



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 1

Úvod do vodíkové bezpečnosti pro zásahové jednotky

ÚROVEŇ I

Hasič

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Hasič** a vyšší.

Toto téma je k dispozici také na úrovni IV (Důstojník specialista).

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny, výstupy HyResponse byly použity coby základ





Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.



Souhrn

Tato přednáška obsahuje popis zavedení vodíkové bezpečnosti pro zásahové síly. Vodík se již dlouhou dobu hojně používá v průmyslu jako stlačený plyn nebo ve zkapalněné formě. Vodík není více nebo méně nebezpečný než jiná běžná paliva, ale je jiný, má své specifické vlastnosti a s nimi související rizika. Rostoucí využívání aplikací FCH vyžaduje hluboké pochopení procesů, nebezpečí a rizik, bezpečnostních prvků a koncepcí, jakož i odborně vyškolený personál pro bezpečné řešení případných incidentů nebo havárií. To vše vyžaduje významnou změnu kultury bezpečnosti, zejména u členů zásahových sil, kteří budou jako první řešit nouzové situace, jež mohou zahrnovat tlakový nebo zkapalněný vodík, a to jak uvnitř, tak venku, v městských obytných oblastech, na silnicích, v přírodě a v mnoha dalších různých prostředích.

Tato přednáška obsahuje přehled systémů a infrastruktury FCH. Jsou v ní zvažena potenciální nebezpečí, rizika, bezpečnostní opatření a koncepce spojené se stacionárními i přepravními aplikacemi FCH. Obsahuje rovněž přehled hlavních způsobů využití vodíku, hlavních výrobních metod, možností skladování a způsobů distribuce.

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

Klíčová slova

Palivové články, vodík, výroba, skladování, použití, vodíková bezpečnost

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
1. Cílové publikum.....	6
1.1 Popis úlohy: Hasič.....	6
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Hasič.....	6
1.3 Předchozí učení: Hasič.....	6
2. Úvod, rozsah a cíl.....	6
3. Přehled způsobů výroby, skladování a průmyslového využití H ₂	8
3.1 Výroba vodíku.....	8
3.2 Skladování vodíku.....	9
3.3 Průmyslové využití vodíku.....	11
4. Vozidla FC.....	12
4.1 Klíčové vlastnosti vozidel FC.....	12
4.2 Vozidla na palivové články.....	13
4.2.1 Systém pro skladování vodíku.....	14
4.2.2 Systém dodávky vodíkového paliva.....	14
4.2.3 Systém palivových článků.....	15
4.2.4 Elektrický pohon a systém řízení výkonu.....	15
4.2.5 Bezpečnostní prvky a koncepce.....	15
4.3 Autobusy FC.....	17
4.4 Vysokozdvíhací vozíky FC.....	20
4.5 Letectví.....	21
5. Přeprava vodíku.....	23
5.1 Těžká nákladní vozidla (HGV).....	23
5.1.1 Plynová nákladní vozidla.....	23
5.1.2 Nákladní automobily pro převoz kryogenních kapalin.....	25
5.2 Železnice.....	26
5.3 Potrubí.....	27
6. Stacionární aplikace.....	29
6.1 Systémy kombinované výroby elektřiny a tepla (CHP).....	29
6.2 Výroba záložní energie.....	30
7. Námořní aplikace.....	32
8. Vodíkové systémy skladování energie.....	35



9.	Přehled nehod a havárií	39
9.1	Nehody a havárie v systémech a infrastruktúře FCH.....	39
9.2	Havárie při výrobě vodíku.....	40
9.3	Nehoda na čerpací stanici.....	41
10.	Úvod do e-Laboratoře.....	41
	Literatura a odkazy	43



1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro ÚROVEŇ 1: Hasič. K dispozici jsou také přednášky na úrovních II, III a IV: velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni velitele posádky.

1.1 Popis úlohy: Hasič

Hasič je zodpovědný a očekává se, že bude schopen bezpečně provádět zásahy v osobních ochranných prostředcích, včetně dýchacích přístrojů, za použití poskytnutého vybavení, jako jsou vozidla, žebříky, hadice, hasicí přístroje, komunikační a záchranné prostředky, a to za každých klimatických podmínek, v oblastech a v nouzových situacích, u nichž lze důvodně předpokládat, že vyžadují zásah.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Hasič

Školení v bezpečném a správném používání OOP, BA a dalšího vybavení, které se očekává, musí být podpořeno odpovídajícími znalostmi a praxí. Chování, které zajistí bezpečnost hasiče a bezpečnost ostatních kolegů, by mělo být popsáno ve standardních operačních postupech (SOP). Je vyžadována praktická schopnost dynamicky vyhodnocovat rizika pro vlastní bezpečnost a bezpečnost ostatních.

1.3 Předchozí učení: Hasič

EQF 2 Základní faktické znalosti v oboru práce nebo studia. Základní kognitivní a praktické dovednosti potřebné k využívání relevantních informací při plnění úkolů a řešení běžných problémů s využitím jednoduchých pravidel a nástrojů. Práce nebo studium pod dohledem s určitou mírou samostatnosti.

2. Úvod, rozsah a cíl

Na současném trhu jsou k dispozici aplikace palivových a vodíkových článků (FCH) jak v dopravě, tak v energetice, a je poměrně pravděpodobné, že v blízké budoucnosti budou síly prvního zásahu řešit možné nehody/havárie. Vývoj technologií FCH vyžaduje lepší a hlubší pochopení nebezpečí, rizik, procesů a bezpečnostních prvků souvisejících se systémy a infrastrukturou FCH ze strany sil prvního zásahu. Výroba vodíku elektrolýzou a reformováním zemního plynu, decentralizované aplikace výroby vodíku, skladování plynného a zkapalněného vodíku, aplikace pro přepravu vodíku a manipulaci s materiálem, vozidla FC (např. automobily, autobusy, vysokozdvížné vozíky), vodíkové čerpací stanice, stacionární aplikace FC, systémy skladování energie na bázi vodíku jsou doposud pro členy prvních zásahových sil z větší části neznámé. Kromě toho chybí standardizované postupy pro zásahy v případě nehod nebo havárií ve výše uvedených systémech a prvcích infrastruktury.



Cílem této přednášky je seznámit členy zásahových sil s řadou aplikací FCH, přiblížit jim specifická rizika a nastínit hlavní přístupy k bezpečnosti vodíkových technologií. Zásahové síly by si měly uvědomit, že vodík není více nebo méně nebezpečný než jiné běžné palivo. Vodík je jiný a znalost jeho specifických vlastností usnadní přijímání vhodných rozhodnutí na místě nehody. Zásahové jednotky by měly být odborně vyškoleny pro práci s vodíkovými systémy při tlaku až 100 MPa a teplotách až $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zkapalněný vodík), a to jak ve venkovním prostředí, tak v interiérech.

Tato přednáška je první z ucelené série a navazuje na materiály vytvořené a přednesené v rámci projektu HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). V rámci (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>) byl poprvé vytvořen mezinárodní výukový plán pro školení v oblasti vodíkové bezpečnosti pro členy jednotek prvního zásahu. Jednalo se o první krok k vytvoření Evropské platformy pro školení v oblasti vodíkové bezpečnosti pro členy jednotek prvního zásahu. Tento výukový plán byl dále rozpracován v rámci projektu HyResponder (<https://hyresponder.eu>) tak, aby odrážel současný stav techniky, a byl současně rozšířen o další podrobnosti týkající se zkapalněného vodíku, uzavřených prostor, tlakových nádob atd.

Frekventantům se doporučuje, aby tento dokument používali jako pomůcku při samostatném studiu a aby si aktivně vyhledávali zdroje dalších informací.

Na konci této přednášky bude člen zásahové jednotky / frekventant schopen:

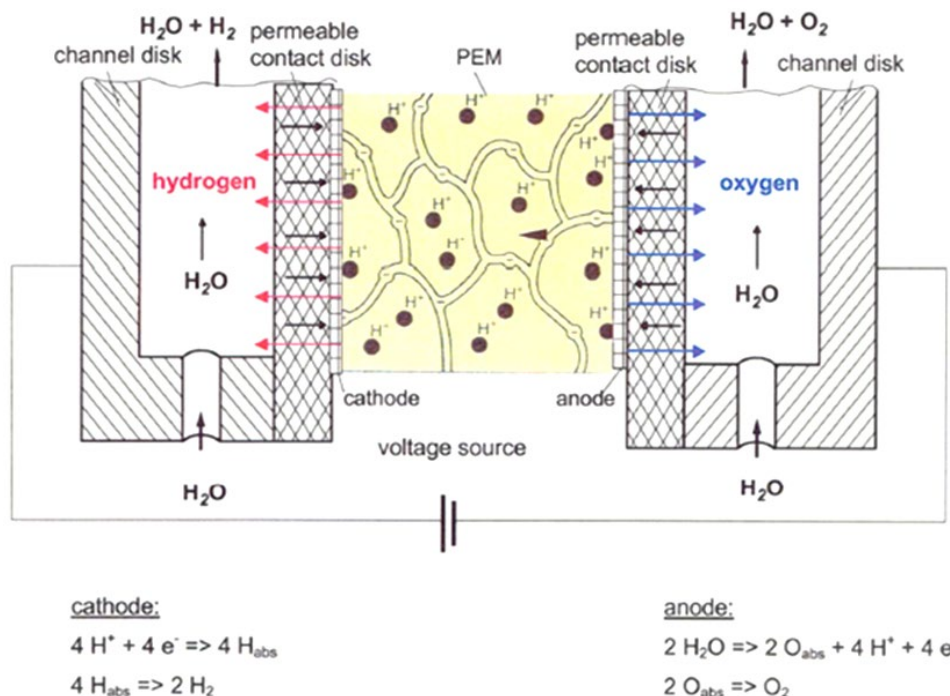
- rozlišit technologické novinky a rozsah technologií FCH v moderní společnosti,
- pochopit úlohu vodíku jako nového energetického nosiče,
- vyjmenovat hlavní způsoby výroby, přepravy, dodávky a využití vodíku,
- rozpoznat obtíže, s nimiž se setkává veřejnost při vnímání vodíkových technologií a technologií palivových článků,
- definovat hlavní metody průmyslové výroby vodíku; ačkoli tato přednáška není určena k tomu, aby posluchačům zprostředkovala hluboké znalosti všech výrobních metod, podává popisný nástin postupu při použití reformování, PEM (protonová výměnná membrána) a alkalických elektrolyzérů s důrazem na bezpečnostní prvky a koncepce,
- popsat princip fungování palivového článku (FC) a svazku palivových článků,
- vysvětlit provozní zásady a bezpečnostní aspekty řady aplikací FCH, včetně vozidel s FC, čerpacích stanic, stacionárních zásobníků vodíku, aplikací pro manipulaci a distribuci vodíku, záložní výroby energie a systémů FC pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny,
- uvést příklady nehod a havárií, ke kterým by mohlo dojít v aplikacích FCH.

3. Přehled způsobů výroby, skladování a průmyslového využití H₂

3.1 Výroba vodíku

Molekuly vodíku se v přírodě v čisté formě nevyskytují. Vodík se tedy musí vyrábět ze sloučenin, v nichž je obsažen, například z vody, metanu, metanolu, čpavku, etanolu, biomasy atd. Výrobu vodíku lze rozdělit do dvou kategorií: centralizovaná, velkoobjemová výroba a decentralizovaná, maloobjemová nebo středněobjemová výroba. Centralizovaná výroba se týká zavedených velkých chemických závodů, které hromadně vyrábějí vodík, jenž je následně přepravován k zákazníkům. V tomto případě se vodík přepravuje, někdy na velké vzdálenosti, potrubím, po silnici, nebo lodní dopravou. Příkladem mohou být velké parní reformátory ve vlastnictví velkých plynárenských společností, jako jsou Air Liquide, Linde, Air Products a další. V současné době je na trhu k dispozici několik zavedených technologií pro průmyslovou výrobu vodíku. Existují dva komerční způsoby výroby vodíku: elektrolýza vody (již přibližně od konce roku 1920) a technologie reformování (zavedená v roce 1960).

Elektrolýza vody je proces, při kterém se voda štěpí na vodík a kyslík pomocí elektrické energie podle rovnice (1):



Zdroj: Areva, 2015.

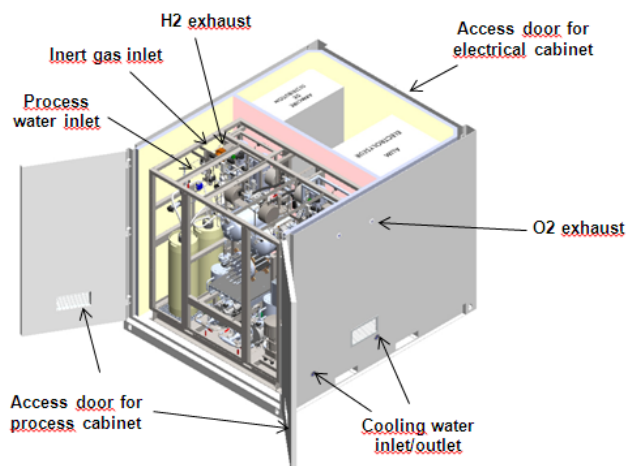
Obr. 1 Principy fungování PEM elektrolyzéro.

Mechanismus elektrolýzy vody na bázi protonové výměnné membrány (PEM) je znázorněn na obrázku 1. Při elektrolýze vody pomocí PEM se voda elektrochemicky štěpí na vodík na katodě

a na kyslík na anodě. Při provozu vodního elektrolyzáru PEM se voda čerpá do anodových kanálků, kde se štěpí na kyslík, protony a elektrony. Protony procházejí PEM umístěnou mezi anodou a katodou a přecházejí na katodovou stranu. Elektrony putují od anody ke katodě přes vnější napájecí obvod, který poskytuje hnací sílu, tj. napětí lázně, pro reakci. Na katodě se protony a elektrony opět slučují za vzniku vodíku.

Vznik výbušného prostředí obsahujícího vodík a kyslík v separátoru může být způsoben poruchou vodovodního potrubí nebo perforací membrány. Aby se zabránilo výbuchu ATEX v separátoru, je třeba zvážit následující bezpečnostní opatření:

- zajistit minimální hladinu vody v plynovém separátoru nad úroveň 55 % jeho výšky,
- regulovat hladinu vody v plynových separátorech na H₂ a O₂,
- regulovat tlak a tlakový rozdíl mezi vedeními H₂ a O₂,
- regulovat koncentraci vodíku na výstupu ze separátoru plyného kyslíku.



