



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ PRO ZKUŠEBNU SPALOVACÍCH MOTORŮ

DESIGN OF HYDROGEN MANAGEMENT FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE TEST FACILITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kryštof Berger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Kryštof Berger**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh vodíkového hospodářství pro zkušebnu spalovacích motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z alternativ pohonu motorových vozidel je vodík jako palivo pro spalovací motory a palivové články. I tyto nové pohony bude třeba testovat a vyvíjet na zkušebnách. Tato práce by měla navrhnout a připravit podklady pro realizaci komplexního zázemí pro motorovou zkušebnu provozující zkušební motor na vodík.

Cíle diplomové práce:

Seznámení s problematikou vodíku a jeho vlastnostmi z pohledu skladování. Normy a bezpečnostní předpisy pro vodíkové tlakové nádoby a další příslušenství.
Problematika dodavatelů vodíku, ceny, forma transportu, možnosti dodání na VUT v Brně.
Návrh kontejneru jako vodíkového zázemí pro zkušebnu vodíkových pohonů.
Zpracování modelu vodíkového zázemí v GT–suite.
Návrh detekčního systému pro zajištění bezpečnosti vodíkového zázemí.

Seznam doporučené literatury:

BRESTOVIC, Tomas, Natalia JASMINSKA a Marian LAZAR. Metal hydride tank cooling at hydrogen absorption into the LaCeNi alloy. 1. Brussels: EuroScientia, 2017. ISBN 978-90-822990-8-3.

SCIPIONI, Antonio, Alessandro MANZARDO a Ren JINGZHENG. Hydrogen economy: supply chain, life cycle analysis and energy transition for sustainability. 1. San Diego: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-811132-1.

GAVRILYUK, Alexander. Hydrogen energy for beginners. 1. Boca Raton: Pan Stanford Publishing, 2013. ISBN 978-981-4364-78-2.

STOLTEN, Detlef a Bernd EMONTS. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. 1. Weinheim: Wiley, 2016. ISBN 978-3-527-33238-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá především problematikou skladování vodíku, technologií vodíkového zázemí a bezpečností vodíkového zázemí. Vzhledem k rostoucím požadavkům na testování a implementaci vodíku jakožto zeleného prvku do celkové mobility lidstva rostou i požadavky na vodíkovou infrastrukturu, jejíž nedílnou součástí jsou nejen vodíkové plnicí stanice ale i celková vodíková hospodářství včetně skladování, přepravy a jiné. Tato práce se v rešeršní části zabývá skladováním vodíku, které je i v dnešní době stále problematické, národní i nadnárodní legislativou spojenou s vodíkovým hospodářstvím nebo vodíkem jako takovým, a nakonec i samotnými typy vodíkových plnicích stanic, u kterých jsou rozebrány jejich hlavní koncepce. Experimentální část práce je zaměřena na návrh vodíkového hospodářství pro zkušebnu spalovacích motorů na VUT v Brně, které je zakomponováno do lodního ISO kontejneru, jenž je upraven tak, aby splňoval bezpečnostní a technologické požadavky, vybrána veškerá technologická zařízení tak, aby splnila očekávání, a nakonec i navrhnutá detekční čidla pro zajištění bezpečnosti. V neposlední řadě jsou nasimulovány průběh a podmínky funkce vodíkového hospodářství v programu GT-Suite.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, skladování vodíku, vodíkové hospodářství, bezpečnost vodíkového hospodářství, technologie vodíkového hospodářství

ABSTRACT

This diploma thesis primarily addresses the issues related to hydrogen, hydrogen infrastructure technologies and hydrogen safety. Due to the increasing demand for testing and implementing hydrogen as a green element in overall human mobility, the requirements of hydrogen infrastructure are also growing. The literature review section of this thesis deals with hydrogen storage, which remains problematic even nowadays, as well as the national and international legislation related to hydrogen economies or hydrogen itself, which cannot be ignored. Lastly, it examines various types of hydrogen refuelling stations and analyse their main concepts. In the experimental section, the diploma thesis focuses on designing a hydrogen economy for the combustion engine testbed at Brno University of Technology, incorporated into a shipping ISO container modified to meet safety and technological requirements. All technological devices are selected to meet expectations, and detection sensors are designed to ensure the safety. Finally, the operation and conditions of the hydrogen economy are simulated using GT -Suite program.

KEYWORDS

Hydrogen, hydrogen storage, hydrogen infrastructure, safety of hydrogen economy, technology of hydrogen economy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERGER, Kryštof. *Návrh vodíkového hospodářství pro zkušební spalovacích motorů*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157349>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Josef Štětina.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením **prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D.** a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2024

.....

Kryštof Berger

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a cenné připomínky při jejím zpracování. Poděkování zároveň patří i mé rodině, která byla mou velkou oporou při studiu na vysoké škole.

OBSAH

Úvod	12
1 Vodík.....	13
1.1 Fyzikální vlastnosti vodíku	13
1.2 Chemické vlastnosti vodíku	14
1.3 Výroba vodíku	15
1.3.1 Výroba vodíku z fosilních zdrojů	15
1.3.2 Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů	16
1.4 Využití vodíku	16
1.4.1 Palivové články	16
1.4.2 Palivový článek PEM	17
2 Bezpečnost práce s vodíkem	18
2.1 Únik a rozptyl vodíku	18
2.2 Vznícení vodíku	18
2.3 Hoření vodíku	19
2.4 Detektory vodíku	19
2.4.1 Polovodičové senzory úniku vodíku	20
2.4.2 Elektrochemické vodíkové senzory	20
2.4.3 Vodíkový senzor na principu katalytického spalování	21
2.4.4 Senzory vodíku s optickými vlákny	21
3 Legislativa České republiky spojená s vodíkem	22
3.1 Vodíková strategie	22
3.2 Legislativa	22
3.3 Standardizace používání vodíku	23
3.3.1 Mezinárodní předpisy ISO/TC197	23
3.3.2 Mezinárodní normy SAE	23
3.3.3 Národní předpisy a normy	24
4 Skladování a přeprava vodíku.....	25
4.1 Skladování zkapalněného vodíku	26
4.2 Skladování stlačeného vodíku	27
4.3 Kombinace zkapalněného a stlačeného vodíku	29
4.4 Vodík ve sloučeninách a materiálech	30
4.5 Přeprava vodíku	31
4.5.1 Potrubní síť	31
4.5.2 Silniční a námořní přeprava.....	31
5 Materiály používané v oblasti vodíku	33
5.1 Poškození materiálu vodíkem	33
5.1.1 Poškození za vysokých teplot.....	33
5.1.2 Vodíková křehkost.....	34
5.1.3 Vodíkové puchýře	34
5.1.4 Vodíkové praskání za vysokého napětí	34
5.1.5 Tvorba hydridů	34
5.2 Materiály u kryogenní technologie	35

5.3	Materiály u tlakové technologie	35
6	Vodíkové plnicí stanice.....	37
6.1	Vodíkové plnicí stanice v Evropské Unii	37
6.2	Vodíkové plnicí stanice v ČR	38
6.3	Vodíkové plnicí stanice využívající stlačený vodík	40
6.3.1	Vysokokapacitní nízkotlaký zásobník	40
6.3.2	Kompresor	40
6.3.3	Vysokotlaký zásobník	41
6.3.4	Chladicí zařízení	41
6.3.5	Výdejní stojan.....	41
6.4	Vodíkové stanice využívající zkapalněný vodík.....	42
6.4.1	Kryogenní nádoba	42
6.4.2	Zplyňovací zařízení	42
6.4.3	Chladič.....	42
6.5	Vodíkové stanice využívající svůj vlastní vodíku	43
6.6	Bezpečnostní prvky vodíkových plnicích stanic	43
6.6.1	Nebezpečné zóny	44
7	Návrh vodíkového hospodářství.....	45
7.1	Možnosti dodání vodíku na VUT	47
7.1.1	Cena vodíku.....	47
7.2	Návrh kontejneru	49
7.2.1	Kostra kontejneru	49
7.2.2	Izolace a zateplení	51
7.2.3	Maximalizace bezpečnosti kontejneru.....	56
7.2.4	Ventilace kontejneru.....	57
7.2.5	Přístup do kontejneru.....	60
7.2.6	Vizualizace kontejneru	61
7.3	Schéma toku vodíku včetně senzorů.....	63
7.4	Technologie vodíkového hospodářství	64
7.4.1	Vysokokapacitní nízkotlaký zásobník	64
7.4.2	Kompresor	67
7.4.3	Vysokotlaký zásobník	68
7.4.4	Chladicí systém a tepelný výměník	69
7.4.5	Potrubí, redukce a další příslušenství	71
7.4.6	Vizualizace rozmístění komponent v kontejneru	73
7.5	Návrh detekčního systému.....	74
7.5.1	Hlavní vypínač a nouzové odstavení	74
7.5.2	Detektor úniku vodíku	75
7.5.3	Detektory plamene s UV/IR zářením	76
7.5.4	Tlakoměry.....	78
7.5.5	Ventily	79
7.5.6	Vizualizace umístění ventilů a tlakoměrů	81
7.6	Simulace v GT-Suite.....	83
7.6.1	Model v preprocesoru GT-Suite	83
7.6.2	Nastavení proměnných veličin	87
7.6.3	Výsledky simulace GT-Suite.....	89

Závěr	93
Použité informační zdroje.....	95
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	103
Seznam příloh	105

ÚVOD

Během posledního desetiletí výrazně stoupla frekvence jízd autem, autobusem nebo vlakem. Lidé začali více cestovat za prací, na výlety nebo na dovolené. S rostoucím počtem dopravních prostředků se zvýšila i míra znečištění ovzduší pocházející právě z dopravních prostředků. Vedle produkce samotného oxidu uhličitého je pro zdraví nebezpečná také přízemní vrstva ozonu, která vzniká při spalování. Z důvodu postupného celoevropského snižování emisí se vynaložily nemalé peníze na vývoj a výzkum nových alternativních pohonů, které mají za úkol postupně snižovat množství emisí jako celku.

Automobily poháněné elektřinou, která se taktéž řadí mezi alternativní pohony, se již dostaly do podvědomí všech uživatelů. Produkce těchto automobilů významně závisí na dostupnosti kovů, ze kterých jsou vyráběny baterie pro tyto vozy, a také na samotné životnosti baterií. Není nějakým neznámým faktem, že recyklace baterií nebo jejich samotná likvidace rezonuje mezi lidmi poměrně výrazně neekonomicky i neekologicky. Právě při pomýšlení na tuto problematiku se začalo investovat i do dalších zdrojů čisté energie, jakým je právě vodík.

První automobily na vodík se již vyrábějí. Příkladem budiž Toyota MIRAI, která je průkopníkem v této oblasti. Nicméně k dalším krokům pro využití automobilů poháněných vodíkem je potřeba přispět výzkumy a nápady na potenciální zefektivnění využití energie tohoto velmi rozšířeného plynu na Zemi. A jelikož se nezadržitelně blíží doba, kdy se lidstvo bude muset obejít bez zatím nenahraditelných fosilních paliv, jejichž zásoby nejsou nekonečné, začne se s velkou pravděpodobností klást větší důraz na vývoj a výzkum vodíku a jeho využití nejen v automobilové dopravě.

S použitím vodíku, jakožto dalšího alternativního paliva v dopravě, úzce souvisí i vodíková infrastruktura, která není zdaleka tak rozšířená jako u fosilních paliv. Čerpací stanice pohonných hmot se nachází v podstatě na každém kroku, velkých rafinerií starajících se o dostupnost produktů vyrobených z ropy se vyskytuje také dostatek. Během posledních let se i kadence přípojek pro nabíjení automobilů na elektřinu značně zvýšila. U vodíku tomu tak v současnosti zatím není. Pokud by lidstvo chtělo tento znamenitý nápad s vodíkem dále rozvíjet, je nepostradatelné věnovat se nejen samotným automobilům na vodík, ale i celkové vodíkové infrastruktuře, která v současnosti neoplývá zrovna vysokou frekvencí. Ku příkladu v České republice fungují zatím pouze tři vodíkové plnicí stanice.

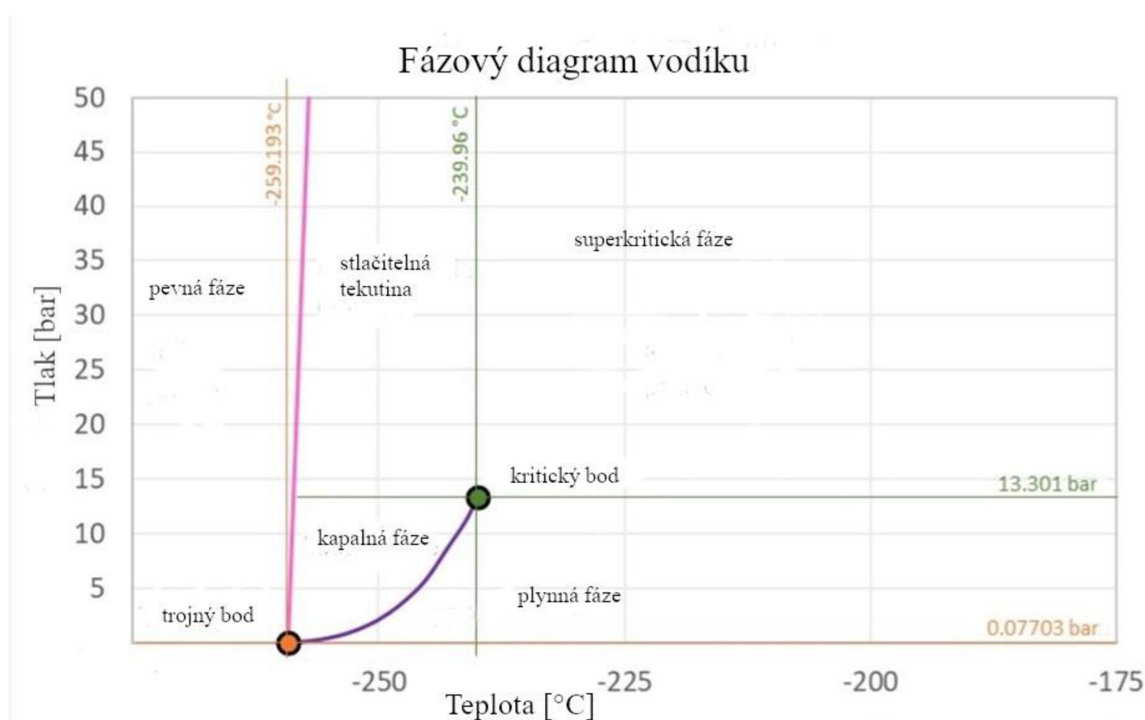
Vodíkové hospodářství jako celek zasahuje nejen do oblasti vodíkové technologie, ale i do oblasti bezpečnosti použití vodíku, jelikož se jedná o lehký a zároveň hořlavý plyn. Zkombinovat tyto dvě zásadní záležitosti není zcela jednoduché. Tato práce navrhuje jedno z několika způsobů řešení, jak je možné navrhnout menší vodíkové hospodářství zabudované v lodním ISO kontejneru včetně veškerých nezbytných technologických, a i bezpečnostních komponent potřebných k jeho správnému fungování.

1 VODÍK

Vodík jakožto nejhojnější prvek ve vesmíru tvoří asi 89 % jeho hmotnosti [1]. Vyskytuje se nejen ve všech hvězdách, kde probíhá jeho termonukleární fúze na hélium, ale i v mezigalaktickém prostoru. Byl objeven v roce 1766 Henrym Cavendishem [1]. Vytváří sloučeniny prakticky s každým prvkem. Mimo to, že je vodík třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi po kyslíku a křemíku, tak je zároveň i prvkem nejlehčím [2]. Nejčastěji se na Zemi vyskytuje v molekulách H_2 , které jsou zároveň i jeho nejstabilnější formou, ve vázané podobě na kyslík či ve všech organických sloučeninách [2].

1.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI VODÍKU

Vodík je za normálních podmínek hořlavý plyn bez barvy, chuti a zápachu. Je mnohem lehčí než vzduch, se kterým se i mimo jiné lehce mísí, a díky své nízké molekulové hmotnosti je i těžko stlačitelný [3]. Se vzduchem vytváří výbušnou směs při určitém směšovací poměru a za vhodných podmínek. Vodík kondenzuje na kapalnou formu při -253 °C , což je ku příkladu nižší teplota než teplota nejchladnější planety sluneční soustavy Uranu [4]. Tuhne na pevnou látku při -259 °C . Kritickou teplotou je pro vodík teplota kolem -240 °C , při které dosahuje nejvyšších tlaků, a přitom může být ještě v kapalném stavu [4].



Obr. 1 Fázový diagram vodíku [5]

V přírodě se vyskytují 3 různé izotopy vodíku, a sice lehký izotop vodíku, deuterium a tritium [2]. Nejčastěji se vodík vyskytuje v podobě lehkého izotopu, který je tvořen jedním elektronem a jedním protonem. I proto dokáže lehce difundovat skrz materiály a poškozovat krystalické mřížky jednotlivých materiálů – viz kapitola Poškození materiálu vodíkem. Vodík je dále charakteristický svou vysokou tepelnou vodivostí [5]. Významná je jeho molekulová

hmotnost, bod varu nebo tání a vlastnosti související s jeho spalováním jako alternativního paliva. Důležitá je i jeho nízká hustota, jelikož při úniku vodíku do ovzduší se dokáže rychleji rozptýlit a nehrozí takové riziko kumulace [3]. Malá potřebná energie k zapálení může mít negativní dopad například na detonační spalování nebo zpětný zášleh plamene, nicméně vysoká teplota samovznícení naopak vede k tomu, že směs potřebuje vnější zdroj energie, než zažehne. Následující tabulka ukazuje základní fyzikální a termické vlastnosti vodíku.

Tab. 1 Fyzikálně-termické vlastnosti vodíku [5][6][7]

Fyzikální vlastnosti vodíku		
Molekulová hmotnost	2,016	[g.mol ⁻¹]
Teplota tání	-259	[°C]
Teplota varu	-253	[°C]
Hustota plynu při 0 °C a atmosférickém tlaku	0,08987	[kg.m ⁻³]
Hustota pevného skupenství při -259 °C	858	[kg.m ⁻³]
Hustota kapalného skupenství při -253 °C	708	[kg.m ⁻³]
Teplo ze sloučení při -259 °C	58	[kJ.m ⁻³]
Teplo z vypařování při -253 °C	447	[kJ.kg ⁻¹]
Teplota samovznícení	585	[°C]
Koeficient difúze	0,61	[cm ² .s ⁻¹]
Minimální potřebná energie k zapálení	0,02	[mJ]
Výhřevnost	120	[MJ.kg ⁻¹]
Tepelná vodivost	0,1825	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Rozsah zápalnosti směsi	4-75	[%]

1.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI VODÍKU

Vodík je za normálních podmínek ve sloučeninách stabilní. K chemickým reakcím dochází až za zvýšené teploty a přítomnosti katalyzátoru [8]. Naproti tomu atomární vodík, který se získává disociací za vysokých teplot, je velmi reaktivní, a proto se v přírodě téměř nevyskytuje. Vodík je schopen tvořit zvláštní typ chemické vazby nazývaný vodíkový můstek, přičemž právě tato vazba má spoustu využitelné energie [9]. Vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután kovovou, kovalentní ani iontovou chemickou vazbou [10]. Mimořádně silná je pak vodíková vazba s atomy kyslíku, což vysvětluje anomální fyzikální vlastnosti vody, jako je vysoký bod varu a tání [10]. Dále se bouřlivě slučuje s halogeny. Tím, že není toxický, jeho únik prakticky nelze zaznamenat pouhým okem. Hořlavost tohoto plynu závisí na koncentraci v molekulách, ve kterých je právě navázán. Neobvyklou vlastností vodíku můžeme nazvat jeho schopnost rozpouštět se v některých kovech například v platině. Díky své vysoké difuzivitě je vodík schopen lépe tvořit homogenní směs [11].

1.3 VÝROBA VODÍKU

Výroba vodíku je pro vodíkovou infrastrukturu jednou z nejvýznamnějších částí celého vodíkového procesu. Vzhledem k tomu, že poptávka po vodíku se bude v příštích letech pravděpodobně zvyšovat, tak i u produkce vodíku se dá očekávat, že se bude zdokonalovat. V čisté formě se vodík vyskytuje ve vesmíru [2]. Získávání tohoto plynu z vesmíru nepřipadá v úvahu svou technologickou náročností, a tedy jediným způsobem, jak vodík získat, je jej vyrobit. V následujících tabulkách je přehledně znázorněn podíl jednotlivých technologií a surovin na výrobě vodíku [11].

Tab. 2 Podíly vyrobeného vodíku podle vstupních surovin [11]

Druh suroviny	Podíl vodíku vyrobeného procesem
Zemní plyn	48 %
Uhlí	18 %
Ropa	30 %
Voda – elektrolyza	4 %

Tab. 3 Podíly vodíku vyrobené jednotlivými druhy procesů [11]

Druh procesu	Podíl vodíku vyrobeného procesem
Parní reforming	59 %
Separace z rafinérských a petrochemických procesů (katalytický reforming, pyrolýza)	35 %
Parciální oxidace	3 %
Ostatní zdroje	3 %

1.3.1 VÝROBA VODÍKU Z FOSILNÍCH ZDROJŮ

V současné době mají největší podíl na výrobu vodíku fosilní zdroje, konkrétněji 96 % čistého vodíku se vyrobí z fosilních zdrojů [11]. Tento typ výroby ovšem není šetrný k životnímu prostředí, proto se dá očekávat jeho postupné nahrazení jinými druhy výroby. Nejvíce se používá metoda výroby zvaná parní reforming zemního plynu, což je nepřetržitý proces, při kterém dochází k reakci zemního plynu, respektive metanu, který je jeho hlavní složkou, s vodní parou za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého [12]. Parní reforming je endotermická metoda výroby vodíku, která probíhá ve čtyřech krocích. Těmi kroky jsou katalytické odsíření, reforming, konverze oxidu uhelnatého zakončená čištěním a separací vodíku [12].

Dále se vodík získává parciální oxidací, což je, na rozdíl od parního reformingu, exotermická reakce, do které vstupují uhlovodíky, například metan, a kyslík. Tato reakce může probíhat i bez přítomnosti katalyzátoru. Produkty této reakce jsou pak vodík a také oxidy uhlíku [13]. Před samotnou parciální oxidací je nutné odsíření [12].

Mezi další typy výroby vodíku z fosilních zdrojů se řadí i výroba vodíku z odpadních produktů při těžbě nebo zpracování uhlí, například z koksárenského plynu. Tomuto druhu výroby se říká zplyňování uhlí. Kvůli nízkému obsahu vodíku v uhlí je hlavním zdrojem vodíku vodní pára. Jiným způsobem je jeho výroba realizována v chemicko-průmyslových závodech, většinou jako vedlejší produkt při chemických reakcích [12].

1.3.2 VÝROBA VODÍKU Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

Vzhledem k trvalému snižování emisí se dá předpokládat, že velká část vyrobeného vodíku v budoucnu bude pocházet z obnovitelných zdrojů. Mezi ně se řadí elektrolýza, při které vodík vzniká rozkladem vody pomocí elektrického proudu, kdy se molekula vody rozloží na vodík a kyslík. Obecně lze říct, že na anodě dochází k oxidaci, na katodě naopak k redukci [14]. Tento způsob výroby je nejvíce rozšířený v elektrárnách při přebytku elektrické energie, popřípadě z obnovitelných zdrojů, například solárních panelů. Takový koncept úschovy energie je označován jako Power-to-Hydrogen [15]. Elektrolýza je zatím bohužel využívána pouze v omezené míře především díky vysokým provozním nákladům. Dnes se nejčastěji používají alkalické, PEM nebo SOE typy elektrolyzérů [14].

Nejčastějším typem výroby vodíku z obnovitelných zdrojů je v dnešní době výroba z biomasy. Jedná se o složitý proces, při kterém dochází k reakci biomasy s vodní parou za vzniku několika produktů [16]. Dalším typem výroby vodíku je pak termolýza vody, což je proces, u kterého dochází k tepelnému rozkladu vody na vodík a kyslík, podobně jako u elektrolýzy. Rozdíl mezi termolýzou a elektrolýzou je pak v typu dodané energie, kdy místo elektrické je dodávána tepelná energie. Nevýhodou je nutnost dosáhnout vysokých teplot, tudíž se využívá i chemických reakcí. Pokud při výrobě vodíku dochází k tepelným i chemickým reakcím, nazývá se tato výroba termochemický rozklad vodíku [12]. I přes tento fakt, že existuje několik možností výroby vodíku z obnovitelných zdrojů, je jejich podíl na celkové produkci vodíku zanedbatelný.

1.4 VYUŽITÍ VODÍKU

V dnešní době je využití vodíku velice pestré hlavně kvůli jeho energetickým vlastnostem. Hojně je dnes využíván jako surovina v chemickém a petrochemickém průmyslu, a to zejména pro čištění a krakování ropy nebo pro výrobu metanolu a amoniaku. Dále se využívá ke spalování a na syntetická paliva. Pro automobilový průmysl je v současnosti důležité využití vodíku v palivových článcích. Motory na vodíkový pohon jsou zatím ve fázi vývoje a výzkumu a nejsou tak rozšířené.

1.4.1 PALIVOVÉ ČLÁNKY

Palivové články v automobilech fungují na principu přeměny chemické energie na energii elektrickou na základě elektrochemických procesů [18]. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž se nachází elektrolyt, nebo membrána, která může být buď kapalná nebo pevná. Na rozdíl od baterií netvoří anodu a katodu aktivní prvky působící v chemické reakci, ale tyto prvky jsou postupně na tyto elektrody přiváděny. Na anodu, která je označována jako palivová, je přiváděno palivo, které na ní oxiduje. Uvolněné elektrony poté míří ke katodě skrze elektrolyt, kde zase redukují. V případě přerušení vnějšího obvodu se zátěž se chemické procesy zastaví [19]. Tím že nedochází ke spalování, nevznikají žádné toxické látky a jedinou odpadní látkou tohoto procesu je voda.

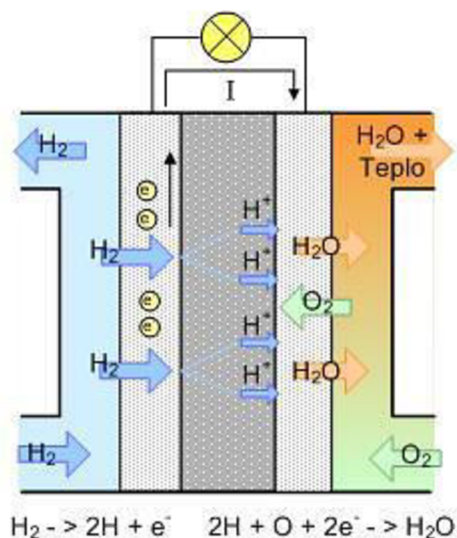
Nevýhodou palivového článku je zamrzávání při nízkých teplotách, při vyloučení vody na katodě totiž může dojít k jejímu zamrznutí, a to pak vede ke kompletnímu zastavení celého procesu. Jejich účinnost se pohybuje mezi 40–60 % a jsou schopny rychle, a hlavně kvalitně zvládat náhlé změny. Nejčastěji používaným typem vodíkových článků v automobilovém průmyslu je typ PEM [20].

1.4.2 PALIVOVÝ ČLÁNEK PEM

Palivový článek PEM se skládá z membrány z polymerů, která propouští pouze protony. Membrána je stlačena mezi dvě porézní elektrody z uhlíkové tkaniny nebo grafitického papíru. K reakcím dochází na rozhraní elektrod a membrány [21]. Na anodu je přiváděn vodík a na katodu kyslík. Vodík se na katalyzátoru rozpadá na kladně nabitě ionty a elektrony za vzniku elektrické energie.



Ionty vodíku pak procházejí membránou a na katodě se slučují se záporně nabitým kyslíkem za vzniku vody a tepla. Vzniklá voda je odvedena s přebytkem kyslíku [18].



Obr. 2 Popis palivového článku PEM [18]

Účinnost palivového článku PEM se pohybuje okolo 60 %, což z něj činí nejefektivněji pracující palivový článek. Používá se nejen u vozidel, ale například i u záložních nebo přenosných zdrojů. Mezi jeho výhody se řadí kompaktnost, nízké provozní teploty a rychlá odezva při startování. Na druhou stranu jsou u něj využívány drahé katalyzátory a je velice citlivý na nečistoty v palivu [20].

2 BEZPEČNOST PRÁCE S VODÍKEM

S častějším užíváním vodíku vychází na povrch i nespočet úskalí souvisejících s výrobou, skladováním a transportem. Aby se předešlo nechtěným nehodám a zaručila se bezpečnost a ochrana zdraví při práci, jsou vydány předpisy a ustanovení, které jsou brány jako neodmyslitelná součást vodíkových technologií.

Vodík, jakožto nejmenší atom na světě, má tendenci unikat [2]. Vzhledem k náročnosti udržet vodík v nádrži, jsou malé úniky přípustné, protože se vodík dokáže rychle rozptýlit ve vzduchu. U vodíkových technologií, pokud dojde k úniku, se shromažďuje nemalé množství tohoto plynu, a proto jsou s ním spojená určitá rizika. Mezi základní rizika související s vodíkovými systémy patří riziko hoření, exploze, překročení tlaku nebo únik tohoto lehkého plynu [22]. Znalost vlastností vodíku a bezpečnostních opatření je základním kritériem pro bezpečnost vodíkových technologií a jeho využití pro komerční účely [23].

2.1 ÚNIK A ROZPTYL VODÍKU

Ve spoustě nehod spojených s vodíkem figuruje jeho únik. Často se jedná o únik nemalého množství, který poté vede i k vážným následkům. Rozmanitost způsobů úniku plynu je velká. Záleží na okolnostech a faktorech, například rychlosti a množství unikajících látek. Nejčastěji se vodík dostává z nádoby skrz materiál a jeho deformacemi, nadměrnému tlaku nebo tím, že se rozlije po povrchu a vyprchává do okolí [22].

Pronikání vodíku skrz materiál, ve kterém je skladován, závisí na samotném materiálu. Může se vyskytnout takřka u všech materiálů. Nicméně daleko nižší pravděpodobnost výskytu je u kovových materiálů, proto se vodík skladuje většinou v kovových nádržích s polymerními vlákny – viz kapitoly Skladování a přeprava vodíku a Materiály používané v oblasti vodíku. Intenzita prostupu je ovlivněna dobou trvání a okolními podmínkami. Pokud v materiálu vznikne trhлина nebo prasklina může vodík vytvářet proud plynu [22]. U tohoto typu úniku záleží na tom, zda je kontrolovaný vztlakem nebo ne. Pokud ano, vytváří proud vodíku stoupající vždy vzhůru. V závislosti na stupni komprese může být proud nazván jako podzvukový nebo sonický [22].

Proces rozptylu vodíku hraje hlavní roli v tom, jak moc dokáže být únik vodíku nebezpečný pro okolí. Podle různých okolností můžeme rozptyl dělit na turbulentní nebo molekulární. V případě malého úniku se vodík okamžitě rozptýlí do okolí a nehrozí tím žádné nebezpečí. Pokud ovšem dojde k většímu úniku a vodík se zároveň dostane do kontaktu s iniciátorem hoření, pak záleží na okolnostech míšení vodíku se vzduchem. V průběhu procesu uvolňování vodíku se mohou rozlišovat tři jasně rozpoznatelná období. První stadium je takové, kdy se uvolněný vodík ještě špatně mísí se vzduchem a není zcela promíchaný, nebo je promíchan pouze v okrajových zónách. To znamená, že nedojde k hoření. Střední stupeň, kdy vodík vlivem vztlakových sil stoupá vzhůru, umožňuje okolnímu vzduchu dostávat se i do vnitřních oblastí, čímž se snižuje koncentrace a tvorba směs hořlavá. V konečné fázi se vlivem kontinuálního míchání koncentrují kapky vodíku pod mez hořlavosti, díky čemuž je směs nespálitelná [22].

2.2 VZNÍCENÍ VODÍKU

Vodík může vzplanout, pokud se dostane do kontaktu s plamenem, žhavým povrchem nebo jiným zdrojem zapálení v přítomnosti kyslíku. Vodík je hořlavý plyn

viz kapitola Vodík, a pokud se setká s odpovídajícími podmínkami, může dojít k jeho vzplanutí. Kritéria hořlavosti při vznícení jsou stejná jako pro hoření. Přítomnost omezujícího povrchu, jako je například potrubí nebo stěny tlakové nádoby, mohou zvýšit tlak a zvětšit rychlost plamene v procesu známém jako plamenová akcelerace. Když plamen dosáhne vysoké rychlosti a turbulence, proces vznícení přejde v explozi [23].

2.3 HOŘENÍ VODÍKU

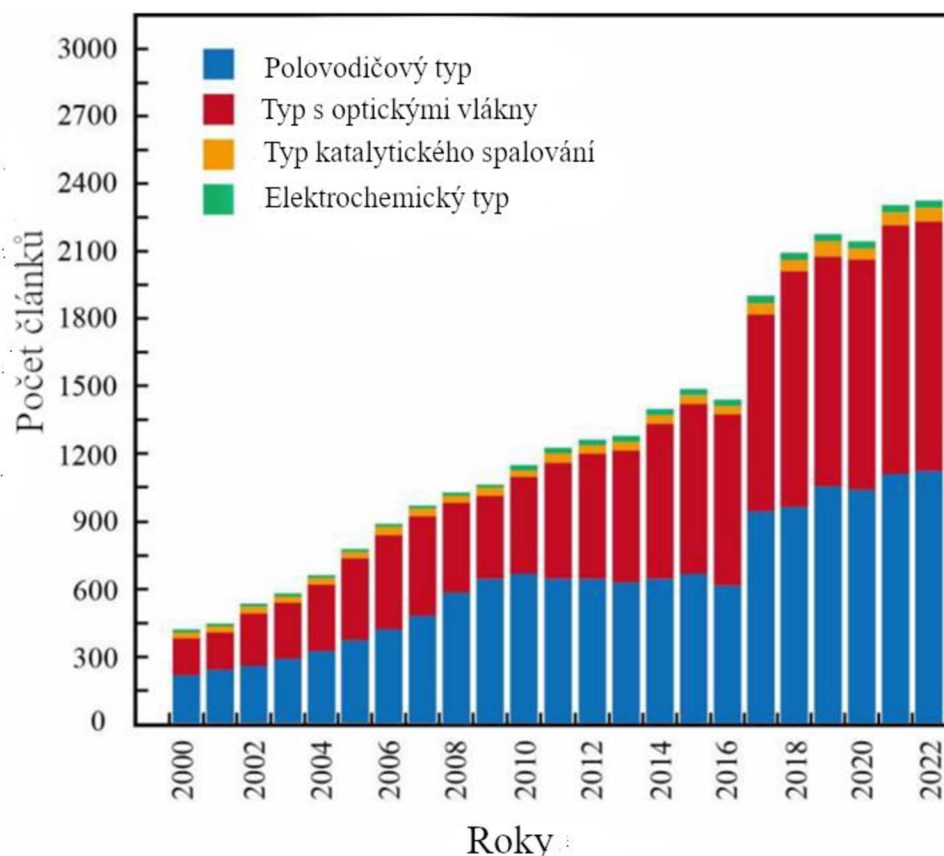
Hoření vodíku je exotermická chemická reakce, při které vodík reaguje s kyslíkem za vzniku vody a energie ve formě tepla [23]. Chemická rovnice hoření vodíku vypadá následovně:



Základním rizikem vodíkového systému je právě jeho nekontrolovatelné hoření při jeho náhodném úniku. Pravděpodobnost úniku vodíku je vysoká, vzhledem k jeho vlastnostem, a následná tvorba hořlavé směsi může vést při iniciaci k uvolnění velké energie a následně k hoření. Aby došlo k hoření vodíku, musí být přítomny dva základní elementy a sice oxidant, v tomto případě se jedná nejčastěji o vzduch, a zdroj iniciace čili horký povrch, tření a podobně. Směs vodíku a oxidantu může hořet v širokém rozmezí teplot, tlaku a koncentrace. Plamen vodíku je prakticky neviditelný za denního i umělého světla. Vyzařuje pouze ultrafialové záření. Pokud se člověk dostane do kontaktu s vodíkem, který právě hoří, není schopen zaznamenat teplo, které tato chemická reakce produkuje [22].

2.4 DETEKTORY VODÍKU

Z hlediska bezpečnosti se měří především koncentrace vodíku v okolí přístrojů nebo skladovacích míst. Pokud dojde k úniku, existují důležitá zařízení, ať už to jsou tlakoměry nebo právě detektory koncentrace vodíku, které dokážou zaznamenat únik včas. V případě nadměrné detekce měl by být k dispozici systém, který dokáže ihned například zavřít jednotlivé ventily. K tomu, aby detektory fungovaly správně, je nutná jejich kalibrace. Dnešní doba klade vysoké požadavky na rychlost odezvy, přesnost a citlivost těchto zařízení. Nicméně většina senzorů je ovlivněna například teplotou nebo vlhkostí. Mezi nejčastější používané typy vodíkových senzorů se řadí vodíkové senzory s oxidem kovu, elektrochemické vodíkové senzory, senzory na principu katalytického spalování a senzory vodíku s optickými vlákny [24]. Na vývoji a výzkumu senzorů úniku vodíku se intenzivně pracuje od počátku století. S přibývajícími vodíkovými hospodářstvími se trend vývoje patřičně zrychlil především v oblasti polovodičových typů senzorů a senzorů s optickými vlákny, jak ukazuje příslušný graf [25].



