

Jan Kielin<sup>a)\*</sup>, Jacek Zboina<sup>a)</sup>, Grzegorz Bugaj<sup>b)</sup>, Jacek Zalech<sup>c)</sup>, Damian Bąk<sup>a)</sup>

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

<sup>b)</sup> *Central Institute for Labour Protection – National Research Institute / Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB)*

<sup>c)</sup> *National Headquarters of the State Fire Service of Poland / Komenda Główna Państwowej Straży Pożarnej*

\* *Corresponding author / Autor korespondencyjny: jkielin@cnbop.pl*

## Rescue Operations During Incidents Involving Alternatively Powered Vehicles. Hydrogen Propulsion

### Działania ratownicze podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem alternatywnym. Napędy wodorowe

#### ABSTRACT

**Aim:** This article presents key information and conclusions about hydrogen-powered motor vehicles, as well as technological equipment and technical infrastructure enabling the work of hydrogen fuel cells in the context of their fire safety, particularly the conduct of rescue operations. The authors' main areas of consideration are the challenges for emergency services and the possible risks associated with the development and increasingly widespread and varied use of these technologies.

**Introduction:** We are currently in the midst of the biggest energy crisis since the end of World War II. Therefore, the world's leading economies are taking steps to intensify the production of alternative fuels – including hydrogen – and thus reduce the extraction of fossil fuels. One area of consideration and challenge related to increased extraction, processing and use of hydrogen is safety, particularly fire safety. In this regard, a major challenge is the knowledge, skills, equipment and facilities for rescue operations.

**Methodology:** Based on a review and analysis of literature on the subject and available research results, key information, conclusions and recommendations directed to emergency services conducting operations during accidents and fires involving fuel cells were developed. Taken into account are the specific properties of hydrogen and the need to store it under high pressure. The article reviews the current state of knowledge regarding hazards and how to deal with them when conducting rescue operations during incidents involving hydrogen-powered vehicles.

**Conclusions:** The development of this and other technologies, as well as the use of new alternative fuels, along with the increase in the number of vehicles powered in this way, will undoubtedly result in numerous and varied challenges for fire protection in the near future, including the need for rescue operations. These changes require systemic preparation and improvement of both the knowledge, skills of the rescuers and their equipment. Therefore, it is urgently necessary to work on the preparation/adaptation of appropriate education, training and professional development programs and teaching materials. It is necessary also to clarify the technical requirements for equipment for storing and supplying hydrogen to vehicles for example passenger vehicles and technical equipment in plants such as forklifts or generators for providing electricity in emergency situations. Work on these regulations is currently underway.

**Keywords:** hydrogen drives, fire safety, rescue operations, rescue card

**Type of article:** review article

---

**Received:** 16.10.2023; **Reviewed:** 06.12.2023; **Accepted:** 06.12.2023;

Authors' ORCID IDs: J. Kielin – 0000-0002-3506-5424; J. Zboina – 0000-0002-9436-5830; G. Bugaj – 0000-0003-1650-023X;

J. Zalech – 0000-0001-7948-2812; D. Bąk – 0000-0002-2549-3855;

Percentage contribution: J. Kielin – 30%; J. Zboina – 20%; G. Bugaj – 20%; J. Zalech – 15%; D. Bąk – 15%;

**Please cite as:** SFT Vol. 62 Issue 2, 2023, pp. 6–32, <https://doi.org/10.12845/sft.62.2.2023.1>;

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

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** W niniejszym artykule przedstawiono kluczowe informacje i wnioski dotyczące pojazdów mechanicznych napędzanych wodorem, a także urządzeń technologicznych oraz infrastruktury technicznej umożliwiających działanie wodorowych ogniw paliwowych w kontekście ich bezpieczeństwa pożarowego, w szczególności prowadzenia działań ratowniczych. Głównym obszarem rozważań autorów są wyzwania dla służb ratowniczych oraz możliwe zagrożenia związane z rozwojem oraz coraz powszechniejszym i różnorodnym stosowaniem tych technologii.

**Wprowadzenie:** Obecnie znajdujemy się w samym środku największego kryzysu energetycznego od zakończenia II wojny światowej. Dlatego wiodące gospodarki światowe podejmują działania mające na celu zintensyfikowanie produkcji paliw alternatywnych – m.in. wodoru – i tym samym ograniczenie wydobycia paliw kopalnych. Jednym z obszarów rozważań i wyzwań związanych ze zwiększonym wydobyciem, przetwarzaniem i zastosowaniem wodoru jest bezpieczeństwo, szczególnie bezpieczeństwo pożarowe. W tym zakresie istotnym wyzwaniem są wiedza, umiejętności, sprzęt i wyposażenie do prowadzenia działań ratowniczych.

**Metodologia:** Na podstawie przeglądu i analizy literatury przedmiotu oraz dostępnych wyników badań opracowano kluczowe informacje, wnioski i rekomendacje kierowane do służb ratowniczych prowadzących działania podczas wypadków i pożarów z udziałem ogniw paliwowych. Uwzględniono w nich specyficzne właściwości wodoru oraz konieczność magazynowania go pod wysokim ciśnieniem. Artykuł przeglądowo przedstawia obecny stan wiedzy w zakresie zagrożeń i radzenia sobie z nimi podczas prowadzenia działań ratowniczych z udziałem pojazdów z napędami wodorowymi.

**Wnioski:** Rozwój tej i innych technologii, a także zastosowania nowych paliw alternatywnych, wraz ze wzrostem liczby pojazdów zasilanych w ten sposób, bez wątpienia skutkować będzie w najbliższej przyszłości licznymi i różnorodnymi wyzwaniami dla ochrony przeciwpożarowej, w tym koniecznością prowadzenia działań ratowniczych. Te zmiany wymagają systemowych przygotowań i doskonalenia zarówno wiedzy, umiejętności ratowników, jak i ich wyposażenia. Dlatego konieczne jest pilne podjęcie prac nad przygotowaniem/dostosowaniem odpowiednich programów kształcenia, szkolenia i doskonalenia zawodowego oraz materiałów dydaktycznych.

Niezbędne jest także doprecyzowanie wymagań technicznych dla urządzeń do przechowywania i dostarczania wodoru do pojazdów np. samochodów osobowych i urządzeń technicznych w zakładach np. wózków widłowych czy agregatów prądotwórczych. Aktualnie trwają prace nad tymi regulacjami.

**Słowa kluczowe:** napędy wodorowe, bezpieczeństwo pożarowe, działania ratownicze, karta ratownicza

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

**Przyjęty:** 16.10.2023; **Zrecenzowany:** 06.12.2023; **Zaakceptowany:** 06.12.2023;

Identyfikatory ORCID autorów: J. Kielin – 0000-0002-3506-5424; J. Zboina – 0000-0002-9436-5830; G. Bugaj – 0000-0003-1650-023X; J. Zalech – 0000-0001-7948-2812; D. Bąk – 0000-0002-2549-3855;

Procentowy wkład merytoryczny: J. Kielin – 30%; J. Zboina – 20%; G. Bugaj – 20%; J. Zalech – 15%; D. Bąk – 15%;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 62 Issue 2, 2023, pp. 6–32, <https://doi.org/10.12845/sft.62.2.2023.1>;

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

## Introduction

The growing use of fuel cells in road, marine, rail transportation means that emergency services may increasingly face the challenge of conducting rescue operations during incidents involving a variety of equipment that use fuel cells as an energy source. This incidents such as traffic accidents and failures of such equipment during its operation, requiring urgent intervention of emergency services, especially the fire department and ambulance service.

According to numerous experts, fuel cells provide an environmentally friendly, quiet, flexible and safe solution for providing reliable power in mobile applications. They are available in various formats as control cabinets, trailers, portable outdoor boxes, vehicle-based or directly integrated into vehicles [1, p. 40].

Combined with environmentally friendly hydrogen, fuel cells are currently the most environmentally friendly power source. Direct-methanol fuel cells (DMFCs) are designed for mobile use. The most popular types of hydrogen fuel cells are proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) and solid oxide fuel cells (SOFC). The latter are typically used in stationary applications, but PEMFC fuel cells – thanks to their high efficiency, fast response times and small size and weight – are ideal for portable applications. They convert hydrogen, supplemented with oxygen from the air, into electricity, producing the only by-product – water [1, p. 40].

At present, in emergency practice, we can already encounter the use of hydrogen as a fuel in fuel cells that generate electricity to drive electric motors or to power other consumers, such as

## Wprowadzenie

Rosnące zastosowanie ogniw paliwowych w transporcie drogowym, morskim, kolejowym powoduje, że przed służbami ratowniczymi coraz częściej może pojawiać się wyzwanie prowadzenia działań ratowniczych podczas zdarzeń z udziałem różnorodnych urządzeń, w których wspomniane ogniwa paliwowe służą jako źródło energii. Dotyczy to także zdarzeń typu wypadki komunikacyjne oraz awarie takich urządzeń podczas ich eksploatacji, wymagających pilnej interwencji służb ratowniczych, w szczególności straży pożarnej i pogotowia ratunkowego.

Ogniwa paliwowe w opinii licznych ekspertów stanowią przyjazne dla środowiska, ciche, elastyczne i bezpieczne rozwiązanie zapewniające niezawodne zasilanie w zastosowaniach mobilnych. Są one dostępne w różnych formatach jako szafy sterownicze, przyczepy, przenośne skrzynki zewnętrzne, oparte na pojazdach lub bezpośrednio zintegrowane z pojazdami [1, s. 40].

W połączeniu z ekologicznym wodorem ogniwa paliwowe są obecnie najbardziej sprzyjającym środowisku źródłem zasilania. Ogniwa paliwowe na wodór i metanol (DMFC) są przystosowane do użytku mobilnego. Najpopularniejszymi typami wodorowych ogniw paliwowych są ogniwa z membraną protonowymienną (PEMFC) i ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem (SOFC). Te ostatnie są zwykle używane w zastosowaniach stacjonarnych, ale ogniwa paliwowe PEMFC – dzięki wysokiej wydajności, krótkim czasom reakcji oraz niewielkim rozmiarom i wadze – są idealne do zastosowań przenośnych. Zamieniają one wodór, uzupełniony tlenem z powietrza, w energię elektryczną, produkując jedyny produkt uboczny – wodę [1, s. 40].

lighting systems used in emergency situations, powering facilities important for the safety of people, such as hospitals, nursing homes and other facilities important in emergency situations.

Some countries are also already using methanol fuel cell generators. They are used to supply power to the growing number of devices used by rescuers (fans, rescue tools, lighting of the action area, etc.). They eliminate the need to run both the car engine and the internal combustion engines that drive the generator set, which emit exhaust fumes and generate noise. The factors of the rescue workers' working environment mentioned above are increasingly being analyzed. Alternatives are being sought – including those that will not impede long-term search operations in rubble or earthquake zones. In doing so, it should be noted that methanol-powered fuel cells achieve significantly lower power output compared to hydrogen-powered cells (see Table 2).

The article, as synthetically as possible, presents the most important information and conclusions useful and needed during rescue operations involving hydrogen-powered vehicles. In addition, the area of consideration includes technical infrastructure and related technological equipment. The development of new technologies, including hydrogen propulsion, results in the need for rescuers to improve their training, adjusting their education and training programs – with a particular focus on the necessary knowledge, skills, as well as equipment and supplies needed for rescue operations. To meet this important need, the following sections of the following article, based on the available research results and literature on the subject (hydrogen-oxygen electric cells and motors, hydrogen propulsion), present the identified risks that may arise during operations, failures and accidents, proposals for assessing the risks in the context of response, as well as detailed tactical worksheets proposed for selected incidents. The summary formulates conclusions and recommendations.

## Hydrogen-oxygen fuel cells and electric motors

Vehicles with this type of engine generate the electricity they need from a fuel cell, which produces electricity from the energy carrier known as hydrogen. It is a galvanic cell to which fuel and oxidant are continuously supplied. Hydrogen-oxygen cells are distinguished by the fact that the chemically bound energy of the fuel is not first burned, converted into thermal energy and then converted into electrical energy, but is converted directly from chemical energy into electrical energy. In passenger cars, the fuel for the fuel cell is hydrogen or a hydrogen compound. Fuel cells for other applications may also have other energy sources.

A fuel cell converts hydrogen into electricity. It converts chemical energy directly into electrical energy. Hydrogen is continuously

Obecnie w praktyce ratowniczej możemy już spotkać się z zastosowaniem wodoru jako paliwa w ogniwach paliwowych wytwarzających prąd do napędu silników elektrycznych lub do zasilania innych odbiorników, jak np. instalacje oświetleniowe wykorzystywane w sytuacjach awaryjnych, zasilanie w energię elektryczną obiektów ważnych ze względu na bezpieczeństwo osób, takich jak szpitale, domy opieki oraz inne obiekty ważne w sytuacjach kryzysowych.

W niektórych krajach stosuje się już także agregaty prądotwórcze z napędem na ogniwo paliwowe na metanol. Służą one do zasilania w energię coraz liczniejszych urządzeń stosowanych przez ratowników (wentylatory, narzędzia ratownicze, oświetlenie terenu akcji itp.). Eliminują one konieczność pracy zarówno silnika samochodowego, jak i silników spalinowych napędzających agregat prądotwórczy, które emitują spaliny i generują hałas. Wymienione czynniki środowiska pracy ratowników są coraz częściej przedmiotem analiz. Poszukuje się rozwiązań alternatywnych – w tym takich, które nie będą utrudniać długotrwałych akcji poszukiwawczych na gruzowiskach lub w strefach po trzęsieniach ziemi. Należy przy tym zaznaczyć, że ogniwa paliwowe zasilane metanolem uzyskują znacznie niższą moc w porównaniu z ogniwami zasilanymi wodorem (zob. tabela 2).

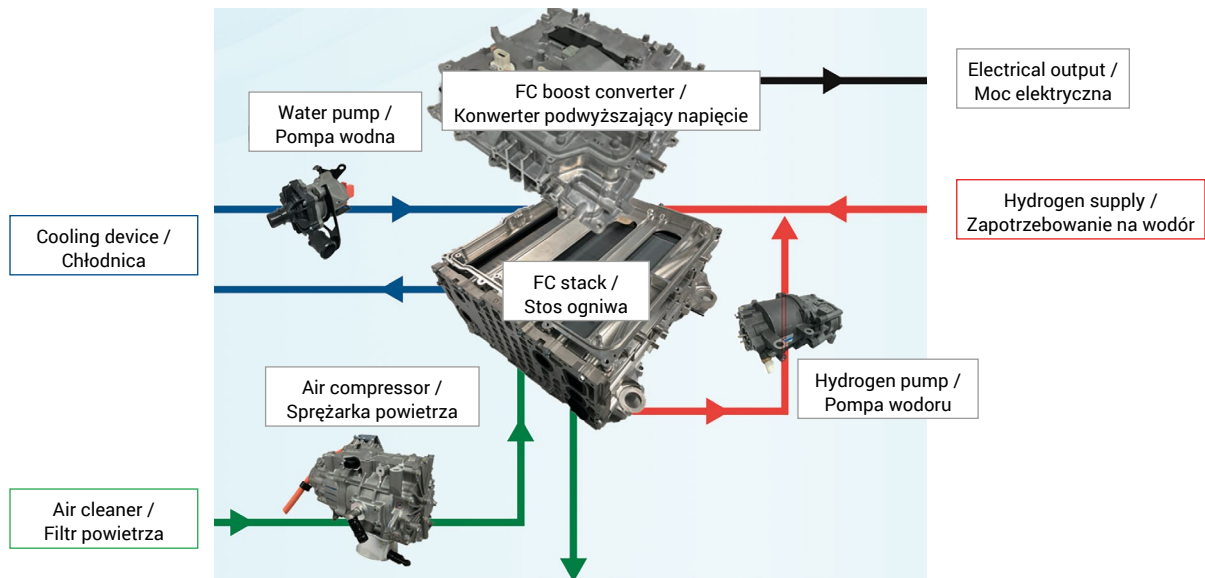
W artykule, w sposób możliwie syntetyczny, przedstawiono najważniejsze informacje i wnioski użyteczne i potrzebne podczas działań ratowniczych z udziałem pojazdów z napędem wodorowym. Dodatkowo obszarem rozważań objęto infrastrukturę techniczną i związane z nią urządzenia technologiczne. Rozwój nowych technologii, w tym napędów wodorowych, skutkuje potrzebą doskonalenia zawodowego ratowników, dostosowywania programów ich kształcenia i szkolenia – ze szczególnym uwzględnieniem niezbędnej wiedzy, umiejętności, a także sprzętu i wyposażenia koniecznych do prowadzenia działań ratowniczych. Wychodząc naprzeciw tej ważnej potrzebie, w kolejnych częściach poniższego artykułu, na podstawie dostępnych wyników badań i literatury przedmiotu (wodorowo-tlenowe ogniwa i silniki elektryczne, napędy wodorowe), przedstawiono zidentyfikowane zagrożenia, jakie mogą powstawać podczas eksploatacji, awarii i wypadków, propozycje oceny zagrożeń w kontekście reagowania, a także szczegółowe arkusze taktyczne proponowane dla wybranych zdarzeń. W podsumowaniu sformułowano wnioski i rekomendacje.