Obr. 2 Schéma PEM elektrolyzáru [1]

3.2 Skladování vodíku

Tento oddíl obsahuje přehled možností pro skladování vodíku. Úniky vodíku, požáry a výbuchy, jakož i interakce vodíku s materiály používanými pro skladování jsou mimořádně důležité a budou tématem následujících přednášek. Skladování vodíku je základní technologií pro celou řadu aplikací FCH, od skladování ve vozidlech FC až po stacionární aplikace FC. Univerzální řešení skladování, které by bylo možné nainstalovat do všech systémů, neexistuje. Řešení pro skladování vodíku musí být vybráno tak, aby vyhovovalo konkrétní aplikaci. Například u osobních vozidel jsou limitujícími faktory velikost a hmotnost, zatímco u vysokozdvizných vozíků může být hmotnost žádoucí vlastností. Řešení skladování je jednou z klíčových výzev pro vodíkové hospodářství a tyto technologie jsou předmětem značného zájmu vědecké i průmyslové komunity.

Dlouhodobé skladování velkého množství vodíku je klíčovým krokem při budování infrastruktury FCH, která bude regulovat spotřebu a výrobu vodíku a zajistí plynulost jeho dodávek zákazníkům. Zkoumají se například různé způsoby podzemního skladování vodíku. Jednou z možností je skladování plynného vodíku v geologických útvech, jako jsou vytěžená plynová ložiska, spodní vody nebo solné jeskyně. Další možností je podzemní skladování v podzemních nádržích, kde se vodík skladuje buď v podobě stlačeného plynu, nebo v kapalné formě. Geologická skladovací zařízení se obvykle nacházejí v blízkosti místa výroby vodíku, zatímco podzemní nádrže se nacházejí blíže místu spotřeby, například u čerpacích stanic.

K dispozici je řada technologií pro skladování vodíku, které lze rozdělit do následujících skupin:

- skladování v podobě stlačeného plynu,
- skladování ve zkapalněné formě,
- skladování v pevném skupenství.

Vodík se nejčastěji skladuje jako stlačený plyn nebo kryogenní kapalina v kovových nebo kompozitních lahvích nebo nádržích (obrázek 2). Další užitečnou alternativou je kryokompresní technologie, kdy se plynný vodík pod vysokým tlakem ochladí na nízké teploty. Láhve mohou mít různé velikosti, objem (od 20 do 300 l) a tlak (20–70 MPa) a pro některé aplikace je lze spojit do svazků nebo seskupit do přepravních košů.



a



b



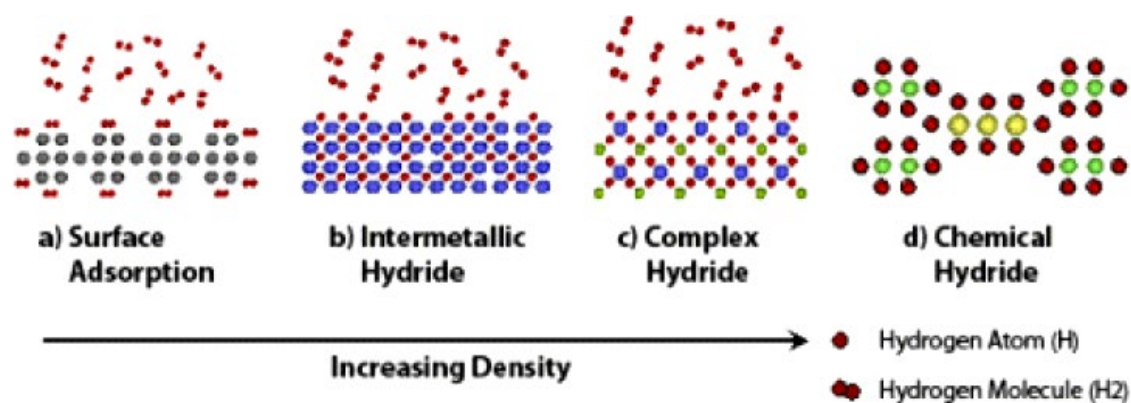
c

Obr. 2 Palubní zásobník vodíku (a), svazek lahví (b) a přepravní koš s lahvemi (c).

Plynný vodík lze stlačit na 20–100 MPa. Hlavním problémem při skladování vodíku ve formě stlačeného plynu je množství energie potřebné pro stlačení, bezpečnostní otázky související se skladováním vodíku při tak vysokém tlaku a dodatečné náklady a hmotnost lahví určených pro vysokotlaké skladování vodíku. Problémy, jako jsou permeace a křehnutí, jsou úměrné tlaku plynu, proto mohou být při vyšších úrovních tlaku výraznější. Jediným bezpečnostním prvkem přepravních lahví používaných v Evropě je zpravidla pouze ventil. V USA jsou přepravní lahve vybaveny zařízením pro uvolnění přetlaku. Tento předpis je velmi kontroverzní, protože tato

zařízení se často stávají zdrojem úniku. Stlačený plynný vodík se zpravidla skladuje ve stacionárních skladovacích systémech a v palubních zásobnících ve vozidlech s FC [1].

Kryogenní vodík vzniká při ochlazení na teplotu pod bodem varu 20 K (-253 °C), což je druhý hlavní způsob skladování vodíku. V této formě lze vodík po určitou dobu skladovat nebo přepravovat. Tato možnost skladování je také velmi nákladná vzhledem ke značné spotřebě energie potřebné ke zkapalnění. Je třeba také zvážit náklady a hmotnost vhodných materiálů pro skladování a udržení vodíku při nízkých teplotách. Vodík lze rovněž skladovat buď uvnitř struktury nebo na povrchu některých pevných materiálů. Tento způsob skladování nevyžaduje vysoké tlaky ani nízké teploty jako předchozí dvě metody, což přináší výhody z hlediska bezpečnosti materiálů. Existují tři hlavní mechanismy ukládání vodíku do materiálů: absorpce, adsorpce (obrázek 3a) a chemické reakce (obrázek 3, b–d). Příklady materiálů a sloučenin vhodných pro skladování pevného vodíku jsou uvedeny na obrázku 3.



Obr. 3 Materiály používané jako pevné zásobníky pro skladování vodíku [2]

Všechny tyto tři možnosti mají své výhody a nevýhody, liší se také otázkami bezpečnosti, které budou podrobně rozebrány v přednášce 3 „Bezpečnost skladování vodíku“. Systémy pro skladování vodíku lze použít k různým účelům: jako obaly pro jeho přepravu, jako stacionární systémy pro skladování na místě (pod zemí nebo nad zemí) nebo jako palubní nádrže ve vozidlech FC.

3.3 Průmyslové využití vodíku

Vodík se v průmyslu používá a bezpečně skladuje jako stlačený nebo zkapalněný plyn již více než 100 let. Vodík se široce uplatňuje v řadě aplikací, například při rafinaci ropy, jako chladivo ve velkých turbínových elektrických generátorech, jako pohonná látka v raketovém pohonu a v raketových střelách, při výrobě čpavku do hnojiv, v metalurgii k dobývání čistých kovů z rud, v polovodičovém, sklářském, farmaceutickém, petrochemickém, chemickém a potravinářském průmyslu atd. Ze statistik o haváriích souvisejících s vodíkem vyplývá, že v současné době jsou nejčastější havárie, ke kterým dochází v laboratořích (přibližně 32 %) [3]. Nízkou mírou nehodovosti lze vysvětlit přísnými bezpečnostními opatřeními, která jsou pro výrobu a konečné užití vodíku již zavedena. Tento trend se však může v následujících letech



zvrátit v důsledku rozšíření aplikací FCH do veřejné sféry a častějšího používání technologií FCH soukromými osobami bez speciálního bezpečnostního školení. Z hlášení událostí také vyplývá, že z celkového počtu dosud zaznamenaných událostí má jen malá část z nich za následek ztrátu lidského života (4,6 %) [4]. Ačkoli otázky bezpečnosti vodíku v průmyslu byly doposud účinně řízeny, budou v odvětví dopravy i na trzích s palivy pro domácnosti zapotřebí další bezpečnostní přístupy, zejména pokud se jedná o postupy reakce na mimořádné události, a to zejména kvůli vysokým tlakům používaným při skladování vodíku. Vodík není více ani méně nebezpečný než jiná hořlavá paliva, a to včetně benzínu a zemního plynu. Některé jeho vlastnosti, jako je vztlak, naopak poskytují ve srovnání s jinými palivy jisté bezpečnostní výhody. Se všemi hořlavými palivy je však třeba zacházet zodpovědně. Vodík je stejně jako benzín a zemní plyn hořlavý a za určitých podmínek se může chovat nebezpečně. S vodíkem lze bezpečně manipulovat, jsou-li dodržovány jednoduché zásady a uživatel má dobré znalosti o jeho jedinečném chování. Pochopení specifických vlastností vodíku a znalost aplikací FCH umožňují bezpečné používání vodíku coby paliva. V naší společnosti je třeba vytvořit novou kulturu bezpečnosti, vyvinout inovativní bezpečnostní strategie a průlomová technická řešení. Očekává se, že úroveň bezpečnosti na spotřebitelském trhu s vodíkem musí být podobná nebo vyšší než v případě používání fosilních paliv. Bezpečnostní parametry výrobků na vodíkové a palivové články tak přímo určují jejich konkurenceschopnost na trhu [5].

4. Vozidla FC

Technologie FCH pro silniční a speciální vozidla mají dnes velký význam. Někteří výrobci automobilů, jako například Toyota, již zahájili prodej vozidel s FCH v regionech, kde je již vybudována infrastruktura pro doplňování paliva. Mezi příklady takových silničních vozidel se řadí osobní vozidla, autobusy, skútry, lehká užitková vozidla atd. Jako palivo používají vodík a nemají žádné motory, protože místo nich se používá FC a elektromotor. Dostupnost infrastruktury je klíčovým krokem k tržnímu úspěchu těchto výrobků. Tato vozidla se svým vzhledem podobají běžným vozidlům. Na rozdíl od běžných vozidel však nevypouštějí žádné škodliviny a v provozu jsou velmi tichá. Další důležitou aplikací jsou speciální vozidla. Speciální vozidla jsou určena pro specifické účely a obvykle jsou provozována ve vozových parcích. Dobrým příkladem speciálních vozidel jsou vysokozdvížné vozíky FC. Tento typ vozidel vyžaduje výkon od 1,5 do 10 kW. V současné době mnoho soukromých společností investuje do vozového parku vysokozdvížných vozíků FC a do infrastruktury pro doplňování paliva, protože jejich používání jim přináší téměř okamžité výhody.

4.1 Klíčové vlastnosti vozidel FC

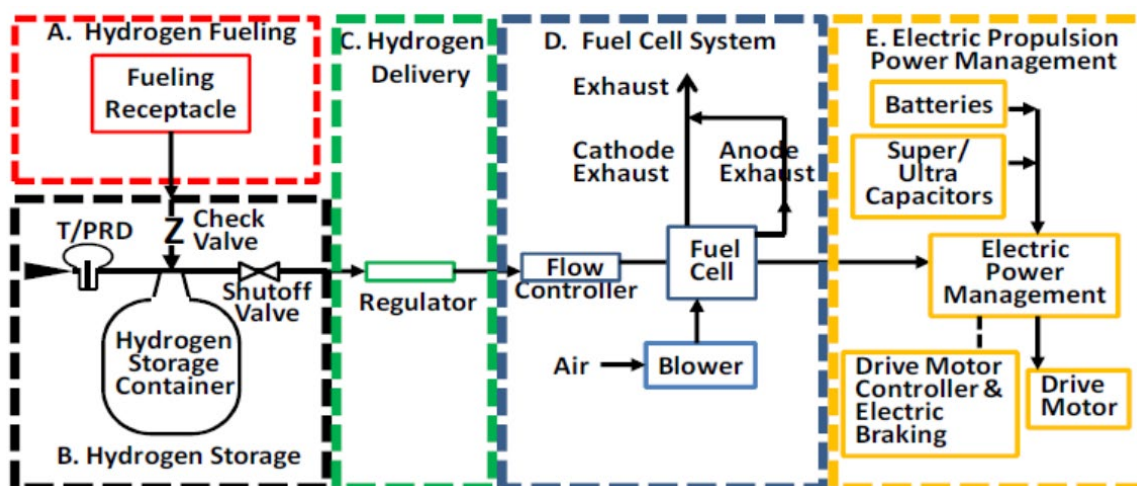
Vozy FC mají elektrickou poháněcí soustavu na FC, které vyrábí elektřinu elektrochemickou reakcí s využitím vodíku. Přestože existuje celá řada prototypů vozidel FC, pro většinu z nich jsou společné následující klíčové vlastnosti (obr. 4) [6]:

- systém pro tankování vodíku,



- systém pro skladování vodíku,
- systém dodávky vodíkového paliva,
- systém FC,
- elektrický pohon a systém řízení výkonu.

Při tankování je vodík do vozidla přiváděn přes tankovací nádobu (A) a proudí do vodíkového zásobníku (B). Vodík se dodává a skladuje ve skladovacím systému zpravidla ve formě stlačeného plynu. Při startu vozidla FC se ze zásobníku uvolňuje plynný vodík. Regulátory tlaku a další zařízení v systému přívodu vodíku (C) snižují tlak na úroveň vhodnou pro provoz palivových článků. Vodík se elektrochemicky spojuje s kyslíkem v systému FC (D) a vyrábí se z něj vysokonapěťová elektrická energie. Tato elektrická energie je vedena do systému řízení výkonu elektrického pohonu (E), kde se používá k napájení hnacích elektromotorů nebo k nabíjení baterií a ultrakondenzátorů.