Obr. 3 Trend vývoje vodíkových senzorů [25]

2.4.1 POLOVODIČOVÉ SENZORY ÚNIKU VODÍKU

Senzory úniku vodíku s oxidem kovu se skládají z topného rezistoru, který se ohřívá, a snímajícího rezistoru, na jehož povrchu je nanesená katalytická vrstva oxidu kovu mezi dvěma elektrodami. Podkladovým materiálem bývá kvůli dobrému elektrickému odporu oxid hlinitý. Ohřívající rezistor ohřívá snímač na určitou provozní teplotu, která se pohybuje cca od 200 °C do 450 °C tak, aby mohla vrstva nanesená na tomto tělese reagovat s redukčními plyny, mezi které se řadí i vodík, a měnit svou odolnost [24]. Typickým materiálem reagujícím s vodíkem je detektor s příměsí oxidu cíničitého. Tento typ polovodiče má za normálních podmínek velmi nízkou vodivost. Pokud ovšem detekuje redukční plyn, změní se jeho vodivost a tím pádem i odpor, který se následně u tohoto senzoru měří [24].

2.4.2 ELEKTROCHEMICKÉ VODÍKOVÉ SENZORY

Elektrochemické vodíkové senzory se skládají z pracovní elektrody, pomocné elektrody, referenční elektrody a tenké vrstvy elektrolytu. Elektrolyt může být tekutý, a to při nižších teplotách, nebo tuhý při vyšších teplotách. Když vodík prochází elektrolytem, objeví se zpětná chemická reakce generující elektrický proud úměrný jeho koncentraci. Vyznačují se vysokou citlivostí, krátkou odezvou anebo stabilním nulovým bodem. Nevýhodou těchto senzorů je ztráta jejich citlivosti v průběhu času v důsledku ztráty katalytického povrchu. Mají nízkou spotřebu elektrické energie a používají se při běžných aplikacích. Rozdělují se na ampérmetrické, potenciometrické a kondukt-metrické [24].

2.4.3 VODÍKOVÝ SENZOR NA PRINCIPU KATALYTICKÉHO SPALOVÁNÍ

Vodíkové senzory založené na katalytickém spalování jsou využívány kvůli své stabilitě a citlivosti. Katalyzátorem v tomto typu senzoru je kovové palladium. V palladiu se vodík dobře rozpouští a spolu s ním vytváří hydridy, které mají vyšší odpor než čisté palladium. Princip měření spočívá právě v rozdílu odporu. Palladium má ovšem dvě velké nevýhody. První z nich je, že senzor se musí nahřát klidně i na 500 °C, aby správně fungoval, a to jde ruku v ruce s vyšší spotřebou energie [25]. Druhá nevýhoda je jeho citlivost na vlhkost a dlouhodobé používání. Díky vlhkosti se poté mění katalytické vlastnosti. Výhodami těchto senzorů jsou naopak rychlá odezva, vysoká přesnost a pokud nejsou vystaveny vlhkosti tak i dlouhá životnost. Katalytický vodíkový senzor je ovšem ještě ve fázi vývoje a výzkumu, protože stále vyzařuje velké množství tepla, které může zvýšit riziko výbuchu nebo vznícení [25].

2.4.4 SENZORY VODÍKU S OPTICKÝMI VLÁKNY

V dnešní době se často používají optická vlákna k měření různých velikostí nebo veličin. Není tomu jinak ani u měření koncentrace vodíku. Optická vlákna mohou reagovat i při normálních podmínkách. K detekci plynů obecně je potřeba tenká vrstva speciálního materiálu. Každý materiál reaguje na přesný typ plynu, například na detekci vodíku se využije vrstva palladia. Materiál poté reaguje s plynem a mění index lomu, což vede ke změně vlnové délky odraženého světla. Jsou odolné vůči šumu a elektromagnetickému rušení a zároveň jsou i citlivé, spolehlivé s rychlou odezvou. Narozdíl tedy od ostatních senzorů negenerují žádné elektrické jiskry, čímž se snižuje riziko výbuchu v případě úniku [25].

3 LEGISLATIVA ČESKÉ REPUBLIKY SPOJENÁ S VODÍKEM

Ve vodíku jakožto alternativního paliva vidí budoucnost nejen inženýři a vývojáři různých firem a společností, ale i přední světoví politici. Proto se investuje do vývoje technologií, legislativ a strategií zabývajících se tímto typem alternativního paliva. Vzhledem k tomu, že Česká republika je součástí Evropské unie, řídí se i nadnárodní legislativou vydanou právě tímto správním orgánem. Evropská unie se v rámci projektu Green Deal, který se zabývá nulovými emisemi do roku 2050 [26], rozhodla podpořit nejen finančně, ale i dalšími prostředky, jako jsou vodíkové strategie vývoje, vývoj a výzkum vodíku a jeho navazující využití.

Účinná legislativa v oblasti vodíkových technologií a využití vodíku pro komerční účely je jednou ze základních podmínek funkčnosti vodíkového energetického systému. Zaručení bezpečnosti ve všech stádiích vývoje vodíkových technologií a využití vodíku je obecně cílem a předpokladem pro tvorbu zákonů, standardů a strategií.

3.1 VODÍKOVÁ STRATEGIE

V České republice již několik let podporuje a řídí jednotlivé vodíkové projekty Česká vodíková technologická platforma HYTEP [27]. Vznikla v roce 2006 a od té doby se rozrostla na více než 85 členů, mezi které se řadí například Škoda Auto a.s., Linde Gas a.s. a jiné. Platforma podporuje především informovanost mezi jednotlivými subjekty při vývoji a výzkumu vodíku. Prosazuje také maximální efektivní využití vyrobeného vodíku v ČR a rozvoj bezemisní výroby vodíku [27].

Milníkem pro Českou republiku v rámci strategií bylo vydání Vodíkové strategie České republiky v roce 2021 zpracovanou Ministerstvem průmyslu a obchodu. Hlavní motivací pro schválení a vytvoření tohoto dokumentu bylo sjednocení informací, které jsou prozatím k dispozici, a stanovení určité strategie vývoje [28]. Jedná se především o takovou prognózu vývoje národního vodíkového hospodářství. Jako příklad by se dal využít fakt, že Vodíková strategie České republiky počítá, v převážné části, zpočátku importem vodíku, vzhledem k geografické poloze země, a tudíž i vybudování potrubních sítí určených k importu tohoto plynu. Strategie je určena pro všechny z oblastí dopravy, chemického průmyslu, energetiky a jiné [28].

3.2 LEGISLATIVA

Vodík je v legislativě České republiky od roku 2023 zakotven jako alternativní palivo v zákoně č. 311/2006 Sb. o pohonných hmotách, jehož součástí je již od roku 2017 společně s LNG, CNG a LPG, a nově také v energetickém zákoně č. 458/2000Sb. § 2 odst. 2 písmeno b) bod 9 jako plyn určený pro energetiku [29]. Mezi další plyny určené pro energetiku patří zemní plyn, koksárenský plyn čistý, degazační a generátorový plyn, biometan, propan, butan a jejich směsi, pokud nejsou používány pro pohon motorových vozidel. Znamená to, že vodík je dle českého právního řádu nejen palivem, ale i energetickým plynem [29]. Ovšem je součástí i dalších zákonů, sbírek nebo vyhlášek [29]. Uvedené sbírky jsou těmi nejdůležitějšími.

V legislativě České republiky ovšem existují i určité bariéry, které brání rychlejšímu rozvoji vodíkových technologií. Jedná se například o fakt, že vodík není statisticky sledovaná komodita, chybějící certifikace a nástroje pro obchodování s nízkouhlíkovým vodíkem nebo právě chybějící legislativa v jednotlivých odvětvích, jako je například omezení přepravovaného vodíku v tlakových lahvích po silnicích z důvodu bezpečnosti [28]. Vše by se ale mělo v příštích několika letech doplnit a nedostatky odstranit, protože se očekává rychlejší než-li explozivní vývoj a výzkum vodíkových technologií v následujících letech.

3.3 STANDARDIZACE POUŽÍVÁNÍ VODÍKU

Jako každá jiná standardizace tak i standardizace užívání vodíku se zabývá pravidly, normativy a postupy užívání vodíku. Tyto standardy mají za úkol zajistit bezpečnost, účinnost a spolehlivost při manipulaci s vodíkem. Standardizace by se dala rozdělit do několika větších skupin.

První z nich jsou bezpečnostní normy zahrnující stanovení pro bezpečnost používání vodíku v oblasti přepravy, skladování a používání vodíku. Jejich cílem je minimalizace rizik exploze, úniku a podobně. Další jsou normativy zajišťující kvalitu vodíku. Infrastrukturní normy se zabývají standardy pro vývoj a správu infrastruktury. Poté existují i standardy pro vodíkové palivové články, standardy regulující přepravu vodíku a podobně.

3.3.1 MEZINÁRODNÍ PŘEDPISY ISO/TC197

Organizace, která se zabývá vytvářením a schvalováním norem a předpisů, se nazývá Mezinárodní organizace pro standardizaci ISO. Tato organizace vytvořila soubor mezinárodních norem, kterými se řídí všechny fyzické i právnické osoby při manipulaci s vodíkem. Mezinárodní předpisy ISO/TC 197 řeší standardizaci v oblasti systémů a zařízení pro výrobu, skladování, dopravu, měření a použití vodíku. Primárním cílem tohoto standardu jsou požadavky na bezpečnost vodíkových technologií a využití vodíku jako paliva [23].

Předpisy ISO/TC 197 představují soubor norem spojených především s použitými vodíkovými technologiemi jsou platné do konce roku 2024 [32]. Nedokáží ovšem zabránit veškerým nehodám způsobených například únikem vodíku, ale poskytují takový standard, který by měl v maximální možné míře předejít katastrofickým scénářům. Každá jednotlivá část vydaných předpisů se zabývá konkrétní oblastí. Vzhledem k této práci jsou důležité standardy ISO/TC 197, kde například ISO 16111:2018 se zabývá nádržemi pro plyný vodík, což je podstatné v oblasti skladování [32]. V oblasti samotné vodíkové plnicí stanice je důležitý soubor norem ISO 19880, který je rozdělen do 6 oblastí, jako jsou například ventily, základní požadavky nebo O – kroužky [32].

3.3.2 MEZINÁRODNÍ NORMY SAE

Mezinárodní sdružení SAE je sdružení pohybující se v oblasti automobilního, leteckého a dopravního průmyslu. Jedná se o standardizační sdružení se sídlem v USA, které standardizuje jednotlivá usnesení například v oblasti motorových prostředků nebo letadel. Sdružení vytváří i standardy spojené s vodíkem a vodíkovými technologiemi. Mezi tyto předpisy patří například protokoly SAE J2719 zabývající se kvalitou vodíku, SAE J2799 související s palivovými články a pro tuto práci nejdůležitější normu SAE J2601, která se zabývá vodíkovými stanicemi a podobně [33]. Jedná se o ekvivalenci pro normy od sdružení ISO, konkrétně ISO TC/197.

Norma SAE J2601 a její další části se zabývá především doplňováním vodíkového paliva a dalšími aspekty souvisejícími s touto činností. Důležitým faktorem pro doplňování vodíku je jednak jeho výstupní teplota a pak také chladicí schopnost výdejního zařízení. Celkově soupis těchto norem obsahuje protokoly, které se používají pro dvě tlakové třídy, tedy 350 bar, jimiž se plní nákladní automobily nebo autobusy, a 700 bar pro osobní automobily, tři kategorie teplot pro dodávky paliva a skladování stlačeného nebo zkapalněného vodíku [33].

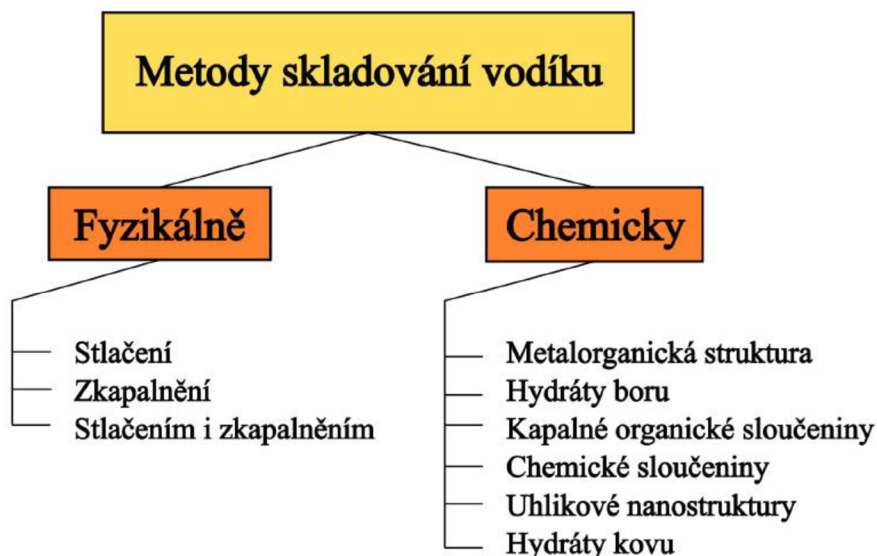
3.3.3 NÁRODNÍ PŘEDPISY A NORMY

Česká republika se řídí především českými technickými normami ČSN eventuálně převzatými normami ČSN EN. Při návrhu nových vodíkových technologií se postupuje tak, aby veškerá úskalí, která jsou spojena s návrhem, odpovídala těmto normám. Z hlediska vodíkových plnicích stanic se jedná o několik norem. Normy jsou zpoplatněné, nicméně je možné získat základní přehled z volně dostupné směrnice Českého plynárenského svazu TPG 304 03, která vychází z normy ČSN ISO 19880. Nejen tato směrnice poslouží i k návrhu samotné plnicí stanice na VUT v Brně [31].

V případě skladování vodíku se jedná především o normu ČSN EN 17533, která se týká tlakových lahví, konkrétně jejich skladování. Definiuje také, z jakého materiálu mají být tlakové lahve vyrobeny – viz kapitola Materiály u tlakové technologie [30]. Dále se materiály, ventily a jinými odvětvími skladování vodíku v tlakových lahvích zabývá norma ČSN EN 11114 [30]. O vodíkové křehkosti je psáno v normě ČSN EN 2832 [30]. Dalšími důležitými normami spojenými s vodíkem jako takovým jsou normy týkající se transportu vodíku, konkrétněji norma ČSN 07 8305 [30]. U ostatních typů skladování a transportu vodíku zatím nejsou české ekvivalenty, tudíž je vhodné řídit se nadnárodními předpisy nebo normami. Z pohledu vodíkových plnicích stanic je podstatný soubor norem ČSN ISO 19880 skládající se z několika částí, který je ekvivalentem normy ISO 19880 [30].

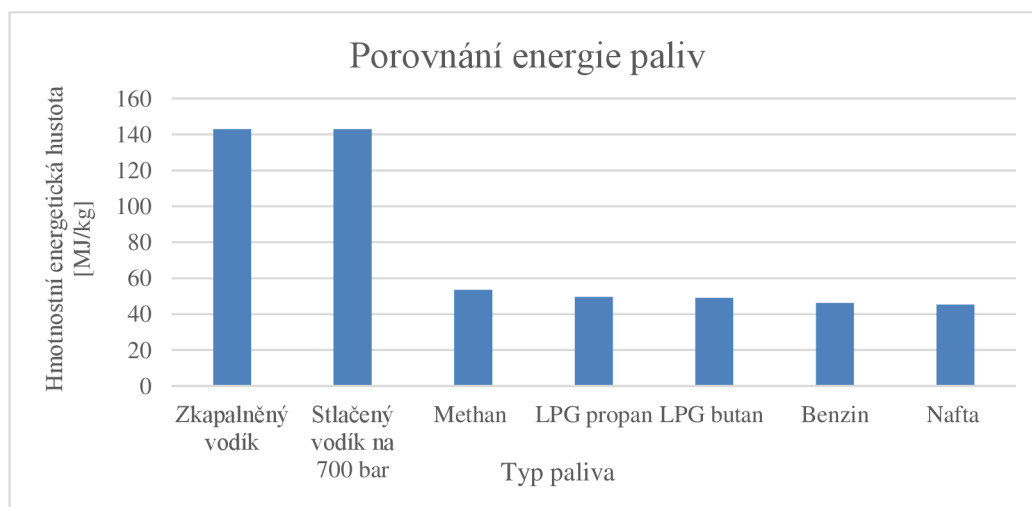
4 SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVA VODÍKU

Skladování vodíku by se dalo zařadit mezi jeden z nejsložitějších aspektů v oblasti vodíkových aplikací především kvůli jeho fyzikálním vlastnostem. Výběr správného typu skladování závisí na několika parametrech, jako je samotný typ aplikace vodíku nebo objem skladování. Mezi nejčastější možnosti fyzikálně skladovaného vodíku v současnosti se řadí kryogenní nebo tlakové technologie, přičemž každá z nich má své výhody i nevýhody. Méně je poté využíváno chemicky skladovaného vodíku ve sloučeninách, hydrátech a podobně.



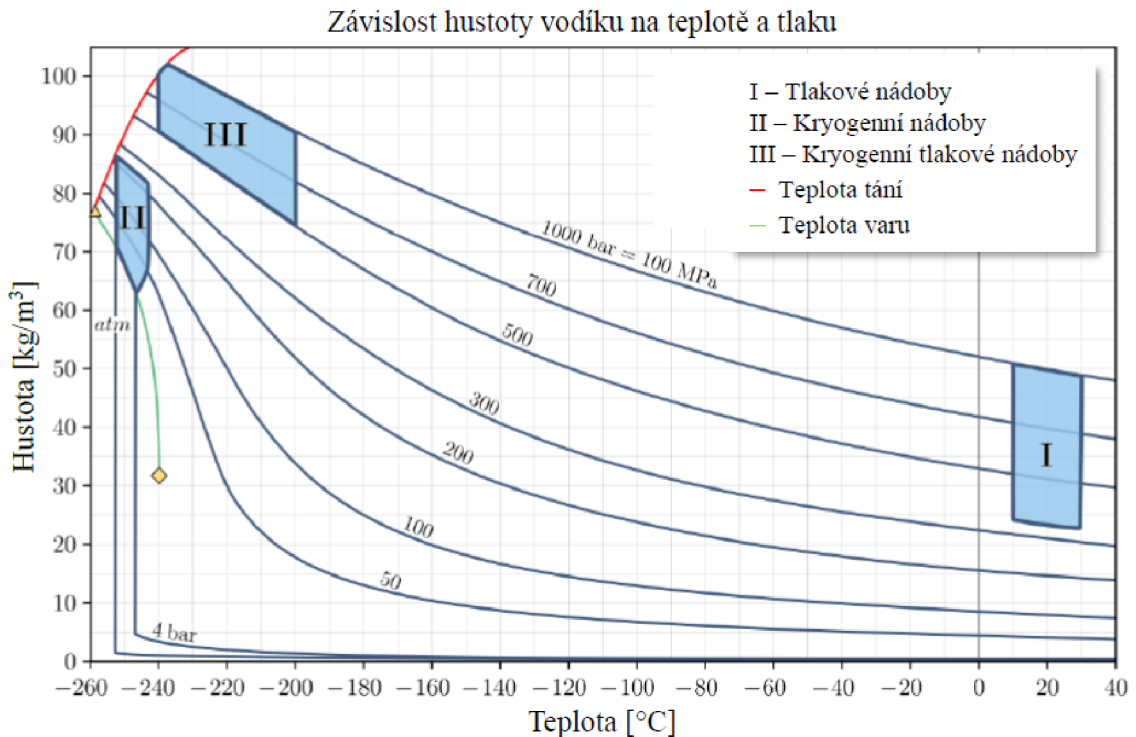
Obr. 4 Možnosti skladování vodíku [34]

V porovnání s ostatními palivy se ve vodíku vyskytuje spousta energie, ovšem při velmi nízké hustotě. Proto je hlavním důvodem, proč se vodík skladuje za jiných než běžných podmínek, zvýšení jeho hustoty, tudíž nahromadění většího množství energie do menšího objemu. Následující graf ukazuje porovnání hmotnostní energetické hustoty dostupných paliv.



Obr. 5 Graf porovnání energie paliv [35]

Nejpoužívanějšími typy skladování vodíku je jeho fyzikální skladování, do kterého se řadí stlačený, zkapalněný nebo kombinace stlačeného a zkapalněného vodíku. Každý z nich má určitý pracovní rozsah hustot a teplot, ve kterých se daný způsob skladování pohybuje. Úzce se skladováním vodíku je spojená také jeho přeprava, protože často využívá stejných technologií.



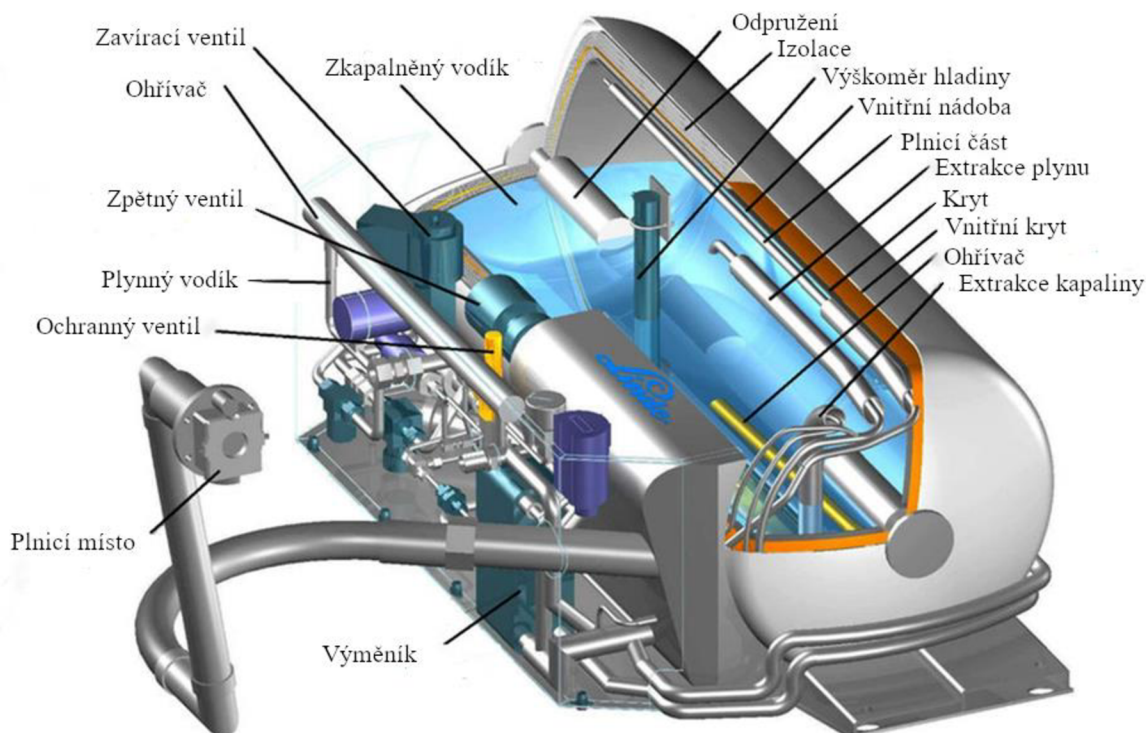
Obr. 6 Závislost hustoty vodíku na teplotě a tlaku [36]

4.1 SKLADOVÁNÍ ZKAPALNĚNÉHO VODÍKU

První z možností, jak skladovat a zároveň přepravovat vodík v čisté formě, je jej zkapalnit. Jedná se o velice technologicky, ekologicky ale i ekonomicky náročný proces, který probíhá za atmosférického tlaku. Nejčastějšími médii používanými k chlazení vodíku jsou dusík a helium [37]. Zkapalněný vodík má téměř dvojnásobnou hustotu než stlačený vodík na 700 bar. Jeho hustota dosahuje 70 kg/m³ [36]. Vodík se ochlazuje na teplotu pod -253 °C. Kritická je ovšem teplota -240 °C, jelikož zde dosahuje nejvyššího tlaku [36].

Ke kondenzačnímu procesu je využíván Joule-Thompsonův jev, který je obecně známý jako jev pro zkapalnění vodíku. Nejprve čistý proud vodíku je stlačen kompresorem na takovou hodnotu, aby odpovídala tlaku vysokotlakého zkapalňovače. Tento proud vodíku poté vstupuje do výměníku, kde je chlazen použitým médiem až pod inverzní teplotu. Dále je proud vodíku ochlazován v dalším výměníku pomocí proudu vodíku, který byl již zchlazen. Chlazený proud vodíku proudí přes škrtkovací ventil do nádrže, kde je expandován a vytváří dvoufázový proud vodíku. V této nádrži je oddělena kapalina, v tomto případě již zkapalněný vodík a pára neboli stále plynný vodík. Studená pára se vrací do výměníku, kde slouží ke chlazení. Tento okruh činností se několikrát opakuje [38].

Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi a maximálním přetlakem 5 barů [39]. Kryogenní nádoby jsou dvouplášťové a ocelové. Prostor mezi pláští je pak tepelně izolován vakuem. Při skladování zkapalněného vodíku v kryogenních nádobách při atmosférickém tlaku dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování, čímž se zvyšuje tlak uvnitř nádrže. Aby nedošlo k její destrukci, je přebytečný tlak regulován odpouštěním vypařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují tyto ztráty až 3 % z objemu za den. Proto je takto unikající vodík jímán a stlačován do přidavných tlakových lahví [39].



Obr. 7 Skladovací nádoba pro zkapalněný vodík [40]

4.2 SKLADOVÁNÍ STLAČENÉHO VODÍKU

Stlačení vodíku je nejjednodušší a zároveň nejefektivnější cestou ke zvýšení objemové hustoty. Jedná se totiž o pokročilou metodu skladování, která je již zažita a zároveň dosahuje vysoké míry spolehlivosti. Stlačený vodík se nejčastěji uchovává při tlacích od 200 bar do 700 bar, přičemž tlaky do 200 bar se využívají při dodávkách vodíku. V automobilovém průmyslu pak je nejčastěji využíváno stlačení vodíku v nákladních vozidlech na tlak 350 bar a v osobních automobilech na tlak 700 bar. Při stlačování dochází k energetickým ztrátám, nejčastěji kolem 10 % v závislosti na tlaku [40]. Z bezpečnostního hlediska je tento typ skladování zrádný zejména vodíkovou korozí, která je popsána v kapitole Poškození materiálu vodíkem, a i samotnými vysokými tlaky.

Jednou z nejsložitějších technologií při stlačování vodíku bývá samotný kompresor. Z pohledu konstrukce se na stlačení vodíku nejčastěji používají pístové nebo membránové kompresory [41]. Z ekologického důvodu se používají bezolejové kompresory, které jsou zároveň i lépe udržitelné, a dokáží zaručit čistotu vodíku [41]. A také vzhledem k tomu, že se

vodík stlačuje na vysoké tlaky, jsou kompresory navrženy jako vícestupňové, neboť na tak vysoké tlaky nelze během jednoho kompresního stupně dosáhnout.

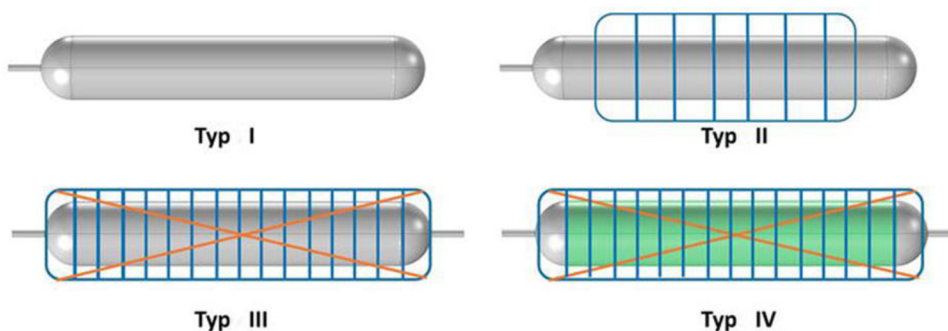


Obr. 8 Membránový vodíkový kompresor [42]

Vodík se po samotném stlačení skladuje v nádobách tomu určených. Z hlediska konstrukce existují čtyři typy nádob, nádoby typu I - IV. Obecně lze říct, že čím vyšší číslo, tím vyšší tlaky jsou schopny nádoby pojmout.

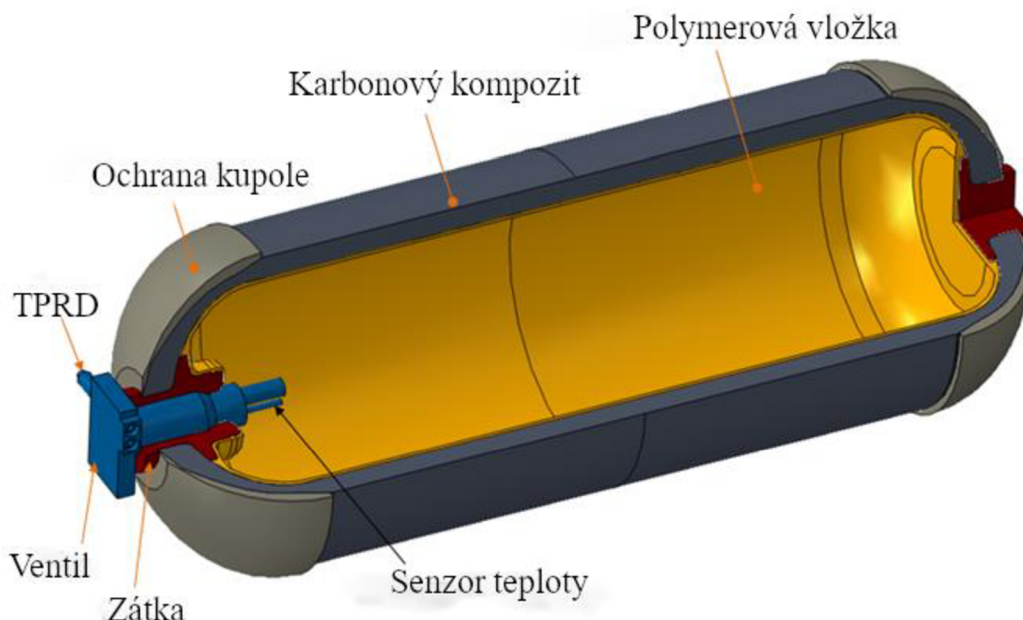
Nádoby typu I jsou vyrobeny nejčastěji z oceli a jsou nejtěžší. Z hlediska hmotnosti jsou tyto nádoby nejméně vhodné, protože vodík v nich z celkové hmotnosti zabírá asi 1 % [40]. Tlak uvnitř nádob se pohybuje mezi 200 bar až 350 bar. Typ II je kovová nádoba vyztužená na válcové části uhlíkovými nebo skelnými vlákny. Výhodou je patřičně nižší hmotnost a odolnost vůči vyšším tlakům [40]. Tyto dva typy jsou zpravidla použity na stacionární skladování a jsou náchylné na projevy vodíkové koroze.

Nádoby typu III je kompozitní nádoba s hliníkovým základem sloužící hlavně k zabránění úniku vodíku. V porovnání s typy I a II poskytuje tato nádoba 25–75% nárůst poměrové hmotnosti vodíku v nádobě. Používá se do tlaku 450 bar [43]. Posledním typem skladovacích nádob z hlediska konstrukce je typ IV. Jedná se o kompletně kompozitní nádoby, jejíž vložka je tvořena plastem. Nádoba je obalena hliníkovými vlákny v epoxidové matrici. Tyto nádrže odolávají tlakům až 1000 bar. Vodík u nich tvoří nejvyšší procentuální hmotnost [43].



Obr. 9 Typy tlakových nádob dle konstrukce [43]

Všechny tlakové nádoby používané ve vodíkových aplikacích jsou opatřeny přetlakovým TPRD ventilem [40]. Jedná se o bezpečnostní složku tlakových nádob, kdy při překročení požadovaného maximálního tlaku umožní upustit nežádoucí tlaky. Tato situace může nastat například při vysokých okolních teplotách.



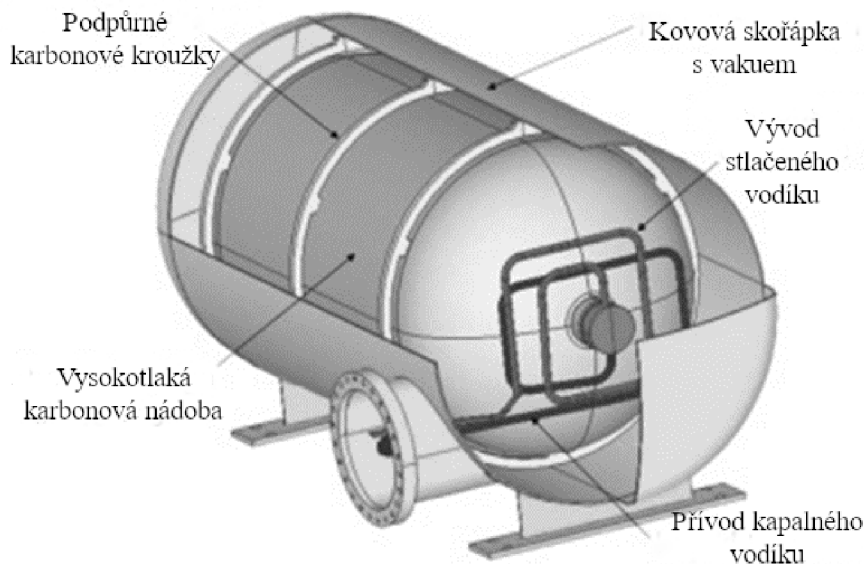
Obr. 10 Popis skladovací nádoby pro stlačený vodík [40]

Nádoby na stlačený vodík lze rozdělit i podle velikosti úložného prostoru a mobility na stacionární velké nebo malé skladovací prostory, na mobilní určené pro transport a distribuci nebo na nádrže ve vozidlech. Pro větší spotřebu a dlouhodobé skladování lze využít právě velké tlakové nádoby i v podzemní instalaci. Podobají se dnešním nádržím na zemní plyn. Největším problémem je jejich ekonomičnost. Další nevýhodou takto skladovaných zásob je především únik vodíku, který může následně reagovat s horninou v okolí tlakových nádob. Podzemní zásobníky lze rozdělit na solné kaverny, aquifery a porézní zásobníky [44]. Pozemní zásobníky naopak využívají standardní velikosti tlakových lahví o objemu 50 l. Existují však i stacionární vysokotlaké kontejnery nebo nízkotlaké kulové kontejnery, ve kterých se dá skladovat větší množství stlačeného vodíku [40].

4.3 KOMBINACE ZKAPALNĚNÉHO A STLAČENÉHO VODÍKU

Tento typ skladování vodíku využívá oba předchozí typy skladování, ze kterých si bere především jejich výhody. Tato metoda vede k minimalizaci ztrát a ke zvýšení energetické hustoty. Vodík se skladuje v kryogenních teplotách, které se pohybují od -230 °C až do -190 °C , a zároveň je stlačen na hodnoty přes 300 bar [40]. Konstrukčně je tento typ nádob řešen jako typ III nebo typ IV, nicméně více preferovaný pro tento typ skladování je typ III, to znamená, že je vyroben z kovové vložky a zároveň je vyztužen vlákny kompozitu. Skládá se ze dvou plášťů. Prostor mezi nimi je vyplněn vakuem, tak aby byl zamezen přestup tepla [40]. Kombinace stlačeného a zchlazeného vodíku by se mohla stát budoucností nejen nákladní

dopravy, nicméně jedná se o relativně mladý proces, který se nachází teprve v zárodkách vývoje. Největší nevýhodou je jejich vyšší výrobní cena.



Obr. 11 Nádoba na zkapalněný i stlačený vodík [40]

4.4 VODÍK VE SLOUČENINÁCH A MATERIÁLECH

Vodík se dá skladovat, mimo stlačenou a zkapalněnou formu, i jako součást materiálů nebo sloučenin. Mezi takové chemické sloučeniny se řadí amoniak NH_3 nebo peroxid vodíku [41]. Hlavním důvodem, proč se vodík uchovává ve sloučeninách je jeho samostatná reaktivnost, a proto se uměle tvoří sloučeniny. Z ekologického hlediska se ovšem nejčastěji využívá právě amoniaku kvůli absenci uhlíku v jeho sloučenině a také kvůli zaběhnutému industriálnímu procesu. Molekula amoniaku je výrazně větší a stabilnější, proto nedochází k jevu vodíkové koroze. Tento způsob se používá jak pro skladování, tak pro samotnou přepravu vodíku. Vodík dále vzniká i jako chemický odpad při výrobě hydroxidů [41].