## Wodorowo-tlenowe ogniwa paliwowe i silniki elektryczne

Pojazdy z silnikiem tego typu wytwarzają potrzebną im energię elektryczną z ogniwa paliwowego, które produkuje energię elektryczną z nośnika energii, jakim jest wodór. Jest to ogniwo galwaniczne, do którego w sposób ciągły doprowadzane jest paliwo i utleniacz. Ogniwa wodorowo-tlenowe wyróżnia to, że związana chemicznie energia paliwa nie jest najpierw spalana, przekształcana w energię cieplną i dopiero zamieniana na energię elektryczną, lecz jest przekształcana bezpośrednio z energii chemicznej w elektryczną. W samochodach osobowych paliwem dla ogniwa paliwowego jest wodór lub związek wodoru. Ogniwa paliwowe do innych zastosowań mogą mieć również inne źródła energii.

supplied to it. The resulting waste product is water. The operating voltage is in the range of 200–650 V [2].

Ogniwo paliwowe przetwarza wodór na prąd elektryczny. Przekształca energię chemiczną bezpośrednio w energię elektryczną. Wodór jest do niego stale doprowadzany. Powstającym produktem odpadowym jest woda. Napięcie robocze mieści się w przedziale 200–650 V [2].



**Figure 1.** Example of connection between a fuel cell (FC) module and external devices (visualization)

**Rycina 1.** Przykład połączenia między modułem ogniwa paliwowego (FC) a urządzeniami zewnętrznymi (wizualizacja)

**Source:** Own elaboration based on [3].

**Źródło:** Opracowanie własne na podstawie [3].

A hydrogen vehicle is an electric vehicle (E) connected to a hydrogen fuel cell system (A-B-C-D). Its fuel cell is fuelled by hydrogen and oxygen (from ambient air), and produces the electricity needed to charge batteries and operate electric motors.

Pojazd na wodór to pojazd elektryczny (E) połączony z systemem wodorowych ogniw paliwowych (A-B-C-D). Jego ogniwo paliwowe zasilane jest wodorem i tlenem (z powietrza atmosferycznego), wytwarza energię elektryczną niezbędną do ładowania akumulatorów i obsługi silników elektrycznych.

## Hydrogen drives and fuel cells

Hydrogen-powered vehicles, based on their use, are divided into two types. On the one hand, hydrogen can be used as an alternative fuel for the internal combustion engine, and on the other, it can be converted into electricity in a fuel cell. This energy is used to power the engine or electric motors. Fuel cells are the most energy-efficient device for extracting energy from fuels. The maximum efficiency of the fuel cell is 60%, which is 37% higher than that of a diesel engine.

### Properties of hydrogen

Under standard conditions of temperature and pressure (273.15 K – 0°C / 101.325 kPa – 1 bar), hydrogen:

- is gaseous;
- floats due to its very low relative density – compared to air;
- mixes very quickly with the atmosphere, where it is released;

## Napędy wodorowe i ogniwa paliwowe

Pojazdy napędzane wodorem, ze względu na sposób użytkowania, dzielą się na dwa rodzaje. Z jednej strony wodór może być stosowany jako alternatywne paliwo dla silnika spalinywego, a z drugiej może być przekształcany w energię elektryczną w ogniwie paliwowym. Energia ta jest wykorzystywana do zasilania silnika lub silników elektrycznych. Ogniwa paliwowe to najbardziej wydajne energetycznie urządzenie do pozyskiwania energii z paliw. Maksymalna sprawność ogniwa paliwowego wynosi 60%, a więc o 37% więcej niż silnika Diesla.

### Właściwości wodoru

W standardowych warunkach temperatury i ciśnienia (273,15 K – 0°C / 101,325 kPa – 1 bar), wodór:

- jest gazowy;
- unosi się ze względu na swoją bardzo niską – w porównaniu z powietrzem – gęstość względną;

- has a wide range of flammability;
- can be ignited by one of the lowest gas ignition energies (e.g. static electricity, rubbing, shock, heat);
- spontaneous ignition with sudden release is possible.

If the release is the result of a liquid hydrogen leak, the extremely low temperature of the gas can cause the hydrogen cloud to flow horizontally or downward upon immediate release. Condensation of atmospheric moisture can make the cloud visible for a while, even if the hydrogen itself is invisible.

- bardzo szybko miesza się z atmosferą, w której jest uwalniany;
- ma szeroki zakres palności;
- może zostać zapalony przez jedną z najniższych energii zapłonu gazu (np. elektryczność statyczna, pocieranie, wstrząsy, ciepło);
- możliwy jest spontaniczny zapłon przy nagłym uwolnieniu.

Jeżeli uwolnienie jest wynikiem wycieku ciekłego wodoru, to skrajnie niska temperatura gazu może spowodować, że po natychmiastowym uwolnieniu chmura wodoru będzie płynąć poziomo lub w dół. Kondensacja wilgoci atmosferycznej może sprawić, że chmura będzie przez chwilę widoczna, nawet jeśli sam wodór jest niewidoczny.

**Table 1. Properties of hydrogen**

**Tabela 1. Właściwości wodoru**

Colour / Kolor	Colourless / Bezbarwny
Scent / Zapach	Odourless / Bezwonny
Melting point / Temperatura topnienia	-259°C (solid to liquid) / -259°C (ciało stałe w ciecz)
Boiling point / Temperatura wrzenia	-253°C (liquid to gas) / -253°C (ciecz do gazu)
Self-ignition temperature / Temperatura samozapłonu	560°C
Flammability range / Zakres palności	4–77% volume in air / 4–77% obj. w powietrzu
Detonation range / Zakres detonacji	11–59% in air / 11–59% w powietrzu
Relative density, hydrogen/air / Gęstość względna, wodór/powietrze	0.07/1
Relative density, air/hydrogen / Gęstość względna, powietrze/wodór	14.28/1
Solubility in water / Rozpuszczalność w wodzie	1.6 mg/l
Ignition energy / Energia zapłonu	0.017 mJ

**Source:** Own elaboration based on [2].

**Źródło:** Opracowanie własne na podstawie [2].

#### **Classification, labelling and packaging (CLP) [4]:**

- H220 – extremely flammable gas.  
 H280 – contains gas under pressure; may explode when heated.  
 P210 – keep away from heat, hot surfaces, sparks, open flames and other sources of ignition. Do not burn.  
 P377 – fire caused by a gas leak: do not extinguish unless leak can be stopped safely.  
 P381 – eliminate all ignition sources if safe to do so.  
 P403 – store in a well-ventilated place.  
 P410+P403 – protect from sunlight. Store in a well-ventilated place.

#### **Klasyfikacja, oznakowanie i pakowanie (CLP) [4]:**

- H220 – skrajnie łatwopalny gaz.  
 H280 – zawiera gaz pod ciśnieniem; może wybuchnąć po podgrzaniu.  
 P210 – przechowywać z dala od ciepła, gorących powierzchni, iskiei, otwartego ognia i innych źródeł zapłonu. Nie palić.  
 P377 – pożar spowodowany nieszczelnością gazu: nie gasić, chyba że wyciek może być bezpiecznie zatrzymany.  
 P381 – wyeliminować wszystkie źródła zapłonu, jeżeli jest to bezpieczne.  
 P403 – przechowywać w dobrze wentylowanym miejscu.  
 P410+P403 – chronić przed światłem słonecznym. Przechowywać w dobrze wentylowanym miejscu.

### Identification characteristics of hydrogen containers

Hydrogen is a colourless and odourless gas that is neither irritant nor toxic. However, in the event of a hydrogen leak, breathing apparatus that isolates the airways should always be used. If the hydrogen ignites, the flame is barely visible and has a combustion temperature of about 2000°C. Measurement of explosive atmospheres is possible with the measuring equipment provided by fire brigade units.



Figure 2. Hydrogen cylinder kit  
Rycina 2. Zestaw butli z wodorem

Source / Źródło: Lecomte L., *European Emergency Response Guide, ENSOSP, 2022* [2].

### Cechy identyfikacyjne zbiorników na wodór

Wodór jest bezbarwnym i bezwonym gazem, który nie jest ani drażniący, ani toksyczny. Jednak w przypadku wycieku wodoru należy zawsze używać aparatów powietrznych izolujących drogi oddechowe. Jeśli wodór się zapali, płomień jest ledwo widoczny i ma temperaturę spalania wynoszącą ok. 2000°C. Pomiar atmosfery wybuchowej jest możliwy za pomocą urządzeń pomiarowych będących na wyposażeniu jednostek straży pożarnych.



Table 2. Comparison of the properties of hydrogen and other motor fuels  
Tabela 2. Porównanie właściwości wodoru i innych paliw silnikowych

Properties / Właściwości	Hydrogen / Wodór	Methane / Metan	Gasoline / Benzyna	Diesel / Olej napędowy
	Chemical formula / Wzór chemiczny			
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub>
Carbon content [% by weight] / Zawartość węgla [% mas.]	0	75	84	86
Calorific value [MJ/kg] / Wartość opałowa [MJ/kg]	119.9	45.8	43.9	42.5
Density (1 bar & 273 K) [kg/m <sup>3</sup> ] / Gęstość (1 bar & 273 K) [kg/m <sup>3</sup> ]	0.089	0.72	730–780	830
Volumetric energy content (1 bar & 273 K) [MJ/m <sup>3</sup> ] / Objętościowa zawartość energii (1 bar & 273 K) [MJ/m <sup>3</sup> ]	10.7	33.0	33 × 103	35 × 103
Molecular weight [g/mol] / Masa cząsteczkowa [g/mol]	2.016	16.043	~110	~170
Boiling temperature [K] / Temperatura wrzenia [K]	20	111	298–488	453–633
Self-ignition temperature [K] / Temperatura samozapłonu [K]	853	813	~623	~523
Minimum ignition energy in air (1 bar, stoichiometric mixture) [mJ] / Minimalna energia zapłonu w powietrzu (1 bar, mieszanka stechiometryczna) [mJ]	0.02	0.29	0.24	0.24
Stoichiometric excess air coefficient [mass] / Stechiometryczny współczynnik nadmiaru powietrza [mas.]	34.4	17.2	14.7	14.5
Diffusion coefficient in air (1 bar & 273 K) [m <sup>2</sup> /s] / Współczynnik dyfuzji w powietrzu (1 bar & 273 K) [m <sup>2</sup> /s]	8.5 × 10 <sup>-6</sup>	1.9 × 10 <sup>-6</sup>	–	–
Flammability limits in air [% vol.] / Granice palności w powietrzu [% obj.]	4–76	5.3–15	1–7.6	0.6–5.5
Octane rating (R + M)/2 / Liczba oktanowa (R + M)/2	130+	120+	86–94	–
Cetane number* / Liczba cetanowa*	–	–	13–17	40–55

\* Cetane number (LC) – a quantity characterising the self-ignition capacity of a liquid fuel in a compression-ignition internal combustion engine, source: PWN Encyclopaedia. / \*Liczba cetanowa (LC) – wielkość charakteryzująca zdolność paliwa ciekłego do samozapłonu w tłokowym silniku spalinywym o zapłonie samoczynnym, źródło: Encyklopedia PWN.

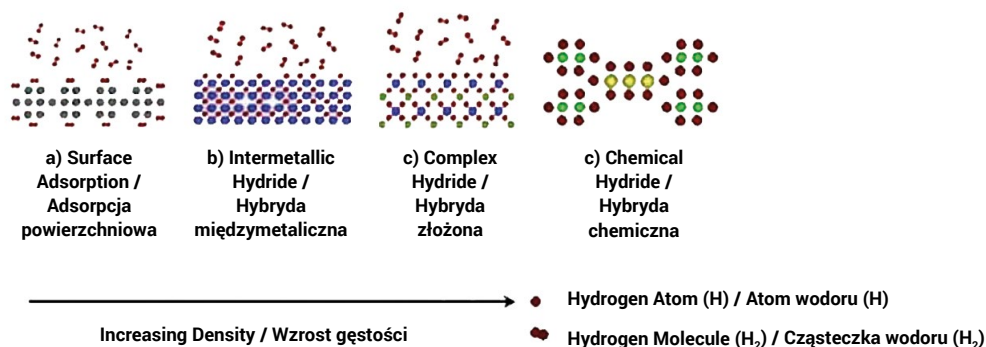
Source / Źródło: Stępień Z., Urzędowska W., *Tłokowe silniki spalinywe zasilane wodorem – wyzwania*, „Nafta–Gaz” 2021, 12, s. 832 [5].

Hydrogen is stored in pressurised composite gas tanks at pressures of around 16 bar and above, either deeply cooled ( $\text{LH}_2$ ) or in gaseous form ( $\text{GH}_2$ ) at pressures of up to 700 bar. Some of these tanks are installed in the boot or under the vehicle.

The most common way to store hydrogen as a compressed gas or as a cryogenic liquid is in metal or composite cylinders or tanks. Cylinders can vary in size, capacity (20–300 litres) and pressure (20–70 MPa), and in some applications can be bundled or collected in a basket for transport [6]. Hydrogen gas can be compressed to pressures of 20–100 MPa. The main problems with storing hydrogen as a compressed gas are the amount of energy required for the compression process, the inherent safety issues associated with storing hydrogen at such high pressures and the additional cost and weight of the cylinders for this purpose. Problems such as permeation and embrittlement are proportional to gas pressure, so at higher pressures they can be more of a problem. In Europe, most portable cylinders only have a valve as a safety feature [6].

Wodór jest przechowywany w ciśnieniowych zbiornikach gazowych z materiałów kompozytowych pod ciśnieniem od ok. 16 barów, głęboko schłodzony ( $\text{LH}_2$ ) lub w postaci gazowej ( $\text{GH}_2$ ) przy ciśnieniu do 700 bar. Niektóre z tych zbiorników są zainstalowane w bagażniku lub pod pojazdem.

Najpopularniejszym sposobem przechowywania wodoru jako gazu sprężonego lub jako cieczy kriogenicznej są metalowe lub kompozytowe butle lub zbiorniki. Butle mogą mieć różne rozmiary, pojemności (20–300 l) i ciśnienia (20–70 MPa), a w niektórych zastosowaniach mogą być połączone w wiązkę lub zebrane w koszu do transportu [6]. Gazowy wodór może być sprężany do ciśnienia 20–100 MPa. Podstawowe problemy dotyczące przechowywania wodoru w postaci sprężonego gazu to ilość energii potrzebnej do procesu sprężania, nieodłączne kwestie bezpieczeństwa związane z przechowywaniem wodoru pod tak wysokim ciśnieniem oraz dodatkowe koszty i masa butli przeznaczonych do tego celu. Problemy, takie jak przenikanie i kruchość, są proporcjonalne do ciśnienia gazu, dlatego przy wyższych ciśnieniach mogą stanowić większy problem. W Europie większość butli przenośnych posiada jedynie zawór jako element zabezpieczający [6].