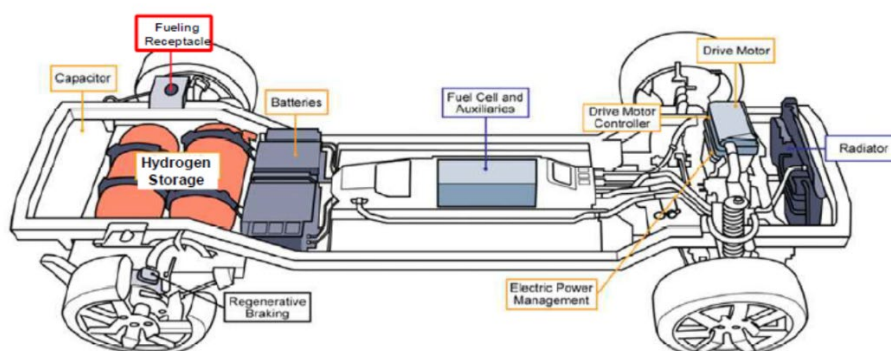
Obr. 4 Klíčové systémy vozidla na palivové články [6]

4.2 Vozidla na palivové články

Obrázek 5 znázorňuje obvyklé uspořádání klíčových součástí typického vozidla na vodíkové palivové články [6]. Palivová nádrž je umístěna v zadní čtvrtině délky vozidla, stejně jako u jiných běžných vozidel. Stejně jako nádrže na benzín jsou i nádrže na vodík zpravidla montovány příčně v zadní části vozidla, ale mohou být namontovány i jinak, například podélně ve středovém tunelu vozidla. Palivové články a spojovací prvky jsou obvykle umístěny pod prostorem pro cestující spolu s řízením napájení, řídicí jednotkou motoru a motory samotnými. Vzhledem k velikosti a hmotnosti trakčních baterií a ultrakondenzátorů jsou tyto komponenty zpravidla umístěny ve vozidle, aby byla zachována požadovaná hmotnostní rovnováha pro správné ovládání vozidla.

Vodík lze do vozidla doplnit na čerpací stanici. V současné době se vodík do automobilů nejčastěji dodává jako stlačený plyn pod tlakem až 125 % jmenovitého pracovního tlaku (NPT)

vozidla, aby se kompenzovalo přechodné zahřívání způsobené adiabatickým stlačováním během tankování.



Obr. 5 Příklad vozidla na palivové články [6]

4.2.1 Systém pro skladování vodíku

Klíčovou funkcí systému pro skladování vodíku je přijímat vodík během tankování, uchovávat jej do okamžiku spotřeby a poté jej uvolňovat do systému palivových článků pro pohon vozidla. V současné době se vodíkové palivo na palubě nejčastěji skladuje a dodává ve formě stlačeného plynu (CGH_2). Lehké lahve na stlačený plyn s tlakem 700 barů jsou vyvinuty pro zvýšení skladovací kapacity. Skládají se z kovové (typ III) nebo polymerní (typ IV) vložky umístěné v kompozitní konstrukci vyztužené vlákny (obrázek 6). Práce na snížení ceny těchto lahví pokračují. Další informace týkající se palubních systémů pro skladování vodíku budou k dispozici v následujících přednáškách.



Obr. 6 Prototypy lahví s tlakem 700 barů vyvinuté a testované v rámci evropského projektu STORHY: (a) technologie typu III, (b) technologie typu IV.

4.2.2 Systém dodávky vodíkového paliva

Systém dodávky vodíkového paliva přenáší vodík ze zásobníku do pohonného systému při tlaku a teplotě, které jsou vhodné pro provoz palivových článků. K tomu slouží řada ventilů pro regulaci průtoku, regulátorů tlaku, filtrů, palivových potrubí a tepelných výměníků. Palivové potrubí má většinou stříbrnou barvu, ale někdy může být i červené. Pokud dojde k odstavení nádrže z důvodu havárie, bude se v těchto potrubích nacházet pouze malé množství vodíku. Při vyprošťování by však jednotky prvního zásahu neměly palivové potrubí přerušovat.

4.2.3 Systém palivových článků

Systém palivových článků (FC) vyrábí elektřinu potřebnou k provozu hnacích motorů a k nabíjení baterií nebo kondenzátorů vozidla. Existuje několik druhů palivových článků, ale v automobilovém průmyslu se nejčastěji uplatňují palivové články typu PEM, a to díky nižší provozní teplotě, která umožňuje kratší dobu náběhu. Palivové články PEM vyrábějí elektrickou energii prostřednictvím elektrochemického slučování vodíku s kyslíkem. Palivové články jsou schopny nepřetržitě vyrábět elektrickou energii, jsou-li zásobovány vodíkem a kyslíkem. Současně vyrábějí elektřinu a vodu, aniž by produkovaly oxid uhličitý (CO₂) nebo jiné škodlivé emise typické pro spalovací pístové motory poháněné benzínem či motorovou naftou. Obecně platí, že palivové články v lehkém osobním vozidle generují napětí přibližně 400 V DC. Palivový článek je s vysokonapětovým akumulátorem spojen měničem. Provozní teplota FC je mnohem nižší než u spalovacího pístového motoru, protože FC jsou účinnější.

4.2.4 Elektrický pohon a systém řízení výkonu

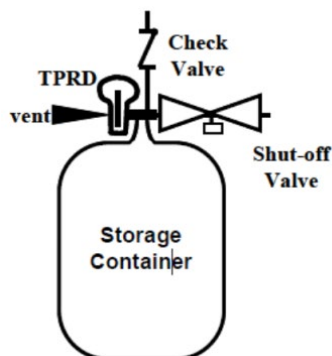
Elektrická energie generovaná systémem (svazkem) palivových článků slouží k napájení elektromotorů, které pohánějí vozidlo, a také k napájení kompresoru klimatizace a motoru ventilace vozidla. Mnoho osobních vozidel na vodíkové články má pohon předních kol s elektromotorem a hnacím ústrojím umístěným v „motorovém prostoru“ příčně nad přední nápravou, ale reálné jsou i jiné konfigurace a pohon zadních kol. Větší vozy typu SUV s pohonem na palivové články mohou být vybaveny pohonem všech kol s elektromotory na přední i zadní nápravě nebo s kompaktními motory na každém kole. Vysokonapětový akumulátor je obvykle umístěn v kovovém pouzdře a pevně zabudován do rámu. Různá vozidla FC používají různé druhy akumulátorů, například nikl-metal hydridové nebo lithium-iontové akumulátory. Mezi další vysokonapětové součásti může patřit stykač FC, řídicí jednotka napětí akumulátorů, měnič DC-DC, pohonná jednotka a elektrické vytápění. Elektrická energie ze zásobníku FC a vysokonapětového akumulátoru je do motorů přiváděna prostřednictvím řady kabelů, které jsou obvykle umístěny uvnitř nebo za zakrytovanými vysokonapětovými součástmi a pod vozidlem. Lze je snadno rozpoznat podle výrazně oranžových ochranných krytů.

4.2.5 Bezpečnostní prvky a koncepce

Vozidla FC se tankují prostřednictvím speciální plnicí trysky na výdejním stojanu čerpací stanice, která se spojí s palivovou nádrží ve vozidle a zajistí přenos vodíku do vozidla „uzavřenou soustavou“. Palivová nádrž vozidla FC obsahuje zpětný ventil nebo jiné zařízení, které zabraňuje úniku vodíku z vozidla po odpojení plnicí trysky.

Součásti typického systému skladování stlačeného vodíku jsou znázorněny na [obrázku 7](#). Součástí systému jsou zásobník a všechny ostatní komponenty, které tvoří „primární tlakovou bariéru“, jež brání úniku vodíku ze soustavy. Součástí systému skladování stlačeného vodíku jsou tři bezpečnostní zařízení:

- zpětný ventil,
- uzavírací ventil,
- teplotou ovládané zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD).



Obr. 7 Typický systém pro uchovávání stlačeného vodíku [6]

Při doplňování paliva vodík vstupuje do zásobníku přes zpětný ventil. Zpětný ventil zabraňuje zpětnému toku vodíku do čerpacího potrubí. Automatický vodíkový uzavírací ventil zabraňuje odtoku načerpaného vodíku, když vůz není v provozu nebo když je zjištěna porucha, která vyžaduje odpojení systému skladování vodíku. V případě požáru zajišťují tepelně aktivovaná zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD) řízené uvolnění plynu ze zásobníků stlačeného vodíku dříve, než vysoké teploty při požáru oslabí stěny zásobníků a způsobí jejich nebezpečné roztržení. TPRD jsou navržena tak, aby rychle uvolnila celý obsah zásobníku. Neuzavírají se a neumožňují opětovné natlakování nádoby. Očekává se, že zásobníky a zařízení TPRD, která byla vystavena požáru, budou vyřazena z provozu a znehodnocena. Vodík se zpravidla (ale ne vždy) vypouští mimo vozidlo FC pomocí drenážního potrubí. Přesné umístění drenážních potrubí závisí na výrobcu vozidla a jeho modelu, ale obvykle se nachází v zadní části vozidla, v blízkosti vodíkového zásobníku [6]. Systém podávání paliva musí snížit tlak z úrovně panující v systému skladování vodíku na hodnoty požadované systémem palivových článků. Například v případě systému skladování stlačeného vodíku NWP o tlaku 70 MPa může být nutné snížit tlak z 87,5 MPa na méně než 1 MPa na vstupu do systému palivových článků. To může vyžadovat vícestupňovou regulaci tlaku, aby se dosáhlo přesného a stabilního řízení a ochrany proti přetlaku v případě selhání regulátoru tlaku. Ochrana systému podávání paliva proti přetlaku může být provedena vypouštěním přebytečného plynného vodíku přes přetlakové ventily nebo odpojením přívodu plynného vodíku (uzavřením uzavíracího ventilu v systému skladování vodíku), jakmile je zjištěn stav přetlaku za systémem [6]. Ve vozidlech FC je umístěna řada vodíkových senzorů. Při zjištění potenciálně nebezpečného úniku vodíku řídicí jednotka systému automaticky zastaví tok vodíku ze zásobníku. Sensory se nacházejí na několika místech: na přístrojové desce, vedle vodíkových zásobníků, v blízkosti výfukového potrubí, pod kapotou, nad stropem v prostoru pro cestující atd. Když je pohonný systém „zapnutý“, tyto snímače nepřetržitě monitorují koncentraci vodíku v těchto úsecích. Například



podle standardního operačního postupu (SOP) pro jednotky prvního zásahu v USA je řidič při detekci vodíku na „výstražné úrovni“ upozorněn ikonou „H₂“ umístěnou na přístrojovém panelu a v informačním centru řidiče (DIC) se zobrazí zpráva „H₂“ (Zjištěn vodík). Pokud je zjištěn vodík na „poplašné úrovni“, ikona „H₂“ začne blikat, zazní zvukový signál a na displeji DIC se zobrazí zpráva „H₂ Detected – Evacuate Vehicle“ (Zjištěn vodík – opusťte vozidlo) [7]. V této souvislosti je třeba uvést, že různé země definují různé úrovně nebezpečí, ačkoli obecné SOP jsou obdobné. Různé koncentrace vodíku vyvolávají v různých zemích také různé stupně výstrahy.

4.3 Autobusy FC

Autobusy na palivové články používají stejnou technologii jako automobily s tímto pohonem. Vodík se skladuje v nádržích umístěných zpravidla na střeše autobusu. Celková kapacita se pohybuje okolo 40 kilogramů. Svazek palivových článků je umístěn v motorovém prostoru v zadní části vozidla. Svazek palivových článků je v autobusu větší než u osobních vozidel a generuje vyšší napětí, přibližně 600 V. Hlavními výhodami autobusů FC ve srovnání s konvenčními autobusy jsou nižší znečištění, nižší koncentrace skleníkových plynů, vyšší energetická účinnost a tišší provoz. S dopravou na vodík je spojena řada evropských projektů. Například Partnerství v oblasti čisté energetiky (CEP) [8] je projekt, jehož cílem je testovat a demonstrovat využití technologií vodíkových palivových článků v dopravě. Projekt CEP, založený v roce 2002, představuje mezinárodní spolupráci 18 partnerů, mezi nimiž jsou přední výrobci automobilů, jako například BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota a Volkswagen. V roce 2011 přešel projekt CEP do své třetí fáze „Příprava trhu“. Dalším projektem je HyFLEET: CUTE, jehož cílem je vytvořit a provozovat největší vozový park autobusů FC na světě. Projekt HyFLEET: CUTE zahrnuje provoz 47 autobusů na vodíkový pohon v běžné veřejné dopravě v 10 městech na třech kontinentech (Amsterdam, Barcelona, Peking, Hamburk, Londýn, Lucemburk, Madrid, Perth, Reykjavík) [9]. Tyto autobusy úspěšně poskytují konstruktérům a provozovatelům cenné údaje, protože jsou používány v náročném prostředí, v nepřetržitém provozu a v extrémních klimatických podmínkách. Dalším důležitým aspektem tohoto projektu je seznámit veřejnost s novou technologií a získat tak souhlas veřejnosti s jejím zavedením [9]. V Londýně nyní jezdí na trase RV1 mezi Covent Garden a Tower Gateway 8 autobusů na vodíkový pohon (obrázek 14). Šestiletý projekt Společného podniku pro palivové články a vodík (FCH JU) a iniciativy JIVE (Společná evropská iniciativa pro vodíková vozidla), který byl zahájen v lednu 2017, usiluje o zavedení 139 nových autobusů s nulovými emisemi a související infrastruktury pro doplňování paliva v pěti zemích. Následující projekt, JIVE2, který byl zahájen v lednu 2018, v kombinaci s projektem JIVE nasadí do začátku roku 2020 téměř 300 autobusů s palivovými články ve 22 městech po celé Evropě, což je dosud největší nasazení v Evropě. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)

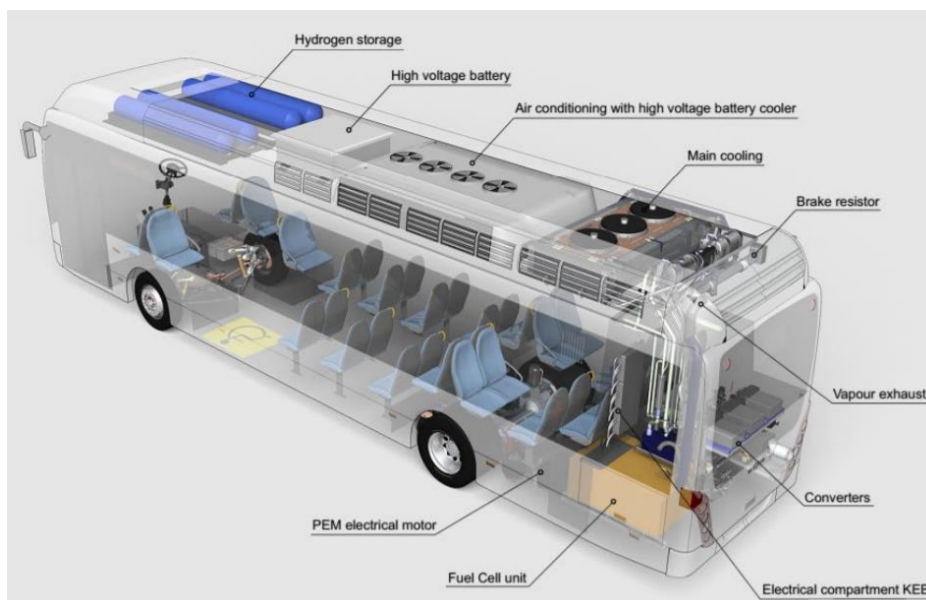


Obr. 8 Autobus Wright Pulsar 2 na vodíkový pohon na lince RV1 v Londýně.