Předchozí způsob skladování je poněkud složitý, a proto se většinou využívá vodíku z kovových hydrátů, kde se vyskytuje jako anion vodíku. Příkladem takového kovového hydrátu jsou sloučeniny LaNi_5H_6 , MgH_2 nebo NaAlH_4 [45]. Absorpce vodíku probíhá na povrchu kovu nebo slitiny a poté difunduje do struktury krystalové mřížky. Skladování vodíku v hydridech nevyžaduje žádné vysoké tlaky ani nízké teploty, což se stává energeticky nejméně náročným typem skladování [45]. Lze jej dodat při konstantním nastavitelném tlaku. Na druhou stranu hmotnost hydridu, ve kterém se vodík nachází, představuje několik procent celkové hmotnosti – viz tabulka 4 [45]. Hlavní výhodou, proč se vodík váže na sloučeniny nebo kovové hydráty, je jeho manipulace, která je mnohem bezpečnější než u předchozích fyzikálních možností skladování. Mezi další výhody se řadí fakt, že vodík je skladován v nízkých tlacích čili nehrozí jeho únik. Naopak jako velká nevýhoda může působit jeho opětovný rozklad na vodík v místě spotřeby, a právě tím se stává tato metoda dosti nepopulární a ekonomicky neefektivní. Zároveň tyto hydridy mají i větší hmotnost než stlačený vodík v nádobách nebo kryogenní vodík v nádobách. Nicméně výzkum v oblasti kovových hydridů a jejich využití pro skladování vodíku je stále aktivní, s cílem zlepšit

termodynamické vlastnosti, kinetiku procesů a celkovou účinnost skladování vodíku pro budoucí energetické potřeby [40].

Tab. 4 Parametry metal hydridových slitin [45]

Hydrid	Hmotnostní obsazení vodíku [%]	Desorpční teplota při 1 baru [°C]
La Ni ₅ H ₆	1,4	25
TiV ₂ H ₄	2,6	40
ZrMn ₂ H ₃	1,8	167
NaAlH ₄	5,1	220
MgH ₂	7,6	>300

4.5 PŘEPRAVA VODÍKU

Doprava vodíku je zásadním aspektem v rozvoji využití vodíku. Je samozřejmé, že místa výroby a místa spotřeby vodíku se mohou lišit, tudíž řešení otázky dopravy vodíku je jedna z věcí, na kterou se klade důraz. S rostoucí poptávkou po vodíku v budoucnosti se bude muset vyřešit fakt velkoobjemové přepravy. V prozatímní situaci se velkoobjemová přeprava řeší na velmi malé vzdálenosti, protože většina firem, plnicích stanic a podobně si vodík vyrábí přímo na místě. Nicméně zatím je spotřeba vodíku stále minoritní oproti jiným plynům, tudíž se řeší jeho přeprava v tlakových lahvích podobně jako u ostatních plynů.

Existuje několik možností, kterými lze vodík přepravovat. Tyto možnosti se zvažují na základě potřebného množství vodíku, způsob zpracovaného vodíku a také vzdálenost obou míst. Mezi ty nejčastější způsoby přepravy patří nákladní automobily, vlaky a lodě převážející stlačený nebo zkapalněný vodík, potrubí přepravující stlačený vodík a chemické nosiče, jako jsou například hydridy, které reagují v místě použití. Poslední zmíněná možnost je zároveň nejbezpečnějším druhem přepravy.

4.5.1 POTRUBNÍ SÍŤ

Studie ukázaly, že potrubí je nákladově nejefektivnější a energeticky nejúčinnější způsob přepravy vodíku na malé vzdálenosti, například v areálu firem, kde jsou běžně používány, ale i na velké vzdálenosti a ve velkém množství [46]. Vyskytuje se hlavně v Evropě a USA. Pracuje se stlačeným vodíkem, typicky od 100 do 200 bar, proto musí být potrubí vybaveno monitorovacím systémem úniku vodíku z potrubí nebo odstředivými ventily. Mezi výhody této přepravy se řadí například kontinuální dostupnost vodíku, jelikož plyn proudí prakticky neustále, navíc v dobré kvalitě, nebo ekologičnost za předpokladu nulového úniku vodíku. Na druhou stranu je potřeba říct, že k výrobě tohoto typu potrubí jsou potřeba dražší materiály, aby bylo zamezeno právě únikům vodíku [46]. Navíc ani z legislativního hlediska se přeprava vodíku potrubím nejeví jednoduše. Nicméně je možné využít již stávajícího potrubního systému na zemní plyn, což se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější. Další alternativou jsou přímo vodíkové plynovody, které jsou určeny pouze pro přepravu pouze vodíku [46].

4.5.2 SILNIČNÍ A NÁMOŘNÍ PŘEPRAVA

Ideálním východiskem pro transport vodíku na střední vzdálenosti a do různých lokalit je silniční síť. V současnosti se jeví jako nejobvyklejší varianta přepravy vodíku. Tento typ přepravy může být spojen i s potrubní sítí konkrétně jejími uzly, kde může být vodík načerpán do nádob a umístěn na nákladní automobil. Při transportu s využitím silniční sítě se

přepравuje stlačený nebo zkapalněný vodík. Převrava stlačeného vodíku je ztížena jeho nízkou hustotou i při vysokých tlacích. Je také technicky náročná, nejen kvůli úniku vodíku. Každá z přepравovaných lahví má ventily, pomocí kterých se regulují tlaky. K tomuto účelu se využívají vysokotlaké nádoby viz kapitola Skladování stlačeného vodíku. Aby se zachovala ekonomičnost dané převravy, přepравuje se povětšinou několik nádob naráz, nebo se používají cisterny [48].



Obr. 12 Ukázka převravy vodíku [48]

Další způsob převravy je pomocí zkapalněného vodíku. Zkapalněný vodík vyžaduje tepelně izolované nádrže pro snížení ztrát odpařováním. Jedinou výhodou je redukce v nákladech na silniční nebo námořní převravy vodíku kvůli vyšší hustotě, než je hustota stlačeného vodíku. Najednou lze převést až 3,2 tuny kapalného vodíku [48]. Tento způsob převravy je používán na delší trasy, protože je o něco málo efektivnější než v tlakových nádobách.



Obr. 13 Námořní převrava zkapalněného vodíku [47]

5 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ V OBLASTI VODÍKU

Materiály používané v oblastech skladování, ať už je to zkapalnění nebo stlačení vodíku, se od sebe významně liší, a to nejen samotným použitím, ale i jeho složením. Největšími rozdílovými aspekty, které mají vliv na materiálové vlastnosti, jsou u skladování zkapalněného vodíku velice nízká teplota, byť za atmosférického tlaku, naopak u stlačeného typu skladování se počítá s vysokými tlaky při běžných teplotách. Materiály musí být odolné vůči těmto blíže specifikovaným podmínkám viz kapitola Skladování a přeprava vodíku.

Mechanické vlastnosti všech materiálů jsou nepříznivě ovlivněny především díky kontaktu s vodíkem. Velikost zhoršení mechanických vlastností materiálu závisí na samotném materiálu, specifickém prostředí, například tlaku a teplotě vodíku, a na mechanickém zatížení. Proto musí být materiály vystavené vodíku pečlivě vybírány a konstrukce musí počítat s výsledným zhoršením mechanických vlastností. V ideálním případě se provádí testování neboli přímé vystavení materiálu vodíku, a analýza, aby se zajistilo, že materiál bude fungovat podle očekávání nejen za plánovaných provozních podmínek, ale i za působení horších podmínek a nečekaných vlivů.

5.1 POŠKOZENÍ MATERIÁLU VODÍKEM

Vodík se v přírodě vyskytuje nejčastěji jako molekula H_2 nebo jako část některé z chemických sloučenin nebo kovových hydridů. Pokud ovšem dojde k jeho rozštěpení, a to hlavně v přítomnosti železa, které funguje jako katalyzátor snižující energetickou bariéru reakce, dokáže poté samostatný atom vodíku velmi agresivně reagovat s některými kovy například s hořčíkem [11]. Pojem poškození vodíkem zahrnuje řadu korozních jevů, ve kterých hraje klíčovou roli právě vodík. Poškození vodíkem se většinou vyskytuje u tlakových nádob, kde jsou rozdílné tlaky na vnitřní a vnější straně [49]. Důsledkem toho je pak nechtěný jev zvaný jako difúze, kdy atomární vodík vniká do krystalických mřížek materiálu [49]. Hlavní formy poškození vodíkem se odlišují na základě jejich mechanismu vzniku, vzhledu a podmínek, za kterých k tomuto poškození dojde.

5.1.1 POŠKOZENÍ ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Poškození vodíkem za vysokých se vyskytuje u nízkolegovaných ocelí za působení vysokých teplot nad $220\text{ }^\circ\text{C}$ a pod vysokým tlakem [50]. Při tomto poškození dochází k reakci vodíku s uhlíkem za vzniku metanu.



Pokud se ovšem materiál vystaví těmto podmínkám jen na krátkou dobu, nic se nestane. K difuzi dochází u atomárního vodíku vzniklého při korozních procesech nebo disociaci molekulárního vodíku v proudu plynu na povrchu oceli [50]. Principiálně se na hranicích zrn nebo nedokonalostech tvoří atomární vodík, který reaguje s rozpuštěným uhlíkem nebo karbidy za vzniku metanu. K dekarbonizaci dochází v oblastech s pnutím, jako jsou například svary. K předejití tohoto nežádoucího jevu a sice dekarbonizaci materiálu, je vhodné využít oceli s chromem a molybdenem, jelikož tyto prvky zvyšují rezistenci materiálu vůči vodíku [50].

5.1.2 VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Vodíková křehkost, jak již z názvu vyplývá, ovlivňuje křehkost materiálu za působení vodíku [51]. Jedná se o degradační jev materiálu. Nejvíce jsou ohroženy slitiny titanu, hliníku nebo legovaných ocelí. Většina norem spojuje fakt vodíkové křehkosti s materiály, které mají $R_m > 1000 \text{ MPa}$. Základem vodíkové křehkosti je samovolné vniknutí atomárního vodíku do mezer v krystalické mřížce materiálu, a tím se sníží lomová houževnatost a plasticita [50]. Vodík se může dostat do materiálu například již při výrobě nebo při nanášení elektrolytického povlaku. Urychlit tento proces může i cyklické nebo tahové namáhání. V oblastech s vyšším napětím se pak i zvyšuje koncentrace vodíku, tudíž tyto místa namáhání jsou nejvíce náchylná k porušení. Porušení materiálu ovšem nevzniká ihned po vniknutí vodíku, nýbrž o několik dnů nebo i týdnů později. Prevencí před vodíkovou křehkostí může být povrchová úprava materiálu, u které nedochází během procesu k tvorbě vodíku [51].

5.1.3 VODÍKOVÉ PUCHÝŘE

Poškození materiálu známé jako vodíkové puchýře se vyskytuje zejména u nízko pevnostních ocelí [50]. Může se vyskytnout i u sloučenin hliníku. Probíhá i za normálních teplot. Difúze se může zastavit při nečistotách nebo vadách v krystalické mřížce materiálu, kde se atomární vodík přemění zpět na molekulární, což je právě typické pro vodíkové puchýře [50]. Molekuly tímto způsobí hromadění vodíku, tím se zvyšuje tlak a ocel se začíná deformovat do takových typických puchýřků, které naruší pevnost mřížky, zejména pak na povrchu materiálu. Může dojít i k jejímu selhání. Jedná se ovšem o pomalý proces, který lze bezpečně monitorovat. Tento typ poškození se vyskytuje povětšinou v ocelích vystavených elektrolýze nebo kyselých výparů. Prevencí může být například použití čistější oceli bez vměstků schopných k akumulaci vodíku [50].

5.1.4 VODÍKOVÉ PRASKÁNÍ ZA VYSOKÉHO NAPĚTÍ

Vodíkové praskání lze popsat jako křehké lámání slitiny při konstantním namáhání ve vodíkovém prostředí [50]. Jedná se o dominantní vodíkové poškození pro většinu aplikací. V této skutečnosti často dochází k lomu pod mezí pevnosti. Typické je pro vysokopevnostní oceli s pevností $R_m > 800 \text{ MPa}$. Namáhání iniciuje tento typ poškození, bez něj by k němu nedošlo. Mechanismus praskání závisí na velikosti namáhání, teplotě, které je materiál vystaven, nebo pevnostní struktuře vyplývající z chemicko-tepelného zpracování [50]. Narozdíl od korozního praskání lze vodíkové praskání poznat na základě ostře definovaných jednotlivých trhlin. Vyskytuje se u vysoce namáhaných součástí jako jsou šrouby nebo svary. Odolnost vůči tomuto jevu je hlavním faktorem při výběru materiálu, kterou lze zajistit vhodným metalurgickým stavem a sice omezením $R_m < 620 \text{ MPa}$ [50].

5.1.5 TVORBA HYDRIDŮ

U tvorby hydridů na rozdíl od ostatních poruch musí dojít k vnesení molekul vodíku do materiálu [50]. Vodík se na povrch materiálu může dostat několika způsoby například svářením. Jedná se o typickou formu degradace kovů, která probíhá i za normálních teplot a nízkém tlaku. Degradovanými prvky mohou být například hořčík, titan nebo nikl. Křehnutí se týká i jejich slitin [50]. Poškození je způsobeno tvorbou křehkého hydridu, který se vysráží z kovu a iniciuje praskání. Principem je difúze atomárního vodíku do mezer v krystalické mřížce materiálu, což vede ke snížení lomové houževnatosti a poklesu plasticity. To, co urychluje tvorbu vzniku hydridu, je napětí. Čím větší je, tím rychleji dojde k lomu. Dále vznik hydridů a rychlost jejich šíření podporují vysoké teploty nejčastěji kolem $70 \text{ }^\circ\text{C}$ nebo

přítomnost nečistot na povrchu. Prevencí před tímto způsobem degradace materiálu může být vytvoření vrstvy silného oxidového filmu [50].

5.2 MATERIÁLY U KRYOGENNÍ TECHNOLOGIE

Kryogenní technologie pracují s nízkými teplotami, proto zde žádná vodíková křehkost ani vodíkové puchýře nehrozí, nebo pokud se objeví, tak jen ve velmi malé míře. Materiály pro kryogenní aplikace se vybírají zejména podle houževnatosti při nízké teplotě. K ověření této lomové houževnatosti je využíváno Charpyho rázového testu měřícího množství absorbované energie během lomu [53]. Dalším důležitým faktorem, podle kterého se volí typ materiálu, je změna materiálu z tažného na křehký při snižování teploty a v neposlední řadě se bere ohled i na teplotní roztažnost materiálu nebo tepelnou vodivost. Proto se většinou volí austenitické nerezové oceli nebo slitiny hliníku [52]. Při vyšších kryogenních teplotách tedy teplotách pohybujiících se okolo -200 °C , mohou být využity i legované feritické oceli, výjimečně i slitiny titanu. Ty jsou ovšem celkově dražší [53]. V malém zastoupení jsou voleny polymery a kompozity, u kterých ale právě hrozí křehnutí při nízkých teplotách. Polymery se ale většinou volí jako materiál pro těsnící nebo izolační účely [54].

5.3 MATERIÁLY U TLAKOVÉ TECHNOLOGIE

Materiály, které jsou využívány u tlakových technologií, jsou vystaveny enormní tlakové zátěži, což je jeden z velkých aspektů pro výběr jednotlivých typů materiálu. Dalším neméně důležitým aspektem je vystavení kovů samotnému vodíku, které může vést ke křehnutí materiálu [52]. Křehnutí se může projevit výraznými ztrátami pevnosti v tahu, mechanické tažnosti a lomové houževnatosti. Dalším projevem je i fakt zrychleného růstu únavových trhlin a následnému selhání tlakových nádob [52]. Pro jednoznačné určení, který typ materiálu je vhodný na konkrétní aplikaci, bylo sestaveno několik norem, podle kterých se dá při výběru řídit, ať už to jsou zahraniční normy, nebo jejich české ekvivalenty.

Nejčastěji využívaným materiálem u vodíkových aplikací jsou různé formy oceli. Ocel je používána v podstatě v celé vodíkové infrastruktuře, od potrubí, přes tlakové nádoby až po samotnou plnicí stanici. Odolnost ocelí vůči vodíkovému křehnutí je do značné míry ovlivněna její mikrostrukturou, chemickým složením a tepelným zpracováním [52]. Obecně jsou preferovány jemnozrnné nerezové austenitické oceli. Z pohledu chemického složení se berou spíše nízkolegované oceli, to znamená oceli s nízkým obsahem uhlíku a vměstků [53]. Z hlediska tepelného zpracování je potřeba nakonec tuto mikrostrukturu materiálu zjemnit, v jistých případech i na homogenní strukturu, a odstranit tím velká zrna, která jsou právě náchylná na vodíkové křehnutí. Proto je dobré se vyhnout především martenzitické oceli, která právě obsahuje velká zrna a jedná se o jednu z nejpevnějších, ale zároveň nejkréhčích ocelí. Tepelné zpracování je dobré zakončit homogenizací materiálu a odstraněním vnitřního pnutí. Obdobně by měly být řešeny i svary [53]. Za předpokladu nízkého namáhání lze použít i litiny, které mají zpravidla nižší houževnatost.

Jako další materiály využívané v tlakové technologii jsou slitiny mědi a hliníku. Oba tyto kovy nejsou náchylné na vodíkové křehnutí, nicméně jejich použití u tlakových nádob je značně ovlivněno jejich mechanickými vlastnostmi a cenou, a to hlavně u mědi [53]. Tyto materiály ovšem nejsou vhodné pro vysokotlakové aplikace právě kvůli horším mechanickým

vlastnostem. Polymerní materiály a kompozity jsou taktéž hojně vyžívané jako materiály pro tlakové nádoby. Nejsou ovlivněny vodíkovým křehnutím a jsou i lehčí než oceli. Cena bývá jedním z několika limitujících faktorů při výrobě a použití [54]. Naopak mezi výhody se řadí pevnost, odolnost, a hlavně nízká hmotnost. Při vybírání materiálů k tlakovému použití je vhodné se vyhnout slitinám titanu a niklu [54].

6 VODÍKOVÉ PLNICÍ STANICE

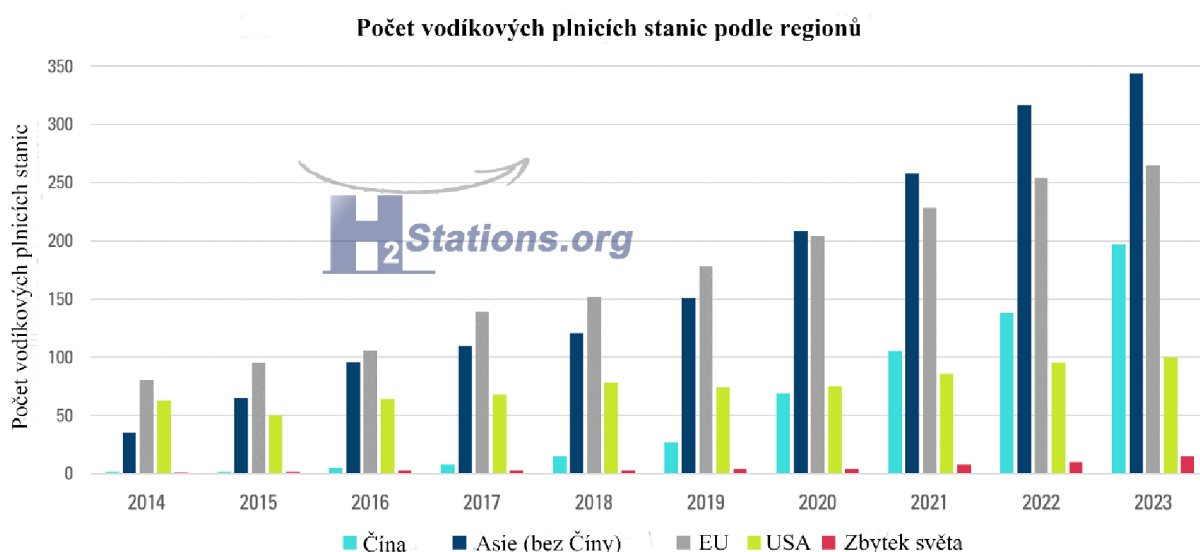
Vodíkové plnicí stanice jsou prakticky jednou z nejdůležitějších částí rozvoje a využití vodíku v automobilové dopravě. Slouží ke stejným účelům jako čerpací stanice fosilních paliv nebo dobíjecí stanice elektromobilů, a sice k dobíjení energie, aby mohl automobil pokračovat v jízdě. Potíž ovšem je v tom, že oproti například dobíjecím stanicím, které se dají postavit takřka na všech místech, kde se lze napojit na elektrickou síť, se tyto vodíkové plnicí stanice musí doplňovat externě, tudíž je nelze postavit úplně na náhodném místě. V současné době existují dva typy koncepcí vodíkových stanic rozdělených podle typu vodíku, které zpracovávají, na plnicí stanice se stlačeným vodíkem a na plnicí stanice se zkapalněným vodíkem. Příslibem do budoucna budou zcela jistě vodíkové plnicí stanice vyrábějící si svůj vlastní vodík přímo na místě pomocí vodíkového elektrolyzéro.

6.1 VODÍKOVÉ PLNICÍ STANICE V EVROPSKÉ UNII

V Evropské Unii v rámci projektu Hydrogen mobility, tedy projektem zabývající se infrastrukturou vodíkových alternativních paliv, je v provozu celkem 166 vodíkových plnicíček a dalších 42 je rozestavěných, které jsou nebo budou schopny dodávat vodík do osobních automobilů o tlaku 700 bar [55]. Vodíkových plnicích stanic, které jsou uzpůsobené dodávat vodík pro nákladní automobily nebo autobusy, je podstatně méně. V provozu jich do konce roku 2023 bylo celkově 70 a dalších 74 je rozestavěných [55]. Většina vodíkových plnicích stanic se nachází v Německu, které, co se týče vodíkové mobility, se nachází značně před ostatními členy Evropské unie. Vodíkové plnicí stanice jsou zatím v porovnání k těm klasickým s fosilními palivy menšího rozměru. Většinou se jedná o plnicí stanice s jednou maximálně dvěma koncovkami. Většina vodíkových plnicích stanic funguje na stlačený vodík, zkapalněný se vyskytuje jen zřídka. Co se týče lokace, plnicí stanice se nachází především v centrech velkých měst, jako jsou například Berlín, Paříž nebo Mnichov. V budoucnu jsou plánované i v některých důležitých dopravních uzlech. Zajímavostí je, že plnicíčky se nachází i na letištích například na letišti Schönefeld v Berlíně [55]. V tabulce níže jsou srovnány ceny, za které lze vodík na vybraných stanicích načerpat. Obrázek níže naopak ukazuje porovnání Evropské unie s dalšími oblastmi světa.

Tab. 5 Přehled vodíkových stanic v Evropě [55]

Místo vodíkové stanice	Provozovatel	Tlak čerpání [bar]	Cena [EUR/kg]
Berlín [GER]	TotalEnergies	700	15,25
Mnichov [GER]	H2 MOBILITY	700	15,25
Hannover [GER]	H2 MOBILITY	350/700	15,25
Paříž [FRA]	Air Liquide	350/700	neuvedeno
Vídeň [AUT]	H2 MOBILITY	700	23,99
Brusel [BEL]	Air Liquide	350/700	neuvedeno
Amsterdam [NDL]	Shell Hydrogen	700	25,00
St. Gallen [SUI]	Osterwalder St. Gallen AG	350/700	21,82



Obr. 14 Počet vodíkových plnicích stanic [56]

6.2 VODÍKOVÉ PLNICÍ STANICE V ČR

Česká republika se angažuje do projektu zabývající se infrastrukturou alternativních paliv. V současné době jsou v provozu 3 vodíkové plnicí stanice. Do konce roku 2025 by v České republice mělo být v provozu 12 vodíkových stanic, do roku 2030 pak dalších 28 [59]. V roce 2030 by však podle odhadů Ministerstva dopravy České republiky mohlo být na českých silnicích až 50 000 vozů na vodíkový pohon [59].

První neveřejnou plnicí stanicí se stala stanice v Neratovicích. Byla vybudovaná firmou Linde Gas, dokáže plnit motorová vozidla plyným vodíkem o tlaku 350 bar. Stanice se skládá z dvoustupňového vodíkového kompresoru, přičemž vodík je skladován v nadzemním zásobníku o objemu 50 m³. Celá stanice je umístěna v železobetonovém kontejneru [57].



Obr. 15 Vodíková plnicí stanice v Neratovicích [57]

V roce 2022 se v České republice otevřela první veřejná vodíková plnicí stanice. Nachází se v Ostravě-Vítkovicích. Stanice se kromě stavebních prvků a inženýrských sítí skládá ze tří základních částí: odolného zásobníku vodíku o objemu 7,26 m³, kompresoru a výdejního stojanu. Vysokotlaké nádoby pro plnicí stanici dodala firma Vítkovice Cylinders, další části dodávaly firmy APT, spol. s.r.o. a Vítkovice IT Solutions [58]. Stanice je koncipována jako menší, aby vyšla co nejrychleji vstříc potřebám zavádění vodíkových technologií do běžné praxe. Využívá tlakové technologie. Je možné si zde načerpat stlačený vodík na 700 bar [58].



Obr. 16 Vodíková plnicí stanice ve Vítkovicích [58]

Poslední již fungující veřejnou vodíkovou plnicí stanicí je stanice nacházející se v Praze na Barrandově. Byla otevřena v březnu 2023. Tato stanice je součástí společnosti Orlen. Jedná se o první plnicí stanici v ČR, která je schopná naplnit plnou nádrž několika vozidel v rychlém sledu za sebou a je schopná plnit jak větší vozidla, které standardně používají tlak 350 bar, tak osobní automobily s tlakem 700 bar [59]. Používá tlakové technologie. U této plnicí stanice je cena stanovena na 278 Kč/kg vodíku [59].



Obr. 17 Vodíková plnicí stanice na Barrandově [59]

6.3 VODÍKOVÉ PLNICÍ STANICE VYUŽÍVAJÍCÍ STLAČENÝ VODÍK

Vodíkové plnicí stanice na stlačený vodík se skládají z několika hlavních technologických uzlů. Jsou jimi vysokokapacitní nízkotlaký zásobník vodíku, kompresor, vysokotlaký zásobník, chladicí systém a výdejní stojan. Z pohledu zásobování vodíku lze u této stanice využít vodíkové potrubí, plynovody nebo mobilní velkokapacitní nádoby. Stlačený vodík se využívá u většiny vodíkových plnicích stanic. Lze jej použít i na místech s menší spotřebou vodíku.

6.3.1 VYSOKOKAPACITNÍ NÍZKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK

Zásobník plní funkci dodavatele vodíku do systému, přičemž se jedná o vysokokapacitní nízkotlakou nádobu. Běžně se vodík dodává při jmenovitém tlaku 200 barů, nicméně tlak zásobníku může klesnout až na hodnoty kolem 20 bar [60]. Konstrukčním typem nádoby je typ I viz kapitola Skladování stlačeného vodíku, který odolává těmto tlakům bez větších potíží. Pokud ovšem je zde napojeno kontinuální přijímání vodíku pomocí plynovodu nebo podobného typu transportu vodíku, nemusí se vůbec u vodíkových plnicích stanic vyskytovat [60].

6.3.2 KOMPRESOR

Kompresory jsou nedílnou součástí vodíkových plnicích stanic, jelikož je potřeba vodík vždy stlačit na vyšší tlaky, než jaké jsou tlaky ve vysokokapacitním nízkotlakém zásobníku. Obvykle stačí jeden vodíkový kompresor na jednu vodíkovou plnicí stanici. Vzhledem k rozdílu tlaků se používá vícestupňová komprese. Z hlediska konstrukce se nejčastěji využívají pístové kompresory, membránové nebo kompresory s ionickou kapalinou [61]. Důležitým faktorem kompresorů je i zachování čistoty vodíku, a proto se využívají kompresory bezolejové, jinými slovy, aby se do dodaného vodíku nedostaly nežádoucí plyny či jiná znečištění [61].

Pístové kompresory se podobají válcové jednotce u motoru automobilu. Mění se u nich rotační pohyb klikové hřídele na posuvný pohyb pístu, který stlačuje plynný vodík. Pístový kompresor má navíc dva ventily. Díky několika opakujícím se krokům dokáže vytvořit vysoké tlaky pohybující se až okolo 850 barů, což bohatě stačí pro další použití [61]. Následně, kvůli zvyšujícím se tlakům, se zvyšuje i průtok vodíku a tím pádem se snižuje i rychlost dobíjení vozidla. Nevýhoda u pístových kompresorů může být taková, že například těsnění brzy přestanou plnit svou funkci, proto se musí častěji servisovat [61].

Membránové kompresory fungují podobně jako pístové kompresory. Skládají se z klikové hřídele a pístu, který ovšem nestlačuje vzduch, nýbrž kapalinu. Kapalina poté vyvíjí tlak na membránu z jedné strany a stlačuje plyn, v našem případě vodík, na požadovaný tlak. Výhodou je jejich delší životnost, a hlavně méně potřebných součástí než u pístových kompresorů. Tyto kompresory se doporučují ke stlačení čistých plynů tedy i vodíku [61].

Funkce kompresorů s ionickou kapalinou je v podstatě stejná jako u membránových vícestupňových kompresorů. Liší se pouze tím, že na povrchu pístu, který přijde do přímého kontaktu s vodíkem je vrstva ionové kapaliny, která je téměř nestlačitelná a nijak nereaguje s vodíkem. Písty pak navíc nejsou zvedány mechanicky, ale hydraulicky [61]. Zkrátka je dosahováno potřebných tlaků při mnohem efektivnějším přístupu. Dosahují komprese díky kvazi-izotermickému ději [61]. U těchto kompresorů se nachází minimum pohybujících se

částí, tedy i minimum toho, co se musí servisovat, výhodou jsou i jejich menší rozměry oproti ostatním vodíkovým kompresorům [61].

6.3.3 VYSOKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK

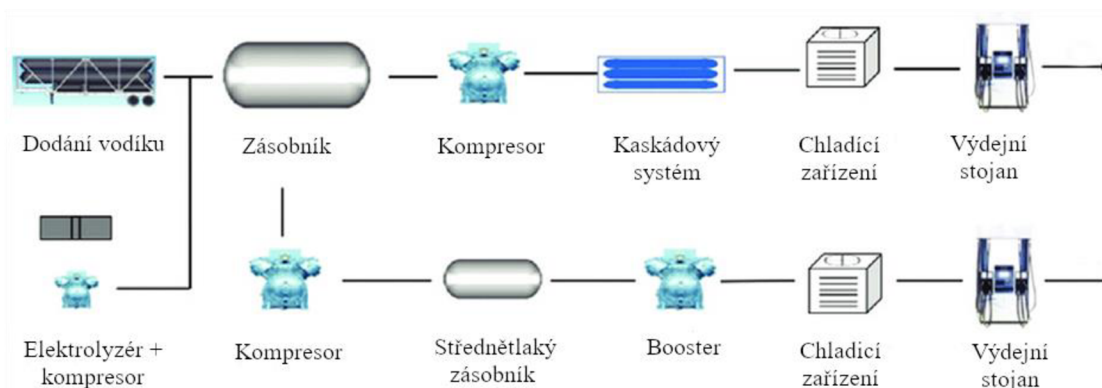
Vysokotlaký zásobník u vodíkových plnicích stanic slouží jako akumulátor již stlačeného vodíku. Podle koncepce vodíkové stanice se dělí na Buffer systém, využívající vysokotlakové nádoby o jednotném tlaku, nebo Cascade systém, který je častější u vytíženějších vodíkových plnicích stanic [62]. Při použití buffer systému musí tlak při plnění vozidla na 350 bar být alespoň 437,5 bar a při plnění vozidla na 700 bar až 875 bar, jinak hrozí neúplné naplnění nádrže vozidla [62]. V případě kaskádového systému záleží, na jaké tlaky je daná vodíková stanice koncipována. Jestliže se jedná o stanici s výstupním tlakem 700 bar, pak tlaky v kaskádovém systému mohou být rozloženy následovně na 350 bar, 560 bar a 900 bar. Naopak u stanic s výstupní tlakem 350 bar se jedná o nejčastěji o dvě tlakové lahve o 300 bar a 450 bar [62]. Každá nádoba obsahuje vodík o jiném tlaku a jiném jmenovitém objemu. Z konstrukčního pohledu se jedná o nádoby typu II až IV, které odolávají vysokým tlakům, viz kapitola Skladování stlačeného vodíku.

6.3.4 CHLADICÍ ZAŘÍZENÍ

Při plnění vozidla klesá tlak na hodnoty používané u automobilů z hodnot vysokotlakové nádoby. To znamená, že energie, která se tímto během doplnění vodíku ztratí, se přemění na teplo, proto je potřeba chladicího zařízení. Během doplňování vodíku dochází k dalšímu ohřevu vlivem opačného Joules-Thompsonova jevu. Chladicí zařízení má za úkol zchladit vodík na teplotu kolem minimálně kolem 85 °C [63]. Dle norem se před výdejním stojanem musí vodík ochladit až na hodnoty kolem -40°C. Z pohledu konstrukce jsou dva možné přístupy a sice použití velké chladicí jednotky, schopné dodat požadovaný chladicí výkon, ve spojení s kompaktním výměníkem tepla, nebo použití chladicí jednotky s nižším výkonem spolu s hliníkovým blokem sloužícím současně jako výměník a akumulátor tepla [64].

6.3.5 VÝDEJNÍ STOJAN

Výdejní stojan může využívat dva typy plnicích koncovek z hlediska tlaku, pro automobily s tlakem 700 bar H70 a pro nákladní automobily a autobusy s tlakem 350 bar H35. Koncovky jsou rozdílné nejen tvarem, ale zároveň i rychlostí plnění. Rychlost plnění se u automobilu pohybuje do 60 g/s, u nákladních automobilů a autobusů pak do 120 g/s [66].



Obr. 18 Jednotlivé komponenty vodíkové plnicí stanice na stlačený vodík [65]

6.4 VODÍKOVÉ STANICE VYUŽÍVAJÍCÍ ZKAPALNĚNÝ VODÍK

Dalším typem vodíkových plnicích stanic jsou stanice na zkapalněný vodík. Stanice využívající zkapalněný vodík jsou používány tam, kde je spotřeba vodíku mnohonásobně větší, protože skladování zkapalněného vodíku je zpravidla energeticky a ekonomicky náročnější a pro menší vodíkové plnicí stanice takřka nesmyslné. Stanice se skládá z několika hlavních komponent, jsou jimi kryogenní komora, zplyňovací zařízení, chladič a výdejní stojan, který využívá stejných koncepcí jako u plnicích stanic se stlačeným vodíkem.

6.4.1 KRYOGENNÍ NÁDOBA

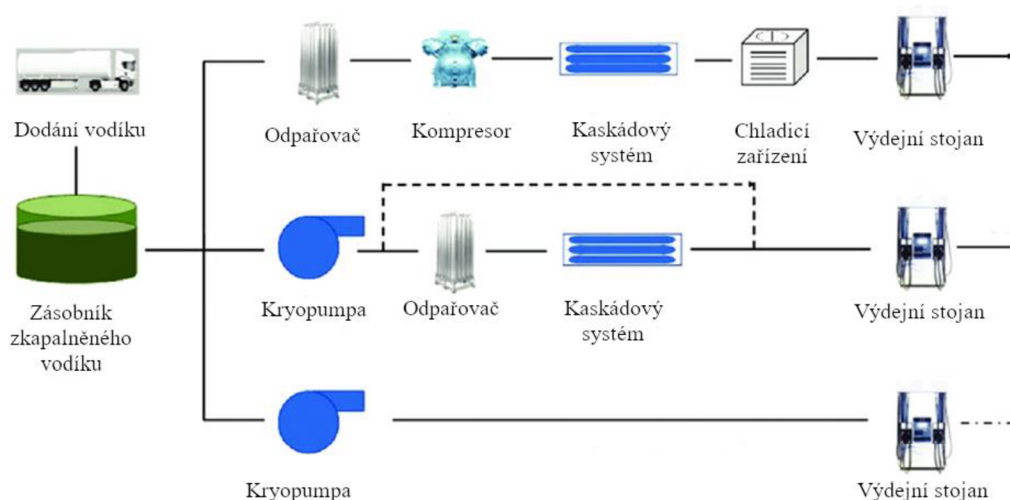
Kryogenní komora plní obdobně jako u typu vodíkové stanice se stlačeným vodíkem funkci zásobárny vodíku, ve které se vodík uchovává na teplotě blízké bodu varu. Jedná se o nádrž, jejíž konstrukce je popsána v kapitole Skladování zkapalněného vodíku. Materiály použité na zásobník musí odolávat nízkým teplotám. Kryogenní zásobárna vodíku obvykle bývá situována pod zemským povrchem kvůli stálejšímu klimatu [60].

6.4.2 ZPLYŇOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Zplyňovací zařízení, jak již název napovídá, má za úkol převést vodík z kapalného skupenství do plynného tak, aby se dal doplnit do nádrží v automobilech. U většiny takto postavených a situovaných stanic funguje tak, že nejprve se vodík dostatečně zahřeje, aby změnil skupenství a následně se stlačí na potřebné hodnoty až 900 bar [60]. Existuje i druhý způsob, který je navíc efektivnější. Tento způsob zplyňování spočívá v dosažení superkritického stavu tekutého vodíku kolem 900 bar, který se následně zahřeje. K tomuto účelu se používají kompresory se dvěma kryogenními komorami, aby se dosáhlo tohoto superkritického stavu [60].