**Figure 3.** Examples of materials and compounds suitable for hydrogen storage in the solid state

**Rycina 3.** Przykłady materiałów i związków odpowiednich do przechowywania wodoru w stanie stałym

**Source / Źródło:** *European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders* [6].

Hydrogen can also be stored in a structure or on the surface of some solid materials. This storage option requires neither high pressure nor low temperatures as with the previous two methods; instead, it offers advantages in terms of material safety.

Fuel cell electric vehicles (FCVs) have an electric propulsion system powered by a fuel cell that generates electricity through an electrochemical reaction using hydrogen. The key elements of the FCV are:

- A – hydrogen refuelling system;
- B – hydrogen storage system;
- C – hydrogen fuel delivery system;
- D – fuel cell system;
- E – electric drive and energy management system.

Wodór może być również przechowywany w strukturze lub na powierzchni niektórych materiałów stałych. Ta opcja składowania nie wymaga ani wysokiego ciśnienia, ani niskich temperatur, jak w przypadku dwóch poprzednich metod; za to przynosi korzyści w zakresie bezpieczeństwa materiałów.

Pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi (FCV) mają elektryczny układ napędowy zasilany przez ogniwo paliwowe, które generuje energię elektryczną w reakcji elektrochemicznej z wykorzystaniem wodoru. Kluczowe elementy pojazdu FCV to:

- A – system tankowania wodoru;
- B – system magazynowania wodoru;
- C – system dostarczania paliwa wodorowego;
- D – system ogniw paliwowych;
- E – elektryczny układ napędowy i zarządzania energią.

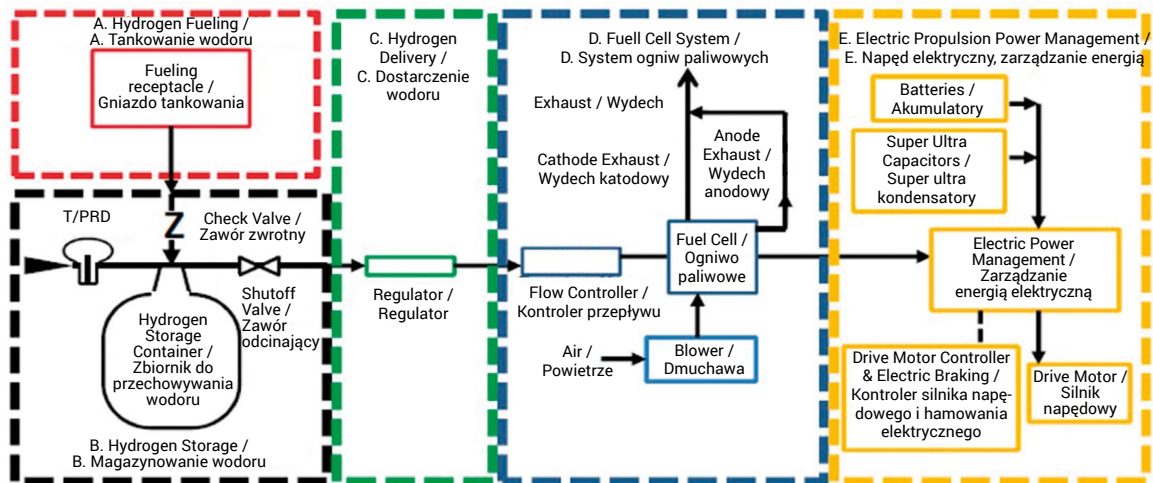


Figure 4. Main components of the FCV drive system

Rycina 4. Główne elementy systemu napędowego pojazdu FCV

Source / Źródło: European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders [6].

FVC vehicles come in two variants, as:

- hydrogen-only fuel cell vehicle with H<sub>2</sub> storage at 700 bar;
- hybrid electric vehicle with battery and H<sub>2</sub> range extender, with a 350 bar hydrogen tank.

The hydrogen fuel tanks have a capacity of approximately 80 litres (2 tanks) or 140 litres. This allows 5 to 7 kg of H<sub>2</sub> to be stored.

Hydrogen tanks are usually installed transversely at the rear of the car, but can also be installed along the car's centre tunnel. The fuel cells and auxiliary equipment are usually located underneath the passenger compartment along with the energy management system, propulsion engine controller and propulsion engines. Given the size and weight of traction batteries and ultracapacitors, these components are usually mounted in the car to maintain the desired weight balance for proper driving.

For a fuel cell electric vehicle, the main hazard events are:

1. Release of hydrogen from a thermally activated pressure relief device (TPRD) or other device (e.g. rupture of a pipe, loss of integrity of connections), and the consequences are:
  - a) release of hydrogen from a non-ignited container;
  - b) hydrogen release with ignition:
    - with immediate ignition causing a jet fire,
    - with delayed ignition resulting in a flammable cloud and potential vapour cloud explosion in free space,
2. Mechanical rupture of the container causing a shock wave.

Pojazdy FVC występują w dwóch wariantach, jako:

- pojazd zasilany wyłącznie wodorem w ogniwie paliwowym z zasobnikiem H<sub>2</sub> o ciśnieniu 700 bar;
- hybrydowy pojazd elektryczny z akumulatorem i rozszerzaczem zasięgu H<sub>2</sub>, ze zbiornikiem na wodór o ciśnieniu 350 barów.

Zbiorniki wodoru paliwa mają pojemność ok. 80 l (2 zbiorniki) lub 140 l. Pozwala to na zgromadzenie od 5 do 7 kg H<sub>2</sub>.

Zbiorniki na wodór są zwykle instalowane poprzecznie z tyłu samochodu, ale mogą być również montowane wzdłuż środkowego tunelu samochodu. Ogniwa paliwowe i urządzenia pomocnicze są zwykle umieszczone pod kabiną pasażerską wraz z systemem zarządzania energią, sterownikiem silnika napędowego i silnikami napędowymi. Biorąc pod uwagę rozmiar i wagę akumulatorów trakcyjnych i ultrakondensatorów, komponenty te są zwykle montowane w samochodzie tak, aby zachować pożądaną równowagę masy dla prawidłowego prowadzenia samochodu.

Dla pojazdu elektrycznego z ogniwem paliwowym główne zdarzenia powodujące zagrożenie to:

1. Uwolnienie wodoru z termicznie aktywowanego urządzenia nadmiarowego (TPRD) lub innego urządzenia (np. pęknięcie przewodu, utrata szczelności połączeń), a konsekwencje to:
  - a) uwolnienie wodoru ze zbiornika bez zapłonu;
  - b) uwolnienie wodoru z zapłonem:
    - z natychmiastowym zapłonem wywołującym pożar strumieniowy,
    - z opóźnionym zapłonem powodującym powstanie palnej chmury i potencjalną eksplozję chmury par w wolnej przestrzeni,
2. Mechaniczne rozerwanie zbiornika wywołujące falę uderzeniową.



**Table 3.** Duration of tank blowdown for different discharge volumes and diameters**Tabela 3.** Czas trwania przedmuchiwanego zbiornika dla różnych objętości i średnic wypływu

Tank capacity / Pojemność zbiornika	Storage pressure / Ciśnienie składowania	Duration of blowdown / Czas trwania przedmuchu			
		0.1 mm	1 mm	2 mm	4 mm
60 l	350 bar	25 h	13 min 20 s	3 min 40 s	52 s
150 l	350 bar	47 h	28 min 10 s	7 min	1 min 40 s
80 l	700 bar	29 h	17 min 10 s	4 min 10 s	56 s
150 l	700 bar	54 h	32 min 20 s	8 min	1 min 50 s

Source: Own elaboration based on [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6].

**Table 4.** Duration of tank blowdown for different discharge volumes and diameters**Tabela 4.** Czas trwania przedmuchiwanego zbiornika dla różnych objętości i średnic wypływu

Hole diameter / Średnica otworu	Pressure in the tank / Ciśnienie w zbiorniku	Thermal effects / Skutki termiczne			
		Flame length / Długość płomienia	No damage / Brak szkód	Pain threshold / Próg odczuwania bólu	3 <sup>rd</sup> degree burns / Poparzenia 3 stopnia
0.1 mm	350 bar	0.2 m	0.7 m	0.6 m	0.4 m
1 mm	350 bar	2.3 m	8 m	7 m	4.6 m
2 mm	350 bar	4.5 m	16 m	14 m	9 m
4 mm	350 bar	9.1 m	32 m	27 m	18 m
0.1 mm	700 bar	0.3 m	1 m	0.9 m	0.6 m
1 mm	700 bar	3 m	11 m	9 m	6 m
2 mm	700 bar	6.1 m	21 m	18 m	12 m
4 mm	700 bar	12.1 m	42 m	36 m	14 m

Source: Own elaboration based on [6].

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6].

### Threats of FCV gas drives H<sub>2</sub>

Currently, existing fuel cell buses and trains have hydrogen gas (not LH<sub>2</sub>) tanks. For FCVs, the main events of concern, are the release of hydrogen from the TPRD or other equipment (e.g. rupture of the cable, loss of tight connections), and the potential consequences are:

1. Tank burst without ignition.
2. Hydrogen release with ignition:
  - with immediate ignition causing a jet fire,
  - with delayed ignition causing a flammable cloud and a potential vapour cloud explosion,
3. Mechanical rupture of the tank causing a shock wave.

In FCVs, the TPRD outlet is usually located very close to the ground, while in trains and buses it is on the roof. The location of the TPRD varies for FCV gas trucks with H<sub>2</sub>, depending on the original design manufacturer.

Hydrogen storage tanks are most often located on the roof of buses and trains, and in the case of trucks they are located on the underside of the frame or chassis. The pressure in storage

### Zagrożenia napędów FCV gazowe H<sub>2</sub>

Obecnie istniejące autobusy i pociągi z ogniwami paliwowymi posiadają zbiorniki na wodór gazowy (nie LH<sub>2</sub>).

W przypadku pojazdów FCV główne zdarzenia, których można się obawiać, to uwolnienie wodoru z TPRD lub innych urządzeń (np. rozerwanie przewodu, utrata szczelności połączeń), a potencjalne konsekwencje to:

1. Rozerwanie zbiornika bez zapłonu.
2. Uwolnienie wodoru z zapłonem:
  - z natychmiastowym zapłonem wywołującym pożar strumieniowy,
  - z opóźnionym zapłonem wywołującym łatwopalną chmurę i potencjalną eksplozję chmury par,
3. Mechaniczne rozerwanie zbiornika wywołujące falę uderzeniową.

W przypadku FCV wylot TPRD zlokalizowany jest najczęściej bardzo blisko podłoża, z kolei w pociągach i autobusach znajduje się na dachu. Lokalizacja TPRD jest różna dla gazowych ciężarówek FCV z H<sub>2</sub>, zależnie od producenta oryginalnego projektu.

tanks is typically 350 bar, and they have a larger capacity than FCVs. However, it can be anticipated that the pressure in the tank will be increased up to 700 bar.

The capacity of the tanks is currently about 170 litres (buses, trucks) or 240 litres (trains). The number of hydrogen tanks depends on the designed range. Thus, there can be from 5 to 10 cylinders per bus or rail car.

The fuel supply – H<sub>2</sub> ranges from 30 to 45 kg for buses and can reach up to 180 kg for trains [7].

### Hydrogen tanks

Hydrogen storage is a key enabling technology for the development of fuel cell hydrogen (FCH) for applications including stationary, mobile and transportation power generation [8]. There is no one-size-fits-all solution for hydrogen storage, and all those used must be carefully designed to meet the system requirements already specified. For instance, space and weight are critical factors for FCV passenger vehicles, while weight may be a desirable attribute for FC forklifts or for marine applications. NASA has been using liquid hydrogen in space applications for years.

Hydrogen at ambient temperature is not a liquid, so in order to store sufficient quantities for a certain driving range of a vehicle (above 500 kilometres), it is necessary to either compress it to very high pressures (e.g. up to 700 bar in automotive applications) or to cool it significantly to make it a liquid. These extremes of pressure and temperature pose a challenge to the safety of the materials used and if airtightness is lost.

Five types of tanks are used to transport and store hydrogen:

- type I: seamless metal container,
- type II: seamless metal container wrapped with a fibre-resin composite rim,
- type III: metal cladding fully wrapped in fibre-resin composite,
- type IV: polymer liner fully wrapped in fibre-resin composite,
- type V: all-composite tank without liner.

Currently, fuel cell-powered light passenger vehicles typically store up to 6 kg of hydrogen in the vehicle tank needed to provide a driving range of 400–500 km [8]. Hydrogen-powered buses store hydrogen on the roof in several tanks. The fuel cell stack is usually located in the rear engine compartment of the bus. Up to 50 kg of hydrogen can be stored on board the FC bus.

The main safety feature of hydrogen storage systems (in both automotive and stationary applications) are pressure relief devices (PRDs). In case of a fire, a temperature-activated venting device (TPRD) ensures the controlled release of GH<sub>2</sub> hydrogen gas from the high-pressure storage tank before its walls are weakened by high temperatures, which could eventually lead to rupture. Therefore, TPRD devices quickly release the entire contents of the container. In case of hydrogen systems, they do not close the tank or allow it to re-pressurize.

Accumulation of hydrogen for long periods of time in rooms such as the garage, workshop room or passenger compartments

Zbiorniki magazynowe wodoru znajdują się najczęściej na dachu autobusów i pociągów, a w przypadku ciężarówek lokalizowane są na dolnej części ramy lub podwozia. Ciśnienie w zbiornikach magazynowych wynosi zwykle 350 barów, a mają one większą pojemność niż samochody FCV. Można jednak przewidywać, że ciśnienie w zbiorniku będzie zwiększone nawet do 700 barów.

Pojemność zbiorników wynosi aktualnie ok. 170 l (autobusy, ciężarówki) lub 240 l (pociągi). Liczba zbiorników wodoru zależy od projektowanego zasięgu. Na jeden autobus lub jeden wagon kolejowy może więc przypadać od 5 do 10 butli.

Zapasy paliwa – H<sub>2</sub> wynosi od 30 do 45 kg dla autobusów i może osiągnąć nawet 180 kg dla pociągów [7].

### Zbiorniki wodoru

Magazynowanie wodoru to kluczowa technologia umożliwiająca rozwój wodorowych ogniw paliwowych (FCH) w zastosowaniach obejmujących generowanie energii elektrycznej stacjonarnie, mobilnie i w środkach transportu [8]. Nie istnieje uniwersalne rozwiązanie do magazynowania wodoru, a wszystkie stosowane muszą być starannie projektowane, aby spełnić określone już wymagania systemowe. Na przykład, przestrzeń i waga są krytycznymi czynnikami dla pojazdów pasażerskich FCV, podczas gdy waga może być pożądanym atrybutem dla wózków widłowych FC lub dla zastosowań morskich. W zastosowaniach kosmicznych NASA od lat wykorzystuje ciekły wodór.

Wodór w temperaturze otoczenia nie jest cieczą, a zatem aby przechowywać ilości wystarczające do pewnego zasięgu jazdy pojazdu (powyżej 500 km), konieczne jest albo sprężenie go do bardzo wysokich ciśnień (np. do 700 barów w zastosowaniach motoryzacyjnych), albo znaczne schłodzenie w celu uzyskania postaci ciekłej. Te ekstremalne wartości ciśnienia i temperatury stanowią wyzwanie dla bezpieczeństwa stosowanych materiałów oraz w przypadku utraty hermetyczności.

Do transportu i magazynowania wodoru stosuje się pięć rodzajów zbiorników:

- typ I: bezszwowy metalowy pojemnik,
- typ II: bezszwowy metalowy pojemnik owinięty obręczą z kompozytu włókno-żywica,
- typ III: metalowe okładziny w pełni owinięte kompozytem z żywicy włóknistej,
- typ IV: wkładka polimerowa w pełni owinięta kompozytem z żywicy włóknistej,
- typ V: całkowicie kompozytowy zbiornik bez wykładziny.