„Autobusy s vodíkovým pohonem prošly v posledních desetiletích rozsáhlým vývojem. Byla u nich použita řada různých konstrukčních konfigurací, včetně vodíku v ICE a různých technologií palivových článků. Kromě toho společnosti používají systémy přímého a hybridního pohonu, kde je součástí hnacího ústrojí zařízení pro ukládání energie (akumulátor nebo ultrakondenzátor), které snižuje špičkové zatížení a umožňuje rekuperační brzdění“ [10]. Stručné srovnání hlavních technologií vodíkových autobusů je uvedeno v přehledu vypracovaném v rámci projektu NextHyLights [10]. Obrázek 9 obsahuje uspořádání autobusu na vodíkový pohon „All American“ společnosti SunLine [11]. Zde je vodík uložen jako stlačený plyn (CGH2). Adams [12] provedl výzkum zaměřený na optimální tlak v palubním zásobníku, který by byl potřebný pro autobusy vybavené zásobníky na CGH2. Byl učiněn závěr, že je zapotřebí standardizované palubní zařízení pro omezení tlaku v zásobníku, aby se zajistilo, že vozidlo nebude naplněno na tlak vyšší, než je tlak v zásobníku, na který byl zásobník konstruován. Tato standardizace by byla rovněž nezbytná pro snížení zbytečných nákladů na vývoj systému do vozidel a související tankovací infrastruktury, jakož i pro snížení rizika poškození tankovacích rozhraní z důvodu nekompatibility. Kompresní energie plynu v zásobníku se pro danou hmotnost vodíku zvyšuje s rostoucím tlakem v zásobníku, proto by náhlá expanze plynu v důsledku protržení zásobníku mohla mít vážné následky, jejichž závažnost by rostla společně s rostoucím tlakem. Proto se při zvažování skladovacích systémů pro autobusy, kde objem není tak kritickým omezením jako u osobních vozidel, zjistilo, že optimální tlaky pro jednopodlažní městské autobusy bez kloubů se pohybují mezi 20 a 35 MPa [12].

Bezpečnostní zařízení používaná v autobusech FC jsou podobná těm, která se používají ve vozidlech FC. Zařízení pro uvolnění přetlaku (PRD) je neuzavíratelné tepelně aktivované zařízení, které je určeno k ochraně tlakové nádrže na vodík před katastrofickým selháním v případě, že dojde k nouzové situaci, například k požáru. Používá se k zajištění toho, aby tepelný náraz způsobený plameny nezvýšil tlak ve skladovací nádobě nad její konstrukční kapacitu. Je však třeba poznamenat, že požáry, které způsobí otevření PRD, nemusí mít za následek

okamžité vznícení vodíku při uvolnění. Nádrže na vodík jsou vybaveny tepelně aktivovaným zařízením pro uvolnění přetlaku (TPRD) a palivovým a odvzdušňovacím potrubím z nerezové oceli. Tlačítko nouzového vypnutí (ESD) je umístěno na panelu řidiče a jedno na samotném palivovém článku v motorovém prostoru.



Obr. 9 Uspořádání hlavních součástí autobusu na palivové články [11]

Členové prvních zásahových jednotek se musí naučit, jak zacházet s vozidly s vodíkovými palivovými články v případě dopravních nehod. Hlavní rizika jsou spojena s vysokým napětím (až 600 V) a vysokým tlakem plynu (až 70 MPa). Pro různé typy silničních vozidel vyžaduje nařízení 79/2009 ES ve spojení s 406/2010 ES označování vozidel FC: u lehkých užitkových vozidel musí být štítek viditelně umístěn v blízkosti tankovací nádoby (další štítek by měl být uvnitř motorového prostoru). V současné době probíhají práce na modernizaci pokynů v této oblasti a členům zásahových jednotek se doporučuje, aby si potvrdili aktuálnost požadavků na označování, např. pracovní skupina 13 EHK OSN (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Záchranné listy by měly být k dispozici pro všechna vozidla FC a měly by se nacházet na palubě vozidla. V ideálním případě budou mít hasičské sbory k těmto informacím přístup prostřednictvím komunikačního spojení. Je však třeba poznamenat, že úroveň přístupu se značně liší, takže přístup k informacím nemusí být vždy možný. Identifikační parametry vozidla by také měly obsahovat všechny charakteristiky vysokého napětí a vysokého tlaku, které by v dostatečném předstihu informovaly členy prvotních zásahových jednotek. Podobně jako u vozidel s konvenčním pohonem mohou v případě dopravní nehody představovat nebezpečí pro první pomoc následující součásti: nárazníky, tlumiče, pneumatiky, vzpěry kapoty a zavazadlového prostoru, airbagy, předepínače bezpečnostních pásů, klimatizační systém, akumulátory. Upozorňujeme, že odpojením nízkonapěťového kabelu se ve vozidle FC odpojí a vypnou všechny systémy vozidla (např. skladování vodíku, vysokonapěťový a nízkonapěťový systém).

4.4 Vysokozdvížené vozíky FC

Mnoho společností s velkými sklady nebo distribučními centry v současné době používá k přepravě zboží vysokozdvížené vozíky s pohonem na palivové články, které pracují v nepřetržitém provozu [1]. Vysokozdvížené vozíky FC jsou hybridní vozidla, která spojují palivový článek, zpravidla o výkonu 1,5 až 10 kW, s akumulátorem. Vodíkové lahve jsou uloženy mimo zařízení/sklad. Vodík je na místo přivážen dodavatelem průmyslových plynů, nebo je vyráběn na místě reformováním zemního plynu či elektrolýzou vody. Doplnění paliva do vysokozdvíženého vozíku FC vodíkem se většinou provádí v interiéru (ale jsou možné i venkovní výdejní stojany) a trvá jen několik minut. V porovnání s akumulátorovými zvláštními vozidly mají vysokozdvížené vozíky FC delší životnost; vyšší výkon po delší dobu a lze je doplnit palivem za méně než 3 minuty. Další výhodou vysokozdvížených vozíků FC jsou nižší provozní náklady a vyšší produktivita díky nižšímu počtu cest k nabíjecí stanici. Vzhledem k tomu, že není potřeba nabíječek baterií, skladovacích prostor ani prostor pro výměnu baterií, je k dispozici více skladových prostor pro jiné využití. Skladové vodíkové čerpací stanice pro vysokozdvížené vozíky FC dodávají velké průmyslové podniky. Příklad vysokozdvíženého vozíku FC a jednotky palivového článku je znázorněn na obrázku 10.



Vysokozdvížený vozík FC

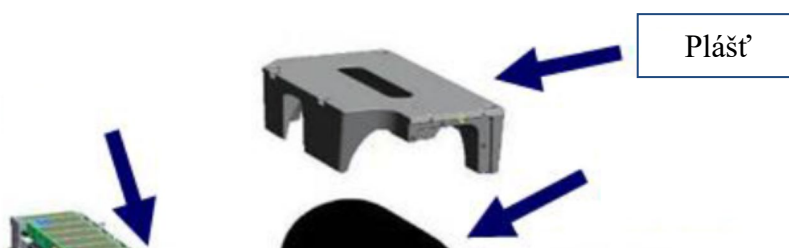


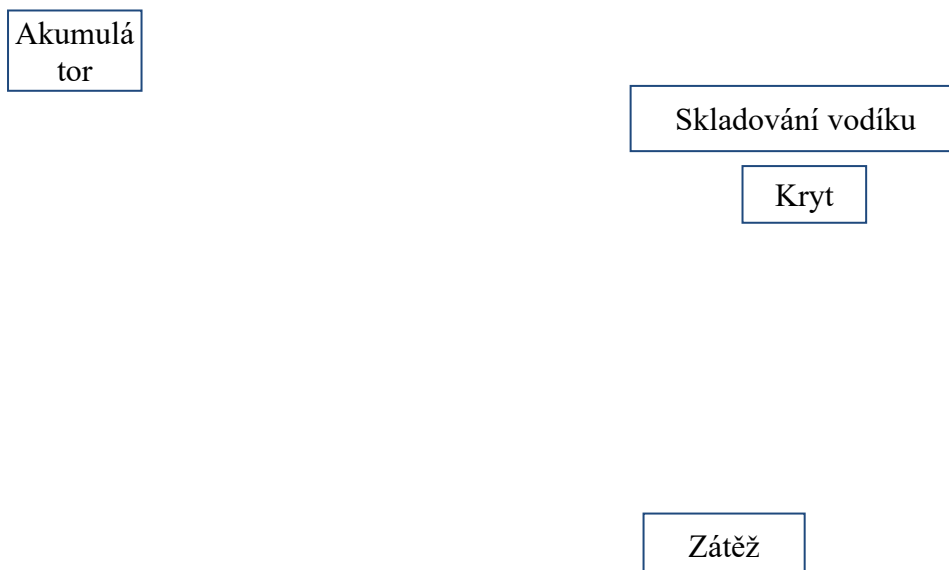
Palivový článek do vysokozdvíženého vozíku FC

Obr. 10 Vysokozdvížený vozík FC a jeho jednotka FC [1]

Hlavní součásti jednotky FC jsou znázorněny na obrázku 11. Patří mezi ně:

- palivový článek (tzv. PAC),
- příslušenství palivového článku,
- zásobník vodíku, jehož objem se pohybuje mezi 20 a 70 l vody a který je vybaven regulačním systémem,
- lithium-iontový akumulátor, který prošel zkouškami požadovanými Organizací spojených národů (UNO) uvedenými v Příručce zkoušek a kritérií OSN, oddíl 38.3,
- sběrná nádrž na vodu.





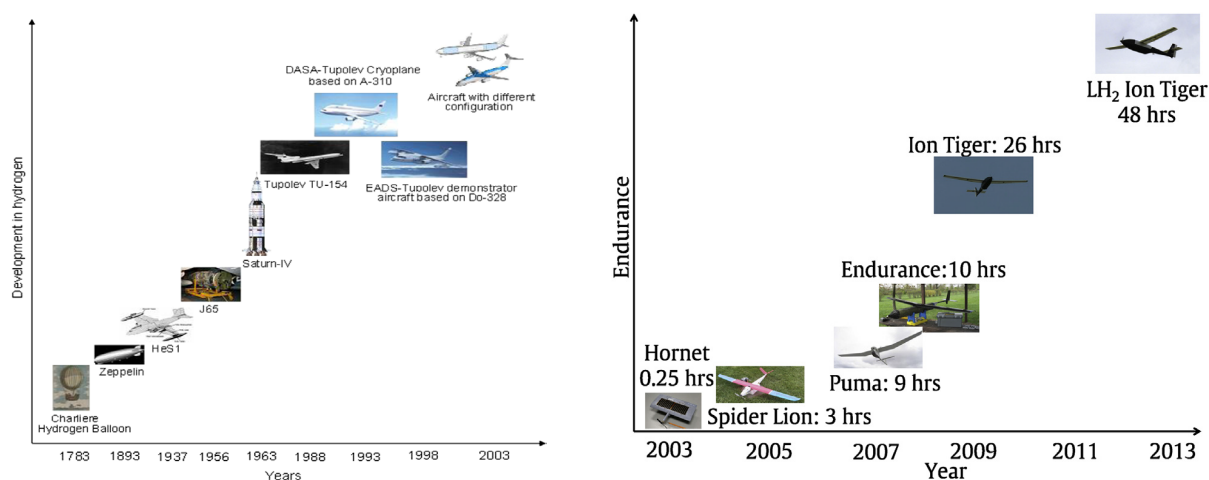
Obr. 11 Součásti jednotky palivového článku u vysokozdvizného vozíku

Z bezpečnostního hlediska je zásobník vodíku chráněn zařízením TPRD (spouštěným tepelnou pojistkou) umístěným mezi uzavíracím ventilem vysokozdvizného vozíku a tlakovou lahví. Pojistka se otevře při teplotě 109 °C a umožní rychlé uvolnění tlakového vodíku. Na plnicím otvoru se nachází také zpětný ventil, který zabráňuje úniku plynu ze zásobníku. Všechny součásti FC jsou zabudovány do litinového pláště, který je chráněn krytem. Tento litinový plášť má dvě výhody: poskytuje ochranu proti vnějšímu mechanickému poškození a umožňuje odvádění vodíku v případě nebezpečí poškození vnějším zdrojem tepla.

4.5 Letectví

Studie využitelnosti vodíku coby leteckého paliva byla zahájena v roce 1956. Spojeným státem se podařilo použít v jednom z motorů letounu B57 Canberra vodíkové palivo natlakované heliem [13]. Po B57 Sověti v roce 1988 vyzkoušeli experimentální přestavbu raně sériového letounu Tu-154, který měl jeden motor využívající vodíkové palivo. Motor na kapalný vodík byl testován ve výšce až 7 000 m a dokázal letounu udělit rychlost až 900 km/h. Bohužel, program kapalného vodíku (LH) se omezil na pouhých pět letů a bylo rozhodnuto, že se s těmito palivy nebude pokračovat kvůli vysokým nákladům a chybějící vodíkové infrastruktuře [14]. Dodnes bylo postaveno mnoho prototypů letounů na vodíkové palivo, jako například Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), Boeing Phantom Eye (Jackson a Haddox, 2010) a ENFICA-FC Rapid 200-FC (Evropská komise, 2011), které využívají kompresní a zkapalňovací metody skladování [15]. Časový rámeček historického vývoje letounů na kapalný vodík a palivové články je znázorněn na **obrázku 11**. V září 2016 absolvovalo první čtyřmístné osobní letadlo HY4 na světě poháněné vodíkovými palivovými články svůj první let z letiště Stuttgart. V tomto budoucím elektrickém taxíku je vodíkové palivo uloženo pod tlakem 4 300 PSI až 5 800 PSI ve dvou nádržích z uhlíkových vláken, které jsou umístěny ve dvou trupech. V tomto letounu s maximální rychlostí 200 km/h

palivový článek přímo přeměňuje vodík na elektrickou energii a jediným odpadním produktem, který při tomto procesu vzniká, je voda [16]. 21. září 2020 odhalila společnost Airbus tři koncepce prvního komerčního letounu s nulovými emisemi na světě, který by mohl být uveden do provozu do roku 2035. Každá z těchto koncepcí představuje jiný přístup k dosažení letu s nulovými emisemi a zkoumá různé technologické cesty a aerodynamické konfigurace s cílem podpořit ambici společnosti stát se lídrem na poli dekarbonizace celého leteckého průmyslu. Všechny tyto koncepce spoléhají na vodík coby primární zdroj energie. Tato volba se dle společnosti Airbus jeví jakožto mimořádně slibná k použití coby čistého leteckého paliva a pravděpodobně bude pro letecký průmysl a mnoho dalších odvětví řešením, jak splnit cíle v dosažení klimatické neutrality.