6.4.3 CHLADIČ

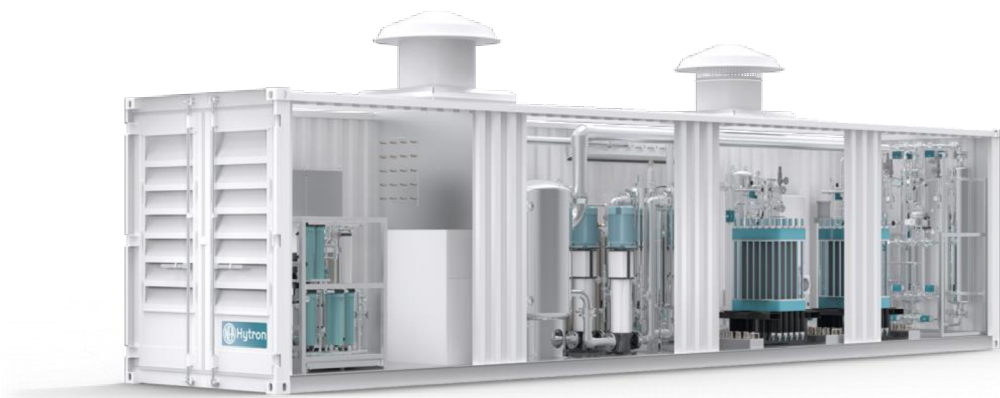
Vzhledem k tomu, že pracujeme s nízkými teplotami, tak chladič má v této koncepci funkci spíše ohřívače, kdy vodík stlačený zahřívá na výdejní teplotu kolem -40°C . Je zahříván elektrickým topným tělesem [60].



Obr.19 Jednotlivé komponenty vodíkové plnicí stanice na zkapalněný vodík [65]

6.5 VODÍKOVÉ STANICE VYUŽÍVAJÍCÍ SVŮJ VLASTNÍ VODÍKU

Vodíkové plnicí stanice využívající svůj vlastní vodík jsou budoucností celkové vodíkové infrastruktury. V dnešní době se ovšem vyskytují spíše výjimečně. U těchto stanic vymizí nejen problém s transportem vodíku, ale zvýší se i kvalita a bezpečnost. Jednou z nejdůležitějších částí těchto stanic je elektrolyzátor. Součástí celého kompaktního zařízení elektrolyzátoru je i zařízení na čištění vody a jednotka na čištění a sušení vodíku. Elektrolyzátor vyrábí vodík na procesu zvaném elektrolyza, který je naznačen v kapitole Výroba vodíku. Vyráběný vodík je vyroben povětšinou v nízkém tlaku 10–25 bar, proto je potřebná dodatečná komprese [67]. Ostatní komponenty stanice jsou stejné jako u těch, u kterých se musí vodík dodávat.



Obr. 20 Elektrolyzátor v upraveném lodním kontejneru [67]

6.6 BEZPEČNOSTNÍ PRVKY VODÍKOVÝCH PLNICÍCH STANIC

Vzhledem k nebezpečným doprovodným jevům, které se mohou vyskytnout u vodíkových plnicích stanic, se dbá i na to, aby byly vodíkové plnicí stanice pečlivě zabezpečeny. Proto jsou vybaveny různými detektory úniku vodíku, detektory plamene vodíku, měřidly tlaku například v jednotlivých částech potrubí nebo samotným odvětrávacím systémem, který má za úkol co rychleji dostat případný uniknutý vodík ven.

V elektrolyzátoru se monitorují především záležitosti spojené s únikem vodíku, jelikož se zde vodík vyrábí. Detekuje se zde například jak samotný únik vodíku, tak i případné zahoření. Zároveň se monitoruje celý proces z pohledu teploty a tlaku [69]. V případě návěsů nebo lahví se jedná především o izolační prvky, které mají zabránit úniku vodíku. Jsou jimi izolační ventily mající za úkol izolovat úložiště, zařízení TPRD, které má zabránit roztržení nádoby při přílišném natlakování, nebo těsnění, která jsou taktéž nedílnou součástí bezpečnostních prvků [69]. Potrubí je kontrolováno především na kontrolu tlaku, aby nedošlo k únikům. Dále se na potrubí provádí pravidelné kontroly, aby bylo zamezeno materiálu doplatit na vodíkovou křehkost a jiné nežádoucí účinky viz kapitola Poškození materiálu vodíkem. Katodická ochrana se pak provádí kvůli prevenci korozi [69].

U zkapalněného vodíku se využívá maličko odlišných bezpečnostních prvků. Co se týče skladování zkapalněného vodíku se u nádrží používají například dva bezpečnostní ventily, z nichž jeden musí být pneumatický. Dále musí nádrže obsahovat zařízení PRD, které omezuje riziko odpaření varem. Samozřejmostí je monitorování teploty, tlaku a hladiny vodíku v nádržích [69].

Mezi hlavní prvky monitorující vodíkovou plnicí stanicí na plynný vodík se pak řadí ty prvky, které monitorují únik případně zahoření vodíku. Součástí každé stanice na plynný vodík by měly být kvalifikované a validované hadice a armatury především kvůli prevenci zamezení úniku vodíku [69]. Další nedílnou součástí jsou detektory plamene vodíku pracující na UV nebo IR záření, pod kterým lze plamen vodíku vidět. Ventily by měly kontrolovat tok samotného vodíku, nebo detektory úniku vodíku, které v případě úniku vyšlou signál do centrální skříně ke spuštění odvětrávání, které se taktéž řadí mezi bezpečnostní prvky [69]. Vzhledem k faktu, že se jedná o výbušné prostředí, tak veškeré komponenty by měly projít certifikací do výbušného prostředí ATEX. Nesmí chybět centrální vypínač celé vodíkové plnicí stanice, který v případě nouze odstaví celou vodíkovou plnicí stanicí technologii [69].

6.6.1 NEBEZPEČNÉ ZÓNY

Vzhledem k tomu, že vodíkové hospodářství patří mezi objekty s potenciálním nebezpečím výbuchu především při úniku vodíku, jsou u něj stanoveny zóny. Tyto zóny se vyskytují i v prostředí chemického, petrochemického nebo farmaceutického průmyslu. Podléhají normě ČSN EN 1127-1 Výbušná prostředí [30]. Základní koncepce a metodika Zóny se dělí podle výskytu pravděpodobnosti výbuchu na tři typy na zónu 0, zónu 1 a zónu 2 [70]. Zóna 0 je nejnebezpečnější oblastí, protože se zde vyskytuje výbušná směs neustále. V zóně 1 se výbušná směs vyskytuje příležitostně, riziko výbuchu je menší. Tímto typem je zahrnuta oblast výdejního stojanu, kolem kterého je 0,2 m velký rádius, nebo nízkotlakého vysokokapacitního zásobníku. Poslední zónou je zóna 2, kde je výskyt výbušné směsi takřka nemožný. Pokud ovšem vznikne, tak jen na krátkou dobu [70] Vztaheno na vodíkovou stanicí, jedná se o uzavřený objekt kontejneru, ve kterém se vyskytují technologické prvky.

7 NÁVRH VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Praktická část této diplomové práce se zabývá návrhem vodíkového hospodářství pro Vysoké učení technické v Brně. Vzhledem k politice Evropské unie bude poptávka podle všeho v budoucích letech po alternativních pohonech narůstat, zároveň s ní se ale musí rozrůstat i výzkumné a vývojové kapacity. VUT v Brně se angažuje do různých oblastí výzkumných a vědeckých záležitostí, a proto ani vývoj v oblasti vodíku v dopravě, přesněji jako alternativní pohonná hmota nebo palivo do palivových článků, nebude výjimkou. K tomu je ovšem potřeba navrhnout a sestavit vodíkové zázemí tak, aby bylo nejen funkční, ale i spolehlivé.

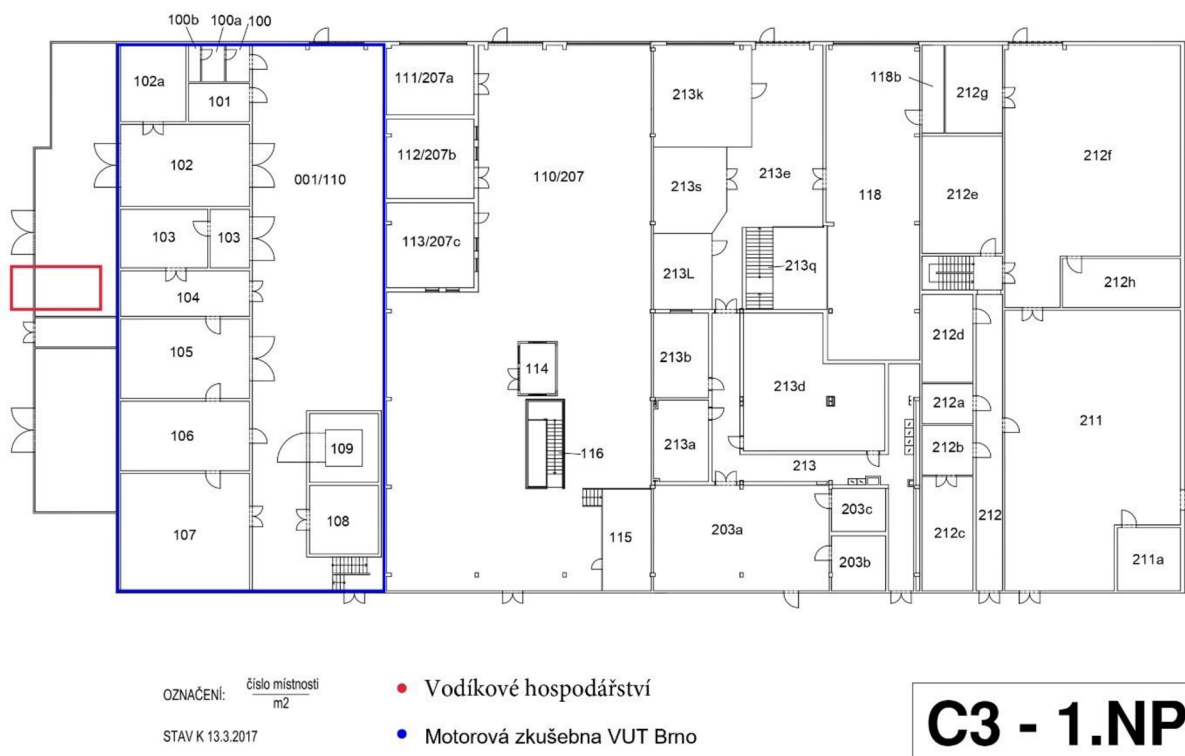
Ve spolupráci s Tatra Trucks a.s. bude v motorové zkušebně nainstalován experimentální jednoválec z osmiválcového vodíkového motoru Tatra reprezentující motory nákladních automobilů se spotřebou pohybující se mezi 1-2 kg vodíku na 100 km. Za předpokladu zintenzivňujícího se testování a implementování nových poznatků v oblasti vodíku se dá uvažovat, že testování na vodíkovém motoru v motorové zkušebně by mohlo být i na denní bázi. Vzhledem k tomu, že vodíkové hospodářství bude menší velikosti, jeho koncepce bude navržena pouze se stlačeným vodíkem.

Vodíkové hospodářství bude nainstalováno u motorové zkušebny Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Základem je návrh upraveného lodního ISO kontejneru, ve kterém budou nainstalovány jednotlivé komerčně dostupné prvky vodíkového hospodářství, které, v případě poruchy, lze snadněji nahradit. Celý koncept je navržen dle platných norem zabývajících se vodíkem a vodíkovými plnicími stanicemi viz kapitola Standardizace používání vodíku. Do budoucna se počítá i s výrobou vodíku vedle samotného vodíkového hospodářství pomocí elektrolyzéry.



Obr. 21 Umístění vodíkového hospodářství

Pro lepší orientaci, kde se bude vodíkové hospodářství u motorové zkušebny nacházet, je přiložen orientační plánec budovy C3 a jejího prvního nadzemního podlaží. Modrým obdélníkem je vyznačena celá motorová zkušebna. V plánu nalevo od ní jsou zaznačeny přístavky, a právě v jednom z nich se bude částečně, přesněji ze dvou třetin, nalézat i vodíkové hospodářství, které je vyznačeno v plánu červeným obdélníkem. Vodíkové hospodářství se bude tedy z jedné třetiny nacházet vně budovy C3, a proto se například veškeré ventilační prvky kontejneru musí soustředit do této oblasti.



Obr. 22 Umístění vodíkového hospodářství na plánu budovy C3

7.1 MOŽNOSTI DODÁNÍ VODÍKU NA VUT

Způsob dodávek vodíku značně ovlivňuje celou koncepci navrhovaného vodíkového hospodářství. Po zvážení všech pro a proti se počítá s koncepcí vodíkového hospodářství se stlačeným vodíkem. Stlačený vodík je možné dodávat několika způsoby například plynovody, speciálním potrubím určeným pouze pro vodík nebo formou zásobníků na stlačené plyny. Potrubí se jeví jako nejelegantnější způsob dodání vodíku, nicméně takhle se zásobují především větší vodíková hospodářství, navíc v České republice chybí i potřebná legislativa k tomuto typu dodávek. Dalším faktem by byla i vysoká cena výroby, montáže a provozu, tím pádem se toto řešení jeví jako značně neekonomické. Jedinou možností, jak efektivně a ekonomicky dodávat vodík na VUT, jsou mobilní tlakové nádoby viz Skladování a přeprava vodíku. V rámci dodání vodíku v mobilních tlakových nádobách se následně řeší hlavně otázky okolo tlaku, periodičnosti dodávek a množství dodaného plynu během jedné periody. Vše záleží na aktuální spotřebě vodíku. Dalším způsobem dodání stlačeného vodíku, který se bere v úvahu při dodávce mobilními tlakovými nádobami, je přepouštění vodíku. Existují dvě varianty, buď se vodík přepustí do vysokokapacitního nízkotlakého zásobníku, nebo se zde ponechají mobilní nádoby.

7.1.1 CENA VODÍKU

Na trhu se stlačenými plyny se objevuje mnoho firem a společností. Jedná se například o firmu LindeGas a.s., Air Products a.s. nebo Air Liquide a.s. Pro dodání vodíku na VUT v Brně je vybrána firma LindeGas s pobočkou v Brně, u které se provedlo srovnání jednotlivých vodíkových produktů, které firma nabízí. LindeGas disponuje třemi typy vodíků lišící se rozdílnou kvalitou. Jako alternativní palivo bezpečně postačí vodík o čistotě větší než 99,99 % [71], jelikož minimální procentuální hodnota čistoty vodíku pro alternativní paliva je stanovena na 99,97 % [31]. Firma nabízí i kvalitnější vodík s čistotou větší než 99,999 % [71], který svou cenou odpovídá zhruba čtyřnásobku variantě předchozí. Tyto dvě varianty jsou zaznamenány v tabulce níže.

Tab. 6 Srovnání cen vodíku v LindeGas [71]

Kvalita vodíku [%]	Objem [l]	Cena [Kč]
>99,99	10	5418
>99,99	600	47320
>99,999	10	10752
>99,999	600	201490

Společnost LindeGas nabízí i několik rozdílných objemů dodávaného vodíku. Vzhledem k pravidelnému užívání vodíkového hospodářství je jednoznačně nejvýhodnější varianta modulárních zásobníků o objemu 600 litrů, která je zároveň i největším nabízeným vodním objemem. Tyto zásobníky se prodávají v referenčním tlaku 200 bar. Minimální tlak, kterého lze u takových nádob dosáhnout, je 20 bar. V přepočtu na hmotnost vodíku, ve kterých se udává jeho spotřeba, se jedná o 9,36 kg vodíku, protože hustota vodíku při 200 bar a standardních podmínkách je 15,6 kg/m³ [72]. Výhodou takto velkých zásobníků je i fakt, že je lze použít namísto vysokokapacitního nízkotlakého zásobníku vodíku.



Obr. 23 Modulární zásobník vodíku

7.2 NÁVRH KONTEJNERU

K samotné realizaci vodíkového hospodářství bude použit upravený lodní ISO kontejner. Tato kapitola je věnována návrhu kontejneru, jeho rozměrům, zateplení a dalším nezbytným prvkům sloužícím ke správné funkci vodíkového hospodářství.

7.2.1 KOSTRA KONTEJNERU

Rozměry lodních kontejnerů definují dvě ISO normy, ISO 1496 a ISO 668. Tyto normy zavádí maximální a minimální rozměry jednotlivých typů kontejnerů [73]. Nejčastější velikosti kontejnerů podle normy ISO 1496 jsou uvedeny v tabulce níže.

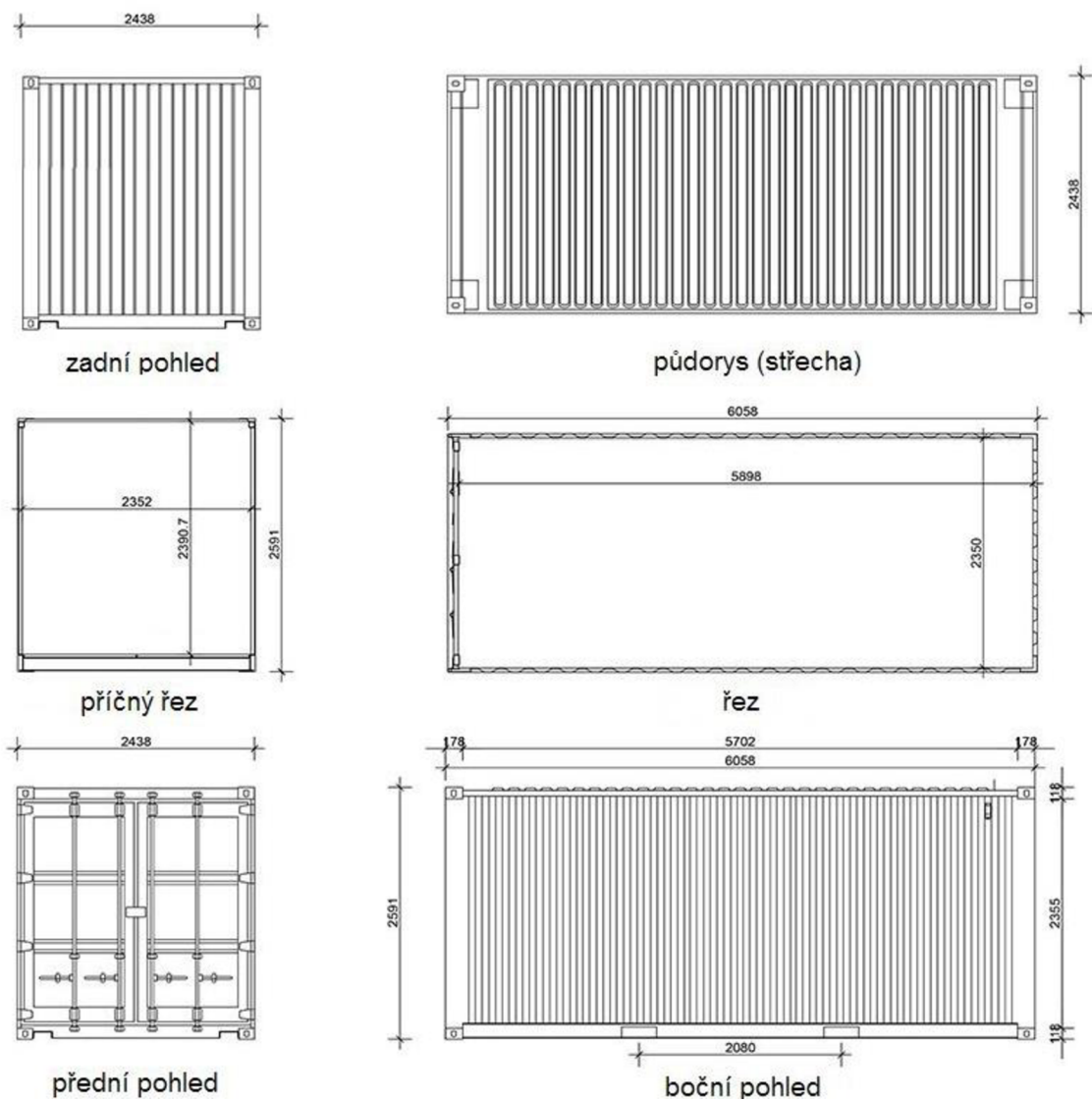
Tab. 7 Typické rozměry lodních kontejnerů [73]

Typ	Vnější rozměry [cm] (D×Š×V)	Vnitřní rozměry [cm] (D×Š×V)
20'	605×244×259	590×235×239
40'	1219×244×259	1204×235×239
45'	1372×244×259	1356×235×239



Obr. 24 Lodní kontejner [74]

Pro úpravu vodíkového hospodářství bude použit první typ kontejneru, a sice velikost odpovídající dvaceti palcům, v tabulce je uvedena v prvním řádku. Jedná se o nejčastěji používaný typ kontejneru na přestavby a alternativní využití, jako jsou mobilní buňky, domy nebo kanceláře. Kontejner bude instalován ideálně na tvrdém betonovém podloží, nebo na šesti patkách tak, aby se váha rozprostřela do více bodů [74]. Kvůli zateplení a udržení podobné teploty po celý rok v celém kontejneru bude použit jen jeho rám. Rám zprostředkuje firma Equiway. Firma nabízí kompletní dodávky a realizaci nejen samotných kontejnerů, kontejnerových rámců ale například i sendvičových panelů, které pro jednotnou koncepci budou použity rovněž od stejné firmy [77].

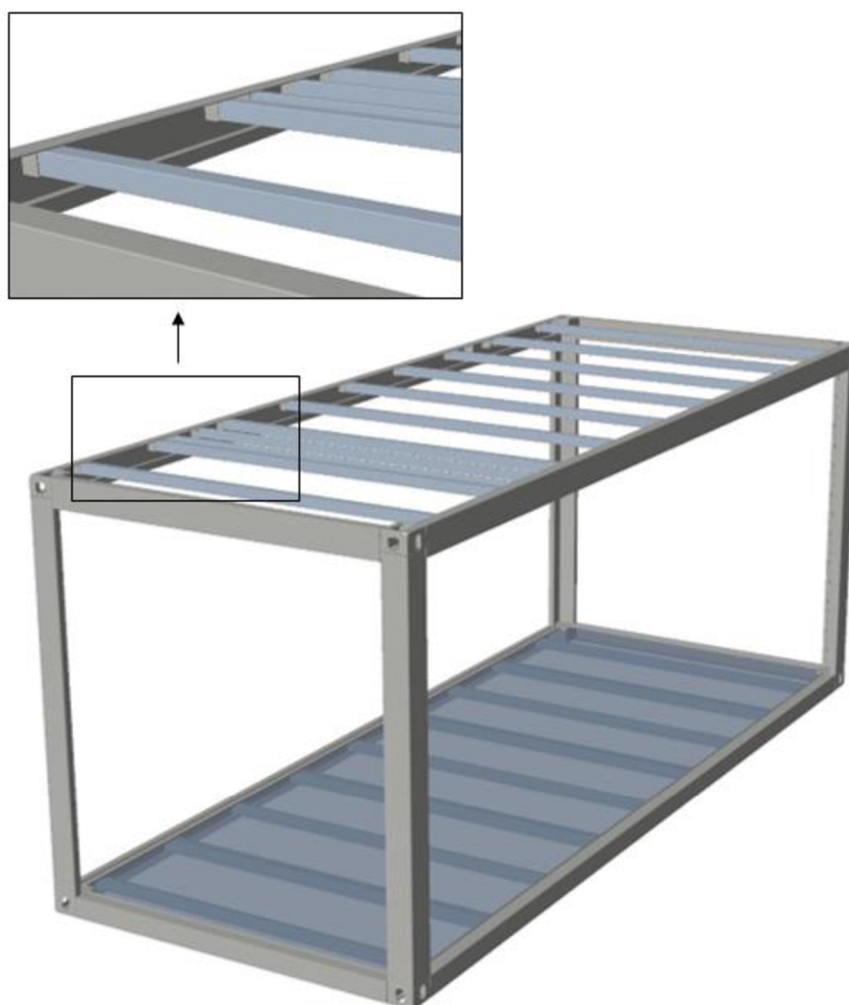


Obr. 25 Rozměry použitého lodního kontejneru [73]



Obr. 26 Rám lodního kontejneru [77]

Model rámu kontejneru je zjednodušen a napodoben tak, aby co nejvíce odpovídal skutečnému dodanému rámu, který dodá firma Equiway. Rám kontejneru je vyztužen podlahou z cementotřískové desky bránící proti vztlínání vody s tloušťkou 28 mm odpovídající certifikaci do výbušného prostředí ATEX [82], která je usazena na čtyřech čtvercových profilech o rozměrech 80×80×4 mm a třech obdélníkových profilech o rozměrech 80×60×4 mm. Horní věnec je vyztužen devíti čtvercovými profily 60×60×2 mm a dvěma obdélníkovými profily 60×30×2 mm. Všechny profily odpovídají normě DIN 2395. Detailně je znázorněno připevnění výztuh k samotnému rámu kontejneru, které jsou vsazeny při montáži celého rámu kontejneru do přivařených výstupků rámu na horním věnci. Všechny výztuhy jsou vyrobeny z nerezové oceli.



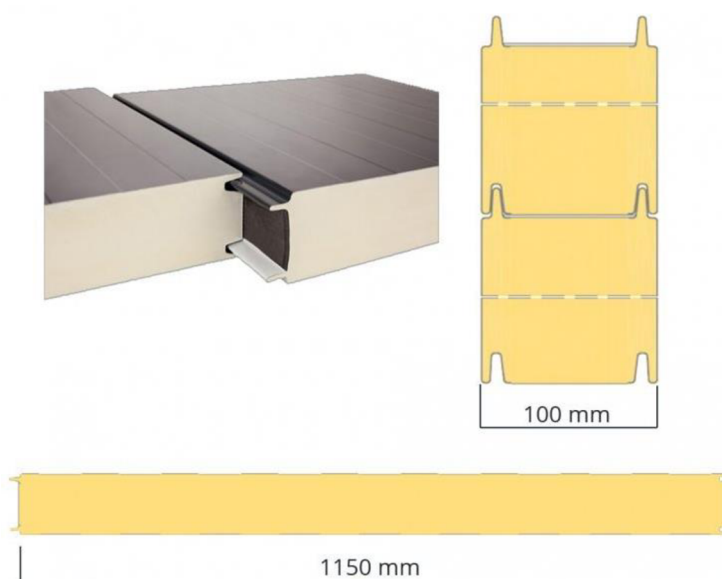
Obr. 27 Model rámu kontejneru + detail připevnění výztuh k rámu kontejneru

7.2.2 IZOLACE A ZATEPLENÍ

Izolace a zateplení kontejneru hrají velkou roli z pohledu funkčnosti samotného vodíkového hospodářství. Vzhledem k tomu, že kontejner se bude z části nacházet na otevřeném prostranství, kde na něj budou působit veškeré povětrnostní podmínky, byla před realizací návrhu stanovena optimální teplota pohybující se od 5 °C do 35 °C, aby byla zaručena efektivní funkčnost jednotlivých vodíkových komponent a technologií, přičemž nejideálnější stav jsou teploty v rozmezí od 16 °C do 25 °C [68].

K izolaci a zateplení kontejneru se počítá se sendvičovými panely, které se běžně používají na stavby velkoplošných skladů, firemních hal a podobně. Jejich výhodou je pak nejen samotné zateplení stavby ale zároveň i odhlučnění. Lákadlem v dnešním urychleném světě je i rychlost realizace staveb, která bývá bezkonkurenční.

Sendvičové panely budou dodány firmou Equiway, stejně jako samotný rám kontejneru, aby byla zaručena kompatibilita jednotlivých stavebních prvků [78]. Níže je znázorněn ilustrativní spoj panelů s tloušťkou 100 mm a modulární šířkou 1150 mm. U vodíkového hospodářství bude využito stejného typu panelu s odlišnou tloušťkou 50 mm, která postačí pro udržení teploty. Panely budou poskládány svisle nikoli vodorovně tak, jak to bývá běžné u větších takto postavených staveb.



Obr. 28 Typy sendvičových panelů – stěnový [78]

Vzhledem k požární bezpečnosti vodíkového hospodářství se bude jednat o protipožární sendvičové panely, které jsou vyrobeny z PIR pěny, opláštění panelů je řešeno pozinkovaným plechem tloušťky 0,5 mm s barevným polyesterovým nátěrem a ochrannou fólií na povrchu. Sendvičové panely splňují normu ČSN EN 14509:2015 a vykazují i platnou normu pro požární bezpečnost, a sice normu ČSN 73 0802 - Požární bezpečnost staveb, která zahrnuje i požární bezpečnost pro vodíkové hospodářství [78].

Kvůli případnému úniku vodíku a jeho následnému zažehnutí je nejvíce diskutována celková požární ochrana stavby. K té velkou mírou přispívá samozhášivá PIR pěna, ze které jsou sendvičové panely vyrobeny. Z chemického hlediska se PIR pěna označuje názvem polyisokyanurát [79]. Jedná se o chemickou sloučeninu s výbornými tepelnými vlastnostmi a důležitou samozhášivou schopností vznikající trimerizací isokyanátu, což jsou velmi reaktivní látky. Reagují společně až utvoří jeden isokyanurátový kruh. PIR se ve skutečnosti neaplikuje samostatně, nýbrž v kombinaci s tvárnou PUR izolační pěnou [79].

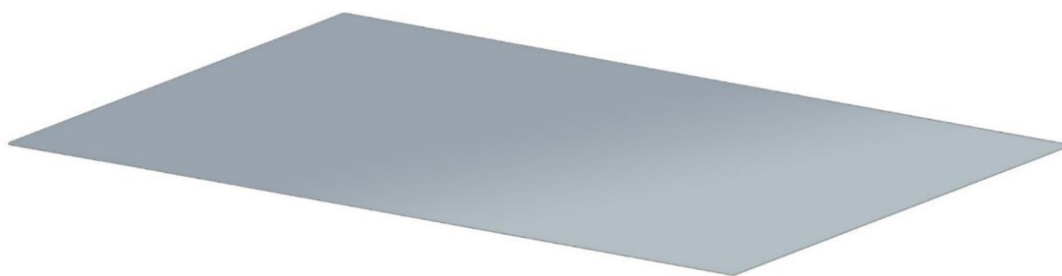
Stěnové panely jsou navrženy na všech čtyřech svislých stranách kontejneru i na stropě. Sendvičové panely budou dodány vcelku, stěnový s výměrou 2,7485 m² a stropní s výměrou

2,7025 m², následně se do nich vyříznou otvory pro vstupy a pro aktivní a pasivní ventilaci navrhnoutou podle bezpečnostní směrnice vydanou Českým plynárenským svazem TPG 304 03. Níže v tabulce vidíme počet použitých panelů na stěnu a jednotlivé výměry daných stěn.

Tab. 8 Sendvičové panely

Stěna	Výměra stěny [m ²]	Počet sendvičových panelů
Přední	5,6165	2
Pravá	14,101	6
Levá	14,101	6
Zadní	5,6165	2
Strop	13,865	6

Firma Equiway nabízí čtyři typy profilování sendvičových panelů. Jsou jimi lineární, vlnité, drážkované a hladké. Vzhledem k tomu, že u vodíkového hospodářství na VUT v Brně se budou sendvičové pláště montovat svisle, je vybrána varianta hladkého profilování.



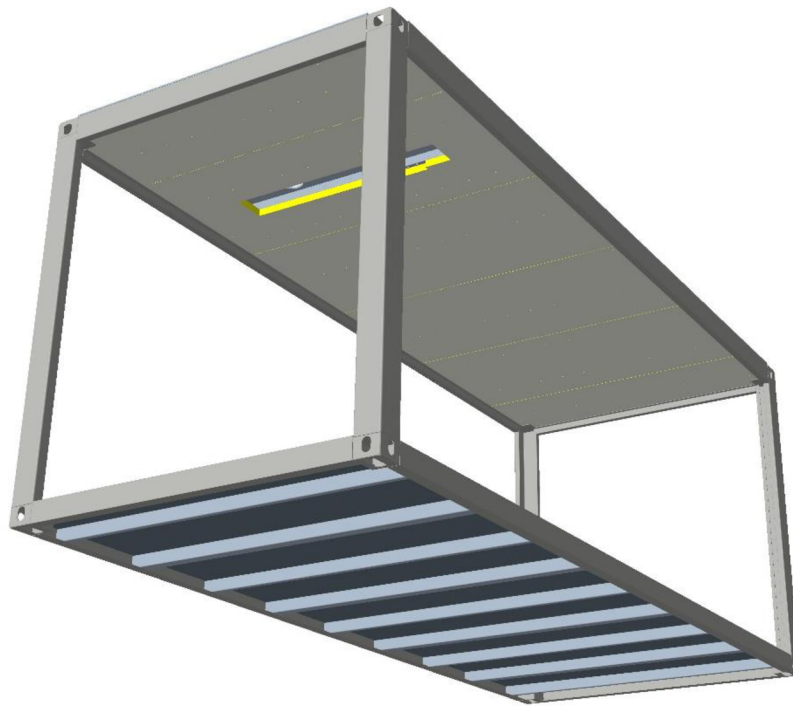
Obr. 29 Vybrané profilování sendvičových panelů [78]

Stěnové sendvičové panely budou připevněny k hornímu věnci rámu kontejneru, stejně tak jako stropní panely k výztuhám rámu kontejneru, pomocí speciálně navržených vrtů určených pro tyto účely. Jedná se o samořezný šroub do ocelové konstrukce a kotvení sendvičových panelů s podložkou EPDM. Všechny takto připevněné panely budou přichytnuty šrouby s délkou 80 mm [80].



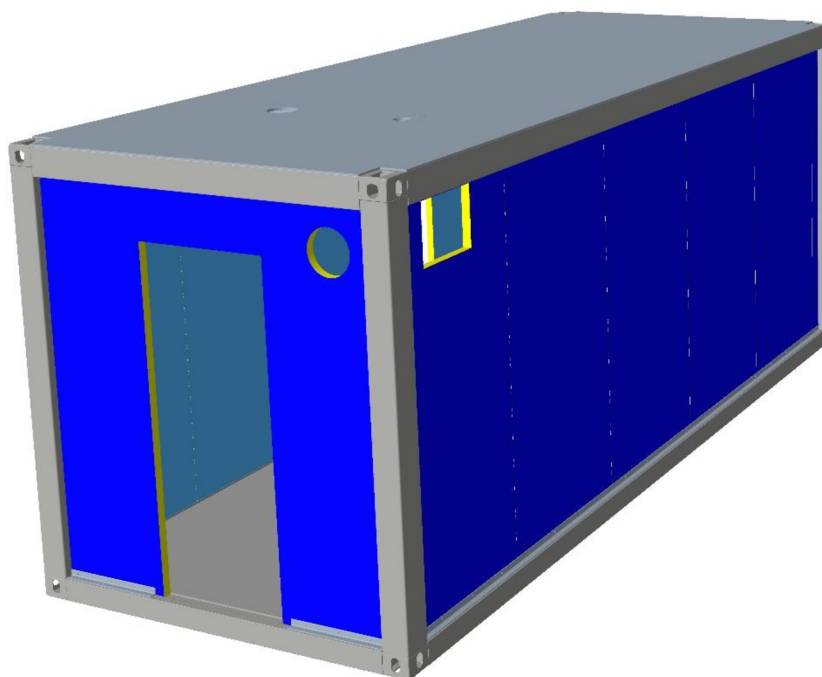
Obr. 30 Samořezný šroub [80]

Sendvičové panely se prodávají u firmy Equiway, jak již bylo zmíněno, v modulární šířce 1150 mm [78]. Proto se v návrhu počítalo s úpravou jejich šířky tak, aby vyhovovala rozměrům ISO kontejneru. Koncové panely byly zkráceny na potřebnou délku u všech stěn. Stropní sendvičové panely, které se připevňují ze všech nejdříve, jsou v modelu připevněny devíti samořeznými šrouby ke každé z horních výztuh kontejneru. Zároveň jsou položeny na střešní profily horního věnce rámu kontejneru. Strop je celkově montován předem a až poté se připevní ke kontejnerovým stojnám.