Obecnie lekkie pojazdy pasażerskie napędzane ogniwami paliwowymi zazwyczaj przechowują w zbiorniku pojazdu do 6 kg wodoru potrzebnego do zapewnienia zasięgu jazdy w zakresie 400–500 km [8]. Autobusy zasilane wodorem przechowują wodór na dachu w kilku zbiornikach. Stos ogniw paliwowych znajduje się zwykle w tylnej komorze silnika autobusu. Na pokładzie autobusu FC można przechowywać nawet do 50 kg wodoru.

Główną cechą bezpieczeństwa systemów magazynowania wodoru (zarówno w zastosowaniach motoryzacyjnych, jak i stacjonarnych) są ciśnieniowe urządzenia zabezpieczające (PRD). W przypadku pożaru aktywowane termicznie urządzenie upustowe (TPRD) zapewnia kontrolowane uwolnienie gazowego wodoru GH<sub>2</sub> z wysokociśnieniowego zbiornika magazynowego,

of vehicles can lead to asphyxiation due to the displacement of oxygen by hydrogen.

Potential risks associated with storing compressed hydrogen gas on board a vehicle include [8]:

1. Difficulty in identifying hydrogen release as the gas is odourless, colourless and tasteless. No odorous substances can be added to hydrogen.
2. Hydrogen can cause metals to become brittle. This can result in a reduction in the strength of the material and subsequent rupture of the container, leading to hydrogen leakage.
3. Formation of flammable mixtures of hydrogen with oxygen or hydrogen with air.
4. The ingress of a flammable mixture into the ventilation system of a building can lead to deflagration or even detonation.
5. High-pressure hydrogen jets can cut unprotected skin.
6. Overpressure and impulse can lead to: eardrum damage in humans, tank rupture, flying debris, broken glass, etc.
7. The pressure surge phenomenon can cause a garage to collapse in just one second.
8. Hydrogen can easily ignite because its minimum ignition energy (MIE) is 0.017 mJ – 10 times less than other fuels. A static spark can ignite the released hydrogen.
9. When pure hydrogen burns, its flames are invisible in daylight.
10. Hydrogen burns quickly and does not produce smoke.
11. External fire, heat or radiant heat can cause mechanical rupture of the tank due to thermal decomposition of polymeric materials and composite materials. The current fire resistance value is up to 12 minutes before a catastrophic failure occurs.
12. In case of a TPRD failure, the worst-case scenario is possible: rupture of the of the hydrogen tank, producing a fireball, shock waves and burning debris (meaning a catastrophic failure).

The main risk associated with reservoirs is rupture due to pressure build-up caused by a rise in temperature.

To prevent tank rupture due to pressure build-up, each tank is fitted with a thermal relief device (TPRD). The TPRD is designed to open when the ambient temperature reaches 110°C (230°F) and vent hydrogen into the atmosphere.

zanim jego ściany zostaną osłabione przez wysokie temperatury, co w konsekwencji może doprowadzić do jego pęknięcia. Dlatego urządzenia TPRD szybko uwalniają całą zawartość pojemnika. W przypadku systemów wodorowych nie zamykają one zbiornika ani nie umożliwiają ponownego zwiększenia w nim ciśnienia.

Nagromadzenie wodoru przez długi czas w pomieszczeniach, takich jak garaż, pomieszczenie warsztatowe lub przedziały pasażerskie pojazdów, może doprowadzić do uduszenia z powodu wyparcia tlenu przez wodór.

Potencjalne zagrożenia związane z przechowywaniem na pokładzie pojazdu sprężonego wodoru gazowego obejmują [8]:

1. Trudność w identyfikacji uwolnienia wodoru, ponieważ gaz jest bezwonny, bezbarwny i bez smaku. Do wodoru nie można dodawać substancji zapachowych.
2. Wodór może powodować kruchość metali. Może to skutkować zmniejszeniem wytrzymałości materiału, a w konsekwencji pęknięciem zbiornika, prowadząc do wycieku wodoru.
3. Tworzenie się łatwopalnych mieszanin wodoru z tlenem lub wodoru z powietrzem.
4. Dostanie się łatwopalnej mieszaniny do systemu wentylacyjnego budynku może prowadzić do deflagracji lub nawet detonacji.
5. Strumienie wodoru pod wysokim ciśnieniem mogą przeciąć nieosłoniętą skórę.
6. Nadciśnienie i impuls mogą prowadzić do: uszkodzenia błony bębenkowej u ludzi, pęknięcia zbiornika, latających odłamków, rozbitego szkła itp.
7. Zjawisko skoku ciśnienia może doprowadzić do zawalenia się garażu w ciągu zaledwie jednej sekundy.
8. Wodór może łatwo ulec zapaleniu, ponieważ jego minimalna energia zapłonu (MIE) wynosi 0,017 mJ – czyli 10 razy mniej niż w przypadku innych paliw. Iskra statyczna może zapalić uwolniony wodór.
9. Gdy pali się czysty wodór, jego płomienie są niewidoczne w świetle dziennym.
10. Wodór spala się szybko i nie wytwarza dymu.
11. Zewnętrzny ogień, ciepło lub promieniowanie ciepłe mogą spowodować mechaniczne pęknięcie zbiornika z powodu rozkładu termicznego materiałów polimerowych i kompozytowych. Aktualna wartość odporności ogniowej wynosi do 12 minut przed wystąpieniem katastrofalnej awarii.
12. W przypadku awarii TPRD możliwy jest najgorszy scenariusz: pęknięcie zbiornika wodoru, wytwarzające kulę ognia, fale uderzeniowe i płonące odłamki (co oznacza katastrofalną w skutkach awarię).

Głównym zagrożeniem związanym ze zbiornikami jest ich rozerwanie w wyniku wzrostu ciśnienia spowodowanego wzrostem temperatury.

Aby zapobiec pęknięciu zbiornika na skutek wzrostu ciśnienia, każdy wyposaża się w termiczne urządzenie nadmiarowe (TPRD). Urządzenie TPRD jest zaprojektowane tak, aby otwierało się i upuszczało wodór do atmosfery, gdy temperatura otoczenia osiągnie 110°C (230°F).

### Identification characteristics of the hydrogen powered vehicle

1. Vehicle markings – not currently required by law. The recommended marking according to the ISO standard is described by the author's team in an article entitled *Rescue and firefighting operations during incidents involving alternatively propelled vehicles. Gas propulsion* [9].
2. Additional fuel filler flap.
3. Additional fuel level indicator.
4. Outlets above the roof (manufacturer-specific), which can also be used to identify escaping gas through "rattling noises" (the sound of a valve operating).

### Cechy identyfikacyjne pojazdu napędzanego wodorem

1. Oznaczenia pojazdów – nie są wymagane aktualnie przez prawo. Zalecane oznakowanie zgodnie z normą ISO zostało opisane przez zespół autorski w artykule pt. *Działania ratowniczo-gaśnicze podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem alternatywnym. Napędy gazowe* [9].
2. Dodatkowa klapka wlewu paliwa.
3. Dodatkowy wskaźnik poziomu paliwa.
4. Otwory wylotowe nad dachem (specyficzne dla producenta), które mogą być również wykorzystywane do identyfikacji ulatniającego się gazu poprzez „odgłosy grzechotania” (odgłosy pracy zaworu).



**Figure 5.** Identification of the propulsion system used on the vehicle  
**Rycina 5.** Oznaczenie napędu zastosowanego w pojeździe

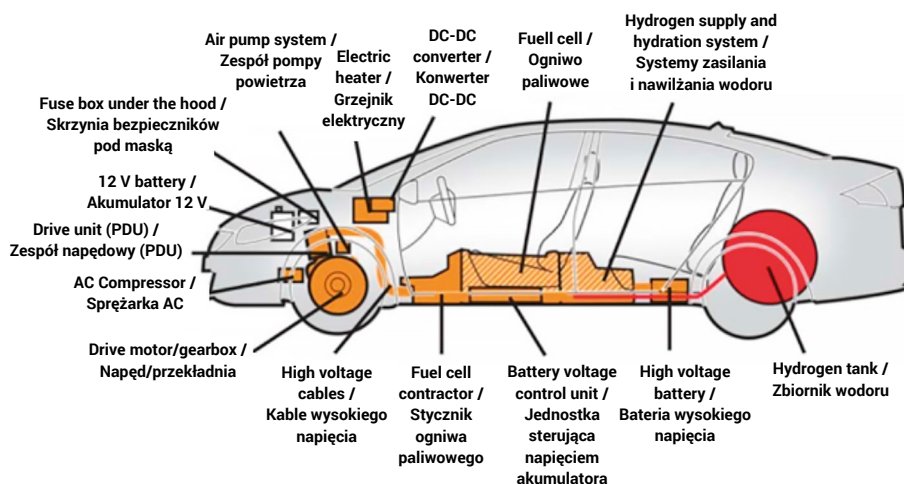
**Source / Źródło:** ix35 FCEV Hyundai Emergency Response Guide, [https://h2tools.org/sites/default/files/training/training/ix35%20FCEV%20ERG\\_Eng.pdf](https://h2tools.org/sites/default/files/training/training/ix35%20FCEV%20ERG_Eng.pdf) [19].

### Hydrogen-fuelled internal combustion engine

Currently, there are a small number of hydrogen-powered vehicles on Polish roads. A hydrogen-powered engine is designed similarly to a petrol or diesel engine. Modified internal combustion engines can use hydrogen as an alternative fuel. The aim is to optimise the emission values of the passenger car. In passenger cars, hydrogen is stored in regular gas cylinders, as well as in other manufacturer-specific storage tanks.

### Silnik spalinowy zasilany wodorem

Obecnie po polskich drogach jeździ niewielka liczba pojazdów napędzanych wodorem. Silnik zasilany wodorem jest skonstruowany podobnie jak silnik benzynowy lub wysokoprężny. Zmodyfikowane silniki spalinowe mogą wykorzystywać wodór jako paliwo alternatywne. Celem jest optymalizacja wartości emisji spalin przez samochód osobowy. W samochodach osobowych wodór jest przechowywany w zwykłych butlach gazowych, a także w innych, specyficznych dla danego producenta zasobnikach.



**Figure 6.** Honda's fuel cell vehicle  
**Rycina 6.** Pojazd Honda z ogniwami paliwowymi

**Source / Źródło:** Honda Emergency Response Guide [17].

Propulsion of vehicles using fuel cells is already being used in:

1. Passenger cars – hydrogen is stored in on-board compressed hydrogen tanks up to a pressure of 700 bar (there may also be more than one tank, e.g. Toyota Mirai FCV has two 70 MPa tanks).
2. Forklift trucks in industry (forklift applications and infrastructure use hydrogen gas:
  - at 200 bar for storage,
  - up to 1000 bar for intermediate storage in buffers,
  - at 350 bar in forklift tanks).
3. Buses (pressures of up to 350 bar are used in the fuel tanks of buses powered by compressed hydrogen).
4. Motorcycles.
5. Heavy goods vehicles.
6. Maritime vessels.
7. Trains.
8. Airplanes.

Napęd pojazdów przy wykorzystaniu ogniw paliwowych stosuje się już w:

1. Samochodach osobowych – wodór przechowywany jest w pokładowych zbiornikach sprężonego wodoru do ciśnienia 700 bar (może też być więcej niż jeden zbiornik np. Toyota Mirai FCV ma dwa zbiorniki 70 MPa).
2. Wózkach widłowych w przemyśle (aplikacje i infrastruktura wózków widłowych wykorzystują gazowy wodór:
  - przy 200 barach do magazynowania,
  - do 1000 barów do pośredniego magazynowania w buforach,
  - przy 350 barach w zbiornikach wózków widłowych).
3. Autobusach (w zbiornikach paliwowych autobusów napędzanych sprężonym wodorem stosuje się ciśnienie do 350 bar).
4. Motocyklach.
5. Samochodach ciężarowych.
6. Statkach morskich.
7. Pociągach.
8. Samolotach.

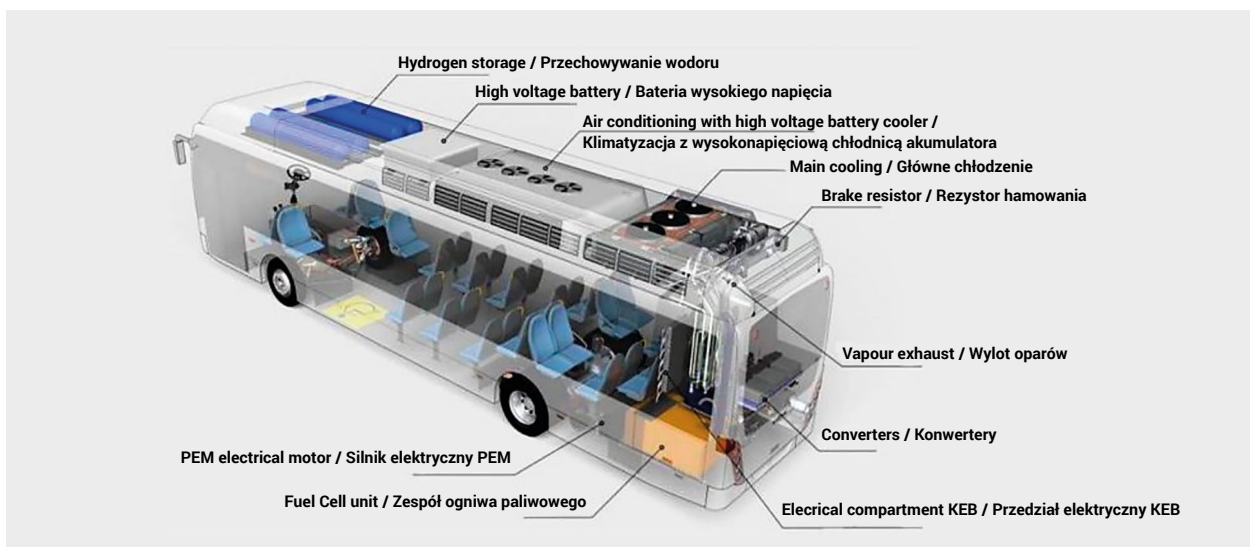


Figure 7. Diagram of a bus powered by fuel cells  
Rycina 7. Pojazd Honda z ogniwami paliwowymi

Source / Źródło: Lecomte L., *European Emergency Response Guide, ENSOSP, 2022* [2].

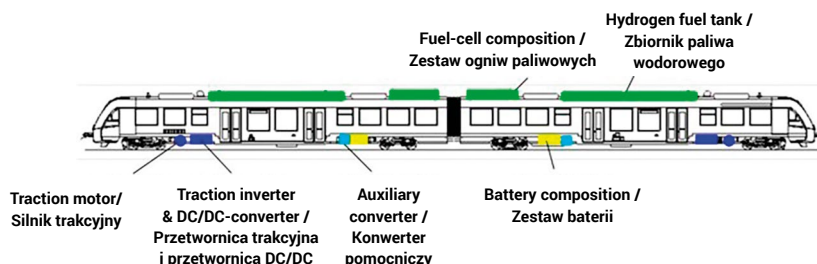


Figure 8. Main components of a hydrogen train (iLint)  
Rycina 8. Główne elementy pociągu z napędem wodorowym (iLint)

Source / Źródło: Lecomte L., *European Emergency Response Guide, ENSOSP, 2022* [2].

### Hydrogen as fuel for fuel cell vehicles

As mentioned earlier, hydrogen is usually stored as a pressurised gas in the tanks of powered vehicles. This pressure can range from 350 bar (buses) to 700 bar (cars).

The vent line can be located on the roof (buses), on the side (forklift trucks) and between the rear wheels (cars). Hydrogen tanks are filled at filling stations through a special filler hole.



**Figure 9.** Connector for hydrogen refuelling

**Rycina 9.** Złącze do tankowania wodoru

**Source / Źródło:** Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns. *Alternativ angetriebene Fahrzeuge...* [18, s. 13].

### Wodór jako paliwo pojazdów z ogniwami paliwowymi

Jak już wspomniano wcześniej, wodór jest zwykle przechowywany jako gaz pod ciśnieniem w zbiornikach napędzanych pojazdów. Ciśnienie to może wynosić od 350 barów (autobusy) do 700 barów (samochody osobowe).

