering, Environmental Science.
3. Christensen, P.A., Anderson, P.A., Harper, G.D.J., Lambert, S.M., Mroziak, W., Rajaeifar, M.A., Wise, M.S., Heidrich, O. (2021). Risk management over the life cycle of lithium-ion batteries in electric vehicles, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
4. Cui, Y., Liu, J. (2021). Research progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires, Process Safety and Environmental Protection, 149, 559-574, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.03.003>.
5. Dennien, M. (2020). Firefighter 'knocked on his back' in fire blast at Griffith University, Brisbane Times, Brisbane, Australia.
6. DSB, Risk assessment and handling of fire in lithium-ion batteries – Guidelines for fire and rescue services, version 1, Tønsberg 2021.
7. Grahl-Jacobsen, L., Vik, K., Eik, M. (2020). Evaluering av brann i parkeringshus Stavanger Lufthavn Sola, Rogaland brannogrednings IKS, 1-60.
8. GroMar sp.z.o.o., licencja: CC BY-SA 3.0 105.
9. https://elektromobilni.pl/biuro_prasowe/kontenery-to-nie-wszystko/, 25.08.2023.
10. https://european-union.europa.eu/priorities-and-actions/actions-topic/transport_pl Unia Europejska, Bezpieczny, zrównoważony i połączony transport, 23.08.2023.
11. <https://moto.rp.pl/na-prad/art37900501-pozary-aut-w-2022-r-statystyki-ppsp-zaskakuja>, 25.08.2023.
12. <https://motoryzacja.interia.pl/wiadomosci/news-wyglada-jak-kontener-na-odpady-ale-to-tylko-pozory-w-polsce-.nId,6609180>, 28.08.2023.

13. <https://policja.pl/>, 26.08.2023.
14. <https://polishevoutlook.pl/2022>, 23.08.2023.
15. https://pspa.com.pl/wp-content/uploads/2021/03/PSPA_pozary_ev_opracowanie.pdf, Eksperti: Samochody elektryczne nie palą się częściej, ani groźniej niż samochody spalinowe, 27.08.2023.
16. https://pspa.com.pl/wp-content/uploads/2021/03/PSPA_pozary_ev_opracowanie.pdf, Eksperti: Samochody elektryczne nie palą się częściej, ani groźniej niż samochody spalinowe, 28.08.2023.
17. https://pspa.com.pl/wpcontent/uploads/2023/03/PSPA_Bezpieczen%CC%81stwo_przeciwpozarowe_EV_White_Paper_online.pdf, 28.08.2023.
18. <https://remiza.com.pl/pozary-elektrykow-w-polsce-dane-komendy-glownej-ppsp/>, 25.08.2023.
19. <https://rib.msb.se/filer/pdf/29438.pdf> Sammanställning av bränder i elfordon och eltransportmedel år 2018–2022, 26.08.2023.
20. <https://www.auto-swiat.pl/ev/wiadomosci/straz-pozarna-o-pozarach-hybrid-i-elektrykow-czy-faktycznie-sa-tak-czeste-i-grozne/5sv8md3>, 25.08.2023.
21. <https://www.cspsp.pl/index.php/pl/9-najnowsze-artykuly/1313-nowe-wyzwanie-szkolimy-sie-pojazdy-elektryczne-i-hybridowe-w-dzialaniach-ratowniczo-gasniczych-panstwowej-strazy-pozarnej> Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie, 28.08.2023.
22. <https://www.cupt.gov.pl/aktualnosc/transportowe-observatorium-badawcze/pozary-samochodow-elektrycznych-nowe-wyzwania-dla-ochrony-przeciwpozarowej/>, 27.08.2023.
23. <https://www.eea.europa.eu/pl/sygna142y/sygna142y-2020/infografika/czym-jest-zanieczyszczenie-srodowiska/view> European Environment Agency, Czym jest zanieczyszczenie środowiska?, 23.08.2023.
24. <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-in-europe>, 23.08.2023.
25. <https://www.evfiresafe.com>, 23.08.2023.
26. https://www.ev-resource.com/Burning_Issues:_The_TRUTH_About_EV_Battery_Fires._Part_One, 27.08.2023.
27. <https://www.gov.pl>, Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej, Baza Wiedzy - Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej – Portal Gov.pl, 28.08.2023.
28. <https://www.ppoz.pl/czytelnia/warsztat-ratownika/Pozary-pojazdow/idn:881>, 25.08.2023.
29. <https://www.renault.pl/samochody-elektryczne/megane-e-tech-electric.html>, 28.08.2023.
30. <https://wysokienapiecie.pl/89604-pozar-samochodu-elektrycznego-dlaczego-wybucha-i-jak-go-ugasic/>, 25.08.2023.
31. https://Zasady_sam_elektryczne_i_hybridowe_maj_2023.pdf, Standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami z napędem elektrycznym oraz hybrydowym, Komendanta Głównego Państwowej Straży Pożarnej (KG PSP), 28.08.2023.
32. ING Economics Department: Raport ING – Breakthrough of Electric Vehicle Threatens European Car Industry 2017.
33. Krajowa Rada Bezpieczeństwa Transportu (NTSB), Biura Statystyk Transportu (BTS), EAFO.
34. Li, Z., Xiong, Y., Sun, S., Zhang, L., Li, S., Liu, X., Xu, Z., Xu, S. (2018). Tri-layer nonwoven membrane with shutdown property and high robustness as a high-safety lithium-ion battery separator, *Journal of Membrane Science*, 50-60.
35. Merkiş, J., Jacyna, M., Merkiş, Guranowska, A., Pielecha J. (2014). Exhaust emissions from oedes of transport under actual traffic conditions *Energy Production and Management in the 21st Century*, 190, WIT Press, Southampton.
36. Neske, M., Kaufmann, J., Butscher, D., Vogel, Ch. (2023). Neue Erkenntnisse für die Brandbekämpfung an E-Fahrzeugen, *vfdb* 2, 88–91.
37. Ould, E.T., Kamzabek, D. Chakraborty, D. (2019). Batteries Safety: Recent Progress and Current Challenges, *Frontiers in Energy Research*.
38. Raboń, J. (2022). Pojazdy elektryczne i ich wpływ na bezpieczeństwo pożarowe garaży- ujęcie praktyczne. *Ochrona przeciwpożarowa*.
39. Sendek-Matysiak, E., Szumska, E. (2018). Infrastruktura ładowania jako jeden z elementów rozwoju elektromobilności w Polsce. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 329-340.
40. Shaw, V. (2021). Two firefighters killed after Beijing battery blaze, *pv magazine*.
41. Sturm, P., Föbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Franz Heindl, S., Krausbar, S., Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire Safty Journal*.
42. Sun, P., Huang, X., Bisschop, R., Niu, H. (2020). Arieview of bat teryfill resin electric vehiles. *Fire Technology*.