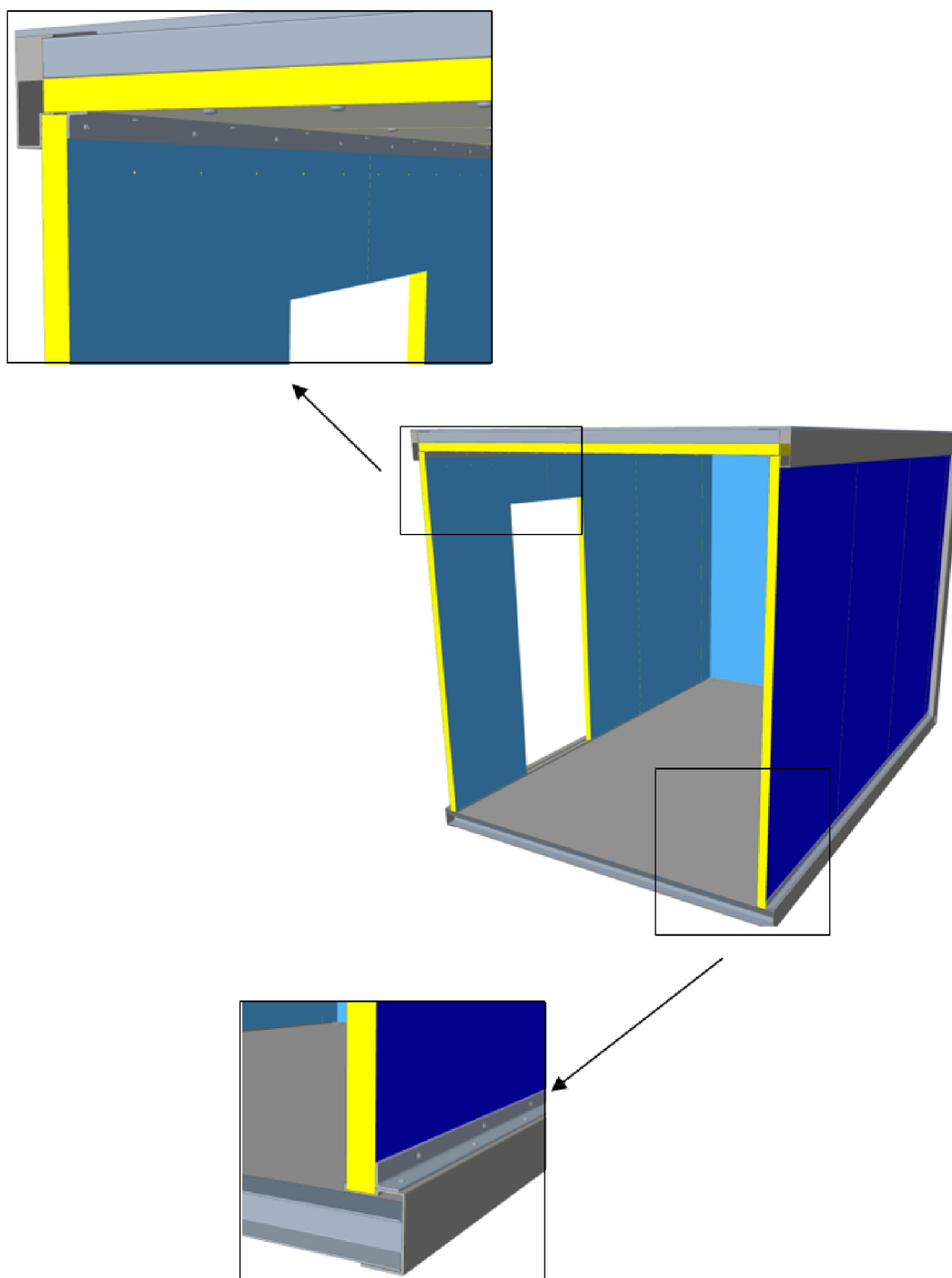
Obr. 31 Uspořádání a připevnění horních panelů

Sendvičové panely na kolmých stěnách jsou uspořádány obdobným způsobem jako u stropu, to znamená, že jsou zkráceny dle rozměrů ISO kontejneru. Jsou do nich zakomponovány otvory pro aktivní i pasivní ventilaci nebo otvory pro vstupy do kontejneru. Střešní pokrytí kontejneru je navrženo pouze ideově. Jedná se o 15 mm tlustý plech připevněný speciálním lepidlem ke střešním profilům kontejnerového rámu.



Obr. 32 Kontejner se sendvičovými panely

Zároveň jsou stěnové sendvičové panely vloženy do spodního profilu rámu kontejneru, který byl vytvarován právě pro sendvičové panely. Pro zajištění bezpečnosti jsou připevněny navíc z vnější strany pomocí L profilů 4×4×0,5 mm normy ČSN 42 6949 a vrtů ISO 7049. Vrutů mají mezi sebou mezeru 250 mm. Dále jsou opřeny o vrchní střešní profily horního věnce rámu kontejneru, ke kterým jsou následně připevněny společně s L profily 4×4×0,5 mm, které plní funkci zpevnění konstrukce, speciálními samořeznými šrouby pro sendvičové panely opět s mezerami mezi šrouby 250 mm.

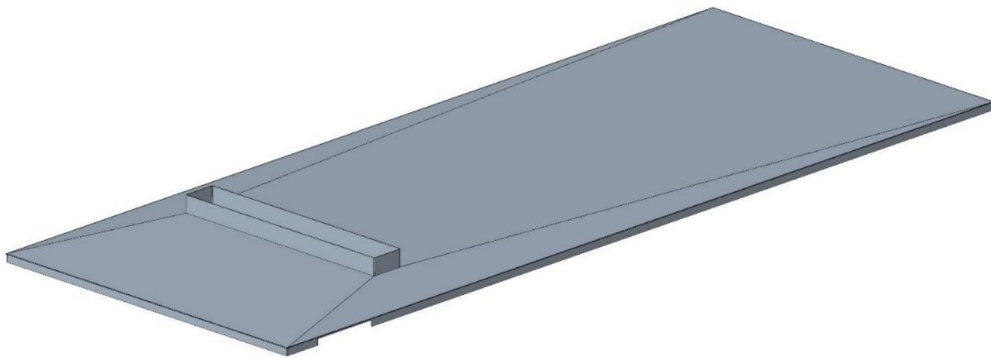


Obr. 33 Řez kontejnerem + detaily připevnění

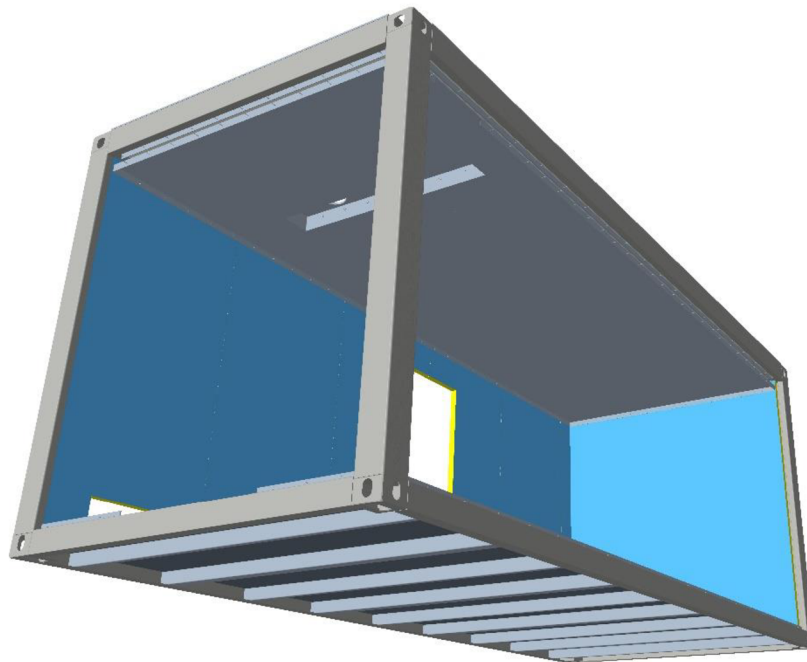
7.2.3 MAXIMALIZACE BEZPEČNOSTI KONTEJNERU

Vodík, jakožto prvek s nejmenší molární hmotností v periodické soustavě prvků, se při úniku snadno rozptýlí ve vzduchu. Pokud ovšem jeho koncentrace přesáhne požadovanou mez, pak může být velice nebezpečný hlavně v uzavřených prostorech, kde se jakožto velmi lehký plyn shromažďuje u stropu [1]. Proto se nejen u vodíkových hospodářství řeší jak nejjednodušeji a nejefektivněji odvést vodík mimo uzavřený prostor.

Jedním z možných řešení maximalizace bezpečnosti je navrhnout podběh střechy vodíkového hospodářství tak, aby se vodík shromažďoval pouze v jedné části vodíkového hospodářství, ze které je následně odvětrán do ovzduší. Podběh je navržen pod malým sklonem z tenkého nerezového plechu, především kvůli hmotnosti a snadnému tváření, připevněn vruty ISO 7049 s mezerami 200 mm mezi sebou k sendvičovým panelům a obdélníkovým profilům 60×30×2 mm vyztužujícím horní věnec rámu kontejneru. Vývod z tohoto podběhu pak vede k odfukovému komínu a střešnímu ventilátoru.



Obr. 34 Podběh střechy kontejneru



Obr. 35 Připevnění podběhu pod střešní sendvičové panely

7.2.4 VENTILACE KONTEJNERU

Mezi nejdůležitější bezpečnostní prvky každého vodíkového hospodářství se řadí pasivní a aktivní ventilace především vnitřních prostorů. Pasivní ventilace je proces přivádění a odvádění vzduchu z vnitřního prostoru bez využití mechanické energie. Týká se to proudění vnějšího vzduchu do vnitřního prostoru v důsledku tlakových rozdílů nebo vlivem větru. Opačným typem větrání uzavřených prostor je aktivní ventilace, což je proces, který je spojen právě s mechanickou činností jako jsou větráky, klimatizace a jiné.

Pasivní ventilace je v určitých případech a za vhodných podmínek postačující. K těmto případům se řadí některá vodíková hospodářství, která jsou především instalována venku a jsou opatřena dostatečně velkými ventilačními otvory těsně u podlahy a pak pod stropem zajišťující dostatečnou a zároveň rychlou výměnu vzduchu. Jejich minimální velikost je dána bezpečnostní směrnici TPG 304 03 [31]. Vzhledem k tomu, že vodíkové hospodářství bude z části v uzavřených prostorech, je nezbytnou nutností řešit i aktivní ventilaci vzduchu. Kontejner vodíkového zázemí musí splňovat požadavky na větrání taktéž podle normy ČSN 07 8304 [31].

Pasivní ventilace je řešena dvěma průduchy a jedním odfukovým komínem instalovaným u střechy kontejneru. Jeden z průduchů se nachází u podlahy na jedné ze stran vodíkového hospodářství, druhý na protější straně u střechy vodíkového hospodářství. Třetí otvor pro pasivní ventilaci je vývod komínu na stropě. Všechny průduchy budou situovány v části vodíkového zázemí nacházející se ve venkovním prostředí.

Větrací průduchy jsou u vodíkového hospodářství navrženy od firmy DALAP konkrétněji jejich typ WDPG, které jsou vyrobené z vysoce kvalitního extrudovaného hliníku s polymerovým nástřikem v šedé barvě [87]. Průduch u podlahy s velikostí 45×20 cm činí více než 0,5 % celkové půdorysné výměry vodíkového zázemí odpovídá bezpečnostním předpisům. Naopak průduch u stropu stejného typu musí odpovídat minimálně 1% půdorysné výměry, což zaručují rozměry větracího průduchu minimálně 45×35 cm [31]. Rozměry jsou dány větrací normou ČSN 07 8304.



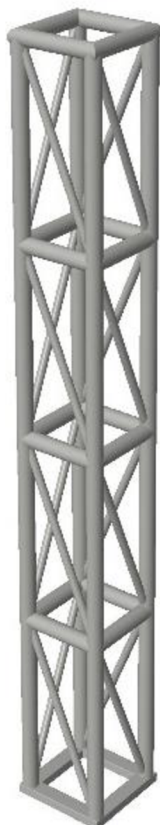
Obr. 36 Větrací průduch firmy DALAP [87]

Odfukový komín je součástí pasivní ventilace vodíkových hospodářství. Jeho vývod je instalován na střeše kontejneru, ke kterému je vyspádován podběh tak, aby se maximalizovala možnost vyvětrání vodíku z kontejneru. Aby splňoval určitá bezpečnostní kritéria směrnice TPG 304 03, musí být komín minimálně 3 metry vysoký pro splnění kritérií týkající se nebezpečné zóny 2 [31]. Komín je navržen z nerezové oceli 1.4404 z komínové trubky o průměru 100 mm od firmy MBTERM se svým výrobkem Prodmax 100/Roura 1000 mm s tloušťkou nerezové oceli 0,6 mm [83].



Obr. 37 Komínová roura s průměrem 100 mm [83]

Vzhledem k výšce komínu bylo nutné se zabývat i povětrnostní vlivy působící na komín. K účelům maximalizace bezpečnosti a odolnosti komínu proti povětrnostním vlivům je navržen ocelový rám se čtvercovým půdorysem z trubek odpovídající normě DIN 2391 vyrobené z nerezové oceli 1.4404. Horizontální a vertikální trubky s rozměry 50×2 mm tvoří základ celé konstrukce. Pro zvýšení pevnosti a zvětšení bezpečnosti je pak samotná nosná konstrukce vyztužena trubkami ze stejného materiálu s rozměry 25×2 mm. K rámu kontejneru je ještě před instalací podběhu střechy připevněna komínová konstrukce šesti pozinkovanými šrouby DIN 933 s matkami a podložkami téže normy.



Obr. 38 Rám komínu vodíkového hospodářství

K ukotvení samotné komínové roury ke konstrukci rámu komínu jsou navrženy celkem čtyři komínové objímky o průměru 100 mm od společnosti Komíny Bokra. S objímkami se v konceptu návrhu vodíkového hospodářství počítá na každé horizontální části rámu přimontovanými k jedné ze čtyř trubek pomocí šroubů, podložek a matek doporučených přímo výrobcem [84].



Obr. 39 Komínová kotvící objímka [84]

Aktivní ventilace vodíkového hospodářství je řešena dvěma ventilátory. První z nich je umístěný na střeše. Jedná se o hlavní ventilátor, který se jako první uvede do chodu v případě zvýšené koncentrace vodíku v kontejneru. Střešní ventilátor je navržen od firmy Systemair starající se o větrání uzavřených prostor. Tento střešní ventilátor je určený pro odvod vzduchu z výbušného prostředí, disponuje certifikací ATEX. Ventilátor je vhodný použít i do prostředí s koncentrací vodíku. Používá radiální oběžná kola vyrobená z hliníku nebo polyamidu, plášť taktéž z hliníku, základovou desku z oceli a sací dýzu z mědi. Ventilátor může být nainstalován v maximálním sklonu 15° od horizontální polohy. Je vybaven termistorem PTC [85].



Obr. 40 Střešní ventilátor [85]

V krajních případech, kdy z jakýchkoli důvodů střešní ventilátor přestane fungovat nebo koncentrace vodíku bude příliš vysoká, se v návrhu vodíkového hospodářství počítá s náhradním nástěnným ventilátorem do výbušného prostředí O.ERRE EB 35 4T EX ATEX o průměru 260 mm. Tento ventilátor je dodáván firmou Ventilatory.cz. Ventilátor je vhodný i do prostředí s vodíkem. Jedná se o axiální ventilátor s velkým průtokem sloužící k odsávání vzduchu. Jeho konstrukce je vyrobena z oceli. Vrtule jsou vyrobeny ze samozhášivého polymeru [86].



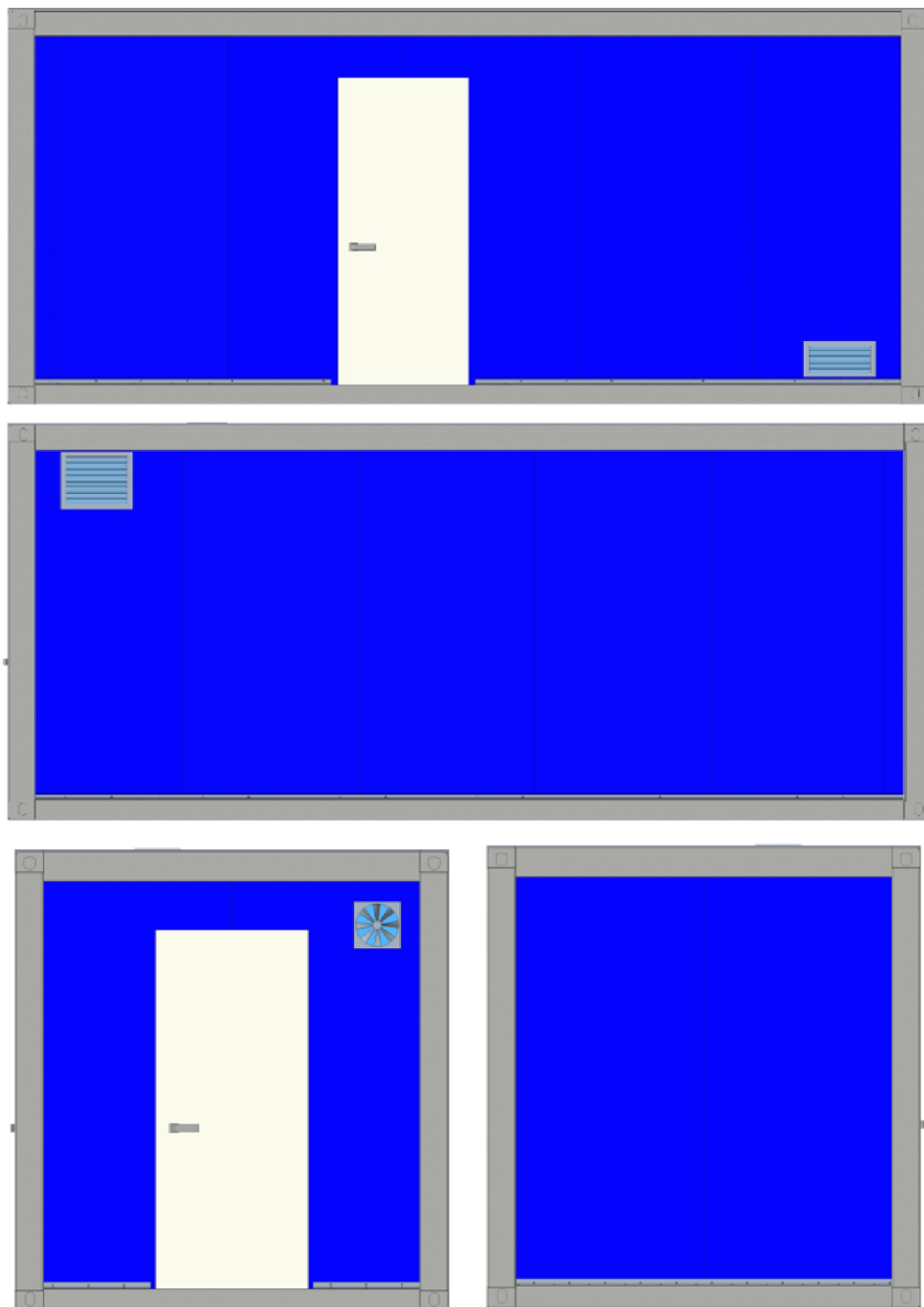
Obr. 41 Nástěnný ventilátor [86]

7.2.5 PŘÍSTUP DO KONTEJNERU

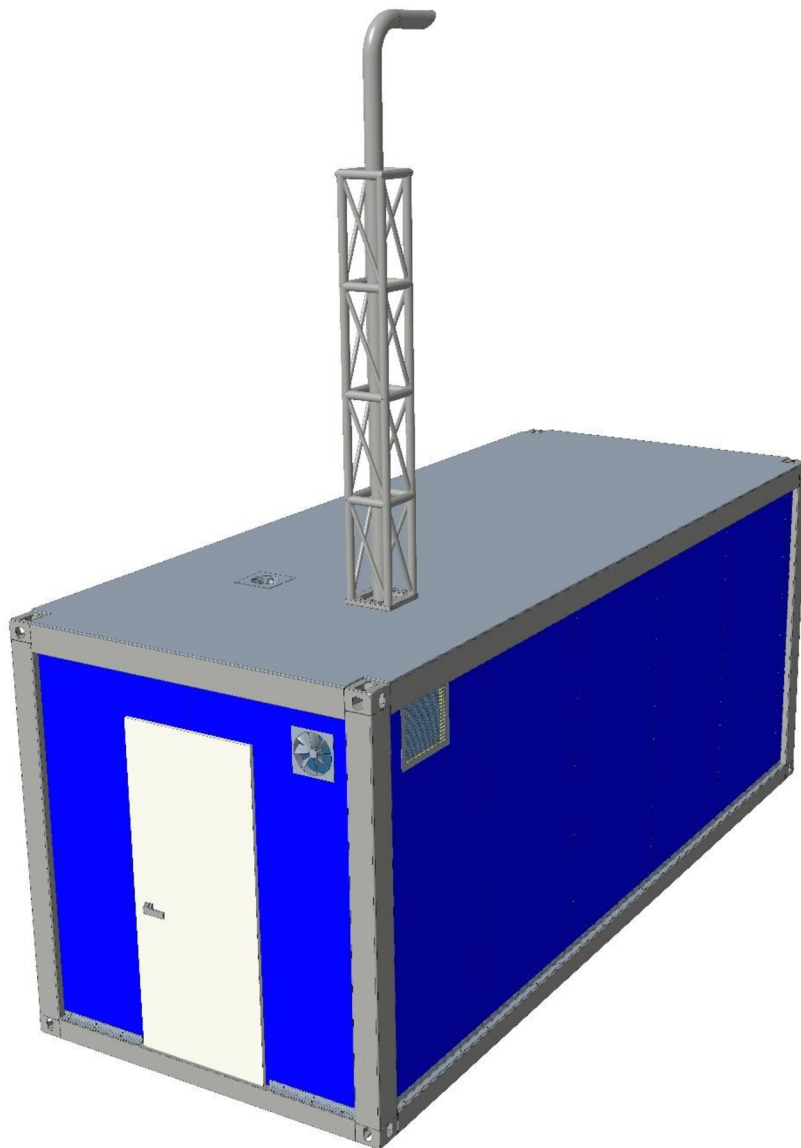
Přístup do vodíkového hospodářství bude zajištěn dvěma vstupy. Z bezpečnostního hlediska podle bezpečnostní směrnice TPG 304 03 a podle legislativy se bude jednat o klasické protipožární dveře, které se budou otvírat ven nikoli dovnitř pro případ snazšího úniku. Protipožární dveře se musí instalovat tam, kde je zvýšené riziko požáru nebo tam, kde jsou hořlavé či výbušné materiály. Obě tyto podmínky jsou pro vodíkové hospodářství splněny. S jedněmi dveřmi se počítá na krátké straně kontejneru, druhé potom na dlouhé straně tak, aby byl zajištěn přístup a únikový východ z obou stran.

7.2.6 VIZUALIZACE KONTEJNERU

Tato kapitola slouží pro samotnou vizualizaci kontejneru jakožto vodíkového zázemí. Níže jsou ukázány základní pohledy celkového návrhu kontejneru poskládaný v zobrazení následovně – levá strana – bokorys, pravá strana – pravý pohled, přední strana – nárys a zadní strana – zadní pohled. Dále je pak zobrazen kompletní návrh kontejneru včetně komínové konstrukce.



Obr. 42 Celková vnější vizualizace kontejneru bez komínové konstrukce

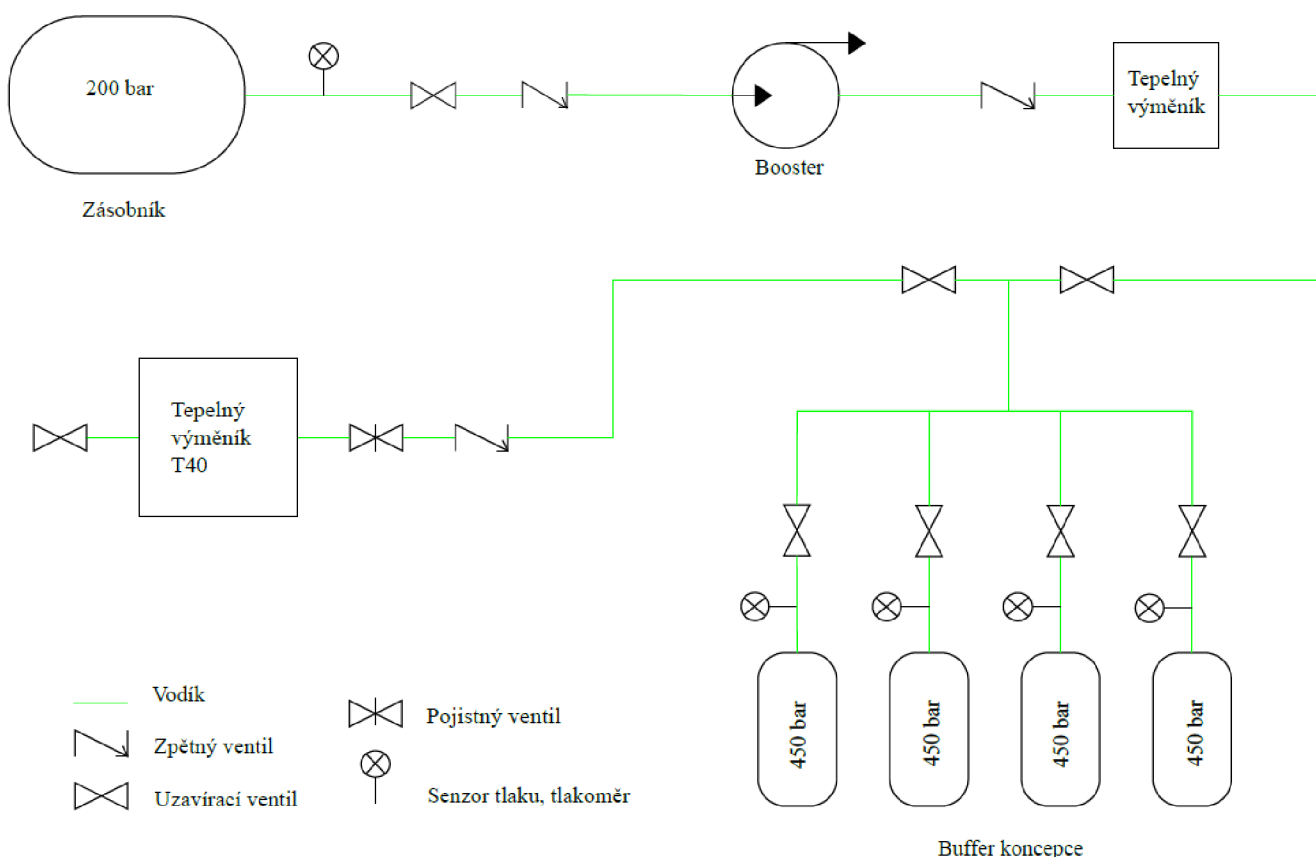


Obr. 43 Celkový návrh kontejneru vodíkového hospodářství

7.3 SCHÉMA TOKU VODÍKU VČETNĚ SENZORŮ

Schéma toku vodíku je nedílnou součástí každého vodíkového hospodářství, jelikož bez tohoto návrhu nelze žádné vodíkové hospodářství zprovoznit. Na VUT v Brně bude vodík proudit tak, jak je to znázorněno na obrázku níže. Nejprve bude vodík uskladněn ve vysokokapacitním nízkotlakém zásobníku o počáteční hodnotě tlaku 200 bar, který následně projde přes tlakoměr, uzavírací ventil a zpětný ventil. Vodík se přes tyto ventily dostane potrubím k boosteru, reprezentující v této konfiguraci vysokotlaký kompresor, který stlačí vodík na potřebné jmenovité hodnoty vysokotlakého zásobníku. Mezi boosterem a vysokotlakým zásobníkem se bude nacházet tepelný výměník, který zchladí vodík po kompresi na potřebné teploty. Vodíkové hospodářství na VUT bude disponovat tlakovým buffer konceptem vysokotlakého zásobníku více v kapitole Vysokotlaký zásobník. U každé tlakové nádoby s daným jmenovitým tlakem bude nainstalován uzavírací ventil a tlakoměr, který bude dávat informaci o stavu tlaku v dané nádobě. V místech rozpojení a spojení vodíkového potrubí bude použita armatura navržená pro toto vodíkové hospodářství. Mezi vysokotlakým zásobníkem a hlavním tepelným výměníkem bude instalován pojistný ventil, který plní úkoly hlídače tlaku. V případě vysokého tlaku se otevře a uvolní tlak do okolí. Po něm se vodík dostane do hlavního tepelného výměníku, který vodík zchladí na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpovídající normě SAE J2601. Jednotlivé technologické uzly budou řízeny hlavní řídicí jednotkou, která si bude regulovat nastavení ventilů, podle snímačů tlaku si bude zapínat a vypínat booster a podobně.

Schéma toku vodíku včetně senzorů



Obr. 44 Schéma toku vodíku včetně senzorů

7.4 TECHNOLOGIE VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Technologie vodíkového hospodářství je hlavní částí celkového konceptu vodíkového hospodářství. Některé technologické části, jako je například kompresor, jsou náchylné k povětrnostním podmínkám, proto musí být schovány do stabilního prostředí s minimální změnou klimatu během celého roku, a proto budou umístěny do upraveného lodního ISO kontejneru. Tato kapitola se zabývá návrhem technologie vodíkového hospodářství.

7.4.1 VYSOKOKAPACITNÍ NÍZKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK

Vysokokapacitní nízkotlaký zásobník vodíku, dále jen zásobník, patří mezi první technologické uzly vodíkového hospodářství. Návrh zásobníku spočívá především v určení jeho minimálního objemu na základě několika podmínek. Důležitým faktorem při návrhu jsou objemové možnosti dodavatele vodíku. To znamená, že se musí počítat s minimálním a maximálním objemem stlačeného vodíku, který je schopen dodavatel dodat. Významnou proměnnou je i tlakový rozsah vodíku v zásobníku, podle kterého je následně vybrán materiál.

Vzhledem k tomu, že se se zásobníkem kalkuluje mimo uzavřenou část vodíkového hospodářství, musí se počítat s povětrnostními vlivy okolí. Co se týče teplotních podmínek, kdy se teploty po většinu roku pohybují v rozmezí od -20 °C v zimě až do $+45\text{ °C}$ v létě, se při takto rozdílných teplotách musí myslet na změnu hustoty vodíku, kdy z pohledu stavové rovnice bude platit následující – čím vyšší teplota, tím nižší je hustota vodíku, protože se vodík bude rozpínat. Z důvodu poryvů větru je zásobník situován v zákrytu kontejneru, aby se minimalizovala případná škoda způsobená větrem.

Při návrhu zásobníku je potřeba myslet i na alespoň minimální rezervu zásob vodíku. V motorové zkušebně bude instalován experimentální jednoválcový motor se spotřebou $0,15 - 0,25\text{ kg}$ na 100 km . Pro návrh zásobníku byla vzata konzervativnější hodnota spotřeby a sice $0,25\text{ kg}$ na 100 km . V případě pravidelného testování je nutné mít v zásobníku minimálně týdenní rezervu vodíku, a to hlavně kvůli možnosti zpoždění nebo výpadku pravidelné dodávky vodíku ze strany dodavatele. V zásobníku je počítáno s jmenovitým tlakem 200 bar . Vodík lze čerpat až do chvíle, kdy tlak v zásobníku klesne na minimální vstupní tlak kompresoru v kompresorové jednotce. Z hlediska konstrukce tlakových nádob postačí typ I viz kapitola Skladování stlačeného vodíku.

Zásobník se skládá z tlakových nádob vyrobených firmou Vítkovice Cylinders, každá o vodním objemu 200 l . K vodíkovému hospodářství bude nastálo připojen pouze experimentální jednoválcový motor, tudíž není potřeba zásobníku s větším vodním objemem. Před samotným výběrem tlakových nádob je nutno si stanovit vstupní hodnoty. Těmi jsou samotná spotřeba, rezerva zásob vodíku a tlakové nádoby, které je schopen výrobce dodat. Hustota vodíku při stlačení na 200 bar je $15,6\text{ kg/m}^3$ [72]. S touto hodnotou se bude dále počítat. Zásoba vodíku byla naddimenzována na $2,5\text{ kg}$. Důležité vstupní údaje k výběru zásobníku jsou v souladu s normou ČSN ISO 19880-1 a normou ČSN 69 0012. Veličiny jsou popsány v tabulce níže [76].

Tab. 9 Vstupní technické údaje k tlakové nádobě [76] [88]

Vstupní veličina	Zvolená hodnota
Vodní objem jedné tlakové nádoby	200 l
Maximální pracovní tlak	200 bar
Minimální pracovní tlak	20 bar
Medium	Plynný vodík
Průměr tlakové nádoby	360 mm
Výška tlakové nádoby	2200 mm

Jednoduchým výpočtem s počátečním tlakem, který byl zvolen, se spočítá minimální počet tlakových nádob tvořící zásobník tak, aby odpovídal požadovanému množství vodíku pro rezervu. Výsledný počet tlakových nádob se následně zaokrouhlí na celé číslo.

Vstupní hodnoty

$$m_{\text{zásoby}} = 2,5 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{vodíku}} = 15,6 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{\text{nádoby}} = 200 \text{ l}$$

Výpočet

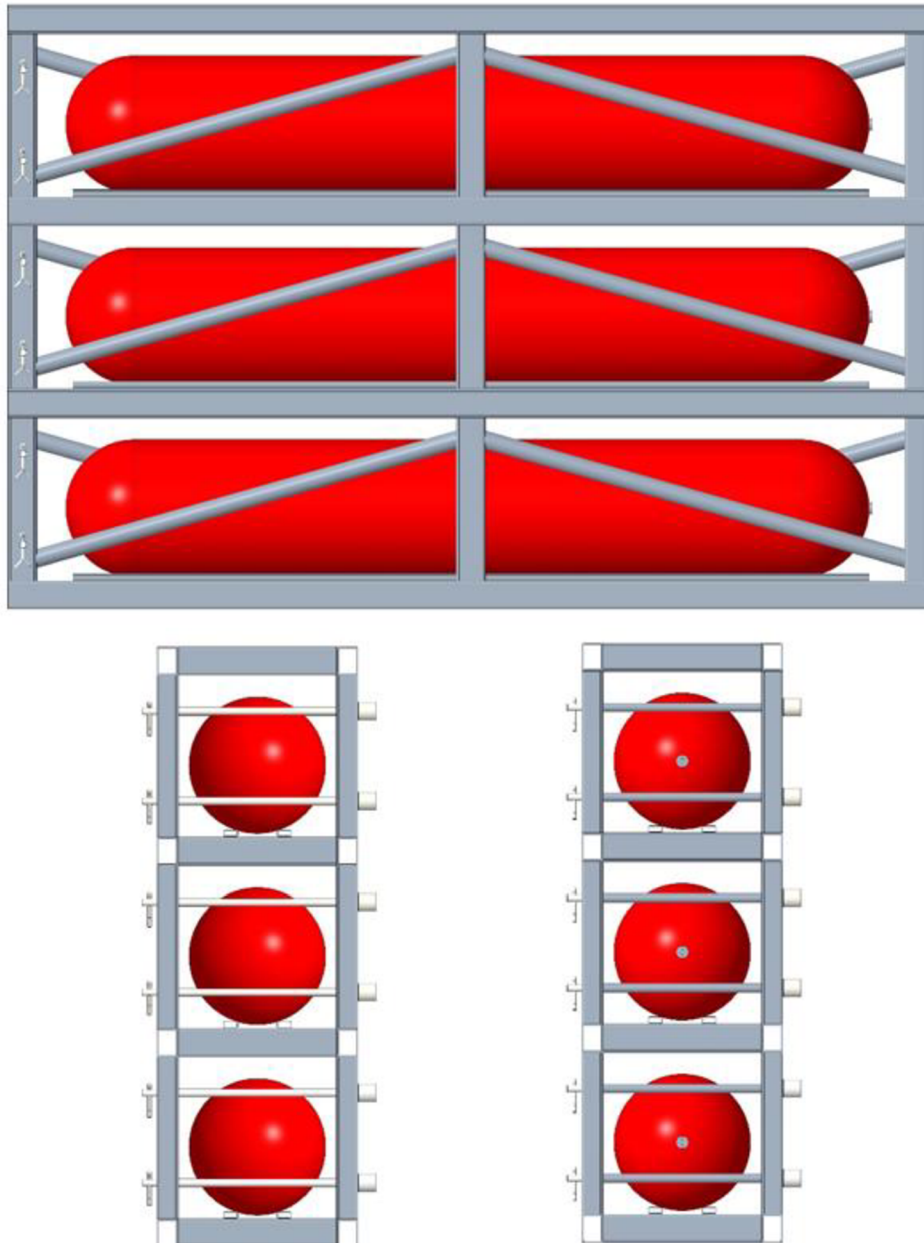
$$V_{\text{celk}} = \frac{m_{\text{zásoby}}}{\rho_{\text{vodíku}}} = \frac{2,5}{15,6} = 0,1602 \text{ m}^3 = 160,2 \text{ l} \quad (5)$$

$$n_{\text{nádob}} = \frac{V_{\text{celk}}}{V_{\text{nádoby}}} = \frac{160,2}{200} = 0,801 \quad (6)$$

Z výpočtu vyplývá, že pro splnění zadaných okrajových podmínek stačí pouze jedna tlaková nádoba na pokrytí veškerých požadavků. Z hlediska konstrukčního návrhu celého zásobníku by to nedávalo úplně smysl, tudíž v návrhu vodíkového hospodářství se počítá se 3 tlakovými nádobami, které budou naskládány nad sebou v ocelové konstrukci tak, aby nezabíraly moc místa.

Návrh konstrukce nízkotlakého zásobníku je složen z obdélníkových profilů a ocelových trubek podle normy DIN 2391. Nosná konstrukce je navržena z obdélníkových profilů 80×60×5 mm. Konstrukce je na své delší straně zpevněna ocelovými trubkami s rozměry 50×3 mm též normy. V zadní části jsou použity ocelové trubky s rozměrem 30×2 mm. Tlakové nádoby leží na dvou ocelových obdélníkových profilech 40×20×3 mm, které jsou potaženy gumovým povlakem tak, aby tlakové nádoby vydržely větší hmotnost, kterou nesou, a zároveň, aby se nepoškodil jejich ochranný plášť. Při poškození je možno tlakové nádoby vytáhnout ven z ocelové konstrukce, poněvadž z jedné strany se nachází trubky s rozměry

20×3 mm osazeny závlačkou normy ČSN 02 1781. Vzhledem k tomu, že se bude jednat o venkovní instalaci budou všechny části konstrukce pozinkovány, aby vydržely co nejlépe a co nejdéle náporu povětrnostních podmínek. Do budoucna je vhodné i řešení nosné konstrukce přístřešku se střešní krytinou, aby ochránil nízkotlaký zásobník před deštěm. Alternativou k těmto tlakovým nádobám jsou pak modulární zásobníky vodíku viz kapitola Možnosti dodání vodíku na VUT, které mohou spolehlivě nahradit navržený zásobník vodíku.