Przewód odpowietrzający może być zlokalizowany na dachu (autobusy), z boku (wózki widłowe) i między tylnymi kołami (samochody). Zbiorniki z wodorem napełniane są na stacjach paliwowych przez specjalny otwór wlewowy.

Table 5 presents the main risks associated with the use of fuel cells in vehicles, together with an indication of the potential origin of the risk and a description of the circumstances (situations) in which the risk may occur.

Tabela 5 prezentuje główne ryzyka związane ze stosowaniem ogniw paliwowych w pojazdach wraz ze wskazaniem potencjalnego pochodzenia zagrożenia i opisem okoliczności (sytuacji), w jakich może dane ryzyko występować.

**Table 5.** Risks associated with the use of fuel cells in vehicles

**Tabela 5.** Ryzyka związane ze stosowaniem ogniw paliwowych w pojazdach

Risk / Ryzyko	Origin of the threat / Pochodzenie zagrożenia	Situation / Sytuacja
Electrocution / Porażenie prądem	Batteries / Baterie	Electric shock due to malfunction, fire, accident, pulling out of water / Porażenie prądem elektrycznym w wyniku nieprawidłowego działania, pożar, wypadek, wyciągnięcie z wody
Burns / Oparzenia	Supercapacitors / Superkondensatory	Outflows of molten metal as a result of using an inappropriate agent (water) to extinguish the fire / Wypływy stopionego metalu w wyniku użycia nieodpowiedniego środka (wody) do gaszenia pożaru
Violent, unquenchable fire / Gwałtowny, nie dający się ugasić pożar	Combustion of metal alloys / Spalanie stopów metali	Batteries are discharged during a fire / Akumulatory ulegają rozładowaniu podczas pożaru
Poisoning / Zatrucie	Batteries / Baterie	Fire or housing failure (accident) / Pożar lub awaria obudowy (wypadek)

**Source:** Own elaboration based on [6].

**Źródło:** Opracowanie własne na podstawie [6].

The following table similarly summarizes the risks associated with the use of hydrogen.

W poniższej tabeli w analogiczny sposób przedstawiono ryzyka związane ze stosowaniem wodoru.

**Table 6.** Risks associated with the use of hydrogen  
**Tabela 6.** Ryzyka związane ze stosowaniem wodoru

Risk / Ryzyko	Origin of the threat / Pochodzenie zagrożenia	Situation / Sytuacja
Suffocation / Uduszenie	Hydrogen (plain suffocating) / Wodór (zwykły duszący)	Hydrogen leakage in an enclosed space without ignition / Wyciek wodoru w zamkniętej przestrzeni bez zapłonu
Burns / Oparzenia	H <sub>2</sub> invisible flame / Niewidoczny płomień H <sub>2</sub>	Vehicle fire and TPRD activation / Pożar pojazdu oraz aktywacja TPRD
Shockwave / Fala uderzeniowa	H <sub>2</sub> tank burst / Rozerwanie zbiornika H <sub>2</sub>	Vehicle fire and TPRD / valve damage / Pożar pojazdu oraz uszkodzenie TPRD / uszkodzenie zaworu
Shock wave and heat wave / Fala uderzeniowa i fala ciepła	H <sub>2</sub> cloud explosion (UVCE) / Eksplzja chmury H <sub>2</sub> (UVCE)	H <sub>2</sub> leakage and ignition source / Wyciek H <sub>2</sub> i źródło zapłonu

Source: Own elaboration based on [6].  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [6].

In order to minimize the indicated risks (hazards) and ensure the safety of use and operation, the following safety devices are currently in use, among others:

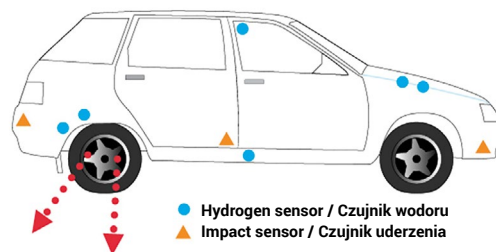
1. Hydrogen sensors (not on all models).
2. Electromagnetic shut-off valve on pressurized gas tank. Turning on the ignition opens the valve and hydrogen flows into the engine. If the ignition is turned off again or the airbag computer detects an accident, the valve closes automatically.
3. Protection against overpressure in the tank.

This prevents the H<sub>2</sub> tank from bursting due to a large increase in pressure, such as a fire. The overpressure protection is installed so that it is possible to blow the gas outside the passenger compartment. If the vehicle is lying on its side or on the roof, the resulting flame jet may affect emergency services if the pressure relief valve is activated, since normally when the car is on its wheels the gas is discharged through the pressure relief opening on the roof.

W celu minimalizacji wskazanych ryzyk (zagrożeń) i zapewnienia bezpieczeństwa użycia i eksploatacji stosowane są aktualnie m.in. następujące urządzenia zabezpieczające:

1. Czujniki wodoru (nie we wszystkich modelach).
2. Elektromagnetyczny zawór odcinający na zbiorniku gazu pod ciśnieniem. Włączenie zapłonu otwiera zawór i wodór płynie do silnika. Jeżeli zapłon zostanie ponownie wyłączony lub komputer poduszek powietrznych wykryje wypadek, zawór zamyka się automatycznie.
3. Ochrona przed nadciśnieniem w zbiorniku.

Zapobiega to rozerwaniu zbiornika H<sub>2</sub> na skutek dużego wzrostu ciśnienia, np. w wyniku pożaru. Zabezpieczenie nadciśnieniowe jest tak zainstalowane, że możliwe jest wydmuchiwanie gazu poza przedział pasażerski. Jeżeli pojazd leży na boku lub na dachu, powstający strumień płomienia może mieć wpływ na działanie służb ratowniczych w przypadku aktywacji zaworu nadciśnieniowego, ponieważ w normalnej sytuacji, gdy samochód stoi na kołach, gaz jest odprowadzany przez otwór nadciśnieniowy na dachu.



\* The illustration does not indicate specific vehicle sensors. It is an exemplary layout/  
\* Ilustracja nie wskazuje na konkretne czujniki pojazdu. Jest to rozmieszczenie przykładowe

**Figure 10.** Possible location of hydrogen sensors on the FCV  
**Rycina 10.** Możliwa lokalizacja czujników wodoru w pojeździe FCV

Source / Źródło: European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders [6].

### Refuelling stations – filling up vehicle tanks with hydrogen

The main function of a hydrogen refuelling station (HRS) is to fill the tanks of vehicles (forklifts, buses, cars) powered by fuel cells with hydrogen. Most refuelling stations supply hydrogen gas, which is initially in storage at a pressure of 200 bar, then compressed in high-pressure storage. The vehicle tank is filled by balancing the pressure. It ranges from 450 bar (forklifts, buses) to 1,000 bar (cars). With fuel tank pressures ranging from 350 bar for a forklift and bus to 700 bar for a car.

In order to fill the vehicle's tank as quickly as possible, the hydrogen can be cooled during the process using a cryogenic liquid hydrogen storage system or a refrigeration unit. The distributor can be located in a dedicated building or outdoors.

### Risks associated with service stations

At filling stations based on hydrogen gas storage, a semi-trailer is generally used as storage. A SWAP system is used, i.e. a "full or empty" exchange. Most trailers consist of 200-barrel steel tubes (i.e. type I tanks) with a capacity of 2 m<sup>3</sup> each. To increase capacity, new trailers were designed with Type IV tanks, each with a capacity of 350 litres, allowing storage pressures of up to 700 bar [6].

The following hazardous events (hazards) may occur during the operation of compressed hydrogen tanks at filling stations:

1. Release of hydrogen without ignition.
2. A release through a 1 mm diameter hole is characteristic of an accidental leak caused by a leaky joint or equipment. Diameters of 2, 4 and 6 mm are more representative of TPRD leakage.
3. Release with immediate ignition.
4. Delayed release.
5. Mechanical rupture of the tank.

### Risks and their potential consequences for hydrogen trailers and liquid hydrogen refuelling stations:

1. Release without ignition.
2. Release with immediate ignition.
3. Mechanical rupture of the tank.

The dangers caused by hazardous events and their consequences are described in detail in the *European Train the Trainer Programme for Responders* [6]. Editorial limitations do not allow them to be discussed in detail in this article.

The publication cited above also provides nomograms against which it is possible to determine:

1. Hazards and possible damage to people (human) resulting from rupture of a tank during a fire.
2. Hazards and possible damage to persons resulting from the bursting of a self-contained tank during a fire.
3. Hazards and possible harm to people resulting from rupture of a tank under a vehicle in a fire.

### Stacje paliw – tankowanie wodoru do zbiorników pojazdów

Główną funkcją stacji tankowania wodoru (HRS) jest napełnianie wodorem zbiorników pojazdów (wózków widłowych, autobusów, samochodów) zasilanych ogniwami paliwowymi. Większość stacji tankowania dostarcza wodór gazowy, który początkowo znajduje się w magazynie pod ciśnieniem 200 barów, następnie jest sprężany w magazynie wysokiego ciśnienia. Zbiornik pojazdu napełniany jest poprzez równoważenie ciśnienia. Wynosi ono od 450 barów (wózki widłowe, autobusy) do 1000 barów (samochody). Przy czym ciśnienie w zbiorniku paliwa wynosi od 350 barów dla wózka widłowego i autobusu do 700 barów dla samochodu.

Aby jak najszybciej napełnić zbiornik pojazdu, wodór może być w trakcie chłodzony za pomocą kriogenicznego systemu przechowywania ciekłego wodoru lub agregatu chłodniczego. Dystrybutor może być umieszczony w dedykowanym budynku lub na zewnątrz.

### Zagrożenia związane ze stacjami paliw

Na stacjach paliw opartych na magazynowaniu wodoru gazowego, z reguły jako magazyn wykorzystywana jest naczepa. Stosuje się system SWAP, czyli wymianę „pełna lub pusta”. Większość naczep składa się z rur stalowych 200-barowych (tj. zbiorników typu I) o pojemności 2 m<sup>3</sup> każda. W celu zwiększenia pojemności zaprojektowano nowe przyczepy ze zbiornikami typu IV, o pojemności 350 l każdy, co pozwala na osiągnięcie ciśnienia przechowywania do 700 barów [6].

W trakcie eksploatacji zbiorników z wodorem sprężonym na stacjach paliw mogą mieć miejsce następujące zdarzenia niebezpieczne (zagrożenia):

1. Uwolnienie wodoru bez zapłonu.
2. Uwolnienie przez otwór o średnicy 1 mm jest charakterystyczne dla przypadkowego wycieku spowodowanego brakiem szczelności połączenia lub sprzętu. Średnice 2, 4 i 6 mm są bardziej reprezentatywne dla wycieku TPRD.
3. Uwolnienie z natychmiastowym zapłonem.
4. Uwalnianie z opóźnionym zapłonem.
5. Mechaniczne pęknięcie zbiornika.

### Zagrożenia i ich potencjalne konsekwencje dla przyczep z wodorem i stacji tankowania ciekłego wodoru:

1. Uwolnienie bez zapłonu.
2. Uwolnienie z natychmiastowym zapłonem.
3. Mechaniczne pęknięcie zbiornika.

Zagrożenia powodowane przez zdarzenia niebezpieczne oraz ich konsekwencje zostały opisane szczegółowo w *European Train the Trainer Programme for Responders* [6]. Ograniczenia redakcyjne nie pozwalają na ich szczegółowe omówienie w niniejszym artykule.

Przywołana powyżej publikacja zawiera także nomogramy, w oparciu o które można określić:

1. Zagrożenia i możliwe szkody dla ludzi (w ludziach) wynikające z rozerwania zbiornika podczas pożaru.
2. Zagrożenia i możliwe szkody dla ludzi wynikające z rozerwania samodzielnego zbiornika podczas pożaru.
3. Zagrożenia i możliwe szkody dla ludzi wynikające z rozerwania zbiornika pod pojazdem w pożarze.



4. Hazards and possible damage to buildings caused by the rupture of a self-contained tank during a fire.
5. Hazards and possible damage to buildings caused by a tank bursting under a vehicle during a fire.
6. Duration of the blowout. This nomogram gives an estimate of the blow-up time of a tank depending on the volume, pressure and size of the discharge opening.

## Threat (risk) assessment, response

The three main protective objectives (protection of life, property and the environment) must be pursued in the safest and most effective way possible as the assessment of each incident allows. The emergency commander must take appropriate action, analysing its risks, taking into account the lives, property and environmental situation that can be saved, balanced with the available rescue forces at the time of the operational decision.

Therefore, decision-making strategies can be divided into two main groups, depending on the level of risk:

1. High-risk incidents – if nothing is done, the incident will lead in a short period of time to certain deaths of people, severe damage to infrastructure and/or irreversible environmental effects.
2. Low-risk events – an incidental situation will lead to minor impacts on people, infrastructure and/or reversible environmental impacts over a period of time.

Since strategy is the answer to the question – what goal do I want to achieve? tactics are the answer to that question – how will I achieve this goal (in the safest way)? The use of defined tactics is a direct consequence of the chosen strategy. Tactics is a variable concept, determined at the operational level, depending on the situation occurring at the present time and in the near future. For a specific type of situation, a tactic can be planned as a step-by-step procedure that describes the actions of rescuers. However, it is clear from the general principles that the incident commander always has the opportunity and the obligation to apply the appropriate procedure for each incident, as each incident is different, individual, unique [6].

There are usually two main types of tactics in use – offensive or defensive. Offensive tactics aim to act quickly on the source of the incident to prevent the consequences of the incident. It has the advantage of speed of action, as it concerns the initial phase of operations with the minimum number of rescuers and equipment available. On the other hand, the disadvantage is that it is risky for firefighters – one action can be taken.

An incident begins when an emergency call reaches the services (e.g. via 112). People who report an incident are usually over-stimulated or upset. Despite this, relevant information needs to be gathered:

- type of incident (electrical fault, gas leak, explosion, fire, etc.);
- location;
- number of people killed, injured or at risk.

4. Zagrożenia i możliwe szkody w budynkach spowodowane pęknięciem samodzielnego zbiornika podczas pożaru.
5. Zagrożenia i możliwe szkody w budynkach spowodowane rozerwaniem zbiornika pod pojazdem podczas pożaru.
6. Czas wybuchu. Ten nomogram podaje ocenę czasu przedmuchiwania zbiornika w zależności od objętości, ciśnienia i wielkości otworu spustowego.

## Ocena zagrożenia (ryzyka), reagowanie

Trzy główne cele ochronne (ochrona życia, mienia i środowiska) muszą być realizowane w możliwie najbezpieczniejszy i skuteczny sposób, na jaki pozwala ocena każdego zdarzenia. Kierujący akcją musi podejmować adekwatne działania, analizując ich ryzyko, biorąc pod uwagę możliwe do uratowania życie, mienie i sytuację środowiskową, zrównoważone dostępnymi siłami ratowniczymi w momencie podejmowania decyzji operacyjnych.

Strategie przy podejmowaniu decyzji można więc podzielić na dwie główne grupy, zależne od poziomu zagrożenia:

1. Zdarzenia o wysokim poziomie zagrożenia – jeśli nic nie zostanie zrobione, incydent doprowadzi w krótkim czasie do pewnej śmierci ludzi, poważnych zniszczeń infrastruktury i/lub nieodwracalnych skutków dla środowiska.
2. Zdarzenia o niskim poziomie zagrożenia – incydentalna sytuacja doprowadzi w dłuższym czasie do niewielkich skutków dla ludzi, infrastruktury i/lub odwracalnych skutków dla środowiska.

Ponieważ strategia jest odpowiedzią na pytanie, jaki cel chcę osiągnąć, taktyka jest odpowiedzią na pytanie – jak osiągnę ten cel (w najbezpieczniejszy sposób)? Stosowanie zdefiniowanej taktyki jest bezpośrednią konsekwencją wybranej strategii.