43. Sungwook, K., Minjae, K., Joung, Y.Ch., Sengkwag, Ch. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. Applied Ebergy.
44. Valverde, V., Clairotte, M., Bonnel, P., Giechaskiel, B., Carriero, M., Otura, M., Suarez-Bertoa, R. (2019). Joint Research Centre 2018 Light-Duty Vehicles Emissions Testing; JRC117625; Publications Office of the European Union: Luxembourg.
45. Wei-tao, L., Shun-bing, Z., Jun-hui G., Zheng, Z. (2018). Research and Development of Fire Extinguishing Technology for Power Lithium Batteries. Procedia Engineering. 211. 531-537. 10.1016/j.proeng.2017.12.045.
46. Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A., Anderson, J. (2020). Toxic gases from fire In electric vehicles, RISE Report 90.
47. www.cnbp.pl, Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej, 28.08.2023.
48. Xu, B., Lee, J., Kwon, D., Kong, L., Pecht M. (2021). Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Zagrożenia pożarowe samochodów elektrycznych typu BEV

Streszczenie: Obecnie kluczowym trendem rozwojowym w globalnym przemyśle motoryzacyjnym jest elektromobilność. W 2021 r. liczba nowo zarejestrowanych samochodów z napędem elektrycznym typu BEV (*Battery Electric Vehicle*) wyniosła 10,5 mln, a ich udział wzrósł do prawie 13%. Dla porównania, w 2015 r. sprzedano 351 tys. takich pojazdów, zaś w 2010 r. – 7,3 tys. Według prognoz Międzynarodowej Agencji Energetycznej w 2030 r. zeroemisyjna flota może powiększyć się do 190 mln, a 41 mln BEV będzie zarejestrowane w Europie. Plany Unii Europejskiej zakładają, że już 5 lata później, od 2035 r., w żadnym państwie członkowskim nie będzie można rejestrować nowych samochodów osobowych i dostawczych z silnikami spalinowymi. Rodzący się rynek elektromobilności stwarza szereg nowych wyzwań i obaw związanych m.in. z pożarem samochodów elektrycznych. Różnice konstrukcyjne między BEV a ich konwencjonalnymi odpowiednikami powodują, że prawdopodobnie inne będą czynniki ryzyka wpływające na wystąpienie pożaru, jego przebieg i gaszenie. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie rzeczywistych najczęstszych przyczyn wystąpienia pożarów BEV, postępowania oraz rekomendacji dotyczących ich gaszenia. Zaprezentowano również stosowane obecnie rozwiązania mające zmniejszyć ryzyko zapalenia się takich pojazdów. Z przeprowadzonych w niniejszej pracy rozważań wynika, że pożary samochodów w pełni elektrycznych należy uznać za incydentalne, a do ich wystąpienia najczęściej przyczyniają się czynniki zewnętrzne o charakterze ekstremalnym. Właściwym kierunkiem jest zatem upowszechnianie rzetelnej wiedzy na temat przyczyn pożarów takich samochodów, ryzyka ich powstania i zasad profilaktyki przeciwpożarowej.

Słowa kluczowe: pojazdy elektryczne, baterie, elektromobilność