Obr. 45 Vysokokapacitní nízkotlaký zásobník

7.4.2 KOMPRESOR

Kompresorová sestava bývá jednou ze základních částí vodíkového hospodářství. Její hlavní funkcí je zajištění tlakové rozdílu mezi vysokotlakým zásobníkem a nízkotlakým vysokokapacitním zásobníkem vodíku. Podle časového a kompletního vytížení vodíkové stanice jsou zvoleny typy kompresorů, ovšem mezi ty nejčastěji se vyskytující patří pístové, membránové nebo s ionickou kapalinou viz kapitola Kompresor. Vodíkové hospodářství na VUT v Brně bude testovat motor nákladního automobilu, tudíž je potřeba stlačit vodík na minimálně 350 bar.

Při návrhu kompresoru jsou důležité vstupní veličiny, podle kterých se následně vybírá příslušný typ kompresoru. Mezi tyto veličiny patří minimální tlak na vstupu, maximální tlak na výstupu, kompresní poměr, hmotnostní tok a pracovní teplota. Vodíkovými kompresory se úspěšně zabývá firma Maximator, jejíž kompresor je vybrán i pro vodíkového hospodářství na VUT v Brně. V tabulce níže jsou vybrány některé typy kompresorů a boosterů této firmy s jejich základními vlastnostmi.

Tab. 10 Vybrané typy boosterů na vodík [89]

Model	Minimální tlak na vstupu [bar]	Maximální tlak na výstupu [bar]	Kompresní poměr [-]	Hmotnostní tok [l/min]	Max. Pracovní teplota [°C]
Gas booster DLE 30-2	20	600	1:60	285	100
Gas booster DLE 75-2	45	1500	1:150	155	100
Gas booster DLE 5-30	2	600	1:90	55	100

V návrhu vodíkového hospodářství se počítá s boosterem s výrobním označením DLE 30–2. Jedná se o vysokotlaký odstředivý booster se dvěma komorami, který je určen i pro vodíkové aplikace. Booster se nemusí promazávat olejem, což je vzhledem k nutnosti čistoty vodíku důležitým faktorem. Minimálním vstupním tlakem, který booster zvládne je 20 bar, a naopak dokáže stlačit plyny až na hodnoty 600 bar [89]. Disponuje vyšším kompresním poměrem, než je pro vodíkové hospodářství potřeba. Limitujícím faktorem je naopak nižší pracovní teplota. Je vyroben z nerezové a korozivzdorné oceli [89]. Pokud by v budoucnu se testoval motor do osobních automobilu, lze vybrat jako náhradu booster s výrobním označením DLE 75-2.



Obr. 46 Booster Maximator DLE 30-2 [89]

Firma Maximator nabízí i kompletní mobilní zázemí k zajištění správného fungování boosteru s výrobním názvem GM 1600 DLE 30-2, ve kterém je již zabudován vybraný booster. Stanice obsahuje veškeré vybavení, které je potřeba k funkci samotného boosteru jako jsou tlakoměry, pneumatické nebo elektromagnetické ventily na sání, který přeruší dodávku vodíku do kompresoru v případě nouze nebo havárie. Dále obsahuje i například vysokotlaké trubice. Stanice prošla certifikací ATEX [90]. V případě, že by se požadovaný tlak ve vodíkovém zázemí chtěl zvýšit, existuje i další varianta přenosné stanice ve stejné konfiguraci s boosterem DLE 75-2.



Obr. 47 Maximator GM 1600 DLE 30-2 [90]

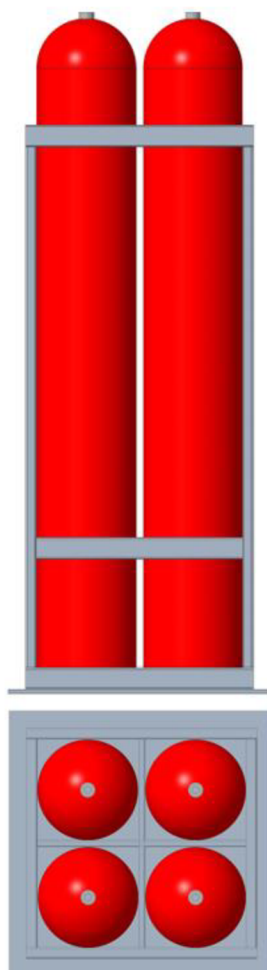
7.4.3 VYSOKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK

Vysokotlaký zásobník se běžně používá u vodíkových plnicích stanic především kvůli uskladnění stlačeného vodíku pro rychlejší naplnění jednoho nebo více mobilních zařízení současně a zároveň snižuje počet spuštění kompresoru. Vysokotlaký zásobník se skládá ze čtyř vysokotlakých nádob dodaných firmou Vítkovice Cylinders, které odolávají tlakům až 1000 bar [75]. Každá z nádob bude při plném naplnění dosahovat tlaku 450 bar. Jsou tedy použity tlakové nádoby konstrukčního typu IV pro případ, že by se na VUT v Brně v budoucnu testoval i vodíkový motor do automobilu. Jejich celkový vodní objem je navržen na 200 l. Každá nádoba musí být vybavena pojistnými TPRD ventily [31].



Obr. 48 Tlaková nádoba firmy Vítkovice Cylinders [75]

Vzhledem k tomu, že vysokotlaký zásobník se bude nacházet uvnitř ISO kontejneru, musí být celá konstrukce vyrobena z nehořlavého materiálu, tedy nejlépe z nerezové oceli 1.4404, aby se maximálně zvýšila bezpečnost v případě požáru. Konstrukce je čtvercového půdorysu a je přivařena k základovému plechu s tloušťkou 10 mm a rozměrech 600×600 mm. Na tento základ jsou přivařené obdélníkové profily s rozměry 50×25×3 mm podle normy DIN 2391. Stejný typy obdélníkových profilů jsou použity i na stojné části konstrukce, která je navíc vyztužena obdélníkovými profily se stejnými rozměry v horizontálních polohách tak, jak je ukázáno na obrázku níže. Aby jednotlivé tlakové nádoby na sebe nedoléhaly, jsou navrženy obdélníkové profily téže normy s rozměry 50×15×1,5 mm, které plní především oddělovací funkci.



Obr. 49 Vysokotlaký zásobník

7.4.4 CHLADÍCÍ SYSTÉM A TEPELNÝ VÝMĚNÍK

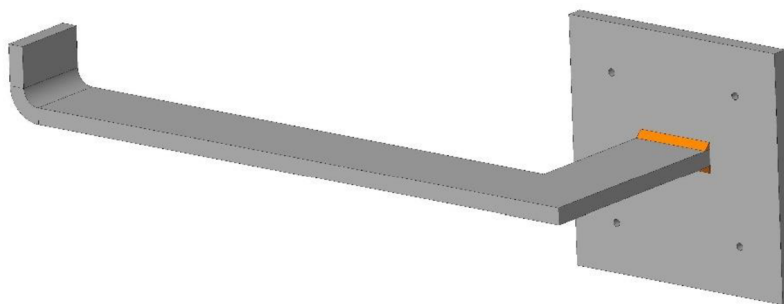
Chladicí systém vodíkového hospodářství se skládá ze dvou výměníků tepla. První výměník figuruje mezi kompresorem a vysokotlakými nádobami. Jelikož i vysokotlaké nádoby disponují určitým teplotním pracovním rozmezím, je nutné vodík po kompresi zchladit. Druhý a zároveň i hlavní výměník tepla, který bude ochlazovat stlačený vodík na oficiální teplotu -40 °C dle SAE J2601, je poté situován za vysokotlakým zásobníkem.

Tepelný výměník za kompresorem, jehož pracovní teplota by měla dosahovat maximálně teplot kolem 100 °C, ochlazuje kompresorem stlačený vodík na hodnoty pod 60 °C, což je hraniční teplota pro vysokotlaké nádoby, ze kterých je vysokotlaký zásobník složen. Tepelný výměník mezi kompresorem a vysokotlakými nádobami je vystaven vysokým tlakům, až okolo 500 bar, proto při jeho návrhu se musí dbát i na tento limitující faktor. Jakožto nejlepší varianta se jeví tepelný výměník od firmy Flovex, konkrétněji výměník s obchodním názvem Multi Spiral Pipe Heat Exchanger. Jedná se o tepelný výměník smotaný do kruhového tvaru odpovídající tepelnému výměníku se stejnými parametry výroby o délce 6 m. Předností tohoto výměníku je jeho odolnost vůči vysokým tlakům, odolává tlakům až 1000 bar [91]. Díky svému konstrukčnímu zatočení je vhodný pro aplikace v menších prostorech.



Obr. 50 Multi spiral tepelný výměník [91]

Tento tepelný výměník bude umístěn na držáku vyrobeném z nerezové oceli 1.4404, jelikož se nachází v konceptu návrhu nad samotným kompresorem. Držák pak je připevněn k sendvičovým panelům čtyřmi samořeznými šrouby podle normy ISO 7049.



Obr. 51 Držák na tepelný výměník

Druhým a zároveň větším tepelným výměníkem je chladicí systém ochlazující vodík při jeho koncovém plnění. Upravuje teplotu vodíku v procesu komprimace. Médium, které je použito v chladicím systému, musí být nehořlavé. Pro vodíkové hospodářství na VUT v Brně je vybrán chladicí systém firmy KUSTEC. Firma dodává chladicí systémy, které fungují na více než polovině vodíkových plnicích stanic po celém světě. Následující tabulka ukazuje vybrané chladicí systémy a jejich základní kritéria, které firma KUSTEC nabízí.

Tab. 11 Chladicí systémy KUSTEC [92]

Model	Chladicí výkon [kW]	Připojovací zátěž [kW]	Chladivo
H2PCU	15-24	24-36	R452A
Eagle 45	45	90	R744
Racoon	45	50	R449A+R744
BusH2Master 120	120	125	R744
Eagle 145	145	230	R744

Součástí vodíkového hospodářství na VUT v Brně bude chladicí systém s výrobním označením H2PCU. Model H2PCU používá chladicí jednotku s menším výkonem spolu s hliníkovým blokem sloužící jako výměník viz kapitola Chladicí zařízení. Médium, které je použito v chladicím systému, je chladivo R452A splňující podmínky nehořlavosti. Kritickou teplotou je teplota 74,9 °C. Systém je navržen pro menší typy vodíkových stanic [92].



Obr. 52 Chladicí systém KUSTEC H2PCU [92]

7.4.5 POTRUBÍ, REDUKCE A DALŠÍ PŘÍSLUŠENSTVÍ

Další nezbytné komponenty pro funkci vodíkového hospodářství, jako je samotné potrubí, armatura a další příslušenství, jsou navrženy od firmy Maximator. Tato firma nabízí nespočet možností velikostí potrubí – viz tabulka níže, rozmanité koncepce armatur a dalších komponent pro vodíkové aplikace.

Tab. 12 Velikosti vysokotlakých trubek [93]

Číslo	Vnější průměr [mm]	Vnitřní průměr [mm]	Max tlaky při 200 °C [bar]
1	6,35	2,77	1200
2	9,53	5,17	1200
3	14,29	9,12	870
4	19,05	13,11	870
5	25,4	17,48	870

Jednotlivé technologické uzly ve vodíkovém hospodářství musí být spojeny vysokotlakým potrubím odolávající tlakům až 1200 bar. Jedná se tlustostěnné trubky tažené za studena. Trubky jsou vyráběny pod přísnými výrobními zásadami a standardy podle normy ISO 13480 tak, aby mohly být použity právě v aplikacích jako jsou vodíkové plnicí stanice. Standardním materiálem je nerezová ocel 1.4404 [93]. K vysokotlakým trubkám nabízí firma Maximator i řadu kuželových a závitových hrdel v různých délkách do tlaku 1500 bar pro všechny standardní velikosti trubek, taktéž vyrobeny z nerezové oceli 1.4404 fungující jako spojovací prvky [93]. Vodíkové potrubí musí být vedeno vhodnou trasou tak, aby bylo minimalizováno riziko poškození dalších komponent. Kotvení potrubí bude provedeno na základě standardů a požadavků v souladu s normou ČSN EN 13480-4 [76]. Vzdálenost podpěr potrubí pak podle normy ČSN EN 13480-3 [76].



Obr. 53 Kuželové a závitová hrdla trubek [93]

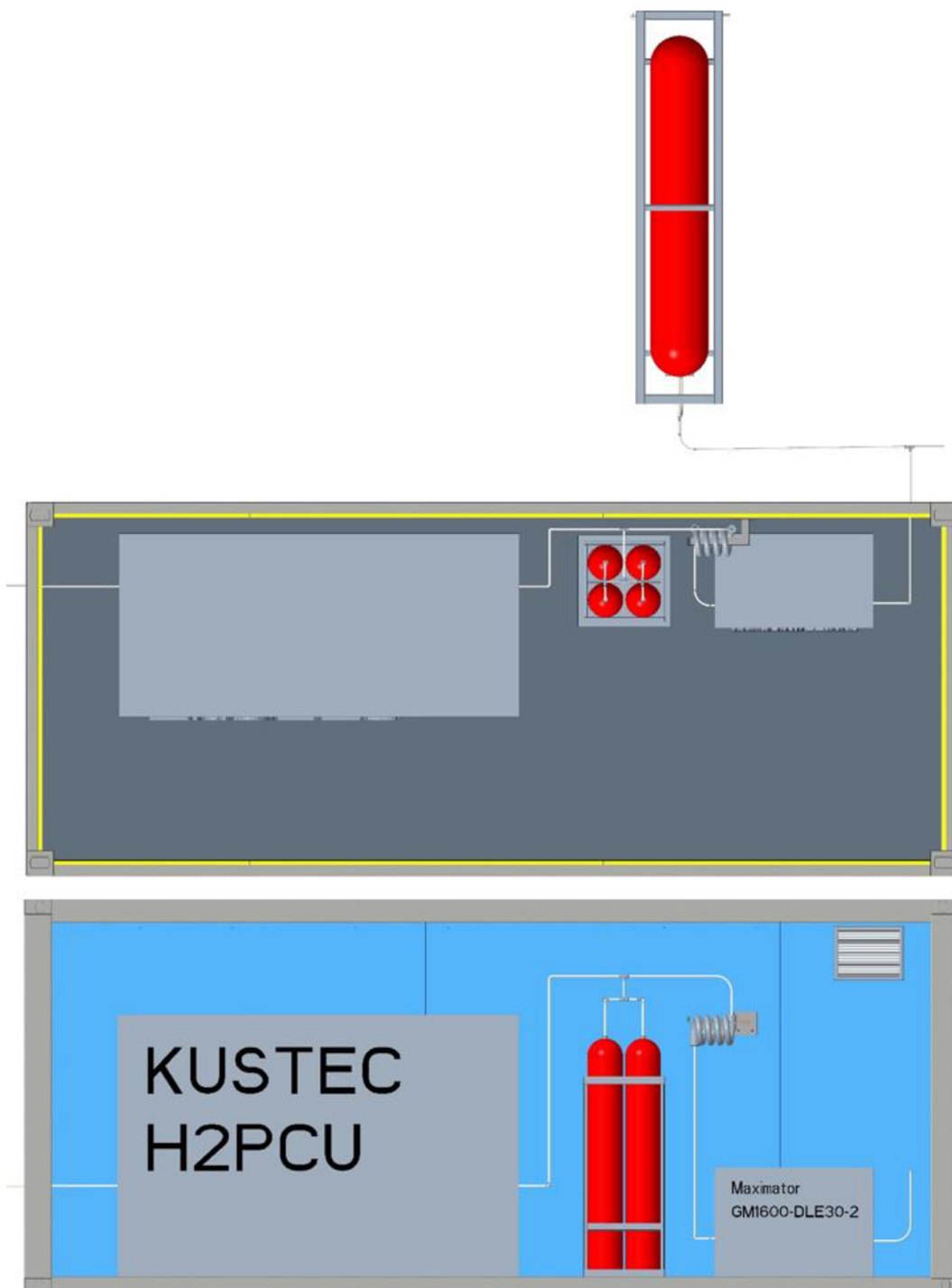
Ke kompletní propojovací skladbě vodíkové plnicí stanice patří bez pochyby i armatury technologického souboru. U vodíkového hospodářství na VUT budou potřeba především křížové spoje nebo T spoje. Dále jsou v nabídce i redukce pro případ změny průtoku nebo takzvaná kolena. Všechny tyto součásti jsou vyrobeny z nerezové oceli 1.4404 [93].



Obr. 54 Vodíkové komponenty Maximator [93]

7.4.6 VIZUALIZACE ROZMÍSTĚNÍ KOMPONENT V KONTEJNERU

Tato kapitola slouží k lepší představě o tom, jak budou jednotlivé komponenty v kontejneru uspořádány. Je zde i zobrazeno, jak velké jsou a kolik místa v kontejneru zaberou. V kontejneru se ještě počítá s umístěním samotné rozvodové skříně, která na tomto obrázku není zobrazena. Vrchní obrázek ukazuje půdorys kontejneru i s polohou nízkotlakého zásobníku spodní půdorys kontejneru, spodní pak bokorys komponent umístěných uvnitř.



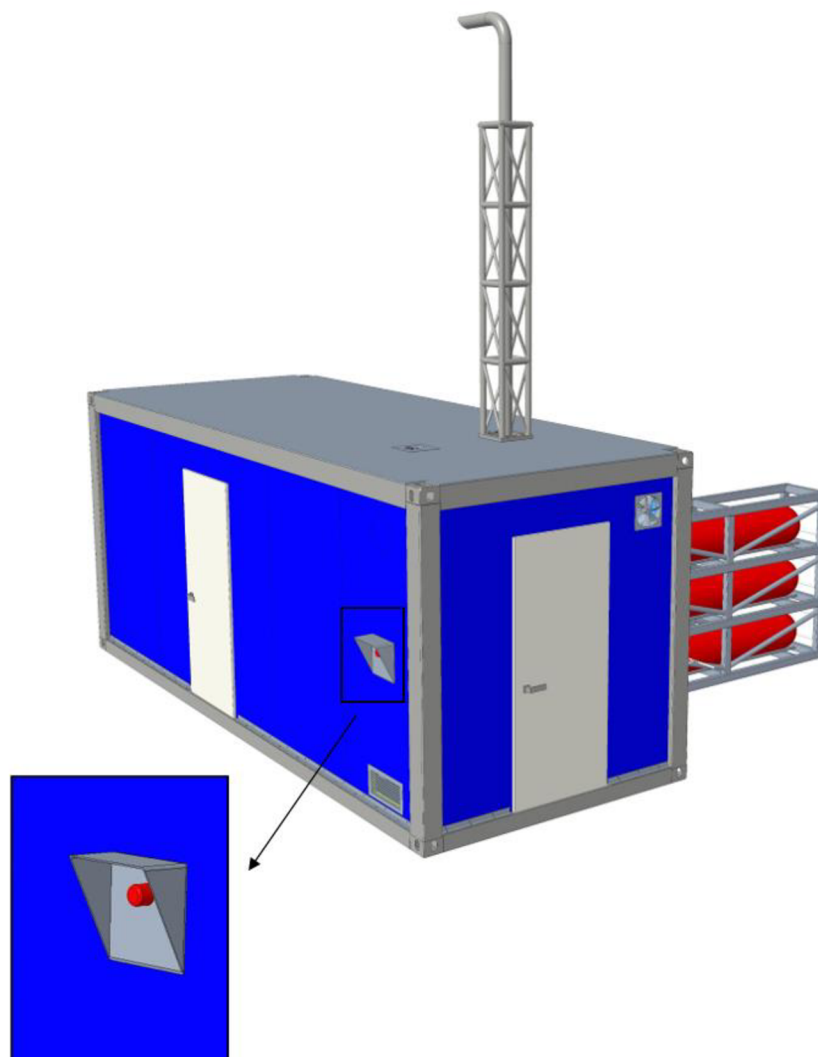
Obr. 55 Rozmístění komponent v kontejneru

7.5 NÁVRH DETEKČNÍHO SYSTÉMU

Vzhledem k výbušnému prostředí vodíkového hospodářství jsou nastavena přísná bezpečnostní pravidla, která musí být v souladu s českou legislativou, dokumentem vydaným Českým plynárenským svazem TPG 304 03. Minimum pro schválení funkční plnicí stanice jsou detektory úniku vodíku, detektory hoření, hlavní panel a vypínač, tlakoměry a ventily [69]. Veškerá vybavení by měla být vyrobena z nerezové oceli, jelikož budou umístěna ve výbušném prostředí.

7.5.1 HLAVNÍ VYPÍNAČ A NOUZOVÉ ODTAVENÍ

Součástí každého vodíkového hospodářství musí být hlavní vypínač, který bude napojen na veškerou vodíkovou technologii tak, aby ji dokázal při nouzovém stavu okamžitě vypnout. Hlavní vypínač je umístěn k hlavnímu rozvaděči celé stanice. Nouzové tlačítko pro nouzové odstavení stanice funguje tak, že v případě nouze se veškeré technologické prvky dají do původní pozice. Vypne se kompresor, chladič systém a přenastaví se všechny ventily tak, aby nedocházelo k dalšímu průniku vodíku v systému. Nouzové tlačítko se stiskne pouze v nejnútnejších případech, je umístěno zvenčí kontejneru na dostupném místě.



Obr. 56 Umístění nouzového vypínače na kontejneru

7.5.2 DETEKTOR ÚNIKU VODÍKU

Detektor úniku vodíku nesmí chybět v žádném vodíkovém hospodářství. V případě úniku vodíku ve větším množství dokáže detektor vodíku odhalit jeho neúnosnou koncentraci v uzavřeném prostoru vodíkového hospodářství. Přístroje pro detekci vodíku, používané v systémech pro snímání a monitorování koncentrace vodíku v uzavřeném prostoru, musí vyhovovat požadavkům na přesnost podle normy ISO 26142 [95].

Jedním z takových detektorů je snímač koncentrace vodíku Evikon E2618-LEL(H₂). Tento polovodičový snímač vyrábí firma Evikon, která vyrábí i ostatní snímače koncentrace plynů jako jsou propan, metan, acetylen nebo butan. Snímač slouží k včasnému varování před nebezpečně vysokou koncentrací vodíku. Využívá plně kalibrovaný a teplotně kompenzovaný polovodičový senzor s výbornou opakovatelností, stabilitou a dlouhou životností [96]. Snímač řady E2618 je řešením pro moderní aplikace s komunikací ModBus RS485 a dvěma analogovými výstupy 4–20 mA/0-10 V. Snímač je v základu kalibrován na vodík [96].

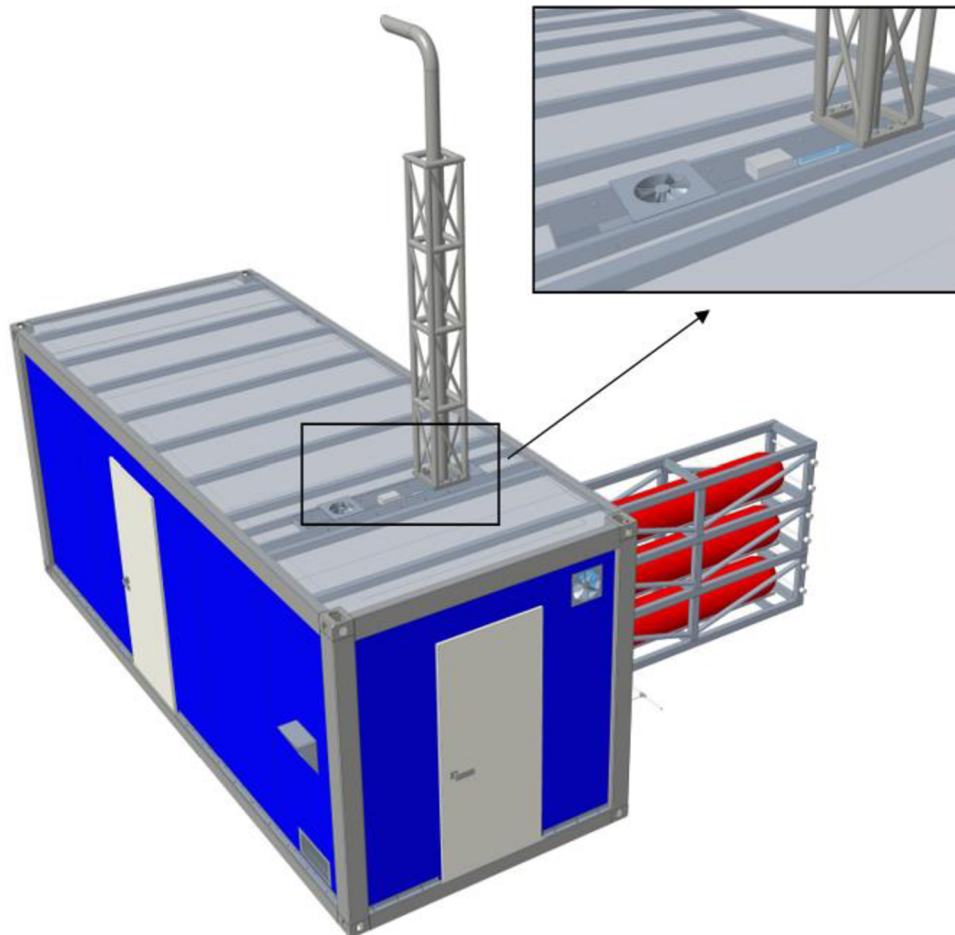


Obr. 57 Snímač koncentrace vodíku Evikon [96]

Princip funkce měření koncentrací pomocí snímačů Evikon E2618-LEL(H₂) je následující. Ústředna měření koncentrace bude zajišťovat hlídání úniku vodíku v kontejneru pomocí snímače úniku koncentrace. U vstupu z venku do kontejneru bude instalována opticko-akustická signalizace a tlačítko pro umlčení akustické signalizace [76]. Na stropě a ve stěně kontejneru budou instalovány dva havarijní ventilátory. V případě zaznamenání úniku s koncentrací pohybující se kolem 10 % dojde ke spuštění havarijní ventilace. Rozsvítí se žluté signalizační světlo a spustí se akustická signalizace. Při poklesu pod hranici koncentrace 10 % se automaticky vypnou ventilátory, a i opticko-akustická signalizace [76]. V případě zaznamenání nárazového úniku s koncentrací vyšší než 20 % dojde opět ke spuštění havarijní ventilace. Rozsvítí se červené signalizační světlo a spustí se akustická signalizace. Zároveň dojde k odstavení technologie vodíkové plnicí stanice. Při opětovném poklesu pod 10% hranici koncentrace se automaticky vypnou nejen havarijní ventilátory, ale i opticko-akustická signalizace [76].

Snímač koncentrace vodíku se ve vodíkovém hospodářství musí umístit v co nejvyšším bodě kontejneru vzhledem ke hromadění vodíku u stropu. Proto se s ním počítá ve výklenku podběhu, který vede vodík ke střešnímu ventilátoru a odřukovému komínu. Snímač koncentrace EVIKON se umístí právě mezi tyto dva ventilační prvky ke střešnímu panelu buďto pomocí speciálního lepidla nebo vrutů ISO 7049. Vzhledem k tomu, že jeho dokáže

snímat poloměr pohybující se v rozmezí 5–6 metrů, je počítáno pouze s jedním snímačem. Na obrázku níže je snímač koncentrace vodíku EVIKON znázorněn jako bílá krabička mezi komínem a střešním ventilátorem.



Obr. 58 Umístění snímače koncentrace vodíku EVIKON

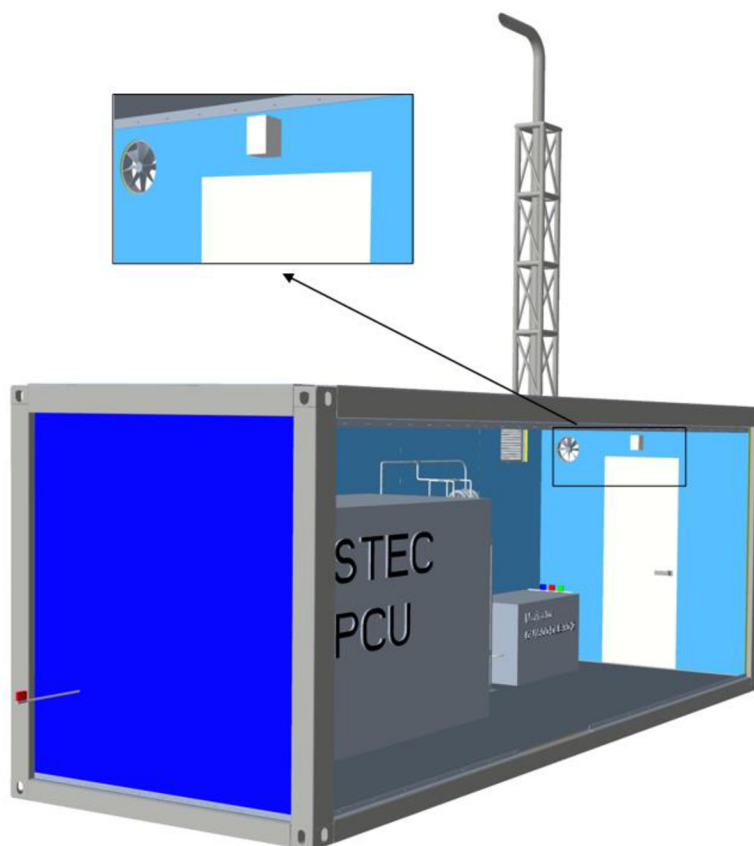
7.5.3 DETEKTORY PLAMENE S UV/IR ZÁŘENÍM

Snímače plamene vodíku na identifikaci využívají ultrafialové nebo infračervené záření, které jim pomáhá plamen snáz a včas detekovat a upozornit na něj. Pro detekci plamene a hoření vodíku se využívá snímač FlameSpec UV-IR, který poskytuje rychlou reakci a spolehlivou detekci hoření vodíku. Klíčovými vlastnostmi jsou například vysoká citlivost, mód ultrarychlé detekce nebo ukládání jednotlivých událostí. Provozní napětí snímače je 24 V. Snímač plamene je inteligentním řešením pro moderní aplikace s komunikací ModBus RS485 a dvěma analogovými výstupy 0–20 mA [97]. Pro přichycení je vybaven držákem, který lze namontovat jak z vrchu, tak i zespoda snímače [97]. K přichycení se použijí vruty ISO 7049.



Obr. 59 Snímač plamene vodíku [97]

S umístěním snímače plamene vodíku FlameSpec UV-IR se počítá nad dveřmi tak, aby zaznamenával celé vodíkové hospodářství. Tento snímač dokáže snímat uniklý vodík a jeho plamen na vzdálenost až 9 m. Jeho zorné pole se pohybuje do 90° ve vertikální ose do 80° v té horizontální. Znamená to, že při případném správném naklonění bez problémů zvládne snímat celý prostor vodíkového hospodářství. Snímač v návrhu je připevněn vruty ISO 7049 do sendvičových panelů nad dveřmi vodíkového hospodářství.



Obr. 60 Umístění snímače plamene vodíku

7.5.4 TLAKOMĚRY

Jedním z dalších bezpečnostních prvků, které musí vodíkové hospodářství obsahovat, jsou různé tlakoměry. Těch musí být po celém toku vodíku hned několik, aby případně zamezily úniku vodíku. Pro vodíkové hospodářství na VUT v Brně jsou vybrány dva typy tlakoměrů. První typ je čistě elektromagnetický, který bude instalován na několika místech vodíkového hospodářství a zajišťovat její bezpečnost, druhý typ je klasický tlakoměr plnící pouze informativní funkci o tlaku.

Elektromagnetický typ tlakoměru UNIK5000H je vyráběn firmou Druck, která je světovým lídrem ve výrobě tlakoměrů. Jedná se o vodíkový tlakoměr určený pro vodíkové plnicí stanice, který snímá tlaky v rozmezí 700 mbar až 700 bar. Je vyroben z nerezové oceli výborně odolávající vodíkové křehkosti. Jeho frekvenční odezva se pohybuje až do 3,5 kHz. Výstupy z tlakoměru mohou být v mV, mA nebo V, záleží na konfiguraci, a má více možností elektrického a tlakového spojení [98].



Obr. 61 Snímač tlaku UNIK5000H [98]

Jako druhý typ je vybrán klasický tlakoměr, který bude sloužit pouze pro informativní účely, jakého tlaku bude dosahováno v jednotlivých tlakových nádobách vysokotlakého i nízkotlakého vysokokapacitního zásobníku. Jedná se o tlakoměr od firmy Ashcroft s výrobním označením 8009 S, který snímá tlaky do 850 bar. Je vyroben z nerezové oceli tak, aby odolával vodíkovému křehnutí. Budíková část je vyrobena ze skla, polykarbonátu a bezpečnostního skla tak, aby odolávala vysokým tlakům [99].



Obr. 62 Tlakoměr Ashcroft 8009 S [99]

7.5.5 VENTILY

Další částí bezpečnostní aparatury vodíkového hospodářství na VUT v Brně jsou ventily. Každý typ ventilu má svoje příslušné pole působnosti. Pro vodíkové hospodářství jsou navrženy tři typy ventilů – zpětné ventily kontrolující směr průtoku, dále uzavírací ventily a pojistný ventil.

Zpětné ventily zabraňují špatnému směru toku vodíku, respektive nedovolí změnu směru toku vodíku. Konstrukční variantou je zpětná klapka. Zpětný ventil sestává z kuličky dosedající na sedlo. Kulička je k sedlu přitlačovaná většinou pružinou. Takových ventilů se ve vodíkovém hospodářství vyskytuje hned několik, v podstatě za každým technologickým uzlem. Pro vodíkové hospodářství na VUT je vybrán zpětný kuličkový ventil od firmy Maximator. Tento zpětný ventil je konstruován z nerezové oceli, otevření ventilu se provede při tlaku 1,5 bar a odolá teplotám až 350 °C [100].



Obr. 63 Zpětný kuličkový ventil Maximator [100]

Uzavírací ventily uzavírají průchod toku vodíku v určitých částech vodíkového hospodářství. Tím se zaručí maximální kontrola nad průtokem vodíku. V konceptu vodíkového hospodářství na VUT v Brně je navržen elektromagnetický typ uzavíracího ventilu konkrétně Typ 3108 od firmy Eugen Seitz AG. Ventil je vyroben z nerezové oceli a zároveň je konstruován do vodíkových podmínek speciálně pro vodíková hospodářství až do vysokého tlaku okolo 1000 bar. Prošel certifikací ATEX. Doporučené napájení 24 V AC/DC nebo 230 V AC [101].



Obr. 64 Elektromagnetický ventil TYPE 3108 [101]

Ruční uzavírací ventil je navržen především pro uzavírání a otevírání toku vodíku u tlakových nádob. Tento ruční uzavírací ventil vyrábí firma Redfluid. Pracovní teplota ventilu se pohybuje v rozmezí od $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ a odolává tlakům až 500 bar. Firma vyrábí velmi rozmanitou škálu průměrů. Je vyroben z nerezové oceli a zároveň je vhodný i do výbušného prostředí [103].



Obr. 65 Ruční uzavírací ventil [103]

Dalším nezbytným ventilem pro vodíkového hospodářství je pojistný ventil. Jeho úkolem je otevřít a vypustit nadměrný tlak nad nastavenou hodnotu ventilu, buď do atmosféry nebo jej odvést jinam potrubím. Pojistný znovu uzavíratelný ventil se vyskytuje u vodíkových plnicích stanic nejčastěji za tlakovými nádobami. Pro vodíkové hospodářství na VUT v Brně je navržen pojistný ventil s názvem TYP 492 od firmy Goetze KG Armaturen. Jedná se o nejčastěji používaný pojistný ventil u vodíkových plnicích stanic. Odolává tlakům 1500 bar a je vyroben z nerezové oceli. Je dostupný v různých variantách potrubního spojení [102].