Taktyka jest pojęciem zmiennym, ustalonym na poziomie operacyjnym, w zależności od sytuacji występującej w chwili obecnej i w najbliższej przyszłości. Dla określonego typu sytuacji można zaplanować taktykę jako procedurę, która krok po kroku opisuje działania ratowników. Jednak z ogólnych zasad wynika, że dowódca zdarzenia ma zawsze możliwość i obowiązek zastosowania odpowiedniego postępowania dla każdego zdarzenia, ponieważ każde zdarzenie jest inne, indywidualne, niepowtarzalne [6].

W użyciu są zazwyczaj dwa główne rodzaje taktyki – ofensywna lub defensywna. Taktyka ofensywna ma na celu szybkie oddziaływanie na źródło zdarzenia, aby zapobiec skutkom jego wystąpienia. Jej zaletą jest szybkość podjęcia działań, ponieważ dotyczy początkowej fazy działań przy minimalnej, dostępnej liczbie ratowników i sprzętu. Natomiast wadą jest to, że jest ryzykowna dla strażaków – można wykonać jedno działanie.

Zdarzenie zaczyna się w momencie, gdy do służb (np. poprzez numer 112) dociera zgłoszenie alarmowe. Osoby, które zgłaszają zdarzenie, są zazwyczaj nadmiernie pobudzone lub zdenerwowane. Pomimo tego należy zebrać istotne informacje:

- typ zdarzenia (awaria elektryczna, wyciek gazu, wybuch, pożar itp.);
- miejsce zdarzenia;
- liczba osób zabitych, rannych lub zagrożonych.

The above data enables the duty officer to select the nearest available emergency team and provide useful advice to the person who called. The following steps should be considered when operating with an FCV:

- assess the scene of an incident, so-called 360° reconnaissance;
- look for a rescue card displayed on the outside or inside of the vehicle, or on the Internet to confirm that an FCV is involved in the incident;
- ensure that all passengers can evacuate the vehicle;
- switch off the ignition;
- provide first aid to casualties in a safe place;
- try to extinguish the fire with an extinguisher if the fire is small;
- do not allow unauthorised access to a burning vehicle before the arrival of the fire brigade.

Every rescue operation follows the same step-by-step sequence, i.e.:

- reconnaissance,
- rescue,
- preparation,
- composure,
- supervision,
- clearing the site,
- final inspection.

It should be emphasized that these steps can be implemented simultaneously, depending on the actual situation.

Recommendations for KDR:

1. Confirm vehicle as FCV – identify signage or type of refuelling connection. Refer to latest manufacturer's emergency manual or relevant emergency card.
2. Designate appropriate danger zones.
3. Immobilise the vehicle by putting wheel chocks under the wheels in both directions of the vehicle.
4. Shut down/deactivate the vehicle in accordance with the manufacturer's emergency response guidelines.
5. Switch off the main instrument panel, especially if the vehicle is charged.
6. Ensure that rescuers use breathing apparatus that isolates the airways (especially if white vapours or smoke are present).
7. Use dielectric gloves and insulated tools according to the guidelines.

Powyższe dane umożliwiają dyżurnemu wybór najbliższego dostępnego zespołu ratunkowego i udzielenie przydatnych porad osobie, która zadzwoniła.

W trakcie działań z pojazdem FCV należy rozważyć następujące kroki:

- dokonać oceny miejsca zdarzenia tzw. rozpoznanie 360°;
- poszukać karty ratowniczej umieszczonej na zewnątrz lub wewnątrz pojazdu, lub w Internecie, aby potwierdzić, że w zdarzeniu uczestniczy FCV;
- upewnić się, że wszyscy pasażerowie mogą ewakuować się z pojazdu;
- wyłączyć zapłon;
- udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym w bezpiecznym miejscu;
- podjąć próbę ugaszenia pożaru za pomocą gaśnicy, jeśli pożar jest niewielki;
- nie dopuszczać osób postronnych do płonącego pojazdu przed przybyciem straży pożarnej.

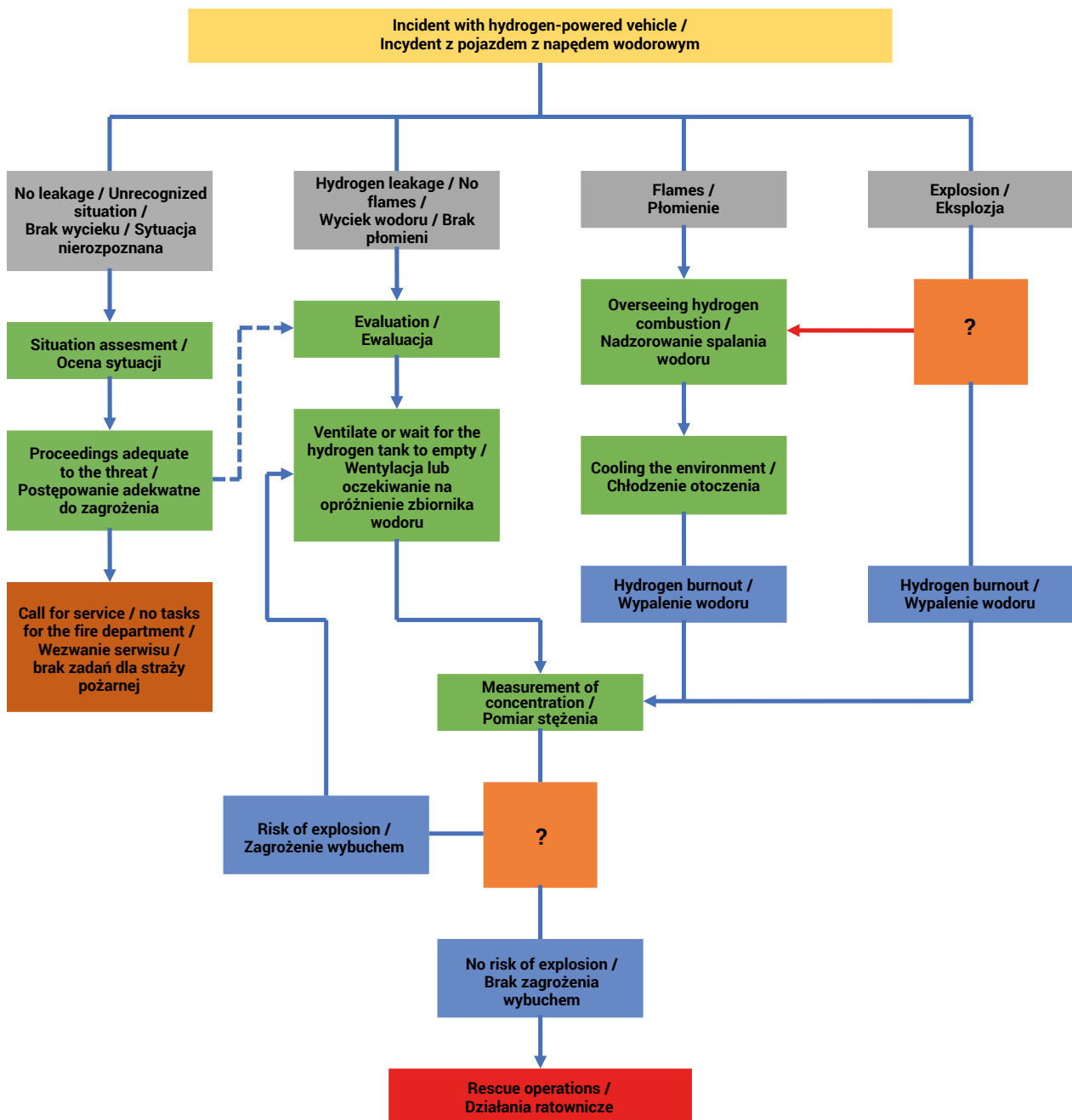
Każda akcja ratownicza przebiega według tej samej sekwencji krok po kroku, tj.:

- rozpoznanie,
- ratowanie,
- przygotowanie,
- opanowanie,
- nadzór,
- oczyszczenie terenu,
- kontrola końcowa.

Należy pamiętać, że kroki te mogą być realizowane jednocześnie, w zależności od rzeczywistej sytuacji.

Zalecenia dla KDR:

1. Potwierdzenie pojazdu jako FCV – zidentyfikować oznakowanie lub rodzaj przyłącza do tankowania. Odnieść się do najnowszej instrukcji postępowania producenta w sytuacjach awaryjnych lub odpowiedniej karty ratowniczej.
2. Wyznaczyć odpowiednie strefy zagrożenia.
3. Unieruchomić pojazd, podkładając kliny pod koła w dwóch kierunkach pojazdu.
4. Wyłączyć/dezaktywować pojazd zgodnie z wytycznymi producenta dotyczącymi reagowania w sytuacjach awaryjnych.
5. Wyłączyć główną tablicę rozdzielczą, zwłaszcza jeśli pojazd jest naładowany.
6. Upewnić się, że ratownicy korzystają z aparatów powietrznych, izolujących drogi oddechowe (zwłaszcza w przypadku obecności białych par lub dymu).
7. Stosować rękawice dielektryczne i izolowane narzędzia zgodnie z wytycznymi.



**Figure 11.** Diagram of the procedure to be followed by KSRG units when dealing with incidents involving hydrogen-powered vehicles  
**Rycina 11.** Schemat postępowania jednostek KSRG podczas działań przy wypadkach z udziałem pojazdów z napędem wodorowym  
**Source:** Own elaboration (G. Bugaj).  
**Źródło:** Opracowanie własne (G. Bugaj).

### Detailed tactical sheets proposed for selected events

Figure 14 shows a diagram of how KSRG units should proceed when dealing with accidents involving hydrogen-powered vehicles. Given the current knowledge of hydrogen-related fires, the HyResponder materials cited in this article [10] propose tactical worksheets for incidents involving: passenger cars, buses, forklifts, hydrogen storage trailers, fuelling stations, stationary

### Szczegółowe arkusze taktyczne proponowane dla wybranych zdarzeń

Na rycinie 14 został przedstawiony schemat postępowania jednostek KSRG podczas działań przy wypadkach z udziałem pojazdów z napędem wodorowym. Biorąc pod uwagę aktualną wiedzę na temat pożarów związanych z występowaniem wodoru, cytowane w niniejszym artykule materiały HyResponder [10] zawierają propozycje arkuszy taktycznych dla zdarzeń

and mobile power generation units, hydrogen-based energy storage systems. It proposes a tactical approach for 4 types of possible events:

- no leakage, no fire;
- H<sub>2</sub> leakage;
- fire in the installation;
- external fire endangering the installation.

The sheets also include intervention sequences for situations:

1. Rescue:
  - injured person in nearby FCH,
  - suffocation caused by H<sub>2</sub> leakage in an enclosed space,
  - electrocution,
  - burns from H<sub>2</sub> leakage.
2. Fire in electrical components of FCH application.
3. Fire threatening FCH installation or H<sub>2</sub> storage facility.
4. Ignited H<sub>2</sub> leak.
5. Non-ignited H<sub>2</sub> leakage.

For each situation, a step-by-step sequence, information on safety points and indicative safety distances in the event of failure of pressure-releasing equipment and protection of the population from the effects of tank explosions are proposed [10].

Based on the cited sources, CNBOP PIB has taken on the task of developing a guide for KSRG rescuers, which will propose intervention strategies depending on situations where hydrogen is or could be the main source of danger.

## Conclusion

Fuel cells are reliable, durable and require little maintenance. Hydrogen and direct methanol fuel cells (DMFCs) are suitable for mobile applications. The most common types of hydrogen fuel cells are proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) and solid oxide fuel cells (SOFCs). The latter are typically used in stationary applications, while PEMFCs – due to their high performance, short response times and small size and weight – are promising for mobile applications. According to many experts, the technology is safe for mobile applications due to its high power density and low operating temperature of around 80°C. It is quiet and produces only a small amount of waste heat. Commercial fuel cell systems for mobile applications have an output of 2.5 to 50 kW with a weight of 28.5 kg and a nominal consumption of 0.06 kg H<sub>2</sub>/kWh. Integrated hydrogen tank systems ensure that the fuel is available on a continuous basis, thus providing an uninterrupted supply for long periods. With a BO I 300 bar gas cylinder, a 1.5 kW PMFC fuel cell can operate for at least 12 hours [1, p. 39].

Direct methanol fuel cells (DMFCs) use liquid methanol, also supplemented with oxygen from the air, to generate electricity. In

dotyczących: samochodów osobowych, autobusów, wózków widłowych, przyczep do transportu przechowywania wodoru, stacji paliw, stacjonarnych i mobilnych jednostek wytwarzania energii, systemów magazynowania energii na bazie wodoru. Proponuje się tam podejście taktyczne dla 4 rodzajów możliwych zdarzeń:

- brak wycieku, brak pożaru;
- wyciek H<sub>2</sub>;
- ogień w instalacji;
- pożar zewnętrzny zagrażający instalacji.

W arkuszach zawarte są także sekwencje interwencyjne dla sytuacji:

1. Ratowanie:
  - uszkodzona osoba w pobliskim FCH,
  - uduszenie spowodowane wyciekami H<sub>2</sub> w zamkniętej przestrzeni,
  - porażenie prądem,
  - oparzenia spowodowane wyciekami H<sub>2</sub>.
2. Pożar komponentów elektrycznych aplikacji FCH.
3. Pożar zagrażający instalacji FCH lub magazynowi H<sub>2</sub>.
4. Zapalony wyciek H<sub>2</sub>.
5. Niezapalony wyciek H<sub>2</sub>.

Dla każdej z sytuacji proponowana jest sekwencja krok po kroku, informacje o punktach bezpieczeństwa i orientacyjne odległości bezpieczeństwa w przypadku awarii urządzeń uwalniających ciśnienie oraz zabezpieczenie ludności przed skutkami wybuchu zbiorników [10].

Opierając się na cytowanych źródłach, CNBOP PIB podjęło się zadania opracowania poradnika dla ratowników KSRG, który będzie zawierał propozycje strategii interwencyjnych w zależności od sytuacji, w których głównym źródłem zagrożenia jest lub może być wódór.

## Podsumowanie

Ogniwa paliwowe są niezawodne, trwałe i wymagają niewielkiej konserwacji. Ogniwa paliwowe na wódór i bezpośredni metanol (DMFC) nadają się do zastosowań mobilnych. Najpopularniejszymi typami wodorowych ogniw paliwowych są ogniwa z membraną protonowymienną (PEMFC) i ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem (SOFC). Te ostatnie są zwykle używane w zastosowaniach stacjonarnych, natomiast PEMFC – ze względu na wysoką wydajność, krótkie czasy reakcji oraz niewielkie rozmiary i wagę – są perspektywiczne do zastosowań mobilnych. W opinii wielu ekspertów, dzięki wysokiej gęstości mocy i niskiej temperaturze roboczej wynoszącej ok. 80°C, technologia ta jest bezpieczna w zastosowaniach mobilnych. Jest cicha i wytwarza jedynie niewielką ilość ciepła odpadowego. Komercyjne systemy ogniw paliwowych do zastosowań mobilnych mają moc wyjściową od 2,5 do 50 kW przy wadze 28,5 kg i nominalnym zużyciu 0,06 kg H<sub>2</sub>/kWh. Zintegrowane systemy zbiorników wodoru zapewniają dostępność paliwa w trybie ciągłym, a tym samym nieprzerwane zasilanie przez długi czas. Z butlą gazową BO I 300 bar, ogniwo paliwowe PEMFC o mocy 1,5 kW może pracować przez co najmniej 12 godzin [1, s. 39].

this case, methanol is converted directly into electricity. By-products are waste heat, water and small amounts of CO<sub>2</sub>. Due to their liquid fuel and light weight, these cells are suitable for remote continuous operation (e.g. in monitoring or measurement scenarios) and for self-sufficient operation in harsh environments. Commercial systems combine a DMFC fuel cell with a battery to power the equipment, with the cell always fully automatically charging the battery. Commercial DMFC systems are available with continuous output power of up to 500 W. The 28 l fuel cartridge provides self-sustaining power to a 50 W receiver for up to 4 weeks – several fuel cells and/or fuel cartridges can be combined if required.

Both PEMFC and DMFC fuel cell systems are suitable for operation with other alternative energy generators, such as solar modules. In such a hybrid combination, the fuel cell switches on automatically only when the solar modules no longer generate enough electricity.