Obrázek 12 Historický časový vývoj letounů na vodíkový pohon (vlevo) a palivové články (vpravo)

Maximální vzletová hmotnost letounu činí až 640 tun. Přeprava takových nákladů vyžaduje velké a výkonné motory, které spotřebují velké množství paliva. Tento požadavek na palivo přináší výhody i problémy související s bezpečností paliva, náklady na palivo, měrnou energii a ekvivalentní energetickou účinností. Letouny dnes většinou používají paliva na bázi ropy získávaná z fosilních paliv. Mezi těmito palivy jsou náklady na nejčastěji používaný kerosin nižší než na ostatní paliva [15, 17]. Přestože kerosin a některé směsi benzínu byly jako palivo pro letectví vhodnější, jejich zásoby jsou omezené a zvýšené emise skleníkových plynů negativně ovlivňují životní prostředí. Vzhledem k těmto skutečnostem výzkumní pracovníci a výrobci zkoumají nové způsoby a formy nakládání s energií pomocí alternativních/obnovitelných paliv.

Konvenční fosilní paliva používaná v letectví jsou proto nahrazována alternativními palivy. Jedním z nejdůležitějších prvků paliv je vodík. Vodík se v posledních letech dostal do popředí zájmu výzkumníků a odborníků na spalování díky své dostupnosti, lepším specifickým energetickým vlastnostem a přínosům pro životní prostředí.

Vodík se v letounech obvykle používá dvěma způsoby: buď jako palivo místo kerosinu ve velkých letounech, nebo jako palivo v PEM palivových článcích v proudových motorech malých vrtulových letounů [15].

5. Přeprava vodíku

Jak jste se již dozvěděli, vodík se v průmyslu používá po mnoho desetiletí. Po výrobě vodíku v centralizovaném výrobním závodě je vodík obvykle přepravován ke koncovým uživatelům nebo do příslušných FC aplikací. Vodík lze přepravovat buď jako stlačený plyn, nebo jako kryogenní kapalinu. Existuje tedy řada způsobů pro jeho hromadnou přepravu: po silnici v nákladních automobilech/návěsích a kontejnerech nebo potrubím.

5.1 Těžká nákladní vozidla (HGV)

5.1.1 Plynová nákladní vozidla

Flotily nákladních vozidel v současné době využívají průmyslové plynárenské společnosti k přepravě bezešvých ocelových nádob se stlačeným plynným vodíkem (CGH₂) na vzdálenost 200–300 km od centralizované výroby. Na návěsy se umísťují jednotlivé láhve, svazky s více lahvemi nebo dlouhé válcové trubky (obrázek 13). Skladovací tlak se pohybuje v rozmezí 200 až 300 bar a přívěs může přepravovat 2 000 až 6 200 Nm³ CGH₂. Omezením je nejvyšší přípustná hmotnost nákladních vozidel 40 tun. Množství takto přepravovaného vodíku je poměrně malé (180 až 540 kg v závislosti na počtu trubek nebo svazků), což představuje přibližně 1–2 % celkové hmotnosti nákladního vozidla. Současné návěsy používají skladovací lahve typu I (tj. celokovové). Pro zvýšení jejich výkonu lze použít svazky lehkých kompozitních lahví nebo trubek obalených obručí (typ II). Tento způsob přepravy je relativně snadný, ale musí být přizpůsoben množství vodíku a vzdálenostem, aby byl cenově konkurenceschopný. Hlavními omezeními silniční přepravy stlačeného plynu jsou investiční náklady, náklady na provoz a údržbu, včetně nákladů na práci řidičů a výdaje na pohonné hmoty.



(a)



(b)

Zdroj: AirLiquide, 2014.

Obrázek 13. Dva typy návěsů CGH₂ provozované společností AirLiquide v Evropě: (a) návěs s trubkami o tlakové kapacitě 2 000 až 3 000 Nm³ vodíku, a (b) návěs s kompozitními lahvemi o tlakové kapacitě 6 200 Nm³.

Přeprava plynu nákladními vozidly (trubkový návěs, tlakové lahve) je jedním z nejrozvinutějších způsobů přepravy malých množství vodíku na krátké vzdálenosti. Hlavními omezeními jsou nízká hmotnostní kapacita zásobníků pro zákazníky s vysokou spotřebou (vyžadující časté dodávky) a nízký tlak dodávaného vodíku, který vyžaduje dodatečnou kompresi, například na čerpací stanici. Proto se zkoumají alternativní technologie s vyšším tlakem, vyšší kapacitou pro přenos vodíku a levnějšími systémy, jak je popsáno níže. Společnost Lincoln Composites vyvíjí kompozitní trubky s vyšší kapacitou. Materiálem nádrže je plastová vložka plně obalená epoxidem impregnovanými uhlíkovými vlákny pro přepravu plynného vodíku na návěsu. Například nádrž TITANTM (průměr 1,08 m, délka 11,5 m, objem 8 400 litrů vody a hmotnost 2 087 kg) pracuje při tlaku 250 bar. Dokáže přepravit 2–3krát více vodíku ve srovnání s množstvím vodíku skladovaného/přepravovaného v ocelových nádržích o podobné hmotnosti. Na [obrázku 14](#) je uvedena skladovací jednotka se čtyřmi kompozitními nádržemi, které jsou schopny skladovat 600 kg vodíku při tlaku 250 bar. Nádrže vhodné pro vyšší tlak jsou v současné době ve vývoji.



Zdroj: Lincoln Composites, 2014.

Obr. 14 Návěs nesoucí čtyři kompozitní nádrže, vyvinutý společností Lincoln Composites.

V Národní laboratoři Lawrence Livermora (LLNL) se zkoumají hybridní technologie, jako je kryokomprese kombinující tlak a nízkou teplotu, s cílem zvýšit množství vodíku, které lze skladovat na jednotku objemu, a předcházet energetickým ztrátám spojeným se zkapalňováním vodíku. Stlačený vodík při kryogenních teplotách je mnohem hustší než v běžných stlačených nádržích při teplotě okolního prostředí. Tyto nové nádoby by mohly skladovat vodík při teplotách až 80 K a tlaku 200–400 bar. Tento přístup vyžaduje vývoj izolovaných tlakových kompozitních nádrží. Alternativně lze uvažovat o použití nádrží na studený vodík, které by vyžadovaly méně chlazení. Může existovat určitá optimální kombinace tlaku a teploty v rozmezí 80–200 K. Před nedávnem společnost LLNL objevila levné materiály ze skleněných vláken pro skladování plynného vodíku zastudena (~150 K a až 500 bar), přičemž očekává 50% snížení výloh na návěs.

Hlavními bezpečnostními zařízeními používanými v nákladních vozidlech pro přepravu plynů jsou ruční bezpečnostní ventily. Během přepravy jsou všechny zásobníky vodíku izolovány ventilem. Používají se různá bezpečnostní zařízení a postupy:

- Postup výměny návěsu probíhá takto:
 - řidič zaparkuje návěs na určeném místě,
 - řidič nasadí klíny a spustí opěrné nohy,
 - řidič odpojí tahač,
 - řidič připojí hadici z plného návěsu, vyzkouší těsnění na čerpací hadici a odpojí prázdný návěs,
 - řidič připojí prázdný návěs k tahači a odjede.
- Ruční zkouška těsnosti při připojení k návěsu. Vše probíhá v těchto fázích. Obsluha připojí hadici návěsu k připojovacímu sloupku zařízení. Hadice se natlakuje. Obsluha kontroluje těsnost pomocí detekčního mýdla a stabilizaci tlaku měřeného lokálně pomocí manometru.

5.1.2 Nákladní automobily pro převoz kryogenních kapalin

Vodík lze přepravovat po silnici též v kapalném stavu (ochlazený pod 20 K neboli -253 °C) a distribuovat tak větší množství (stovky m^3/h). Z hlediska hmotnostní kapacity mohou superizolovaná nákladní vozidla na kapalný vodík (LH_2) přepravovat až desetkrát více vodíku než trubkové návěsy používané pro přepravu CGH_2 . Nákladní vozidla na převoz LH_2 pracující při atmosférickém tlaku mají objem přibližně 50 000 až 60 000 litrů a mohou přepravovat až 4 000 kg (obrázek 15). Jedná se o preferovaný způsob distribuce středních/velkých množství vodíku na dlouhé vzdálenosti, což vysvětluje, proč se obchod s LH_2 nejvíce rozvinul v Severní Americe (kapacita zkapalňování vodíku v Severní Americe je asi desetkrát větší než v Evropě). Kapalný vodík přepravovaný nákladním vozidlem se poté odpařuje na vysokotlaký produkt, který se používá u zákazníka.



Zdroj: Fotobanka společnosti AirLiquide, 2015

Obr. 15 Silniční cisterna provozovaná společností Air Liquide pro přepravu LH_2 ke koncovému uživateli.

Hlavním problémem této přepravní trasy je kapitálově náročný proces zkapalňování. Proces zkapalňování je také nákladný. Energie vložená do zkapalňování představuje 30–40 % nižší výhřevnost vodíku (ve srovnání s 10 % potřebnými pro stlačování plynu) [21]. Náklady na



elektřinu tvoří 50–80 % nákladů na zkapalňování. Rozhodujícím faktorem mezi přepravou LH₂ a plynného vodíku CGH₂ je vzdálenost. Počet nákladních vozidel pro přepravu LH₂ závisí na poptávce po vodíku a lokaci místa zkapalňování. Kapacita nákladních vozidel na kapalné látky je však mnohem větší než kapacita nákladních vozidel na stlačený plyn, a proto je tento způsob dodávky méně závislý na přepravní vzdálenosti. Investiční náklady na nákladní vozidlo a provozní náklady (palivo, práce) jsou tak mnohem nižší. V důsledku toho je přeprava kapalných látek na dlouhé vzdálenosti (přibližně od 400 km do tisíců kilometrů) a přeprava středního množství vodíku ekonomičtější než přeprava plynných látek. Je však třeba vzít v úvahu dostupnost LH₂. V současné době obsluhují trh s průmyslovým vodíkem čtyři zkapalňovací závody v Evropě a deset v Severní Americe. Růst trhu by odůvodnil výstavbu nových zkapalňovacích zařízení. Zvětšení zkapalňovacích kapacit by umožnilo výrazné zvýšení nákladů. Tento způsob dodávek však závisí na ceně elektřiny a na rozhodnutí o instalaci nových zkapalňovacích jednotek. Lepší technologie by mohly nabídnout možnosti snížení investičních nákladů, zlepšení energetické účinnosti procesu zkapalňování a snížení množství ztrát vodíku v důsledku vypařování během skladování a přepravy (míra vypařování, která závisí na velikosti, tvaru, izolaci zásobníku a době skladování, se obvykle pohybuje v řádu 0,2 % za den na jeden zásobník o objemu 100 m³). Probíhá řada studií, jejichž cílem je zlepšit technologie zkapalňování a navrhnout nové přístupy (např. zlepšení orto-para konverze, vývoj magnetického chlazení atd.).

5.2 Železnice

První vodíkový vlak ve Velké Británii, vyvinutý v rámci projektu HydroFLEX, vyjel na trasu po hlavních železničních tratích ve Warwickshire v září 2020. V příštích několika letech budou jezdit další vlaky na palivové články po celém Německu. Otázkou však zůstává, jak nejlépe dodávat vodík do čerpacích stanic pro lokomotivy. Jednou z možných tras je železnice, kterou podporuje Hesenská státní energetická agentura. Společnost DB Energie, dodavatel energie německému národnímu železničnímu operátorovi Deutsche Bahn, zadala úkol prozkoumat, jak toho lze dosáhnout z hlediska technické, provozní a právní proveditelnosti. Tato otázka byla zkoumána na základě stávajícího zdroje vodíku v průmyslovém parku Höchst ve Frankfurtu nad Mohanem na dvou konkrétních trasách v oblasti Rýn – Mohan (viz [obrázek 16](#)).



Zdroj: NPROXX, 2020

Obr. 16 Přeprava vodíku po železnici.

Podle závěrů odborníků společnosti DB Energie bylo možné zásobovat infrastrukturu pro doplňování vodíku vodíkem po železnici. Oproti silniční dopravě má mnoho výhod, jako jsou přesné plánování přepravních časů, vysoká spolehlivost a bezpečnost, možnost přepravy velkých množství a odlehčení silniční dopravě v metropolitních oblastech. Z technického a právního hlediska neexistuje nic, co by hovořilo proti přepravě po železnici. Zatím však neexistují žádné transportní obalové soubory na přepravu vodíku, které by byly schváleny pro železniční přepravu – existují pouze pro silniční přepravu. Vzhledem k tomu, že požadavky jsou velmi podobné, lze očekávat, že certifikace pro použití na železnici by mohla být udělena v dohledné době. Pro zjištění proveditelnosti a hospodárnosti by měla být vypracována samostatná studie, která by zjistila, zda je železniční doprava hospodárnější než silniční. Na obou zkoumaných trasách si železniční doprava vedla o něco hůře. Z toho však nelze vyvozovat obecná tvrzení. Silniční přeprava vodíku však není skutečně udržitelným řešením, zejména pokud se v budoucnu bude pokračovat v doplňování paliva do vlaků na palivové články.