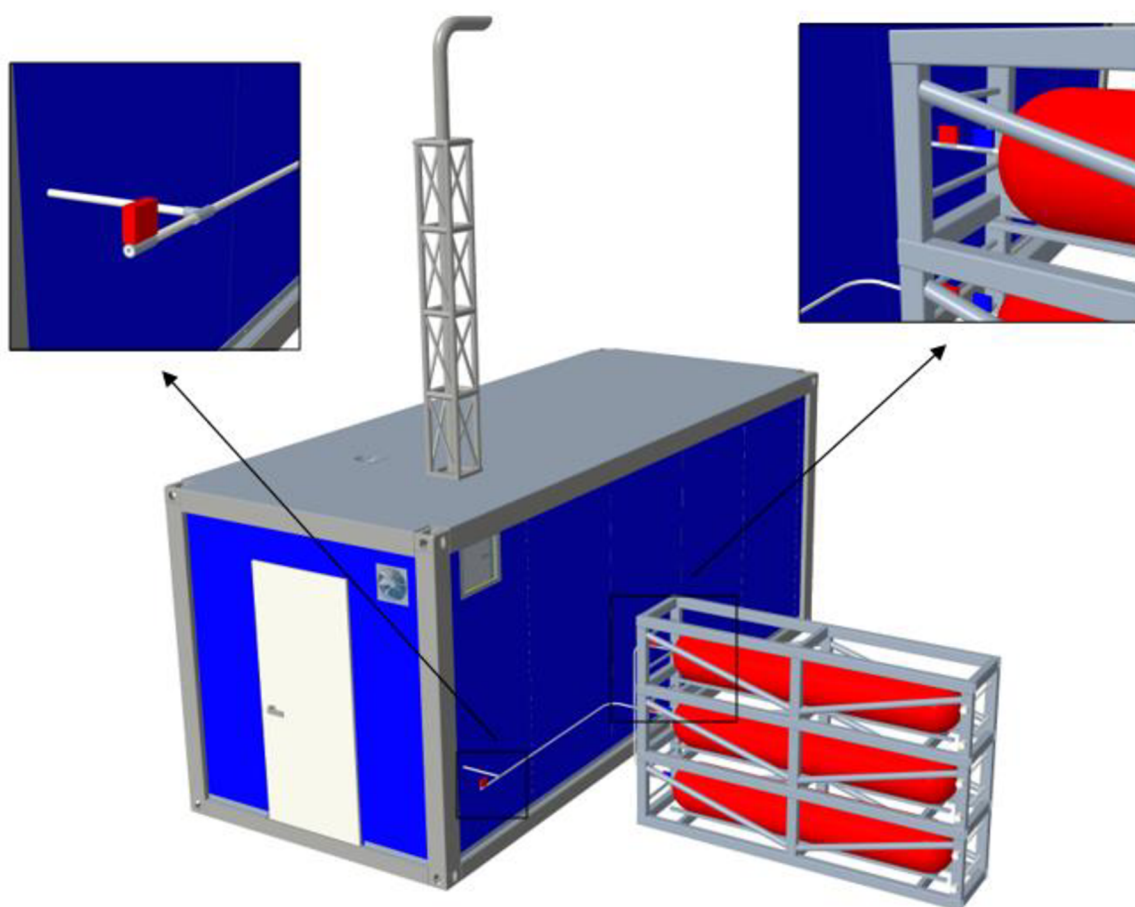


Obr. 66 Pojistný ventil TYP 492 [102]

7.5.6 VIZUALIZACE UMÍSTĚNÍ VENTILŮ A TLAKOMĚŘŮ

Umístění uzavíracích ventilů, tlakoměrů a zpětných ventilů je v souladu se schématem toku vodíku vodíkového hospodářství. Jedná se o důležitou součást vodíkového hospodářství zabraňující především nežádoucím nehodám. Následující obrázky znázorňují polohu jednotlivých bezpečnostních prvků, přičemž zelený prvek značí zpětné ventily, modrý tlakoměry, červený uzavírací ventily a fialový pojistné ventily.

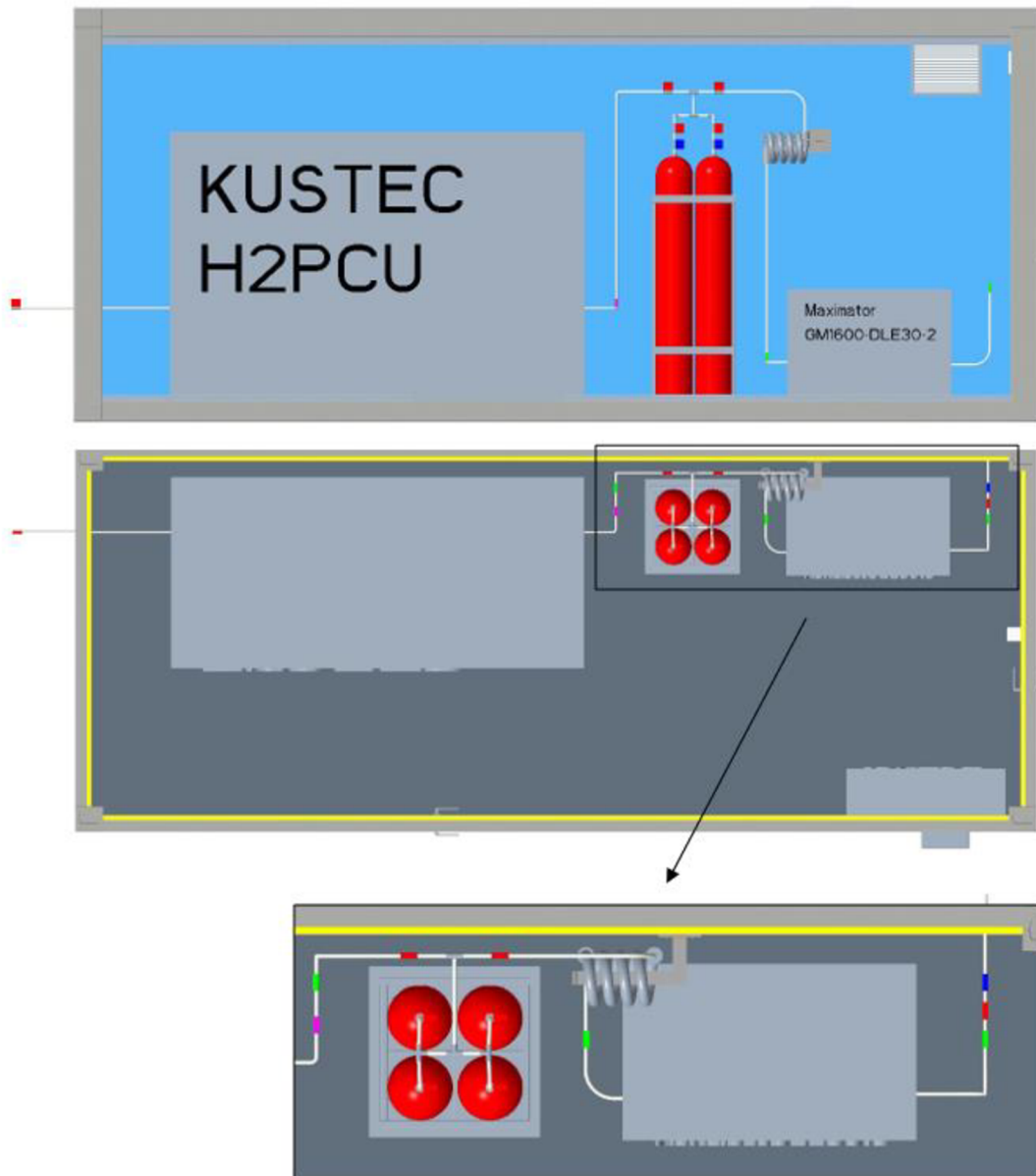
Mimo kontejner budou instalovány tlakoměry a uzavírací ventily. U každé nádoby se v návrhu počítá s tlakoměrem Ashcroft 8009 S a ručním uzavíracím ventilem Redfluid. Při toku vodíku zde je navrženo i místo pro případný dofuk vodíku při dodávání, které je zakončeno opět ručním uzavíracím ventilem. Ruční ventily jsou navrženy především z důvodu snadnější předvídatelnosti daných tlaků.



Obr. 67 Venkovní zapojení tlakoměrů a ventilů

Umístění ventilů a tlakoměrů uvnitř kontejneru je zobrazeno na obrázku níže. Mezi každou technologickou částí se nachází zpětný kuličkový ventil. Před kompresorem musí být připojen ještě elektromagnetický tlakoměr a elektromagnetický ventil TYPE 3108 pro případ rychlého odstavení kompresoru. Před vysokotlakým zásobníkem se nachází elektromagnetický ventil, který je otevřen při zapnutí kompresoru a nedoplňném vysokotlakém zásobníku a naopak zavřen, když zásobník je naplněn na maximální tlak a kompresor je vypnutý. V opačném sledu se otevírá a zavírá elektromagnetický ventil za vysokotlakým zásobníkem. Každá z nádob vysokotlakého zásobníku je navíc opatřena tlakoměrem Ashcroft 8009 S a ručním

ventilem Redfluid. Za vysokotlakým zásobníkem je poté umístěn ještě pojistný ventil pro případ uvolnění vysokých tlaků. Obrázky níže jsou zobrazeny bez komínové konstrukce.



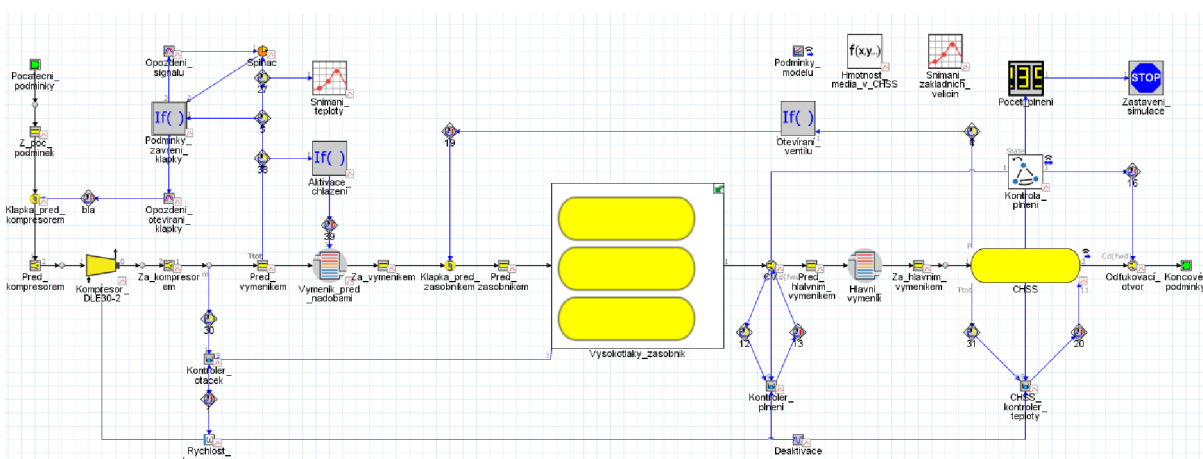
Obr. 68 Zobrazení umístění ventilů a tlakoměru uvnitř kontejneru

7.6 SIMULACE V GT-SUITE

Nezbytnou součástí návrhu vodíkového hospodářství je i samotná simulace, která byla provedena v simulačním programu GT-Suite. Simulací vodíkového hospodářství se dá zjistit například minimální čas plnění jedné koncové nádoby, průběhy tlaků, teplot a podobně. Výsledky by se co nejdříve měly blížit reálným výsledkům.

7.6.1 MODEL V PREPROCESORU GT-SUITE

Před samotnou simulací je nutno sestavit model vodíkového hospodářství. Model je sestaven z několika průtokových prvků simulující nejen samotné prvky, jako je potrubí, ale i tlakové nádoby. Dále jsou do modelu zakomponovány signály potřebné ke správné simulaci modelu. Signály snímají například tlaky v nádobách nebo teploty. Na obrázku níže je zobrazeno grafické znázornění matematického modelu, který je pro lepší popis modelu rozdělen do několika částí – část před vysokotlakým zásobníkem, vysokotlaký zásobník a část za vysokotlakým zásobníkem.



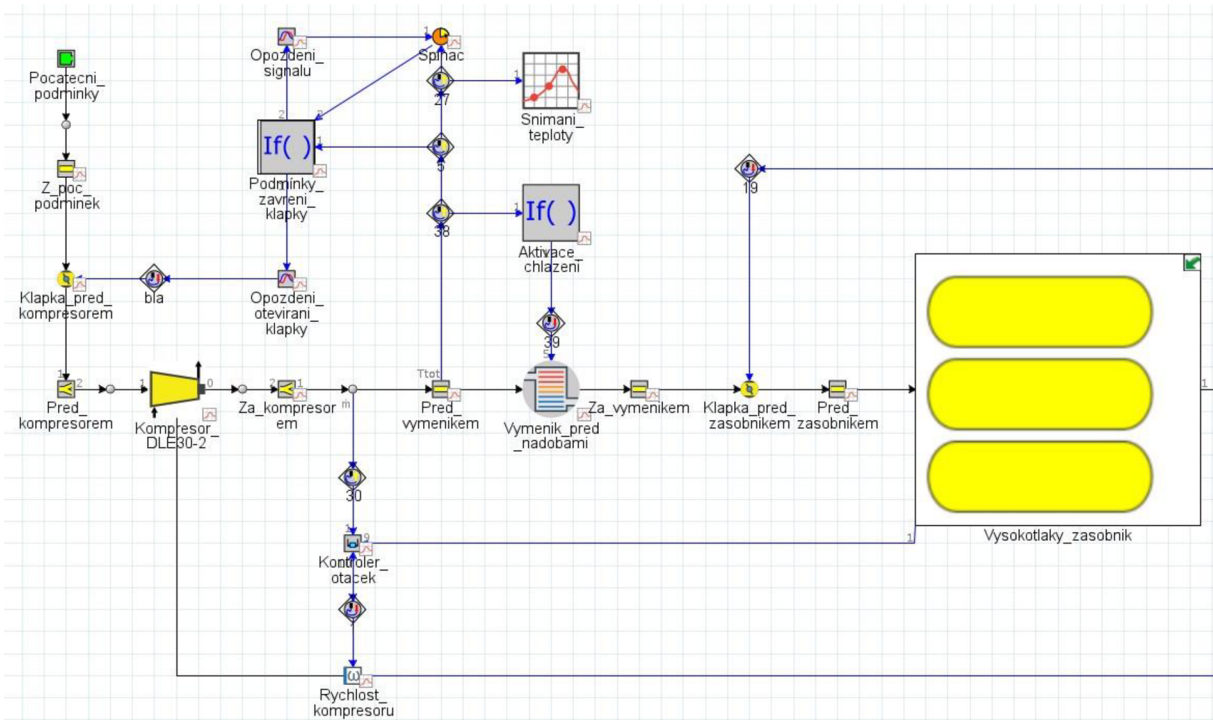
Obr. 69 Kompletní model vodíkového hospodářství v GT-Suite

V části před vysokotlakým zásobníkem, která je zobrazena na obrázku 70, jsou stanoveny počáteční podmínky, stlačení vodíku pomocí kompresoru DLE 30-2 a ochlazení vodíku výměníkem tepla. Počáteční podmínky v modelu jsou nastaveny na minimální možné hodnoty tlaku na sání kompresoru DLE 30-2, tedy 20 bar, a zároveň je počáteční teplota stanovena na 20 °C.

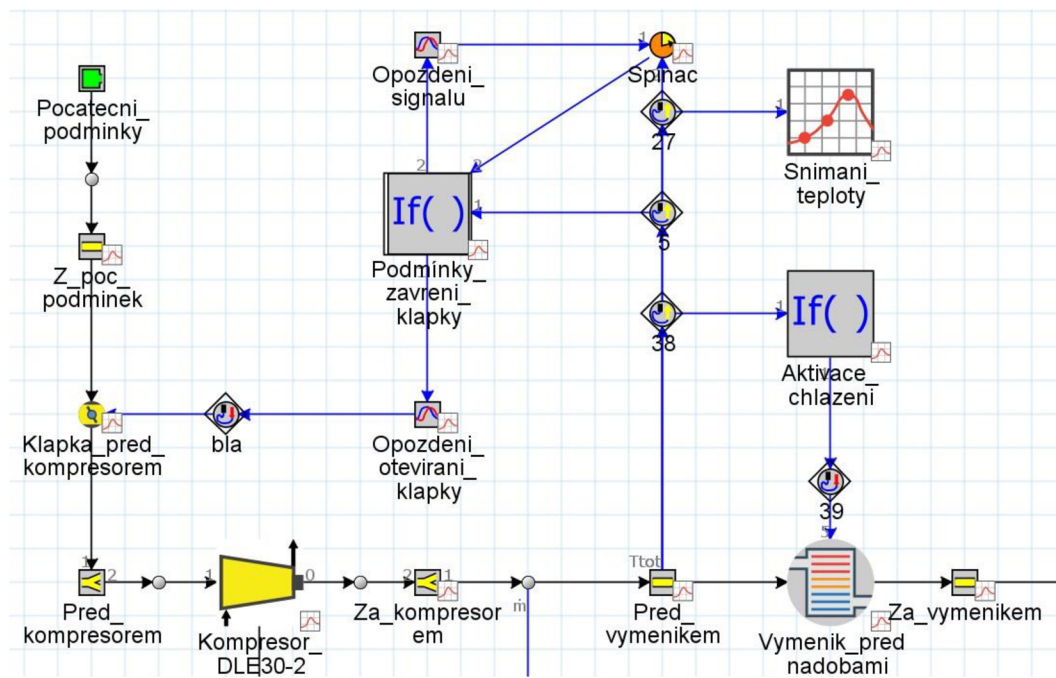
Tok vodíku dále pokračuje k ventilu, v modelu nazvaný jako Klapka před kompresorem, který je ovládán pomocí IF cyklu Podmínky zavření klapky. Tento cyklus zaručí kompresoru, že se bude většinu času pohybovat v rozmezí jeho pracovních teplot, v praxi pak to, že se kompresor bude vypínat a zapínat dle teploty na výstupu. Pokud se teplota dostane nad hodnotu 100 °C, což je jeho maximální pracovní teplota viz kapitola Kompresor, kompresor ještě nějakou dobu bude vodík stlačovat, následně se po 20 sekundách vypne, aby se zchladil. Opětovné zapnutí se provede, až teplota klesne pod stanovenou hodnotu 80 °C. Znamená to, že vodík se bude stlačovat postupně kaskádovitě nikoli kontinuálně. Tento cyklus je zobrazen na obrázku 71.

Po stlačení se vodík dostane k výměníku tepla před vysokotlakým zásobníkem, který ochladí stlačený vodík na hodnotu pod 60 °C, což je maximální pracovní hodnota tlakových nádob vysokotlakého zásobníku. Klapka před zásobníkem reprezentuje uzavírací ventil v návrhu

zaručuje uzavření průtoku vodíku, pokud je zrovna plněna finální nádoba, podrobněji bude popsána níže.

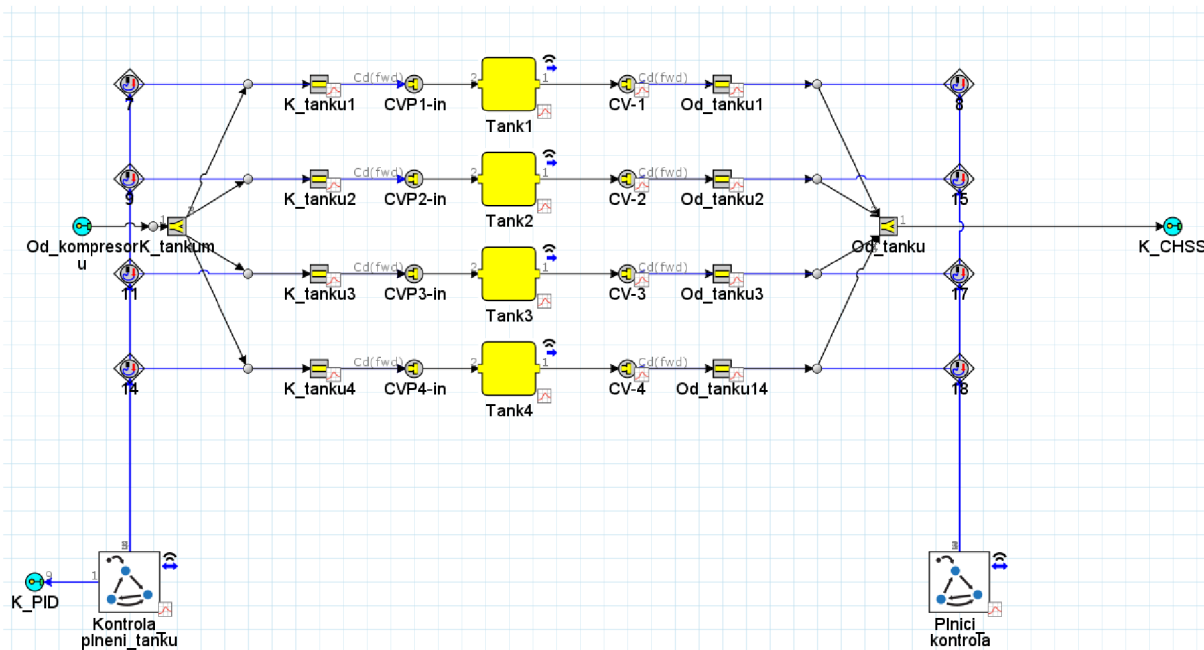


Obr. 70 Zobrazení části modelu před vysokotlakým zásobníkem



Obr. 71 Cyklus ovládající chod kompresoru

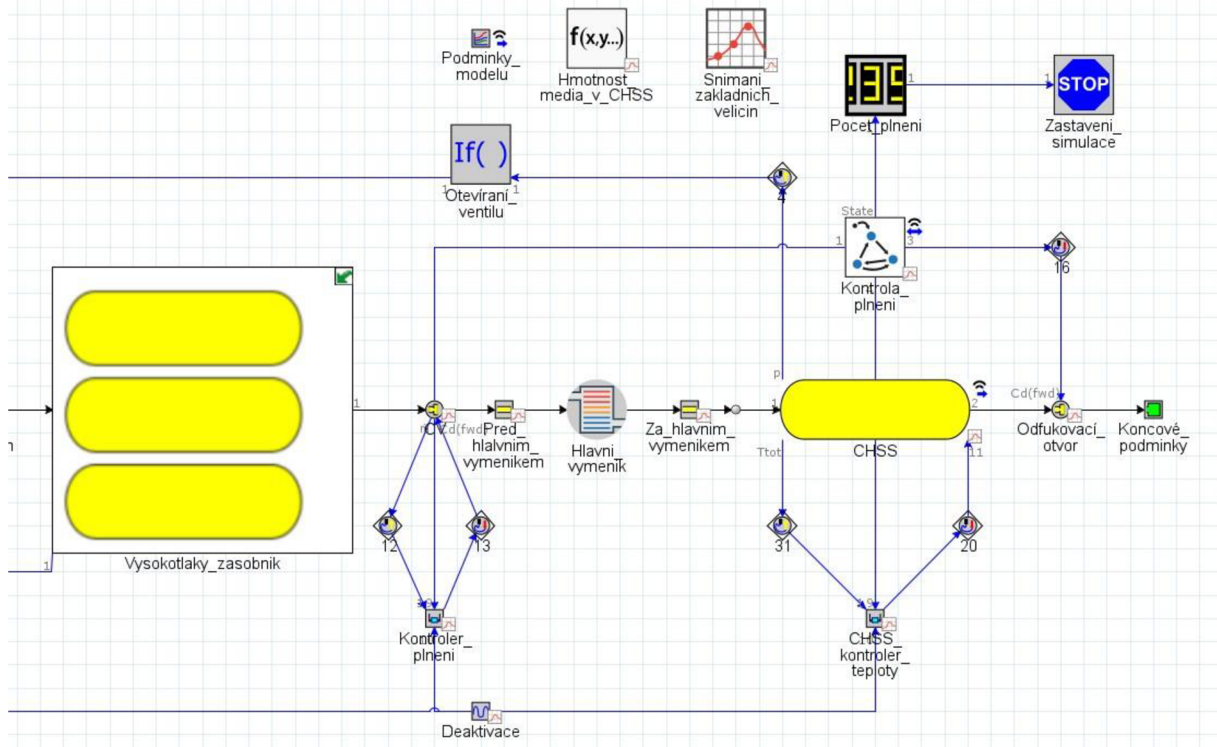
Vysokotlaký zásobník je složen ze čtyř nádob, každá o vodním objemu 50 l a referenčním tlaku 450 bar. Jedná se tedy o Buffer koncepci zásobníku. Ke každé nádobě jsou naprogramované snímače plnění nazvané jako Kontrola plnění tanku a Plnicí kontrola, které snímají tlaky v každé nádobě. Na základě snímaných tlaků poté rozhodují například o tom, kdy a v jakém pořadí budou doplňovány jednotlivé nádoby, nebo naopak, jaká nádoba bude poskytovat vodík pro plnění konečné CHSS nádoby.



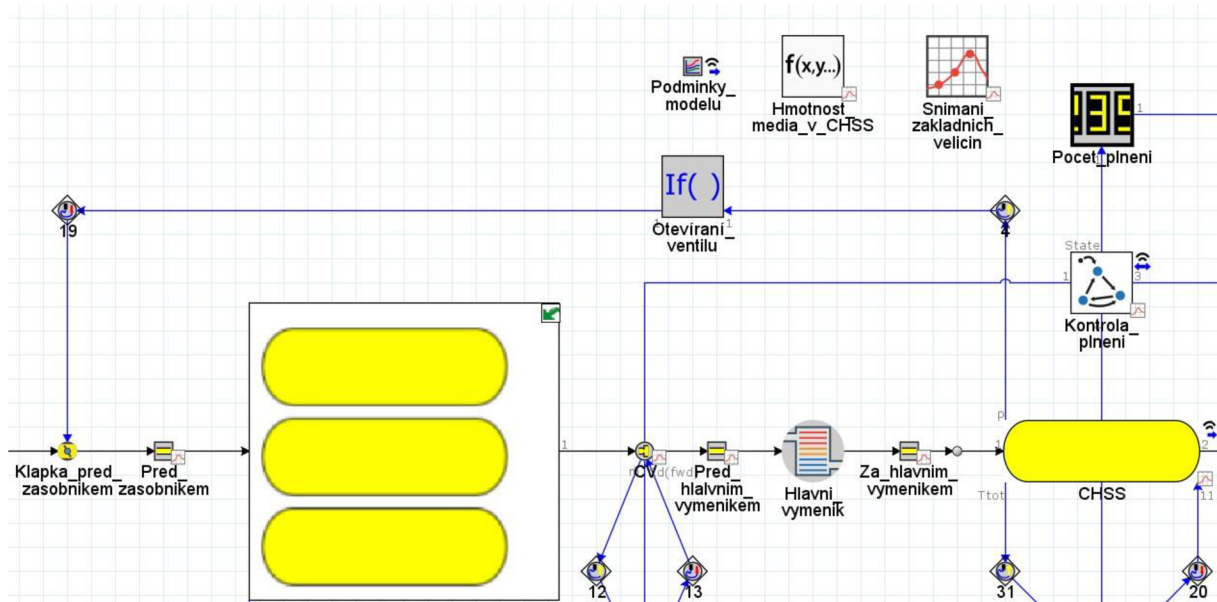
Obr. 72 Model vysokotlakého zásobníku

Část modelu nacházející se za vysokotlakým zásobníkem, zobrazena na obrázku 73, je určena zejména pro finální plnění tlakové nádoby CHSS. Zjednodušeně simuluje odběr vodíku jednoválcového motoru z vodíkového hospodářství. Vodík, který putuje z nádob vysokotlakého zásobníku, je potřeba zchladit v hlavním výměníku na finální teplotu plnění $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle normy SAE J2601 reprezentující chladicí systém KUSTEC H2PCU v kapitole Chladicí systém a tepelný výměník. Dále jsou zde prvky, které ukončují samotnou simulaci – Počet plnění a Zastavení simulace a prvek nazvaný jako Kontrola plnění, který monitoruje tlak v CHSS nádobě.

Důležitým prvkem v této části je i IF cyklus Otevírání ventilu, zobrazeno na obrázku 74, který řídí otevírání klapky před vysokotlakým zásobníkem. Vzhledem k navržené koncepci toku vodíku vodíkového hospodářství nelze stlačovat vodík v kompresoru a přivádět jej do vysokotlakého zásobníku a zároveň plnit koncovou tlakovou nádobu CHSS. Proto je v modelu navržen IF cyklus, který ovládá klapku před kompresorem tak, že během plnění koncové nádoby CHSS je klapka zavřená a po naplnění nádoby CHSS se klapka opět otevře, aby umožnila plnění tlakových nádob zpět na referenční tlak 450 bar.



Obr. 73 Část modelu za vysokotlakým zásobníkem



Obr. 74 IF cyklus ovládající klapku před vysokotlakým zásobníkem

7.6.2 NASTAVENÍ PROMĚNNÝCH VELIČIN

Důležitým aspektem simulace vodíkového hospodářství je nastavení řídicích veličin celého matematického modelu. Mezi hlavní řídicí parametry se řadí počáteční podmínky, geometrické parametry potrubí, plnicí parametry a jiné. Vzhledem k tomu, že vodíkové hospodářství bude zřízeno pouze pro plnění jednoválcového motoru, mohla být stanovena délka mezi plněními tlakové nádrže na 7 hodin, v přepočtu 25200 sekund. Tato doba umožní kompresoru k jeho zchlazení do rozmezí pracovních teplot a postupnému kaskádovitému stlačování vodíku.

Parameter	Unit	Description	Case 1
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>
Case Label		Unique Text for Plot Legends	Base_Case
Pocet_plneni		Pocet naplnenych tlakovych nadob	2 ...
Doba_simulace	h	Maximalni doba simulace	12 ...
Pocatecni podminky			
Pocatecni_tlak	bar	Pocatecni tlak vodiku	20
Pocatecni_teplota	C	Pocatecni teplota vodiku	20
Pocatecni_teplota_CHSS	K	Pocatecni teplota nadoby CHSS	233.15 ...
Geometricke parametry			
Prumer_potrubí	mm	Prumer potrubí	17.48 ...
dx	mm	Diskretizacni delka	500 ...
CHSS Parametry			
Objem_CHSS	L	Objem CHSS	50 ...
Pocatecni_tlak_CHSS	bar	Pocatecni tlak v CHSS	5 ...
Plnici_tlak	bar	Tlak plneni	350 ...
Teplota_chladiva_ve_vyмениku	C	Teplota chladiva ve vyмениku	-70 ...
Teplotni parametry			
Maximalni_teplota_nadob	C	Maximalni teplota nadob a potrubí po kompresi	60 ...
Venkovni_teplota	C	Venkovni teplota	20 ...
Plnici parametry			
Prutok_kompresoru	g/s	Cilovy prutok kompresoru	4.2
Prutok_pri_plneni_nadoby_CHSS	g/s	Prutok pri plneni nadoby CHSS	4.2 ...
Cas_mezi_plnenimi	s	Cas mezi plnenimi	25200 ...

Obr. 75 Nadefinování hlavních veličin modelu

Pro zajištění správné funkce IF cyklů jsou vytvořeny například úhlové parametry plně otevřených a plně zavřených klapek, maximální pracovní teplota kompresoru a podobně.

Doplnění			
Parameter	Unit	Description	Case 1
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>
Case Label		Unique Text for Plot Legends	Base_Case
Uhel_zavreni_klapky			0 ...
Uhel_otevreni_klapky			90 ...
Casovy_limit	s	Casovy limit kompresoru nad maximal...	10 ...
Pracovni_teplota	C	Maximalni pracovni teplota kompresoru	80 ...
Maximalni_prutok		Dopredny maximalni prutok vodiku	5 ...
Maximalni_tlak_zavrene_kl...		Maximalni tlak pri zavrene klapce	10 ...

Obr. 76 Nadefinování veličin pro IF cykly

Posledními vytvořenými parametry zajišťující správný chod a nastavení vodíkového hospodářství jsou parametry vysokotlakého zásobníku, ve kterých se nastavuje například referenční tlak, objem tlakových nádob a podobně.

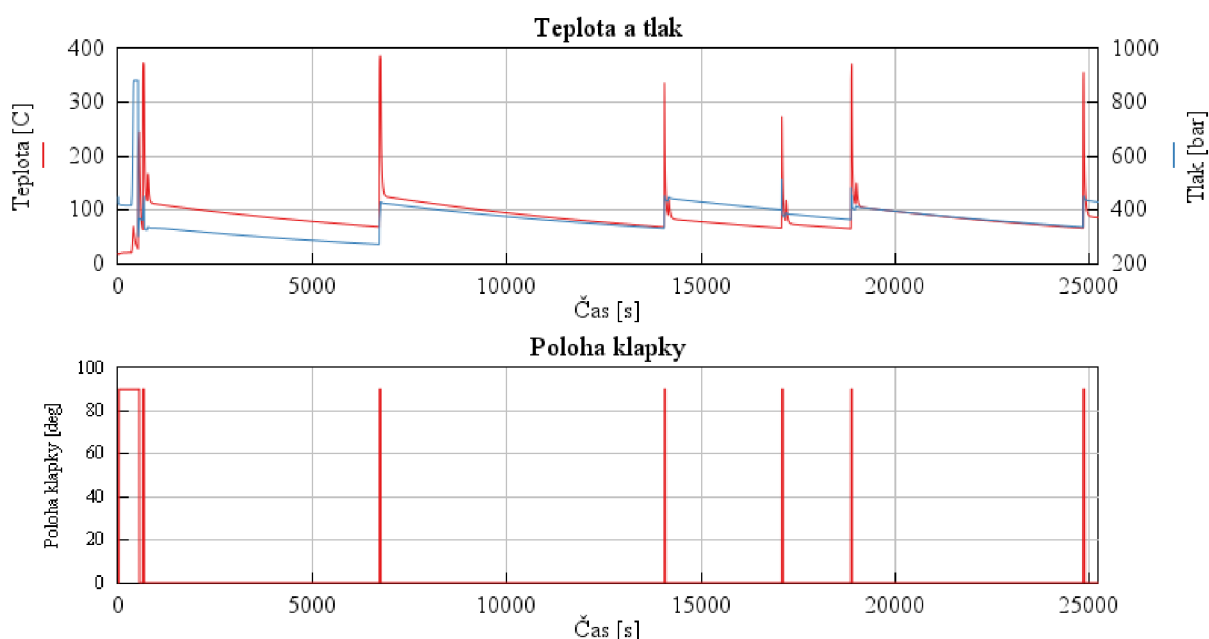
Tlakové nádoby			
Parameter	Unit	Description	Case 1
Case On/Off		Check Box to Turn Case On	<input checked="" type="checkbox"/>
Case Label		Unique Text for Plot Legends	Base_Case
Tank 1			
Celkovy_objem_tanku_1		Celkovy objem tanku 1 v litrech	50
Pocet_nadob_tanku_1		Pocet nadob v tanku 1	1 ...
Objem_nadoby_1	L	Objem nadoby 1	50 ...
Tlak_tanku_1	bar	Tlak tanku 1	450
Tank 2			
Celkovy_objem_tanku_2		Celkovy objem tanku 2 v litrech	50
Pocet_nadob_tanku_2		Pocet nadob v tanku 2	1 ...
Objem_nadoby_2	L	Objem nadoby 2	50 ...
Tlak_tanku_2	bar	Tlak tanku 2	450 ...
Tank 3			
Celkovy_objem_tanku_3		Celkovy objem tanku 3 v litrech	50
Pocet_nadob_tanku_3		Pocet nadob v tanku 3	1 ...
Objem_nadoby_3	L	Objem nadoby 3	50 ...
Tlak_tanku_3	bar	Tlak tanku 3	450 ...
Tank 4			
Celkovy_objem_tanku_4		Celkovy objem tanku 4 v litrech	50
Pocet_nadob_tanku_4		Pocet nadob v tanku 4	1 ...
Objem_nadoby_4	L	Objem nadoby 4	50 ...
Tlak_tanku_4	bar	Tlak tanku 4	450 ...

Obr. 77 Nadefinování veličin vysokotlakého zásobníku

7.6.3 VÝSLEDKY SIMULACE GT-SUITE

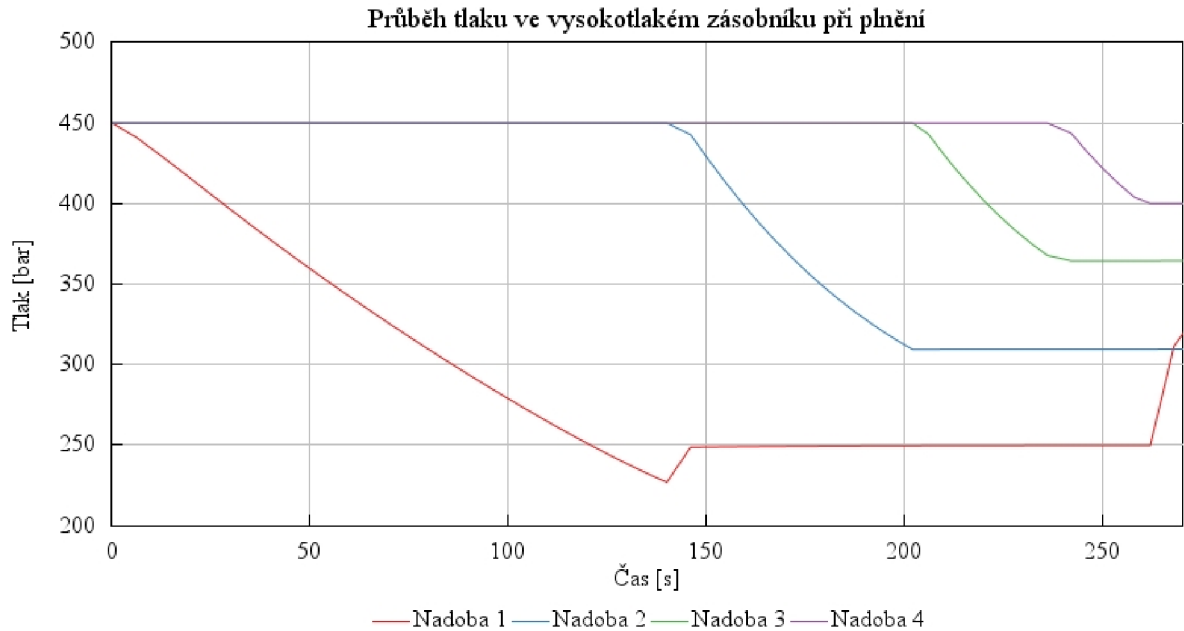
V modelu vodíkového hospodářství jsou simulací sledovány především průběhy tlaků při plnění a průběhy teplot. V modelu popsaném v předchozích kapitolách jsou zároveň důležité IF cykly, z nichž právě cyklus u kompresoru zajišťující do maximální možné míry udržet teploty v pracovním rozmezí teplot kompresoru má značný vliv na průběh tlaků a teplot. Níže jsou popsány důležité grafy modelu vodíkového hospodářství.