Bezpośrednie metanolowe ogniwa paliwowe (DMFC) do generowania energii elektrycznej wykorzystują ciekły metanol, również uzupełniony tlenem z powietrza. W tym przypadku metanol jest przekształcany bezpośrednio w energię elektryczną. Produktami ubocznymi są ciepło odpadowe, woda i niewielkie ilości CO<sub>2</sub>. Dzięki ciekłemu paliwu i niewielkiej masie ogniwa te nadają się do zdalnej pracy ciągłej (np. w scenariuszach monitorowania lub pomiarów) oraz do samowystarczalnej pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Systemy komercyjne łączą ogniwo paliwowe DMFC z akumulatorem, z którego zasilane są urządzenia, przy czym ogniwo zawsze w pełni automatycznie ładuje akumulator. Komercyjne systemy DMFC są dostępne z ciągłą mocą wyjściową do 500 W. Wkład paliwowy 28 l zapewnia samowystarczalne zasilanie odbiornika o mocy 50 W przez okres do 4 tygodni – w razie potrzeby można połączyć kilka ogniw paliwowych i/lub wkładów paliwowych.

Zarówno systemy ogniw paliwowych PEMFC, jak i DMFC nadają się do pracy z innymi alternatywnymi generatorami energii, np. modułami słonecznymi. W takim hybrydowym połączeniu ogniwo paliwowe włącza się automatycznie tylko wtedy, gdy moduły słoneczne nie wytwarzają już wystarczającej ilości energii elektrycznej.

**Table 8. Advantages and disadvantages of selected fuel cell power technologies for mobile application scenarios**  
**Tabela 8. Zalety i wady wybranych technologii zasilania ogniw paliwowych dla scenariuszy zastosowań mobilnych**

Type of fuel cell / Rodzaj ogniwa paliwowego	Fuel capacity / Moc paliwa	Type of fuel / Rodzaj paliwa	Advantages / Zalety	Disadvantages / Wady
PEMFC	> 2.5 kW	Hydrogen / Wodór	Environmentally friendly, emission-free, quiet, no moving parts, low level of waste heat, configurable in accordance with according to power requirements, with green hydrogen, best environmental balance / Przyjazny dla środowiska, bezemisyjny, cichy, bez ruchomych części, niski poziom ciepła odpadowego, konfigurowalny zgodnie z wymaganiami mocy, z zielonym wodorem, najlepszy bilans środowiskowy	Need for refuelling, hydrogen gas has to be transported under pressure or in liquefied form and is therefore expensive, special safety requirements for hydrogen / Konieczność uzupełniania paliwa, gazowy wodór musi być transportowany pod ciśnieniem lub w postaci skroplonej, dlatego jest kosztowny, specjalne wymogi bezpieczeństwa dla wodoru
DMFC	< 0.5 kW	Methanol / Metanol	Environmentally friendly, quiet, smooth and easy to transport transportable fuel, extremely long self-sufficiency, configurable depending on depending on power requirements / Przyjazne dla środowiska, ciche, płynne i łatwe w transporcie paliwo, wyjątkowo długa samowystarczalność, możliwość konfiguracji w zależności od zapotrzebowania na moc	Methanol infrastructure still under construction, special transport requirements for methanol, destruction of fuel cell membranes with contaminated methanol / Infrastruktura metanolu wciąż w budowie, specjalne wymagania transportowe dla metanolu, niszczenie membran ogniw paliwowych przy użyciu zanieczyszczonego metanolu

Source: Own elaboration (J. Kielin) based on [1].

Źródło: Opracowanie własne (J. Kielin) na podstawie [1].

Examples of fuel cell applications include powering mobile 360° CCTV camera systems with power requirements of 60–120 W during large events. They are used to locate trouble spots and secure evidence of crimes. DMFC fuel cells provide reliable power away from the electrical grid. The self-sufficiency of CCTV systems can be increased, if necessary, by using appropriately sized

Przykładami zastosowania ogniw paliwowych jest zasilanie mobilnych systemów kamer CCTV 360° o zapotrzebowaniu na moc 60–120 W podczas dużych imprez. Są one wykorzystywane do lokalizowania miejsc problematycznych i zabezpieczenia dowodów przestępstw. Ogniwa paliwowe DMFC zapewniają niezawodne zasilanie z dala od sieci elektrycznej. Samowystarczalność systemów

fuel cartridges. The fuel cell is invisibly and vandal-proofly connected to the battery in the base of the CCTV system. In hybrid mode, a solar module can be added.

The development of the use of alternative drives, the use of new power sources, solutions and technologies is a fact. It should be mentioned that in vehicles with fuel cell technology, for example, the fuel storage – usually hydrogen (trials are underway with methanol as well) – is gaseous, and electricity is generated in the fuel cell. Here, the battery serves as intermediate storage, among other things, to store recovered energy, so it may have less capacity than a battery electric vehicle (BEV).

As of the end of July 2022, 124 hydrogen-powered vehicles were in operation in Poland<sup>1</sup>. However, a number of forecasts and ventures (such as the hydrogen valleys being created<sup>2</sup>) are available that show that the number of fuel cell vehicles and devices will grow rapidly in the coming years. According to various estimates, as a result of the development of hydrogen stations, 70 or even 140,000 may arrive on Polish roads by 2030 [14].

The development of this and other technologies and the use of new alternative fuels, along with the increase in the number of vehicles fuelled in this way, will undoubtedly result in numerous and varied challenges for fire protection, as well as the need for rescue operations, in the near future. These changes require systemic preparation and improvement of both the knowledge, skills of rescuers and their equipment.

Another area of application for fuel cells is mobile solutions. Fuel cells, due to their advantages, are already widely used, especially in emergency situations when there is a shortage of power supply from the grid. Fuel cells are completely independent of the weather. Their different types can use different fuels, such as hydrogen, methanol, ammonia or methane. Depending on the fuel used – in the simplest case they emit only water. These solutions are already being tested for rescue purposes, and their mass use may become a reality in the near future.

It is necessary to clarify the technical requirements for equipment for storing and supplying hydrogen to vehicles (passenger vehicles, trucks, buses, trains, airplanes) and technical equipment in plants (such as forklifts or generators for providing electricity in emergency situations, as well as for powering facilities and equipment in situations where power grids are unavailable). Work on these regulations is currently underway. Proposals have been made to amend the Energy Law and some other laws, which implement the provisions of the strategic document entitled *Polish Hydrogen Strategy until 2030 with an outlook until 2040*.

A wide range of possible scenarios for firefighting units to intervene in high-risk incidents requires adequate preparation of rescue personnel (entry-level rescuers, commanders of rescue units – depot commanders, platoon commanders, rescue managers) and specialists. Therefore, it is urgently necessary to work on the preparation of appropriate education, training and in-service training programs and teaching materials.

CCTV można w razie potrzeby zwiększyć, stosując odpowiedniej wielkości wkłady paliwowe. Ogniwo paliwowe jest w niewidoczny i wandaloodporny sposób podłączone do akumulatora w podstawie systemu CCTV. W trybie hybrydowym można dodać moduł solarny.

Rozwój wykorzystania napędów alternatywnych, stosowania nowych źródeł zasilania, rozwiązań i technologii jest faktem. Nadmienić należy, że w pojazdach np. z technologią ogniw paliwowych, magazyn paliwa – zwykle wodoru (trwają próby z zastosowaniem również metanolu) – jest gazowy, a energia elektryczna wytwarzana jest w ogniwie paliwowym. Akumulator służy tu jako magazyn pośredni, m.in. do przechowywania odzyskanej energii, dlatego może mieć mniejszą pojemność niż w przypadku pojazdu elektrycznego na baterie (BEV).

W Polsce na koniec lipca 2022 roku eksploatowano 124 pojazdów z napędem wodorowym<sup>1</sup>. Dostępne są jednak liczne prognozy i przedsięwzięcia (jak tworzone doliny wodorowe<sup>2</sup>), które świadczą o tym, że liczba pojazdów i urządzeń napędzanych prądem z ogniwa paliwowego będzie szybko rosła w najbliższych latach. Według różnych szacunków, na skutek rozwoju stacji wodorowych do 2030 roku na polskich drogach może przybyć 70, a nawet 140 tys. [14].

Rozwój tej i innych technologii oraz zastosowania nowych paliw alternatywnych, wraz ze wzrostem liczby pojazdów zasilanych w ten sposób, bez wątpienia skutkować będzie w najbliższej przyszłości licznymi, różnorodnymi wyzwaniami dla ochrony przeciwpożarowej, a także koniecznością prowadzenia działań ratowniczych. Te zmiany wymagają systemowych przygotowań i doskonalenia zarówno wiedzy, umiejętności ratowników, jak i ich wyposażenia.

Innym obszarem zastosowania ogniw paliwowych są rozwiązania mobilne. Ogniwa paliwowe ze względu na swoje zalety znajdują już szerokie zastosowanie, szczególnie w sytuacjach kryzysowych, gdy brakuje dostaw prądu z sieci. Ogniwa paliwowe są całkowicie niezależne od pogody. Ich poszczególne typy mogą wykorzystywać różne paliwa, np. wodór, metanol, amoniak lub metan. W zależności od zastosowanego paliwa – w najprostszym przypadku emitują tylko wodę. Te rozwiązania już są testowane na potrzeby ratownicze, a ich masowe wykorzystywanie może stać się faktem w nieodległej przyszłości.

Niezbędne jest doprecyzowanie wymagań technicznych dla urządzeń do przechowywania i dostarczania wodoru do pojazdów (pojazdy osobowe, samochody ciężarowe, autobusy, pociągi, samoloty) i urządzeń technicznych w zakładach (takich jak wózki widłowe czy agregaty prądotwórcze służące do dostarczania prądu w sytuacjach kryzysowych, a także do zasilania obiektów i urządzeń w sytuacjach braku dostępu do sieci energetycznych). Aktualnie trwają prace nad tymi regulacjami. Powstały propozycje zmian ustawy Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw, które realizują zapisy strategicznego dokumentu pt. *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040*.

<sup>1</sup> The data in this paragraph comes from the website <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-samochody-elektryczne-coraz-popularniejsze-mimo-spadkow-na-rynku-motoryzacyjnym>.

<sup>2</sup> Seven hydrogen valleys are currently operating in Poland (dolnośląska, mazowiecka, podkarpacka, śląsko-małopolska, pomorska, wielkopolska, zachodniopomorska).

<sup>1</sup> Dane zamieszczone w tym akapicie pochodzą ze strony <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-samochody-elektryczne-coraz-popularniejsze-mimo-spadkow-na-rynku-motoryzacyjnym>.

<sup>2</sup> W Polsce aktualnie działa siedem dolin wodorowych (dolnośląska, mazowiecka, podkarpacka, śląsko-małopolska, pomorska, wielkopolska, zachodniopomorska).

The above predictions and conclusions justify ongoing research and work, subsequent implementations and solutions.

Currently, fuel cell vehicles are being produced as a possible complement or alternative to electric cars. They have the following advantages:

- fuel cell generates emission-free electricity from hydrogen,
- fuel cell vehicles can be refuelled just as quickly as internal combustion ones,
- fuel cells are lighter than batteries, so they can be widely used in long-haul trucks or buses, giving them greater applicability than battery-only vehicles,
- range of fuel cell vehicles is longer,
- hydrogen is a good energy carrier<sup>3</sup>,
- hydrogen can be stored for any length of time, and its supply is essentially infinite [15].

This article presents the opportunities presented by the use of hydrogen fuel cells to power vehicles and machinery. The use of hydrogen fuel cells in households is also growing. A case in point is Japan, where fuel cells already provide electricity and heat to more than 400,000 homes, a number that is expected to rise to as many as 5 million by 2030 [16]. It is therefore reasonable to say that hydrogen fuel cells will be used more and more widely in our market as well. Emergency services must be prepared for this, keeping in mind not only the effectiveness of operations, operational and application safety, but also the safety of rescuers. Urgent needs in this area are already being recognized, such as:

- uniform rules of conduct during incidents with liquefied or compressed hydrogen,
- activities to develop and implement into the training practice of KSRG units dedicated training programs for rescuers at the intervention, tactical and strategic levels for those in charge of rescue operations where compressed or liquefied hydrogen may be present,
- measures to promote the proper conduct of users of hydrogen fuel cell vehicles, as well as those using hydrogen fuel cell systems in their households.

Szeroka gama możliwych scenariuszy interwencji jednostek straży pożarnych do zdarzeń o wysokim zagrożeniu wybuchem wymaga odpowiedniego przygotowania kadr ratowniczych (ratowników na poziomie podstawowym, dowódców jednostek ratowniczych – dowódców zastępu, plutonu, kierujących działaniami ratowniczymi) i specjalistów. Dlatego konieczne jest pilne podjęcie prac nad przygotowaniem odpowiednich programów kształcenia, szkolenia oraz doskonalenia zawodowego i materiałów dydaktycznych.

Powyższe przewidywania i wnioski uzasadniają prowadzone badania i prace, kolejne wdrożenia i rozwiązania.

Obecnie pojazdy z ogniwami paliwowymi są produkowane jako możliwe uzupełnienie lub alternatywa dla samochodów elektrycznych. Posiadają one następujące zalety:

- ogniwo paliwowe generuje bezemisyjną energię elektryczną z wodoru,
- ogniwo paliwowe działa dłużej niż konwencjonalny akumulator,
- pojazdy z ogniwami paliwowymi można tankować równie szybko jak te spalinowe,
- ogniwa paliwowe są lżejsze od akumulatorów, dlatego mogą być powszechnie wykorzystywane w samochodach ciężarowych lub autobusach w transporcie dalekobieżnym, co daje większe możliwości zastosowania niż w przypadku pojazdów wyłącznie akumulatorowych,
- zasięg pojazdów napędzanych ogniwami paliwowymi jest większy,
- wodór jest dobrym nośnikiem energii<sup>3</sup>,
- wodór może być przechowywany przez dowolnie długi czas, a jego zasoby są w zasadzie nieskończone [15].

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości, jakie stwarza stosowanie wodorowych ogniw paliwowych do napędu pojazdów i maszyn. Rośnie także użycie wodorowych ogniw paliwowych w gospodarstwach domowych. Przykładem może być Japonia, gdzie ogniwa paliwowe już dostarczają energię elektryczną i ciepło do ponad 400 tys. domów, a do 2030 r. liczba ta ma wzrosnąć aż do 5 milionów [16]. Uzasadnione zatem jest twierdzenie, iż wodorowe ogniwa paliwowe stosowane będą coraz powszechniej również na naszym rynku. Służby ratownicze muszą być na to przygotowane, mając na względzie nie tylko skuteczność działań, bezpieczeństwo eksploatacji i stosowania, ale także bezpieczeństwo ratowników. Już dziś dostrzega się pilne potrzeby w tym obszarze, takie jak:

- jednolite zasady postępowania podczas zdarzeń z wodorem skroplonym lub sprężonym,
- działania mające na celu opracowanie i wdrożenie do praktyki szkoleniowej jednostek KSRG dedykowanych programów szkolenia dla ratowników na poziomach: interwencyjnym, taktycznym i strategicznym dla osób kierujących działaniami ratowniczymi, w których może występować wodór sprężony lub skroplony,
- działania propagujące właściwe postępowanie użytkowników pojazdów z napędem wodorowymi ogniwami paliwowymi, a także osób użytkujących w swoich gospodarstwach domowych instalacje z takimi ogniwami.

<sup>3</sup> The heating value of one kilogram is 33 kilowatt-hours, which is three times the energy value of one liter of diesel or gasoline.

<sup>3</sup> Wartość opałowa jednego kilograma wynosi 33 kilowatogodziny, co stanowi trzykrotność wartości energetycznej jednego litra oleju napędowego lub benzyny.

## Definitions and abbreviations

The following are a selection of the most relevant definitions related to the subject of the work. They were also referenced in articles by the author team published in Safety & Fire Technology magazine in issues 2/2022 and 1/2023.