5.3 Potrubí

K distribuci velkých množství (desítky tisíc m^3/h) plynného vodíku na průmyslový trh se dnes používá řada komerčních vodíkových potrubí. Jejich délka se pohybuje od necelého kilometru až po několik stovek kilometrů. Hlavními aktéry jsou společnosti vyrábějící průmyslové plyny, konkrétně Air Liquide, Air Products, Linde a Praxair. V reakci na zvýšenou poptávku po vodíku ze strany převážně rafinerií se rozšiřují stávající sítě a budují se nové úseky. Například v březnu 2009 oznámila společnost Air Products rozšíření sítě vodíkových potrubí na pobřeží Mexického zálivu v Louisianě o 60 km. Délka vodíkové sítě se odhaduje na přibližně 1 600 km v Evropě a 1 100 km v Severní Americe. Většina potrubí se nachází v místech, kde se v rafinérském a chemickém průmyslu spotřebovává velké množství vodíku. Jedná se o systémy na severu Evropy (Nizozemsko, severní Francie a Belgie), v Německu (Porúří a Lipsko), ve Spojeném království (Teesside) a v Severní Americe (Mexický záliv, Texas – Louisiana,



Kalifornie, Alberta). Menší soustavy existují také v Jižní Africe, Brazílii, Thajsku, Koreji, Singapuru a Indonésii. Délka těchto plynovodů je v porovnání s celosvětovým systémem plynovodů pro přepravu zemního plynu, který přesahuje 2 000 000 km, celkově malá.

Na **obrázku 17** jsou zobrazeny části celosvětové sítě vodíkových potrubí. Například 240 km dlouhé potrubí v německém Porúří (**obrázek 17 a**), které společnost Air Liquide získala v roce 1998, je v provozu od roku 1938. V rámci evropského projektu „Zero Region“ pro využití vodíkové energie nainstalovala společnost Linde v průmyslovém parku Frankfurt-Hoechst vodíkové potrubí o průměru 1“ a tlaku 900 bar v délce 1,7 km pro zásobování osobních vozidel s palivovými články.



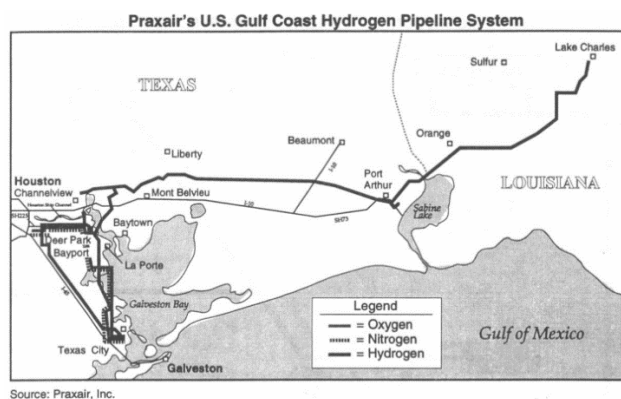
a



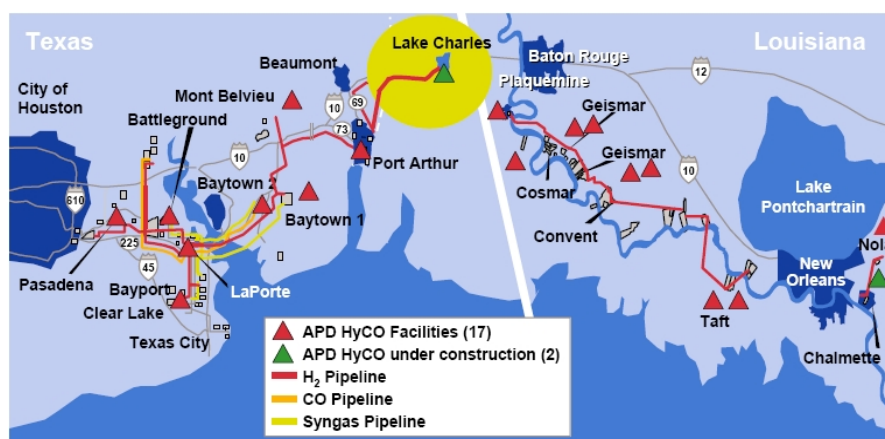
b



c



d



e

Obr. 17 Hlavní vodíková potrubí ve světě: (a) vodíkové potrubí společnosti Air Liquide v zemích Beneluxu, Francii a Německu (Porúří); b) vodíkové potrubí společnosti Air Liquide na pobřeží Mexického zálivu (USA); c) vodíkové potrubí společnosti Linde v Německu; d) vodíkové potrubí společnosti Praxair na pobřeží Mexického zálivu (USA); e) vodíkové potrubí společnosti Air Product na pobřeží Mexického zálivu (USA).

6. Stacionární aplikace

6.1 Systémy kombinované výroby elektřiny a tepla (CHP)

V tradičních zařízeních kombinované výroby elektřiny a tepla (kogeneračních zařízeních) se elektřina a teplo vyrábějí spalováním zemního plynu ve spalovacím pístovém motoru nebo turbíně. Kogenerační systémy založené na FC vyrábějí elektřinu a ohřívají vodu v elektrochemické reakci popsané výše. Uvažuje se o dvou technologiích FC: Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC) a PEM FC. Zemní plyn se přemění na vodík a směs vodíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého (tzv. synplyn) s nečistotami se přivádí přímo do FC, kde se vyrábí energie. V systémech PEM FC, které využívají nižší teploty, je třeba synplyn dále čistit, aby se odstranil oxid uhelnatý a siřnaté sloučeniny. Mikrokogenerační zařízení byla v Evropě zavedena v rámci projektu Callux (<http://enfield.eu/>).

6.2 Výroba záložní energie

Hlavním cílem tohoto typu technologie je zajistit okamžité napájení v případě výpadku elektrické energie. Výkon tohoto zařízení se pohybuje mezi 16 a 80 kW s až devíti vodíkovými lahvemi. Hlavními výhodami této aplikace jsou:

- Vysoká spolehlivost a rychlé uvedení do provozu.
- Škálovatelná autonomie, závisí pouze na objemu plynového zásobníku.
- Nenáročná údržba.
- Čistý a tichý provoz [1].

Mezi potenciální uživatele tohoto typu aplikace patří: telekomunikace, datová centra, nemocnice, armáda, průmysl, luxusní hotely atd. Příklad systému je znázorněn na [obrázku 18](#), který obsahuje záložní napájecí jednotku FC použitou v projektu IP Energy (Aix-en-Provence, Francie). Systém záložního napájení o výkonu 30 kW instalovaný v roce 2008 je prvním kontejnerovým řešením. Vnitřní zásobník plynu umožňuje provoz po dobu 4 hodin.



Obr. 18 UPS s vodíkovými palivovými články ve spojení s datovým centrem IP Energy.

Bezpečnostní prvky a koncepce systému jsou následující:

- Systém FC má dvě oddělená odvodušovací potrubí, jedno pro kyslík a druhé pro vodík, která vypouštějí plyn na střechu zásobníku v bezpečné vzdálenosti, aby se zabránilo smíchání kyslíku a vodíku při vypouštění. Po vypuštění zůstává v systému zbytkové množství vodíku.
- Procesní prostor je vybaven dvěma vodíkovými senzory, které mohou spustit nouzové zastavení, pokud koncentrace vodíku v zásobnících překročí 0,4 % obj. Pokud je zjištěna abnormální koncentrace vodíku, dojde k bezpečnostnímu zastavení a provedou se následující akce:
 - Zastaví se všechny systémové procesy.
 - Aktivuje se mechanická ventilace.
 - Izolují se zásobníky plynu uzavřením elektromagnetických ventilů.



- Detekce vodíku je nepřetržitě monitorována, i když je systém v pohotovostním režimu. V případě výpadku detekce systém provede bezpečnostní zastavení.
- Kontejnery jsou vybaveny požárními hlásiči. V případě jejich aktivace je třeba provést následující kroky:
 - Zastaví se všechny systémové procesy.
 - Izolují se zásobníky plynu uzavřením elektromagnetických ventilů.
 - Odpojí se ventilace.
- V krytu FC musí být zabráněno vzniku nebezpečné výbušné atmosféry v důsledku možného úniku nebo uvolnění vodíku. Pasivní preventivní opatření zahrnují mimo jiné: použití trvale zabezpečených spojů, které jsou konstruovány tak, aby omezovaly maximální rychlost uvolňování na předvídatelnou hodnotu, a přirozená ventilace. Aktivní metody prevence zahrnují mimo jiné: nucenou ventilaci, systém detekce hořlavých plynů, jiné prostředky detekce úniku (např. měřením tlaku vzhledem k nastavení řídicího systému).
- Vnitřní část pláště, kam může vodík unikat nebo se šířit, není klasifikována, protože bezpečnostní bariéry zajišťují, aby v místě úniku nebo hromadění nedocházelo k úniku nebezpečného vodíku z hlediska událostí ATEX. Nicméně všechna zařízení instalovaná těsně pod stropem kontejneru a schopná zapálit hořlavou směs vodíku a vzduchu jsou certifikována pro ATEX zónu 2. Jedná se zejména o vodíková a požární čidla a ventilační systém. Kromě toho je elektrický prostor systémově oddělen od technologického prostoru.
- Kyslík není ve vzduchu hořlavý, ale podporuje proces hoření. Únik kyslíku může být příčinou požáru. Riziko požáru se zvyšuje, je-li atmosféra obohacena kyslíkem. Je třeba zabránit jakémukoli kontaktu kyslíku s organickými látkami z důvodu nebezpečí požáru.
- Při konstrukci a provozu tohoto systému jsou přijata obecná opatření k prevenci rizik:
 - Správná volba materiálů (např. odmaštěná korozivzdorná ocel), použití chrániček, potrubí bez prudkých ohybů, těsné spoje atd.
 - Omezení průtoku kyslíku v závislosti na tlaku.
 - Ochrana kyslíkových potrubí filtry pro zachycení prachu, který by se mohl vznítit.
 - Přirozené a nucené větrání v technologickém prostoru.
 - Zkrácení délky potrubí pod vysokým tlakem, prevence ohrožení potrubí elektrickými součástmi.
 - Přeskupení jednotek obsahujících kyslík ve vymezené zóně (oddělení).
- Dodržování postupů kontroly a údržby (pravidelné zkoušky) zařízení [1].

7. Námořní aplikace

Vodíkové palivové články se osvědčily v řadě aplikací, včetně autobusů, nákladních a osobních automobilů, vysokozdvizných vozíků, a dokonce i osobních vlaků. Díky úspěchu v těžkých pozemních vozidlech se palivové články nyní integrují i do námořních plavidel. Palivové články budou hrát klíčovou roli při řešení emisí skleníkových plynů (GHG) v námořním průmyslu v průběhu plavby i v přístavech.

Je známo, že námořní doprava je významným zdrojem emisí skleníkových plynů. Vysoké emise skleníkových plynů jsou důsledkem tradičně nekvalitního paliva používaného v lodních motorech, které produkuje vysoké emise. Tlak veřejnosti na prevenci znečištění ovzduší a klimatických změn přiměl v posledních letech vlády a další organizace k přijetí opatření na jejich snížení. V důsledku toho se po celém světě zavádějí předpisy o snižování emisí skleníkových plynů zaměřené na námořní dopravu. Příklady:

- Norský parlament přijal v roce 2018 rezoluci na ochranu fjordů, které jsou světovým dědictvím: tato rezoluce zastaví veškeré emise z výletních lodí a trajektů ve fjordech do roku 2026 [22].
- Normy viditelných emisí státu Aljaška omezují neprůhlednost všech námořních plavidel v okruhu tří mil od pobřeží.
- Mezinárodní námořní organizace (IMO) přijala závazná opatření ke snížení emisí skleníkových plynů a k jejich úplnému odstranění do konce tohoto století. Její původní strategie zajistí snížení celkových emisí skleníkových plynů z mezinárodní námořní dopravy do roku 2050 nejméně o 50 % v porovnání s rokem 2008.
- Evropská organizace pro námořní bezpečnost (EMSA) plánuje do roku 2050 snížit emise oxidu uhličitého z námořní dopravy v EU nejméně o 40 % (oproti úrovni z roku 2005). Dalšími akčními oblastmi jsou Arktida, Střední Amerika, Středozevní a Černé moře, Japonsko, Korea a Austrálie.

Tyto emisní předpisy budou mít významný dopad na námořní plavidla a organizace, které je provozují. Aby se provozovatelé flotil námořních plavidel mohli těmto změnám přizpůsobit, potřebují řešení, která zásadním způsobem sníží emise. Vzhledem k vysokému počtu různých typů plavidel potřebuje námořní průmysl skutečné řešení s nulovými emisemi, které lze použít pro různé typy plavidel.

Akumulátory představují bezemisní řešení napájení pro menší plavidla, která pracují v krátkých pracovních cyklech, například malé osobní trajekty a jezerní lodě. Nižší hustota výkonu a vyšší hmotnost však v mnoha aplikacích použití akumulátorů omezují. Pro námořní plavidla představují palivové články jedinou životaschopnou možnost s nulovými emisemi. Stejně jako akumulátory vyrábějí palivové články elektřinu s vysokou účinností pomocí elektrochemického procesu. Rozdíl je v tom, že v palivovém článku je energie uložena



odděleně ve formě vodíku. Dokud je k dispozici palivo, budou systémy palivových článků vyrábět elektřinu jako generátor. Jedinými emisemi z palivového článku jsou vodní pára a teplo.

Vodíkové palivo lze navíc vyrábět z obnovitelných zdrojů, včetně solární, větrné, vodní a geotermální energie. Náklady na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů každoročně klesají, a to zejména díky skutečnosti, že se v Evropě, Austrálii a Chile začínají objevovat velké výrobní projekty. Pokud je palivový článek poháněn obnovitelným vodíkem, představuje skutečný zdroj energie s nulovými emisemi.

Přechod na nový zdroj energie je náročný úkol. V případě palivových článků pro námořní plavidla jsou překážkami infrastruktura pro doplňování paliva a dostupnost vodíku v přístavech. Než budou moci provozovatelé pohánět svá plavidla palivovými články, je třeba dále rozvíjet infrastrukturu pro zásobování vodíkem a čerpání paliva.