Na obrázku 78 je zobrazen graf úhlu otevření klapky v závislosti na čase. Je evidentní, že otevřená klapka koresponduje s nárustem teplot a tlaku právě za kompresorem. To značí, že při otevřené klapce má kompresor co stlačovat, zatímco při zavřené nikoli. V tento moment nastává chladnutí kompresoru, jak dokazuje i klesající křivka teploty. Kompresor však stlačuje vodík pouze kolem 30 sekund, aby se nepřehřál, což je v porovnání s celkovým časem stlačování vodíku minimální část simulace.

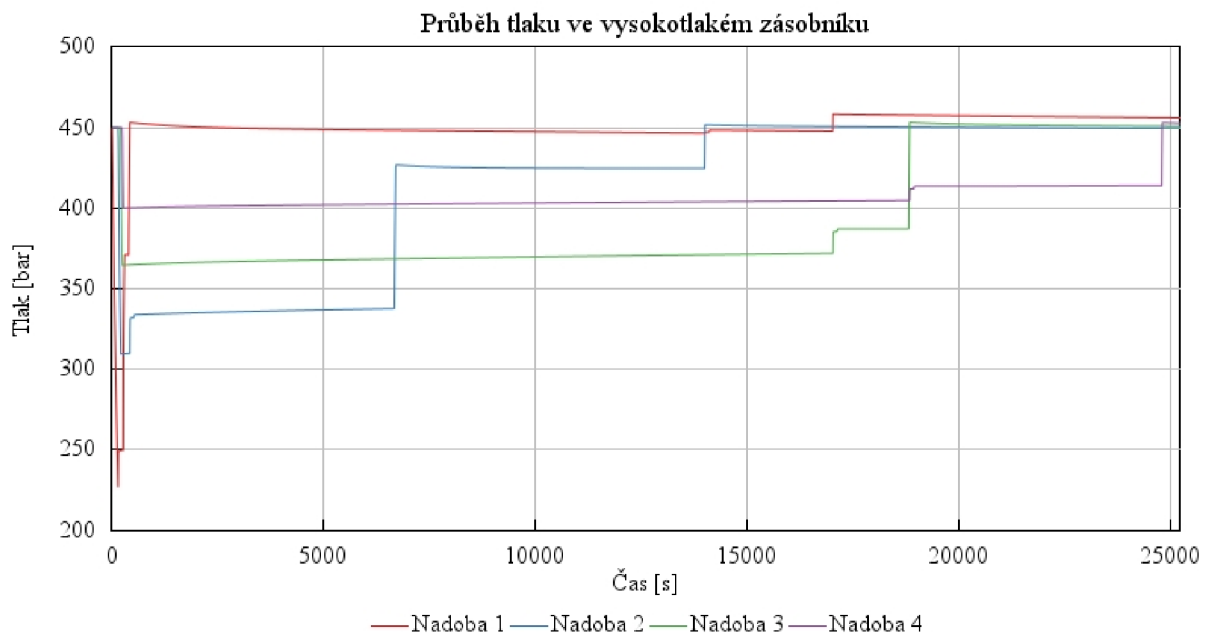


Obr. 78 Graf úhlu klapky, tlak a teploty za kompresorem v závislosti na čase

Dalším technologickým uzlem je vysokotlaký zásobník. Grafy s tlakem ukazují podíl jednotlivých tlakových nádob na plnění koncové nádoby – obrázek 79, a zároveň i to, jak jsou nádoby postupně kaskádovitě doplňovány až do referenčního tlaku 450 bar – obrázek 80.

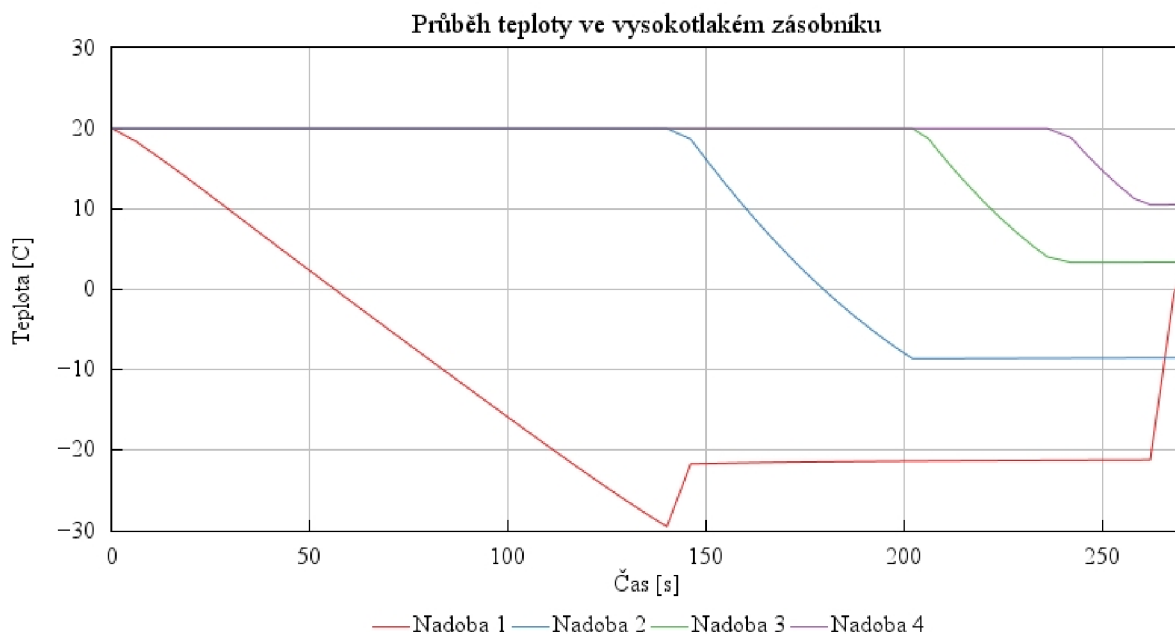


Obr. 79 Průběh tlaků nádob vysokotlakého zásobníku při plnění koncové nádoby

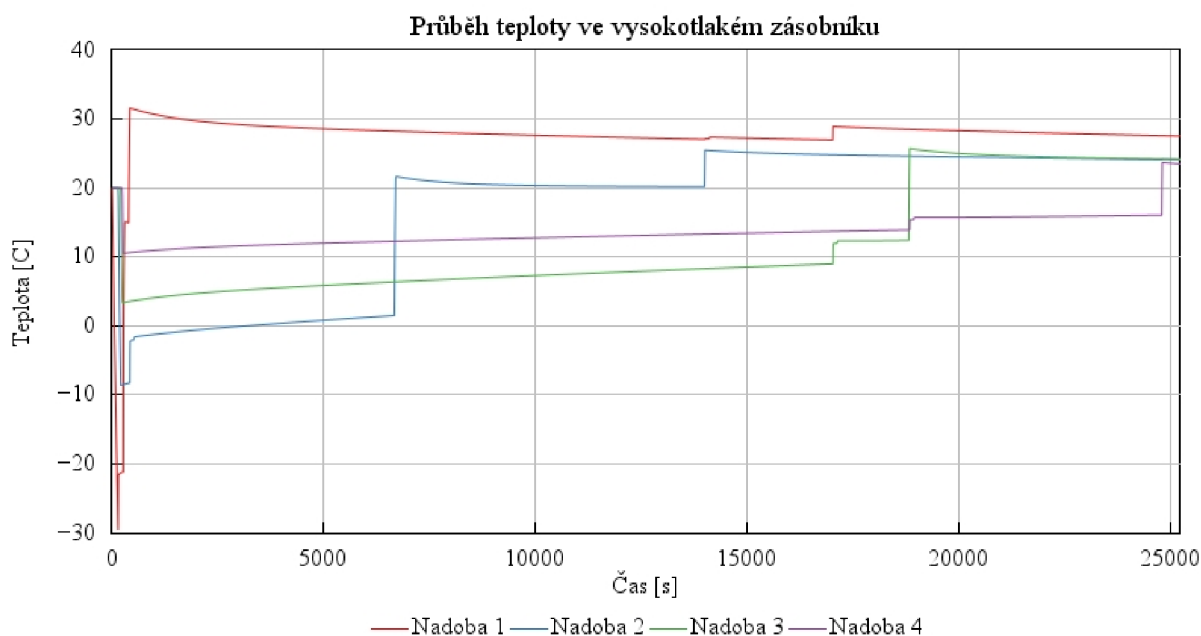


Obr. 80 Průběh tlaku nádob vysokotlakého zásobníku

U vysokotlakého zásobníku se sledují nejen tlaky ale i teploty v jednotlivých tlakových nádobách, které taktéž mají určité pracovní rozmezí teplot. Kvůli tomuto faktu je před vysokotlakým zásobníkem instalován tepelný výměník, který se stará o to, aby teplota stlačeného vodíku nepřesahovala maximální pracovní teplotu vysokotlakých nádob. Níže ukázané grafy dokazují, že tepelný výměník funguje správně, protože se teplota nad tuto povolenou mez – 60 °C – nedostala.

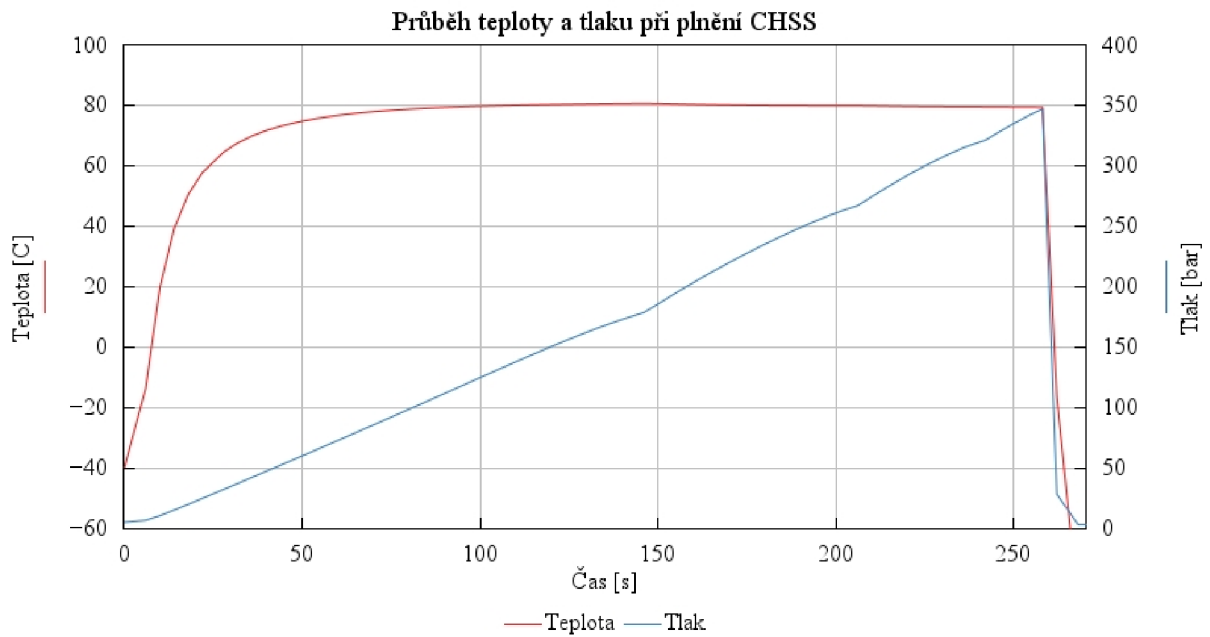


Obr. 81 Průběh teplot nádob vysokotlakého zásobníku při plnění koncové nádoby



Obr. 82 Průběh teplot nádob vysokotlakého zásobníku

Tlak a teplota se sleduje i při plnění koncové tlakové nádoby CHSS. Výsledky simulací ukazují, že s rostoucím tlakem nejprve roste i teplota, u které se ale růst postupně zpomaluje. Jedná se především o fakt, že tepelný výměník umístěný před touto nádobou se snaží regulovat teplotu vodíku při jeho průchodu, což následně ovlivňuje i koncovou teplotu v tlakové nádobě CHSS. Tlak roste kontinuálně do té doby, než dosáhne potřebného tlaku v nádobě 350 bar.



Obr. 83 Průběh tlaku a teplot v koncové nádobě CHSS

ZÁVĚR

Pro inovativní postupy a implementace vodíku do každodenního života jakožto alternativního paliva využívajícího se v dnešní době, zejména pak v palivových článcích, je každá záležitost zaměřená na jeho vývoj a výzkum důležitým krokem vpřed. A právě za účelem inovací a zkoušení vodíku v rámci zkušebny spalovacích motorů na VUT v Brně byla zadána tato diplomová práce zabývající se návrhem vodíkového hospodářství pro zkušebnu spalovacích motorů na VUT v Brně. Toto vodíkové hospodářství je obdobné vodíkovým plnicím stanicím, avšak musí respektovat požadavky a prostorové možnosti zkušebny spalovacích motorů. Při komplexním návrhu vodíkového hospodářství je důležité dbát například na legislativní předpisy nebo bezpečnostní normy, které jej ovlivňují, ale také na skutečnost, aby navrhované části a komponenty byly komerčně dostupné a tím pádem i snadněji nahraditelné při jejich neočekávané poruše.

Zázemí vodíkového hospodářství je spjato s několika normami, především s normou ČSN ISO 19880 nebo bezpečnostní směrnicí TPG 304 03, zabývající se vodíkovými hospodářstvími, a to zejména jejich odvětráváním, opuštěním vodíkového zázemí, či udržení stabilních klimatických podmínek. Vzhledem k tomu, že vodíkové hospodářství se řadí mezi výbušná prostředí a prostředí s možnou vyšší koncentrací vodíku, navrhované komponenty zázemí vodíkového hospodářství musí odpovídat těmto požadavkům, a sice certifikací ATEX, být vyrobené z nehořlavých materiálů a odolávat působení vodíku. Skloubení všech těchto požadavků není zcela jednoduché, a proto se vodíkové hospodářství řadí mezi náročnější inženýrské cíle.

Nedílnou součástí vodíkového hospodářství je jeho technologie. Není neznámým faktem, že se skládá z vysokotlakých nádob, kompresoru nebo tepelných výměníků. Podstatné ovšem je, kde se nachází tyto jednotlivé části ve vodíkovém zázemí, za jakých podmínek fungují nebo jak jsou propojeny. U návrhu musí být brán v potaz i fakt, že se zde pracuje s velkými tlaky, které mohou dosahovat až 1000 bar, a teplotami až okolo 500 °C, tudíž komponenty musí být odolné vůči těmto extrémním podmínkám. Zároveň je známo, že vodík rád difunduje do krystalických mřížek materiálů, tudíž materiály, ze kterých jsou komponenty vyrobeny, musí odolávat například vodíkovému křehnutí nebo vodíkovým puchýřkům.

Bez kvalitní bezpečnostní stránky se neobejde žádné vodíkové hospodářství, proto je návrh bezpečnosti součástí komplexního návrhu. Zázemí musí být vybaveno detektory koncentrace vodíku, případně detektory plamene vodíku, které upozorňují na případnou vyšší koncentraci a podobně. Dále je vodíkové hospodářství vybaveno různými typy ventilů, například uzavíracími nebo pojišťovacími ventily, které by taktéž měly zabránit případné nehodě tím, že zavřou přístup vodíku z nízkotlakého vysokokapacitního zásobníku do vodíkového zázemí nebo v případě vyšších tlaků upustit přebývající tlak.

Experimentální část práce předkládá komplexní návrh vodíkového hospodářství s veškerými technologickými prvky. Návrh je zhotoven v programu CREO Parametric, ve kterém je vytvořen 3D model vodíkového hospodářství s technologickými uzly, propojením i bezpečnostními prvky. V modelu se lze snáze orientovat a dodává tak lepší prostorovou představivost umístění jednotlivých komponent. Zároveň návrh poslouží jako podklad k následné realizaci vodíkového hospodářství v příštích letech na VUT v Brně. K návrhu je vytvořen i model vodíkového hospodářství v simulačním programu GT-Suite korespondující s komplexním návrhem, který poskytuje lepší přehlednost průběhu tlaku, teplot a průtoku vodíku při plné permanenci vodíkového hospodářství.

Pro kompletní a schvátitelný návrh je nutné ovšem v budoucnu navrhnout elektrické rozvody a napojení vodíkového hospodářství k elektrické síti. Další částí, která bude nutná před schválením vyřešit, je kompletní zapojení bezpečnostních prvků k hlavní řídicí centrále vodíkového hospodářství tak, aby v případě poruchy bylo vodíkové hospodářství co nejrychleji odstaveno. Před samotným uvedením do provozu je potřeba vykonat i generální zkoušku vodíkového hospodářství. Z konstrukčního hlediska by bylo vhodné vyřešit zastřešení vodíkového zázemí i s vysokotlakým zásobníkem pro zajištění delší životnosti a připojení vodíkového hospodářství k samotnému jednoválcovému experimentálnímu motoru.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Vodík jako prvek* [online]. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch02s01.html>
- [2] KAMENÍČEK, J. *Anorganická chemie*. 4. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. Skripta. ISBN 9788024423876.
- [3] *Vodík: vlastnosti, výroba a využití* [online]. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>
- [4] ARMSTRONG, John, 2021. *The Future of Energy: Hydrogen: Hope or hype? Hydrogen in the future energy system*. Energy Technology Publishing. ISBN 9781838388645.
- [5] *Chemical, Physical and Thermal Properties of Hydrogen - H₂. Engineering Toolbox* [online]. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_1419.html
- [6] *Basic hydrogen properties. Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/basic-hydrogen-properties>
- [7] *Comparative properties of hydrogen and other fuels. Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/comparative-properties-hydrogen-and-other-fuels>
- [8] *Hydrogen – chemical element* [online], 2023. [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/hydrogen/Reactivity-of-hydrogen>
- [9] GAVRILYUK, Alexander. *Hydrogen energy for beginners*. Singapore: Pan Stanford, 2014, xv, 328 s. ISBN 978-981-4364-77-5
- [10] *Hydrogen – H*, 2022. *Lenntech* [online]. [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
- [11] *Vodík – palivo budoucnosti*, 2021. *Průmyslové spektrum* [online]. 03. 03. 2021 [cit. 2023-11-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodik-palivo-budoucnosti>
- [12] NIKOLAIDIS, Pavlos a Andreas POUILLIKKAS. *A comparative overview of hydrogen production processes*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 67, 597-611 [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- [13] EL-SHAFIE, Mostafa, Shinji KAMBARA a Yukio HAYAKAWA. *Hydrogen Production Technologies Overview*. *Journal of Power and Energy Engineering* [online]. 2019, 7(1) [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: doi:[10.4236/jpee.2019.71007](https://doi.org/10.4236/jpee.2019.71007)

- [14] AMIN, Muhammad, Eunhyea CHUNG a Adeel ZIA. *Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change* [online]. **2022**(1) [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.172>
- [15] MEZIANE, Boudellal, 2018. *Power-to-Gas – Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition*. De Gruyter. ISBN 9783110559811.
- [16] DINCER, Ibrahim a Canan ACAR. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. **2015**(1) [cit. 2023-11-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- [17] GUPTA, Nikunj, Kun ZHANG a James FESMIRE. *Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation* [online]. **2021**(1) [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.025>
- [18] Co je to palivový článek, 2019. *Třipól* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/1084-co-je-to-palivovy-clanek>
- [19] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2004, s. 186-198. ISBN 80-239-1602-5.
- [20] BARBIR, Frano. *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. 2. Waltham (Massachusetts): Elsevier, 2013, s. 10-11. ISBN 978-0-12-387710-9.
- [21] *Comparison of Fuel Cell Technologies* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2016 [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuel-cells/articles/comparison-fuel-cell-technologies-fact-sheet>
- [22] KOTCHOURKO, Alexei a Thomas JORDAN, ed., 2022. *Hydrogen Safety for Energy Applications Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards*. Butterworth-Heinemann. ISBN 9780128204924.
- [23] VÁCHOVÁ, Miluše, 2020. *BEZPEČNOST VODÍKOVÝCH SYSTÉMŮ*. VŠB TUO.
- [24] Four different types of hydrogen sensors work, 2023. *LinkedIn* [online]. [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/four-different-types-hydrogen-sensors-work-pinckney-ca0?fbclid=IwAR1gyDAx8A3Q9DmnXhzkm9SUU16mkGamFZZnlYIX1fp2rVR7vMYZKc7pfHs>
- [25] CHENGHAO, Jia, Zhao LING a Litao LIU, 2023. *A Review of Hydrogen Sensors for ECLSS: Fundamentals, Recent Advances, and Challenges* [online]. **2023** [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/app13126869>
- [26] Zelená dohoda pro Evropu, 2021. *Evropská komise* [online]. [cit. 2024-03-30]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs

- [27] Česká vodíková technologická platforma, 2024. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/platforma/o-nas>
- [28] *Vodíková strategie České republiky* [online], 2021. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf
- [29] Sbírka zákonů, 2024. *Zákony pro lidi* [online]. [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/hledani?text=vod%C3%ADk>
- [30] Technické normy, 2023. *Technické normy* [online]. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/>
- [31] PLNICÍ STANICE STLAČENÉHO VODÍKU PRO MOBILNÍ ZAŘÍZENÍ, 2019. *Český plynárenský svaz* [online]. [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: https://www.cgoa.cz/ts/pdfdoc/pripominkovarizeni/TPG_304_03_KN_27_11_2019.pdf
- [32] Standards by ISO/TC 197 Hydrogen technologies, 2023. *ISO* [online]. [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.iso.org/committee/54560/x/catalogue/>
- [33] SAE J2601, 2023. *NORMSERVIS* [online]. [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://eshop.normservis.cz/norma/sae-j2601-1.5.2020.html>
- [34] BIGA, Roberta, Artem KOLISCHNICENKO a Paolo MAROCCO. *Potential and technical challenges of on-board hydrogen storage technologies coupled with fuel cell systems for aircraft electrification* [online]. **2022** 2-3 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi: doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232397
- [35] MAZLOMI, Kaveeh a Chandima GOMEZ, 2012. *Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi:DOI:10.1016/j.rser.2012.02.028
- [36] VIDAS, Leonardo, Rui CASTRO a Armando PIRES. A Review of the Impact of Hydrogen Integration in Natural Gas Distribution Networks and Electric Smart Grids. *Energies (Basel)* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi:10.3390/en15093160
- [37] SHERIF, S.A., D. Yogi GOSWAMI, Elias K. STEFANAKOS a Aldo STEINFELD, ed. TAYLOR & FRANCIS GROUP. *Handbook of Hydrogen Energy*. New York: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4200-5447-7.
- [38] Vodíkové zkapalňovače, 2024. *Chart Industries* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://cz.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Liquefiers>
- [39] *Hydro race* [online]. [cit. 2023-11-05]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku>
- [40] GOMEZ, Julian a Diogo STATUS, 2023. The Status of On-Board Hydrogen Storage in Fuel Cell Electric Vehicles. *Designs* [online]. **1**(1), 1-16 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/designs7040097>

- [41] SANKIR, Mehmet a Nurdan Demirci SANKIR. *Hydrogen Storage Technologies*. Hoboken (USA): John Wiley and Sons, 2018, 352 s. ISBN 978-1-119-45988-0.
- [42] *Hydrogen Compressors, 2023. Indian Compressor Ltd* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.didwania.com/hydrogen-compressors.html>
- [43] *Review of Decompression Damage of the Polymer Liner of the Type IV Hydrogen Storage Tank, 2023. MDPI* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/10/2258>
- [44] LEONEMKO, Yuri, Hassan HASSANZADECH a Seyed Mostafa Jafari RAAD, 2022. Hydrogen storage in saline aquifers: Opportunities and challenges. *Renewable and suitable energy reviews* [online]. **1**(2), 1-10 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112846](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112846)
- [45] BOUDELLAL, Dr. Méziane. *Power-to-Gas*. Balma (Francie): Walter de Gruyter GmbH, 2018. ISBN 978-3-11-055881-4.
- [46] DU, Zhemin, Congmin LIU, Junxiang ZHAI, Xiuying GUO, Yalin XIONG, Wei SU a Guangli HE. A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles. *Catalysts* [online]. 2021, **11**(3), 1-19 [cit. 2024-03-31]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: [doi:10.3390/catal11030393](https://doi.org/10.3390/catal11030393)
- [47] *New class of hydrogen ship design unveiled, 2024. WorkBoat* [online]. [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.workboat.com/bluewater/new-class-of-hydrogen-ship-design-unveiled>
- [48] MAIR, G.W., S.V. THOMAS, B. SCHALAU a B. WANG. Safety criteria for the transport of hydrogen in permanently mounted composite pressure vessels. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. **1**(1), 1-12 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.268](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.268)
- [49] *Hydrogen embrittlement. Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-embrittlement>
- [50] KNOSHNAW, Fuad a Rolf GUBNER, ed. Part II: Corrosion Topics. In: *Corrosion Atlas Case Studies* [online]. 2021 ed., 2021, s. 43–68 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85849-6.02003-5>
- [51] *Vodíková křehkost, 2020. Bossard* [online]. [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/white-paper/bossard_whitepaper_vodkov-kehkost_cz_11-2020.pdf?la=cs
- [52] *Material Compatibility, 2021. Hydrogen tools* [online]. [cit. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/material-compatibility>
- [53] BARTHELÉMY, Hervé, 2012. Hydrogen storage e Industrial perspectives. *Hydrogen Energy* [online]. **1**(1), 1-9 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: [doi:doi:10.1016/j.ijhydene.2012.04.121](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.04.121)

- [54] Compatibility of hydrogen with different materials. In: *HyResponder: European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders* [online]. HyResponder Consortium, June 2021 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/Lecture-4-slides.pdf>
- [55] Filling up with H₂, 2024. *H2* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://h2.live/en/>
- [56] Statistics: Hydrogen Infrastructure, 2023. *H2stations.org* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.h2stations.org/statistics/>
- [57] První vodíková stanice v ČR, 2009. *Autokaleidoskop* [online]. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://www.autokaleidoskop.cz/Ruzne/Prvni-vodikova-stanice-v-CR/>
- [58] Plnicí stanice vodíku, 2022. *Vitkovice a.s.* [online]. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://www.vitkovice.cz/energetika/plnici-stanice-vodiku/a-196/>
- [59] ORLEN Unipetrol otevřel veřejnou vodíkovou stanici v Praze na Barrandově, 2023. *ORLEN* [online]. [cit. 2023-11-24]. Dostupné z: <https://www.orlenbenzina.cz/promedia/orlen-unipetrol-otevrel-verejnou-vodikovou-stanici-v-praze-na-barrandove>
- [60] BAUER, Artur, Thomas MAYER, Malte SEMMEL, Martin Alberto GUERRERO MORALES a Joerg WIND. Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.01.087
- [61] KHAN, Mohd Adnan, Cameron YOUNG, Catherine MACKINNON a David B. LA-YZELL. *The Techno-Economics of Hydrogen Compression: Technical Brief* [online]. 1. The Transition Accelerator, 2021 [cit. 2024-01-28]. ISSN 2564-1379. Dostupné z: <https://transitionaccelerator.ca/techbrief-techno-economics-hydrogen-compression/>
- [62] FARZANEH-GORD, Mahmood, Mahdi DEYMI-DASHTEBAYAZ, Hamid Reza RAHBARI a Hamid NIAZMAND. Effects of storage types and conditions on compressed hydrogen fuelling stations performance. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2011.11.017
- [63] REDDI, Krishna, Amgad ELGOWAINY, Neha RUSTAGI a Erika GUPTA. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2017, [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.04.233
- [64] ELGOWAINY, Amgad, Krishna REDDI, Dong-yeon LEE, Neha RUSTAGI a Erika GUPTA. Techno-economic and thermodynamic analysis of pre-cooling systems at gaseous hydrogen refueling stations. *International journal of hydrogen energy* [on-line]. OXFORD: Elsevier, 2017, [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.09.087
- [65] XIANMING, Jimmy Li, D. Allen JEFFREY, A. Stager1 JERAD a Y.Ku ANTHONY, 2020. Paths to low-cost hydrogen energy at a scale for transportation applications in the USA and China via liquid-hydrogen distribution networks. *Clean*

- Energy* [online]. 2020(1), 1-22 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: doi:doi:10.1093/ce/zkz033
- [66] An Introduction to SAE Hydrogen Fueling Standardization, 2014. *Department of energy* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/fcto_webinarslides_intro_sae_h2_fueling_standardization_091114.pdf
- [67] Hytron HyPem electrolyzer, 2024. *HyFinder* [online]. [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: https://hyfindr.com/marketplace/systems/electrolysers/pem-electrolysers/nea-hytron-hypem-electrolyzer/
- [68] KOVAC, Ankica, Doria MARCIUS a Matej PARANOS, 2020. Thermal management of hydrogen refuelling station housing on an annual level. *International journal of hydrogen energy* [online]. 2020, 1-11 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.013
- [69] Hydrogen refuelling stations & infrastructure, 2021. *HyResponder* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/L12_HyResponder_L4_210622.pdf
- [70] Jak odvětrat prostředí s nebezpečím výbuchu, 2020. *Ventilatory.cz* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://www.ventilatory.cz/jak-odvetrat-prostredi-s-nebezpecim-vybuchu-x31549
- [71] LindeGas - Vodík, 2024. *LindeGas* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/vodik
- [72] HYDROGEN EUROPE – TECH [Overview], 2012. *Hydrogene Europe* [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: https://hydrogeneurope.eu/
- [73] Průvodce světem lodních kontejnerů, 2024. *Lodní kontejnery levně* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.lodni-kontejnery-levne.cz/?page_id=54
- [74] Příprava stavebních základů pro kontejner, 2022. *Equiway.cz* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.equiway.cz/blog/priprava-stavebnich-zakladu-pro-kontejner/
- [75] ACCUMULATOR SHELLS AND PRESSURE VESSELS, 2024. *Vitkovice Cylinders a.s.* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: https://www.vitkovicecylinders.cz/en/telesa-akumulatoru-a-tlakove-nadrze/p-1/
- [76] ROZVOJ VODÍKOVÉ MOBILITY V OSTRAVĚ, 1. ETAPA 1. A 2. FÁZE: PS 01 - TECHNOLOGIE VODÍKOVÉ PLNÍČÍ STANICE – 1. FÁZE, 2021. In: .
- [77] EQUIWAY s.r.o., 2024. *Equiway* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: https://www.equiway.cz/
- [78] Sendvičové panely, 2024. *Equiway* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: https://www.equiway.cz/sendvicove-panely/

- [79] Jaký je rozdíl mezi PUR a PIR pěnou?, 2022. *PUR Izolace* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.pur.cz/jaky-je-rozdil-mezi-pur-a-pir-penou/>
- [80] Šroub samovrtný ON pro sendvič do kovu max 12 mm + AL podl. 19 mm - ZN, 2024. *Atila shop* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.atilashop.cz/sroub-samovrt-on-pro-sendvic-do-kovu-max-12-mm-al-podl--19-mm-zn/>
- [81] Pasivní ventilace - Passive ventilation, 2021. *Encyklopedie* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/Passive_ventilation
- [82] Protipožární aplikace, 2024. *Cetris* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.cetris.cz/systemy/pozarni-systemy/>
- [83] PRODMAX 100 Roura 1000 mm /0,6mm nerez, 2024. *MBTERM* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: https://www.mbterm-krby.cz/p/4273-prodmax-100-roura-1000-mm-0-6mm-nerez?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAxOauBhCaARIsAEbUSQQz9ktebh2rDf9kt4g1d6BIfaYP3i0g8CqfJeM6znnazsdqOkCjRS8aAtDsEALw_wcB
- [84] Komínová kotvící objímka, Ø 100mm - turbo, 2024. *Komíny Bokra* [online]. [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.kominy-bokra.cz/kominova-kotvici-objimka-o-100mm-turbo-p334>
- [85] DV-EXStřešní ventilátory, 2022. *Systemair* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.systemair.com/cs-cz/vyrobky/ventilatory/stresni-ventilatory/dv/dv-ex>
- [86] Nástěnný ventilátor do výbušného prostředí na 230V/400V O.ERRE EB 25 4T EX ATEX Ø 260 mm, 2022. *Ventilatory.cz* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/nastenny-ventilator-do-vybusneho-prostredi-na-230v-400v-o-erre-eb-35-4t-ex-atex-o-260-mm-x11034>
- [87] Ventilační mřížka z vysoce kvalitního extrudovaného hliníku 450x200 mm, šedá, 2023. *Ventilatory.cz* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.ventilatory.cz/ventilacni-mrizka-z-vysoce-kvalitniho-extrudovaneho-hliniku-450x200-mm-seda>
- [88] Smart solutions for hydrogen transport and storage, 2024. *Vitkovice Cylinders a.s.* [online]. [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: <https://www.vitkovicecylinders.cz/cs/ke-stazeni/a-5/>
- [89] High pressure hydrogen gas booster DLE 30-2, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/hydrogen-gas-boosters/high-pressure-hydrogen-gas-booster-dle-30-2/>
- [90] Power Pack Type GM 1600 DLE30, 2024. *Maximator* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.maximator.ae/products/rental-units/rental-units-for-gases-up-to-2100-bar/power-pack-type-gm-1600-dle30/>
- [91] Multispiral pipe heat exchanger, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/heat-exchangers/shell-and-tube-heat-exchanger/single-spiral-pipe-and-multi-spiral-pipe-heat-exchanger-flovex/>

- [92] Hydrogen cooling system H2PCU, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/systems/hydrogen-cooling-systems/hydrogen-cooling-system-h2pcu/>
- [93] Valves, Fittings And Tubing, 2024. *Maximator* [online]. [cit. 2024-04-11]. Dostupné z: <https://www.maximator.co.uk/products/vft/>
- [94] Otázka 6: Kde lze umístit vodíkovou plnicí stanicí?, 2020. In: *APT s.r.o.* [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.apr.cz/newspaper/q6z>
- [95] ISO 26142, 2024. *ISO* [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/52319.html>
- [96] Detektor plynu pro vodík EVIKON E2630-LEL(H₂)-24, 2024. *BOLA* [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.bola.cz/detektor-plynu-pro-vodik-evikon-e2630-lel-h2-24>
- [97] Detektor plamene FlameSpec UV-IR, 2023. <https://www.detekceplynu.cz/> [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.detekceplynu.cz/product/detektor-plamene-flamespec-uv-ir/>
- [98] Hydrogen pressure sensor - Druck UNI5000H, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/sensors/pressure-sensors/hydrogen-pressure-sensor-druck-unik5000h/>
- [99] Hydrogen Pressure Gauge - Ashcroft 8009S, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/gauges/pressure-gauges/hydrogen-pressure-gauge-8009s/>
- [100] Ball check hydrogen valve, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/valves/ball-check-hydrogen-valve/>
- [101] Hydrogen high pressure solenoid valve - Type 3108 A, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/valves/hydrogen-high-pressure-solenoid-valve/>
- [102] Hydrogen pressure relief valve - Series 492, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/valves/hydrogen-pressure-relief-valves/hydrogen-pressure-relief-valve-series-492/>
- [103] Hydrogen Ball Valves - Redfluid, 2024. *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-04-12]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/en/shop/products/hydrogen-ball-valves-redfluid>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AUT	Rakousko
BEL	Belgie
C	Uhlík (prvek)
CNG	Stlačený zemní plyn
ČR	Česká republika
ČSN	Česká technická norma
DIN	Německá technická norma
EN	Evropská norma
EPDM	Etylen-propylen-dienový kaučuk
Fe	Železo (prvek)
Fe ₃ C	Karbid železa
FRA	Francie
GER	Německo
H	Vodík (prvek)
H ₂ (g)	Vodík v plynném skupenství
H ₂ O(l)	Voda
H35	Přípojka plnění na tlak 350 bar
H70	Přípojka plnění na tlak 700 bar
HYTEP	Česká vodíková technologická platforma
IR	Infračervené záření
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
LaNi ₅ H ₆	Hydrid lanthano-nikelný
LNG	Zkapalněný zemní plyn
LPG	Zkapalněný ropný plyn

MgH ₂	Hydrid hořčíku
NaAlH ₄	Hydrid sodno-hlinitý
NDL	Nizozemsko
O ₂ (g)	Kyslík v plynném skupenství
PEM	Protonová výměnná membrána
PIR	Tvrdá pěna z polyisocyanurátu
R _m	Mez pevnosti
SAE	Sdružení automobilních inženýrů
SOE	Elektrolyzér pevných oxidů
SUI	Švýcarsko
TiV ₂ H ₄	Hydrid titano-vanadnatý
TPRD	Upouštěcí ventil
UV	Ultrafialové záření
VUT	Vysoké učení technické
ZrMn ₂ H ₃	Hydrid manganato-zirkoničitý
V_{celk}	Celkový minimální vypočítaný objem zásobníku
$V_{nádoby}$	Vodní objem jedné nádoby zásobníku
$m_{zásoby}$	Zvolená hmotnost zásob vodíku
$n_{nádob}$	Počet navržených nádob
$\rho_{vodíku}$	Hustota vodíku při 200 bar

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – 3D_model_kontejneru.zip

Příloha 2 – Model_vodíkové_stanice_GT.zip