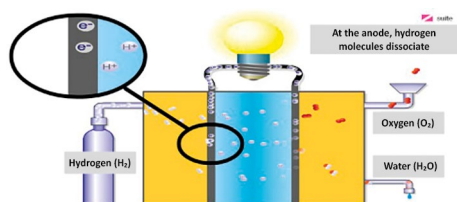
**BEV** – battery electric vehicle.

**FCV** – fuel cell car.

**FCH** – fuel cell hydrogen / hydrogen-powered vehicles.

**Fuel cell (FC)** – an electrochemical generator that generates electricity by converting chemical energy into electrical energy. In case of a hydrogen-powered FC, oxygen and hydrogen are combined to produce electricity, heat and water. The FC consists of two electrodes [positive (cathode) and negative (anode)] immersed in an electrolyte solution that provides ion transfer in both directions, while the corresponding flow of electrons in the outer circuit provides electrical energy [11].

**Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)** – at the anode, hydrogen molecules  $H_2$  are dissociated into protons  $H^+$  and electrons  $e^-$  under the influence of a catalyst:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ . These protons are guided to the cathode through membranes, while the electrons pass through an external electrical circuit. At the cathode, oxygen molecules  $O_2$  are recombined with protons and electrons to form water:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  [7].



**Figure 12.** Schematic principle of fuel cell functioning

**Rycina 12.** Zasada działania ogniwa paliwowego – schemat

**Source Źródło:** Lecomte L., *European Emergency Response Guide, ENSOSP, 2022* [2].

**A first responder** – is a rescuer (e.g. firefighters, police, medical personnel) who is likely to arrive first at the scene of an accident /incident [7].

**Operational risk** – the risk of loss resulting from inadequate or unreliable internal procedures, errors in people and systems, or from external events, also including legal risk. The fulfilment of operational risk always involves the loss of key resources or loss of control over those resources [12].

**Strategy**<sup>4</sup> – a comprehensive plan of action that includes the goals and methods needed to achieve those goals. It is long-term

<sup>4</sup> „Dział sztuki wojennej obejmujący przygotowanie i prowadzenie wojny oraz poszczególnych jej kampanii i bitew”, „przemysłany plan działań w jakiejś dziedzinie”, Encyklopedia PWN.

## Definicje i skróty

Poniżej przedstawiono wybrane, najistotniejsze definicje powiązane z przedmiotem pracy. Zostały one przywołane również w artykułach zespołu autorskiego opublikowanych w czasopiśmie „Safety & Fire Technology” w numerach 2/2022 i 1/2023.

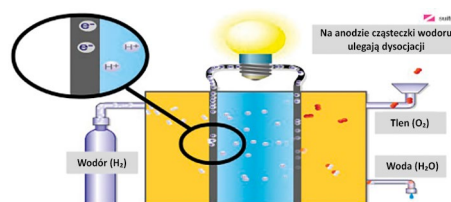
**BEV** – pojazd elektryczny na baterie.

**FCV** – pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi.

**FCH** – wodorowe ogniwo paliwowe / pojazdy zasilane wodorem.

**Ogniwo paliwowe (FC)** – generator elektrochemiczny, który wytwarza energię elektryczną poprzez zamianę energii chemicznej na elektryczną. W przypadku FC zasilanego wodorem, tlen i wodór są łączone w celu wytworzenia energii elektrycznej, ciepła i wody. FC składa się z dwóch elektrod [dodatniej (katoda) i ujemnej (anoda)] zanurzonych w roztworze elektrolitu, który zapewnia transfer jonów w obu kierunkach, podczas gdy odpowiedni przepływ elektronów w obwodzie zewnętrznym zapewnia energię elektryczną [11].

**Ogniwo paliwowe z membraną protonową (PEMFC)** – na anodzie cząsteczki wodoru  $H_2$  są dysocjowane na protony  $H^+$  i elektrony  $e^-$  pod wpływem katalizatora:  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ . Protony te są prowadzone do katody przez membrany, a elektrony przechodzą przez zewnętrzny obwód elektryczny. Na katodzie cząsteczki tlenu  $O_2$  są rekombinowane z protonami i elektronami tworząc wodę:  $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$  [7].



**Osoba udzielająca pierwszej pomocy** – to ratownik (np. strażacy, policja, personel medyczny), który prawdopodobnie przybędzie jako pierwszy na miejsce wypadku/incydentu [7].

**Ryzyko operacyjne** – ryzyko straty wynikające z nieodpowiednich lub zawodnych procedur wewnętrznych, błędów ludzi i systemów lub ze zdarzeń zewnętrznych, obejmując także ryzyko prawne. Spełnianie się ryzyka operacyjnego zawsze polega na utracie kluczowych zasobów lub utracie kontroli nad tymi zasobami [12].

**Strategia**<sup>4</sup> – kompleksowy plan działania, który obejmuje cele i metody potrzebne do osiągnięcia tych celów. Jest to planowanie

<sup>4</sup> „Dział sztuki wojennej obejmujący przygotowanie i prowadzenie wojny oraz poszczególnych jej kampanii i bitew”, „przemysłany plan działań w jakiejś dziedzinie”, Encyklopedia PWN.



planning that involves selecting resources and allocating resources in a way that ensures the effective achievement of specific goals or outcomes [13].

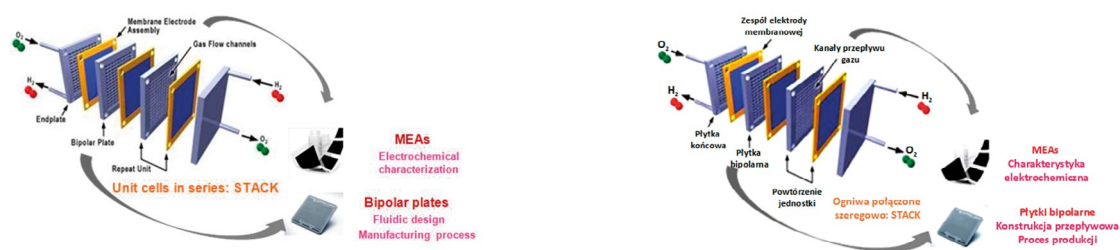
**Thermal pressure relief device (TPRD)** – provides a controlled release of GH<sub>2</sub> (hydrogen gas) from a high-pressure storage tank before its walls are weakened by high temperature, leading to a catastrophic rupture (burst) [13].

**Pressure relief device (PRD)** – a safety device that protects a storage tank from failure by releasing some or all of the tank's contents in the event of high temperature, high pressure, or a combination of both [13].

długoterminowe, które obejmuje wybieranie środków i alokację zasobów w sposób, który zapewnia skuteczne osiągnięcie określonych celów lub rezultatów [13].

**Termicznie aktywowane urządzenie nadciśnieniowe (TPRD)** – zapewnia kontrolowane uwolnienie GH<sub>2</sub> (wodór w postaci gazowej) z wysokociśnieniowego zbiornika magazynowego, zanim jego ścianki zostaną osłabione przez wysoką temperaturę, prowadząc do katastrofalnego pęknięcia (rozerwania) [13].

**Urządzenie nadmiarowo-ciśnieniowe (PRD)** – urządzenie zabezpieczające, które chroni przed awarią zbiornik magazynowy poprzez uwolnienie części lub całej zawartości zbiornika w przypadku wysokiej temperatury, wysokiego ciśnienia lub kombinacji obu tych czynników [13].



**Figure 13.** Membrane Electrode Assembly (MEA)  
**Rycina 13.** Zespół elektrody membranowej (MEA)

**Source / Źródło:** Lecomte L., *European Emergency Response Guide*, ENSOSP, 2022 [2].

## Literature / Literatura

- [1] Ledergerber B., Pinkwart K., Gerber T., *Energieversorgung im Einsatz. Mobiler Strom für Krisenszenarien*, „Crisis Prevention” 2023, 2.
- [2] Lecomte L., *European Emergency Response Guide*, ENSOSP, 2022, [https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/05/Final-English-EERG-December-2022\\_VFinal.pdf](https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/05/Final-English-EERG-December-2022_VFinal.pdf) [dostęp: 01.03.2023].
- [3] FC module, portal internetowy Global Toyota, <https://global.toyota/en/album/images/34799439/> [dostęp: 01.03.2023].
- [4] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1272/2008 z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie klasyfikacji, oznakowania i pakowania substancji i mieszanin, zmieniające i uchylające dyrektywy 67/548/EWG i 1999/45/WE oraz zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1907/2006 (Dz. U. UE. L. 353 z 2008, s. 1 z późn. zm.).
- [5] Stępień Z., Urzędowska W., *Tłokowe silniki spalinowe zasilane wodorem – wyzwania*, „Nafta–Gaz” 2021, 12, 830–840, <https://doi.org/10.18668/NG.2021.12.06>.
- [6] *European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders*, <https://ctif.org/hyresponder-course-material-part-1> [dostęp: 18.09.2023].
- [7] *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders*, <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials> [dostęp: 01.03.2023].
- [8] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> [dostęp: 01.09.2023].
- [9] Kielin J., Zboina J., Bugaj G., Zalech J., Bąk D., *Działania ratowniczo-gaśnicze podczas zdarzeń z udziałem pojazdów z napędem alternatywnym. Napędy gazowe*, SFT Vol. 61 Issue 1, 2023, pp. 6–31, <https://doi.org/10.12845/sft.61.1.2023.1>.
- [10] Lecomte L., *European Train the Trainer Programme for Responders, Deliverable 1.3 Account of scenarios and operational emergency planning and response strategies and tactics*, 2021, <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2022/01/D1.3-Account-of-scenarios-and-operational-emergency-planning-and-response-strategies-and-tactics.pdf> [dostęp: 25.09.2023].
- [11] *Bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń, instalacji i sieci gazowych*, [https://grupasilesia.com.pl/files/1714/1890/8208/Materialy\\_do\\_pobrania\\_-\\_g3.pdf](https://grupasilesia.com.pl/files/1714/1890/8208/Materialy_do_pobrania_-_g3.pdf) [dostęp: 01.10.2023].
- [12] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Ryzyko\\_operacyjne](https://pl.wikipedia.org/wiki/Ryzyko_operacyjne) [dostęp: 18.09.2023].

- [13] Internetowa Encyklopedia PWN, <https://encyklopedia.pwn.pl/>.
- [14] *Licznik Elektromobilności: samochody elektryczne coraz popularniejsze mimo spadków na rynku motoryzacyjnym*, wpis na portalu internetowym PSPA, <https://pspa.com.pl/2022/informacja/licznik-elektromobilnosci-samocho- dy-elektryczne-coraz-popularniejsze-mimo-spadkow-na- rynku-motoryzacyjnym> [dostęp: 18.09.2023].
- [15] *Wasserstoffautos mit Brennstoffzelle So steht's um die Zukunft von Wasserstoffautos*, artykuł na portalu AutoBild, <https://www.autobild.de/artikel/wasserstoffautos-brennstoffzelle-fuel-cell-20492755.html> [dostęp: 18.09.2023].
- [16] Grandt M., *Megatrend Wasserstoff!: Gestalten Sie Ihre ganz persönliche Energiewende*, Kopp Verlag, 2022.
- [17] Honda Emergency Response Guide, <https://www.nfpa.org/Training-and-Events/By-topic/Alternative-Fuel-Vehicle-Safety-Training/Emergency-Response-Guides/Honda> [dostęp: 18.09.2023].
- [18] Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns. Alternativ angetriebene Fahrzeuge, Staatliche Feuerweherschulen, 2018.
- [19] ix35 FCEV Hyundai Emergency Response Guide, [https://h2tools.org/sites/default/files/training/training/ix35%20FCEV%20ERG\\_Eng.pdf](https://h2tools.org/sites/default/files/training/training/ix35%20FCEV%20ERG_Eng.pdf) [dostęp: 18.09.2023].

**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 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.

**SEN. BRIG. (RETD.) JAN KIELIN, M.SC. ENG.** – he graduated from the School of Fire Service Officers in Warsaw and the Higher School of Fire Service Officers in Warsaw. In 1975 he became a licensed fire risk surveyor. He has authored many publications and translations on fire protection.

**SEN. BRIG. (RETD.) GRZEGORZ BUGAJ, PH.D. ENG.** – a graduate of the Fire University (Apoż). He completed postgraduate studies in the areas of: Safety and Protection of Man in the Work Environment (Central Institute for Labour Protection in Warsaw), Emergency Medicine (Medical Academy in Poznan), Safety of Nuclear Energy (Main School of Fire Service), CBRN security manager (Faculty of Biology and Environmental Protection, University of Lodz). Long-time commander of the Specialized Chemical and Ecological Rescue Group and member of the "CBRNDet Module" of the European Civil Protection Mechanism. Former Vice-Chancellor-Deputy Commandant for Operations at the Main School of Fire Service.

**SEN. BRIG. JACEK ZALECH, M.SC. ENG.** – a graduate of the Main School of Fire Service in Warsaw, as well as postgraduate studies in emergency management. He also completed postgraduate Executive Master of Business Administration (MBA). He is an officer with 28 years of experience. He currently serves at the National Headquarters of the State Fire Service as Director of the Bureau of Operations Planning. Author or co-author of documents affecting the safe conduct of rescue operations.

**ST. BRYG. DR HAB. INŻ. JACEK ZBOINA** – Z-ca Dyrektora ds. Certyfikacji i Dopuszczzeń 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 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.

**ST. BRYG. W ST. SP. MGR INŻ. JAN KIELIN** – absolwent Szkoły Oficerów Pożarnictwa w Warszawie oraz Wyższej Oficerskiej Szkoły Pożarniczej w Warszawie. W roku 1975 uzyskał uprawnienia rzeczoznawcy do spraw zabezpieczeń ppoż. Autor wielu publikacji oraz tłumaczeń z zakresu ochrony przeciwpożarowej.

**ST. BRYG. W ST. SP. DR INŻ. GRZEGORZ BUGAJ** – absolwent Akademii Pożarniczej. Ukończył studia podyplomowe na kierunkach: Bezpieczeństwo i ochrona człowieka w środowisku pracy (Centralny Instytut Ochrony Pracy w Warszawie), Medycyna ratunkowa (Akademia Medyczna w Poznaniu), Bezpieczeństwo energetyki jądrowej (Szkoła Główna Służby Pożarniczej), CBRN security manager (Wydział Biologii i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Łódzki). Wieloletni dowódca Specjalistycznej Grupy Ratownictwa Chemiczno-Ekologicznego oraz członek „Modułu CBRNDet” w ramach europejskiego mechanizmu ochrony ludności. Były Prorektor-Zastępca Komendanta ds. Operacyjnych Szkoły Głównej Służby Pożarniczej.

**ST. BRYG. MGR INŻ. JACEK ZALECH** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie, a także studiów podyplomowych z zakresu zarządzania w stanach zagrożenia. Ukończył również studia podyplomowe Executive Master of Business Administration (MBA). Jest oficerem z 28-letnim doświadczeniem. Obecnie pełni służbę w Komendzie Głównej Państwowej Straży Pożarnej na stanowisku Dyrektora Biura Planowania Operacyjnego. Autor lub współautor

In particular, these are: standard rules for dealing with incidents involving acetylene cylinders, standard rules for dealing with incidents involving electric passenger vehicles, standard rules for dealing with incidents following a construction disaster.

**DAMIAN BAŁ, M.SC. ENG.** – a graduate of the Military University of Technology, Faculty of Electronics, field of study: electronics and telecommunication. An engineering and technical specialist at Certification Department at Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute (CNBOP-PIB).

dokumentów mających wpływ na bezpieczeństwo prowadzenia działań ratowniczych. Są to w szczególności: standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z udziałem butli z acetylenem, standardowe zasady postępowania podczas zdarzeń z samochodami osobowymi z napędem elektrycznym, standardowe zasady postępowania po wystąpieniu katastrofy budowlanej.

**MGR INŻ. DAMIAN BAŁ** – absolwent Wojskowej Akademii Technicznej na wydziale Elektroniki na kierunku elektronika i telekomunikacja. Specjalista inżynierjno-techniczny w Jednostce Certyfikującej Centrum Naukowo-Badawczego Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowego Instytutu Badawczego.