V bližším časovém horizontu jsou reálné hybridní aplikace s akumulátory a palivovými články. Vyžadují méně paliva a stále splňují cíl nulových emisí. Těmito aplikacemi jsou:

- pohon menších plavidel, jako jsou trajekty a říční lodě,
- napájení pomocných systémů na větších plavidlech, jako jsou výletní lodě, kde jsou nároky na pomocnou energii vysoké,
- napájení plavidel kotvících u pobřeží.

Použití palivových článků pro námořní aplikace má tři hlavní výhody:

- Modulární napájecí systémy lze přizpůsobit mnoha požadavkům na zatížení.



Obr. 19 Modul lodních palivových článků Ballard o výkonu 100 kW



Palivové články Ballard PEM (s protonovou výměnnou membránou) jsou modulární (obrázek 19) a lze je souběžně používat v různých kombinacích tak, aby poskytovaly výkon a redundanci potřebnou pro plavidlo, a to od 100 kW do 1 MW nebo i více.

- Stejnoseměrné napájení je kompatibilní s různými typy elektrické architektury.

Palivové články Ballard PEM jsou významným zdrojem stejnosměrného proudu, který je kompatibilní s akumulátorovými a hybridními elektrickými soustavami. Mohou být nasazeny v paralelních konfiguracích, aby splňovaly proměnlivé požadavky na výkon:

- hybridního elektrického pohonu,
 - pomocných energetických systémů.
- Systémy palivových článků mají flexibilní konfiguraci.

V systému palivových článků jsou prvky výroby energie a skladování paliva oddělené, což konstruktérům lodí nabízí větší flexibilitu než použití akumulátorů. Systém napájení palivovými články Ballard disponuje flexibilní konfigurací, která se přizpůsobí prostorovým omezením plavidla. Lze jej rozdělit na několik modulů umístěných na různých místech. Kromě toho mohou odborníci společnosti Ballard vyhodnotit provozní cykly jakékoli velikosti nebo typu námořního plavidla. Vývoj životaschopných a praktických řešení jim umožňuje určení optimálních vlastností:

- hybridní architektury,
- výkonu palivových článků,
- požadavku na snižování odběru,
- požadavku na skladování paliva,
- odhadované spotřeby paliva.

Palivové články lze použít na různých typech plavidel, např. trajektech, výletních lodích, říčních plavidlech atd. V případě trajektů mohou modulární, škálovatelné systémy palivových článků zajistit pohon malých i velkých trajektů s nulovými emisemi. Očekává se, že první trajekty s nulovými emisemi budou poháněny hybridní architekturou palivových článků a akumulátorů. Konkrétní poměr akumulátorů a palivových článků bude záviset na délce trasy a jízdním řádu. Vzhledem k tomu, že palivové články poskytují značný stejnosměrný výkon, mohou také poskytovat energii, kterou lze rozvést po celém trajektu (nebo jiném plavidle) a napájet tak jeho pomocné elektrické systémy, jako jsou osvětlení, vytápění, klimatizace, lodní přístroje, nouzové systémy, kuchyně a další palubní systémy. Přebytkové teplo vyrobené palivovými články lze využít k ohřevu vody pro vytápění, ventilaci, klimatizaci, prádelnu a další účely. Vodu, která vzniká v palivovém článku, lze v případě potřeby opět zužitkovat.

Použití palivových článků na výletních lodích může být jedním z prvních způsobů využití v námořní dopravě. Některé přístavy pro výletní lodě již vyžadují provoz s nulovými emisemi.

Na výletních lodích se palivové články používají k výrobě energie pro hotelové účely, nouzové systémy a jako část motorové síly. Aby průmysl v tomto století splnil své cíle na poli dosažení nulových emisí, měly by palivové články zajišťovat 100 % energie na mnoha výletních lodích, protože vodíková infrastruktura je již v pokročilé fázi vývoje.

Palivové články jsou životaschopným řešením pro pohon říčních plavidel s nulovými emisemi, včetně malých lodí, které jsou tlačeny nebo taženy tlačnými čluny a remorkéry, a plavidel s vlastním pohonem. Společnost Ballard již pracuje na ukázkovém projektu pohonu říčních plavidel ve francouzském Lyonu ([obrázek 20](#)). Projekt bude pohánět tlačný člun jako užitkové plavidlo na jedné z nejnáročnějších řek světa, Rhoně.

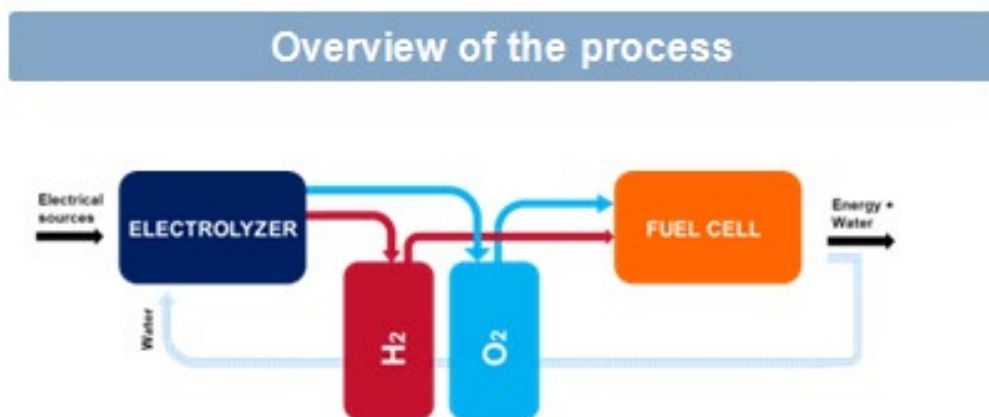


Obr. 20 Projekt společnosti Ballard k pohonu říčních plavidel ve francouzském Lyonu

Ve snaze snížit znečištění ovzduší a emise uhlíku vlády, přístavní úřady a organizace po celém světě zpřísňují emisní normy pro námořní plavidla. Námořní průmysl se tak ocitá pod tlakem, aby splnil připravované předpisy o nulových emisích. Vodíkové palivové články – osvědčené řešení s nulovými emisemi pro pohon autobusů, nákladních vozidel a dalších těžkých dopravních prostředků – nabízejí reálný potenciál pro různá námořní plavidla. Systémy palivových článků s obnovitelným vodíkem představují nejpraktičtější a nejreálnější řešení s nulovými emisemi. Zavedení této technologie je zásadním krokem ke snížení emisí z námořních plavidel a k vyčištění ovzduší pro svět, ve kterém se lépe žije.

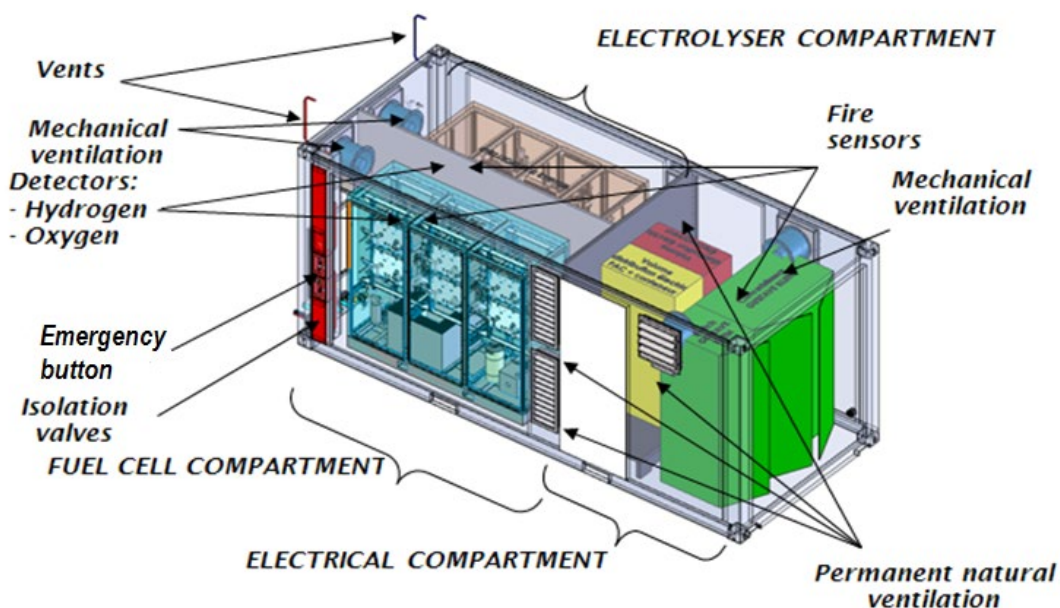
8. Vodíkové systémy skladování energie

Jako příklad vodíkového systému skladování energie lze uvést systém Greenenergy Box. Greenenergy BoxTM je kontejnerový vodíkový řetězec, který se skládá z elektrolyzáru, palivového článku, systému hospodaření s vodou a teplem a systémů elektrických konvertorů spojených se zásobníky vodíku a kyslíku. Greenenergy BoxTM je integrovaný modulární systém, který může nabídnout výkon od 50 do 500 kW s kapacitou úložiště od 0,2 do 2 MW. Jeho princip je znázorněn na [obrázku 21](#). Pro zvýšení výkonu a energetické kapacity lze vzájemně propojit několik systémů, a zajistit tak funkci vysoce výkonného záložního systému na několik hodin [1].



Obr. 21 Přehled procesu v systému Greenenergy Box.

Fotovoltaické panely dodávají elektřinu do elektrické sítě a její přebytek se využívá v elektrolyzáru k výrobě plynného vodíku a kyslíku. Vyrobený plynný vodík a kyslík se skladují v oddělených zásobnících instalovaných stranou systému Greenenergy BoxTM. Díky systému palivových článků lze uskladněný vodík a kyslík využívat k výrobě elektřiny pro zajištění částečné energetické autonomie budov a také jako záložní systém pro případ výpadku dodávky elektrické energie. Systém Greenenergy BoxTM sám řídí elektřinu získanou z fotovoltaických panelů k elektrolyze vody nebo k dodávce elektřiny do sítě. Kromě toho je teplo, které systém rovněž produkuje při elektrolyze i v procesech palivových článků, rovněž řízeno a využíváno v přilehlých budovách. Vodotěsný a větru odolný systém Greenenergy BoxTM má tři různé sekce: elektrickou sekci, sekci pro palivové články a sekci pro elektrolyzáru, jak je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 22 Schéma systému Greenenergy BoxTM [1]



Systém Greenenergy Box™ je držitelem certifikace CE dle směrnice o nízkém napětí LVD 73/23/EHS, směrnice o elektromagnetické kompatibilitě EMC 89/336/EHS, směrnice o strojních zařízeních MD 98/37/ES a směrnice o tlakových zařízeních PED 97/23/ES. Posouzení rizik se u tohoto systému se provádí ve třech krocích. Nejprve je vypracován dokument nazvaný „Základní bezpečnostní hlediska“, který popisuje hlavní bezpečnostní požadavky, jež by měly být dodrženy ve fázích návrhu architektury a koncepce vodíkového řetězce. Jakmile je architektura systému dostatečně podrobná, provede se přezkoumání HAZOP (HAZard and OPerability Study, tj. studie rizik a provozuschopnosti) každého subsystému s cílem definovat potenciální příčiny jednotlivých odchylek procesu, související potenciální následky a posoudit stávající bariéry. Třetí fází je analýza stromové struktury poruchových stavů, která doplňuje přezkoumání HAZOP a upozorňuje na vady koncepce, nevhodnou konfiguraci systému a vnější zdroje nebezpečí. Všechny bezpečnostní studie jsou shromážděny v dokumentu nazvaném „Syntéza bezpečnostních studií systému Greenenergy Box™ [1]. Celková bezpečnostní strategie vodíkového řetězce je podrobně popsána v následujících částech.

- Potlačení a regulace úniků.
 - Materiály zařízení a potrubí jsou vybrány tak, aby byly slučitelné s použitím vodíku a kyslíku. Z norem IGC15/06, ISO/TR 15916 a ISO 11114-4 se vybírají zejména kritéria vodíkové křehkosti materiálu a kyslíkové koroze. Ke skladování vodíku a kyslíku pod tlakem se běžně používají ocelové lahve. Maximální uhlíkový ekvivalent pro vodík je 0,43, jak je popsáno uvedeno v normě IGC 121/04, odst. 3.
 - Upřednostňují se svařované spoje, které se provádějí tak, aby se minimalizovaly potenciální zdroje netěsností. Minimalizuje se počet spojů a osazených přípojek.
 - Obě části zařízení Greenenergy Box™, elektrolyzér i palivový článek, jsou vybaveny dvěma vodíkovými a jedním kyslíkovým senzorem. Bezpečnostní uzavírací ventil se spustí při 10 % LFL vodíku (0,4 % H₂ ve vzduchu) a nouzové vypnutí nastane při 25 % LFL (1 % H₂ ve vzduchu). Detekce kyslíku se spustí vždy, když koncentrace kyslíku ve vzduchu dosáhne více než 23 % obj.
 - Kromě toho se úniky vodíku a kyslíku zjišťují také pomocí rozdílu tlaků v pohotovostních fázích. Pokud v zásobníku nebo části potrubí během pohotovostní fáze dojde k poklesu tlaku, může to znamenat, že došlo k úniku. Dojde-li během pohotovostní fáze k menšímu poklesu tlaku, spustí se alarm, a je-li ztráta tlaku příliš velká, systém nebude možné znovu spustit.
 - Před uvedením do provozu se provedou hydraulické zkoušky a zkoušky těsnosti dle požadavků směrnice o tlakových zařízeních.
 - Pravidelné kontroly a program preventivní údržby jsou organizovány tak, aby byla zajištěna maximální úroveň bezpečnosti. Pravidelně se provádějí zejména zkoušky těsnosti regulátorů tlaku, ventilů, potrubí, spojů a přípojek atd. Pravidelně se provádějí

vizuální kontroly, aby se zkontrolovala úroveň koroze. Informace týkající se četnosti kontrol a údržby jsou uvedeny v dodatcích F k normám IGC 121/04 a IGC 13/02.

- Zabránění vzniku hořlavé nebo překysličené atmosféry.
 - Tři sekce systému Greenenergy BoxTM jsou přirozeně větrané díky bočním ventilačním otvorům umístěným na obou stranách pláště (obrázek 22).
 - Sekce palivových článků a elektrolyzéry jsou vybaveny ventilací typu ATEX, která se spouští při koncentraci vodíku a kyslíku nad 0,4 % obj. vodíku, resp. 23 % obj. kyslíku ve vzduchu. Maximální průtoky jsou stanoveny pro tepelný rozptyl, tj. 2 500 m³/h pro sekci palivových článků a 2 700 m³/h pro sekci elektrolyzéry.
 - Modelování náhodného úniku vodíku o průtoku 750 l/min pomocí metody LES (Large Eddy Simulation) vyvinuté na univerzitě v Ulsteru ukazuje, že vodíkovému senzoru trvá přibližně 10 s, než v přirozeně větrané sekci elektrolyzéry zjistí koncentraci vodíku vyšší než 0,4 % obj. Při konzervativní hypotéze 30 s pro dobu reakce vodíkového senzoru lze pozorovat, že po 40 s nepřetržitého konstantního uvolňování je koncentrace vodíku ve vzduchu vznikající pod stropem stále nižší než LFL vodíku ve vzduchu, tj. méně než 4 % obj. vzduchu. Od tohoto okamžiku vyšle vodíkový senzor signál do řídicího systému, který spustí ventilátor sání vzduchu na maximální otáčky. Lze pozorovat, že vodíkový mrak je zcela zředěn za méně než 2 s.
- Potlačení/omezení zdrojů zapálení.
 - Vnitřní část pláště systému Greenenergy BoxTM, kam může vodík unikat nebo se šířit, není klasifikována, protože bezpečnostní bariéry zajišťují, aby v místě úniku nebo hromadění nedocházelo k úniku nebezpečného vodíku z hlediska událostí ATEX. Nicméně všechna zařízení instalovaná těsně pod stropem pláště a schopná zapálit hořlavou směs vodíku a vzduchu jsou certifikována pro ATEX zónu 2. Jedná se zejména o požární hlásiče, vodíková a kyslíková čidla a ventilační systém.
 - Systém Greenenergy BoxTM a nádrže jsou uzemněny a pospojovány tak, aby byly chráněny před nebezpečím bludných elektrických proudů a elektrostatického výboje.
- Ochrana proti přetlaku.
 - Všechny nádrže a potrubní vedení od systému Greenenergy BoxTM k zásobníkům jsou vybaveny přetlakovým ventilem (PRV). Tlak pojistného ventilu je nastaven tak, aby se ventil PRV aktivoval, když tlak v zásobníku dosáhne 1,15násobku maximálního provozního tlaku.
 - Ventilační otvory skladovacího zásobníku jsou namontovány svisle ve výšce minimálně 3 m. Jsou vybaveny krytem, jehož závaží je kalibrováno tak, aby se zvedalo pod tlakem, aby se zabránilo vniknutí vody do ventilačního otvoru.



- Systém Greenenergy Box™ je vybaven dvěma samostatnými a vzájemně dobře oddělenými průduchy pro vodík a kyslík umístěnými ve výšce minimálně 1 m nad střechou pláště, aby se zabránilo vzniku směsi vodíku a vzduchu obohacené kyslíkem. Každé samostatné odvzdušňovací potrubí je společné pro elektrolyzér a palivový článek a umožňuje snížení tlaku v systému za méně než 2 minuty v případě nouzového vypnutí.
- Nouzové a bezpečnostní vypnutí.
 - Řídicí systém, který se používá k automatickému ovládní systému, slouží také ke spouštění bezpečnostních funkcí. Řídicí systém obsahuje cca 70 bezpečnostních funkcí, které detekují jakoukoli odchylku procesu nebo únik plynů či požár v systému. V závislosti na amplitudě odchylky v porovnání s bezpečnostním prahem parametru se aktivuje nouzové nebo bezpečnostní vypnutí, po kterém následuje vypnutí napájení, odtlakování systému, inertizace a aktivace ventilace (s výjimkou požárů).
 - Hlavní bezpečnostní funkce, tj. detekce vodíku, kyslíku a požáru, nouzový vypínač a hlídací časovač řídicího systému, jsou realizovány pomocí logického kabelu a splňují požadavky úrovně SIL (Safety Integrity Level, úroveň bezpečnostní integrity) 1 [1].

9. Přehled nehod a havárií

9.1 Nehody a havárie v systémech a infrastruktuře FCH

Nehodou se rozumí událost, která může vést ke ztrátě nebo narušení provozu, služeb nebo funkcí, která – není-li zvládnuta – může přerůst v mimořádnou událost, krizi nebo **katastrofu** [43]. Havárií se rozumí nepředvídaná a neplánovaná událost nebo okolnost, která způsobí materiální ztráty nebo poranění osob. Hlášení nehod/havárií, k nimž došlo v systémech nebo infrastruktuře FCH, jakož i komplexní vyhodnocení jejich hlavních příčin a poučení z nich, jsou pro soukromý i veřejný sektor nesmírně cenné. Informace o nehodách a haváriích souvisejících s technologiemi FCH lze nalézt v následujících známých databázích:

- Získané poznatky z nastalých a takřka nastalých nehod v souvislosti s vodíkem: <http://h2tools.org/lessons/>
- Databáze nehod a havárií v souvislosti s vodíkem HIAD: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Všechny databáze by měly být pravidelně aktualizovány.

Například databázi H2Incidents (před nedávnem přejmenovanou na Hydrogen Tools: Lessons Learned) sestavila laboratoř Pacific Northwest National Laboratory za finanční podpory Ministerstva energetiky USA (<https://h2tools.org/lessons>). V této databázi jsou hlášeny nastalé a takřka nastalé nehody bez uvedení názvů společností a dalších podrobností. Důvěrnost

informací totiž přispívá k ochotě hlásit události. Nehody jsou klasifikovány dle prostředí, vybavení, škod a zranění, pravděpodobných příčin a přispívajících faktorů [3].

Rigas a Amyotte [3] definovali následující hlavní příčiny nehod/havárií:

- Mechanická porucha materiálu nebo zařízení.
- Napadení korozí.
- Nadměrný tlak.
- Křehnutí vodíku při nízkých teplotách.
- Výbuch expandující páry vroucí kapaliny (BLEVE).
- Prasknutí skladovací nádrže v důsledku nárazu rázové vlny nebo projektilu z blízkých výbuchů.
- Lidská chyba.

V této první přednášce se budeme zabývat pouze několika příklady nehod/havárií souvisejících s technologiemi FCH. Následující přednášky však budou obsahovat řadu relevantních příkladů pro každý studovaný systém FCH.

9.2 Havárie při výrobě vodíku



Zdroj: Millet a kol., 2011 [45]

Obr. 23 Poškozené části vysokotlakého elektrolyzéry PEM.

K výbuchu elektrolyzéry při provozním tlaku 40 MPa došlo 7. prosince 2005 v předváděcím vodíkovém stánku na univerzitě v japonském Kjúšú [19]. Je možné, že po úniku přes membránu došlo k vnitřnímu tryskovému požáru vodíku a kyslíku, který vyústil v požár kovu (titanu) a výbuch nebo prasknutí pláště elektrolyzéry. Vnitřní kapalina a zplodiny hoření unikly do okolí, a to včetně parkoviště mimo budovu laboratoře. Čelní skla několika vozidel byla poškozena v důsledku působení fluorovodíku, který vznikl při rozkladu polymerního materiálu membrány [19]. Francouzsko-ruská studie [20] uvádí analýzu mechanismů poruch vodních elektrolytických článků PEM, které mohou v konečném důsledku vést ke zničení elektrolyzéry. Byl prokázán dvoustupňový proces zahrnující nejprve lokální perforaci pevného polymerního elektrolytu a následnou katalytickou rekombinaci vodíku a kyslíku uložených v komorách pro



elektrolýzu. Fotografie armatury z korozivzdorné oceli a matice perforované vodíkovo-kyslíkovým plamenem, který vzniká uvnitř PEM, jsou uvedeny na [obrázku 23](#).

9.3 Nehoda na čerpací stanici

K úniku plynného vodíku došlo na čerpací stanici Emeryville [23]. Selhalo přetlakové zařízení PRD, uvolnilo se 300 kg vodíku, který se následně vznítil. Plyn se vznítil na výstupu z odvětrávacího potrubí a hořel 2,5 hodiny, dokud místní hasiči nepovolili technikům vstoupit do stanice a zastavit přívod plynu. Během této události hasiči evakovali okolní podniky a školy a uzavřeli přilehlé ulice.

Zjištěné hlavní příčiny této události jsou:

- použití neslučitelných materiálů při výrobě zařízení PRD,
- nesprávná montáž, která vede k nadměrnému utažení vnitřní sestavy,
- nadměrné vytvrzení materiálů vnitřní sestavy výrobcem ventilu.

Těmto problémům se dalo předejít vhodnými postupy zabezpečování jakosti / řízení jakosti během kontroly konstrukce a bezpečnosti.

10. Úvod do e-Laboratoře

Vzdělávání a odborná příprava pro nově vznikající odvětví palivových článků a vodíkových systémů (FCH) jsou zásadní pro profesní rozvoj současných i budoucích pracovníků. Představují základ vedoucího postavení a konkurenceschopnosti evropských výrobců FCH. Online úložiště digitálních materiálů – e-laboratoř – bylo poprvé vyvinuto v rámci evropského projektu „Nové nástroje pro vzdělávání a odbornou přípravu založené na digitálních aplikacích souvisejících s technologií vodíku a palivových článků“ (tzv. „nástroje NET-Tools“). Původní elektronická laboratoř NET-Tools obsahuje rozsáhlou sadu digitálních nástrojů. Nástroje, které byly považovány za nejvhodnější pro zásahové jednotky, byly zpřístupněny prostřednictvím elektronické laboratoře pro bezpečnost vodíku, která je k dispozici prostřednictvím elektronické platformy HyResponder (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) nebo přímo na adrese <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

Výpočet nebezpečných vzdáleností na základě výkonu, termín nedávno zavedený normou ISO TC197 Vodíkové technologie, je klíčovým prvkem vodíkového bezpečnostního inženýrství pro systémy a infrastrukturu FCH, např. čerpací stanice. Zásady e-Laboratoře pro vodíkovou bezpečnost umožňují posoudit bezpečné vzdálenosti pro nezapálené úniky (velikost hořlavého obalu); zapálené úniky (tryskové požáry); rozpad tlakové vlny při deflagraci, detonaci a prasknutí vysokotlaké zásobní nádrže vodíku při požáru, ohnivé koule atd. Tato dlouho očekávaná sada nástrojů vodíkového průmyslu umožňuje stanovit nebezpečné vzdálenosti pro nezapálené úniky a tryskové požáry v interaktivním režimu, např. změnou parametrů systému,



jako jsou tlak a průměr potrubí (netěsnosti). Nejmodernější bezpečnostní nástroje e-Laboratoře pro vodíkovou bezpečnost představují volně přístupnou, rozšířenou evropskou obdobu nástroje HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods; Metody posuzování rizik související s vodíkem), který byl v minulém desetiletí vyvinut v Sandia National Laboratories (SNL) za finanční podpory Ministerstva energetiky USA. Elektronická laboratoř prokazuje evropské prvenství v oblasti bezpečného vodíkového inženýrství. Umožňuje například vypočítat vzdálenosti ohrožení určené tepelnými a tlakovými účinky ohnivé koule a tlakové vlny po roztržení nádrže při požáru. Tato funkce v nástroji HyRAM schází a podobný kanadský (UTRQ) rámec je implementován pomocí webového vývojového prostředí Smalltalk Seaside.

Literatura a odkazy

1. HyResponse Deliverable D2.1 – popis vybraných systémů a infrastruktury FCH, příslušných bezpečnostních prvků a koncepcí (2014). K dispozici na adrese: <http://www.hyresponse.eu> [přístup k datu 10.10.2020].
2. Mays, T. (2014). Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage (Vědecký pokrok a technologické překážky v oblasti skladování vodíku). H2FC Evropská technická škola vodíkových a palivových článků. 23.–27. června 2014, Kréta, Řecko.
3. Rigas, F a Amyotte, P (2013). Vodíková bezpečnost. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards (Mýty a fakta o nebezpečnosti vodíku). Chemical Engineering Transactions. Svazek 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures (Katastrofa vzducholodi Paul Hindenburg v obraze). K dispozici na adrese: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [přístup k datu 24.12.2011].
6. Světové fórum pro harmonizaci předpisů pro vozidla (WP.29), 160. zasedání, Ženeva, 25.–28. června 2013.
7. Ministerstvo energetiky USA (2008). Bezpečnostní školení na téma práce s vodíkem pro jednotky prvotního zásahu. K dispozici na adrese: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [přístup k datu 06.11.2020].
8. CEP, Partnerství pro čistou energii, 2014. K dispozici na adrese: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [přístup k datu 01.05.2014].
9. HyFLEETE-CUTE (2006–2009). K dispozici na adrese: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [přístup 04.11.2020].
10. Zaetta, R a Madden, B (2011). Projekt Next HyLights. Výstup 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review (Přehled současného stavu technologie autobusů na vodíkové palivové články).
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. K dispozici na adrese: <http://cafcp.org/> [přístup k datu 06.11.2020].
12. Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses (Určení optimálního tlaku pro skladování plynného vodíku v autobusech městské hromadné dopravy). Evropský integrovaný projekt pro vodík – fáze 2 (EIHP2), březen 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımını. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [přístup k datu 06.11.2020]



15. Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications (Přehled možných způsobů využití vodíku v leteckém průmyslu). *International Journal of Sustainable Aviation*, 2: 74–100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [přístup k datu 06.11.2020].
17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts (Posouzení životního cyklu vodíku a dalších potenciálních paliv pro letadla). *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10722–10738
18. Bird, L. (2011). *Dictionary of Business Continuity Management Terms* (Slovník pojmů z oblasti řízení kontinuity podnikání). Business Continuity Institute. K dispozici na adrese: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [přístup k datu 27.12.2015].
19. Molkov, V (2012). *Fundamentals of hydrogen safety engineering* (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: www.bookboon.com, e-kniha k bezplatnému stažení.
20. CEP, Partnerství pro čistou energii, 2014. K dispozici na adrese: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives (Skladování vodíku: nedávná zlepšení a průmyslové perspektivy). *Int J Hydrogen Energy* (2017) 42:7254–7262.
22. Norský parlament přijal nařízení o nulových emisích ve fjordech, které jsou na seznamu světového dědictví UNESCO. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [přístup k datu 04.11.2020]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Vyšetřování nehody s únikem vodíku v zařízení AC Transit Emeryville (revidováno). Zpráva laboratoře Sandia. SAND2012-8642