Zadavatel: Exelsior Engineering a.s.

Společnost **Exelsior Engineering a.s.** tuto studii poskytuje volně k dispozici pro vývojáře a studenty pro jejich diplomové práce

Vodíkové generátory elektřiny: předaplikační studie použití palivových článků

1 Zaměření a cíle studie

Předmětem studie je využití generátorů elektřiny založených na vodíkových palivových článcích k prodloužení dojezdu elektrických pohonných jednotek. Studie se zaměřuje na následující oblasti:

1. lodní doprava,
2. nákladní automobily,
3. letectví.

Studie zahrnuje posouzení proveditelnosti vývoje a výroby generátoru pro výše uvedená použití. Uvažovaným zařízením je generátor založený na palivovém článku s protonově výměnnou membránou (PEM), který poskytuje 30 kW nepřerušovaného elektrického výkonu. Studie posuzuje i některé aspekty zvyšování výkonu zařízení až na 200 kW. Součástí studie je rešerše odborné literatury, analýza dodavatelského trhu a výpočty potřebné k návrhu zařízení. Zaměřujeme se na následující body:

- Návrh řešení s využitím komerčních svazků palivových článků
- Mechanická konstrukce, analýza hmotnosti
- Návrh vodíkového úložiště
- DC-DC převodník, možnosti realizace nabíjení baterií
- Kompresory, chlazení
- Využití odpadního tepla pro ohřev vody
- Projekt automatizace
- Rozpočet a délka realizace projektu prototypu

Tato studie je majetkem Exelsior Engineering a.s.

2 Obsah

1 Zaměření a cíle studie 1
2 Obsah 2
3 Konstrukce systému 5
3.1 Specifikace 5
3.1.1 Lodní doprava 5
3.1.2 Nákladní doprava 5
3.1.3 Letectví 5
3.2 Elektrické pohony 5
3.3 Systém palivových článků 6
3.3.1 Jednosvazková architektura 9
3.3.2 Vícesvazková architektura 9
3.3.3 Spotřeba plynů 10
3.3.4 Velikost a hmotnost 11
3.3.5 Materiály 11
4 Palivové články: svazky a moduly 11
4.1 Svazky 11
4.2 Dodavatelé 13
5 Vodíkový systém 15
5.1 Skladování vodíku a plnící systém 15
5.1.1 Stlačený vodík 16
5.1.2 Zkapalněný vodík 20
5.2 Přívod vodíku 20
5.2.1 Ejektor 21
5.2.2 Dodavatelé 21
6 Vzduchový systém 21
6.1 Vzduchový kompresor 22
6.2 Turbodmychadlo 23
6.3 Účinnost 23
6.4 Dodavatelé 23
7 Elektrický systém 24
7.1 Napěťové měniče 24

7.1.1 Dodavatelé 24
7.2 Nabíjení baterií 24
8 Chlazení 25
8.1 Chlazení palivových článků 25
8.1.1 Vodní chlazení 25
8.1.2 Chlazení se změnou skupenství 27
8.2 Využití tepla 28
8.3 Dodavatelé 29
9 Automatizace a řízení 29
9.1 Hardware pro automatizaci 29
9.1.1 Návrh řídicího systému 29
9.2 Řídicí software 31
9.2.1 Energy Management System (EMS) 32
9.2.2 Řídicí systém palivových článků 32
10 Scale-up 33
10.1 Svazek palivových článků 33
10.2 Vodíkový systém 33
10.3 Vzduchový systém 33
10.4 Měnič napětí 34
10.5 Chlazení 34
10.6 Automatizace 34
11 Projekt prototypu 34
11.1 Rozpočet 34
11.2 Řízení projektu 35
11.2.1 Hardware 36
11.2.2 Software 36
11.3 Masová produkce 36
12 Příloha I: Fyzikální vlastnosti 37
12.1 Vlastnosti vodíku 37
12.2 Vlastnosti kyslíku / vzduchu 38
13 Příloha II: Rovnice 38
13.1 Reakce palivového článku 38
13.2 Spotřeba plynů 39

13.2.1 Samostatný článek 39
13.2.2 Svazek palivových článků 40
13.2.3 Kyslík / vzduch 40
13.2.4 Vodík 41
13.3 Produkce vody 41
13.4 Účinnost 41
13.4.1 Účinnost svazku 41
13.5 Produkce tepla 42
13.6 Spotřeba paliva 42
14 Příloha III: Přehled konkurentů 43
15 Literatura 43

3 Konstrukce systému

3.1 Specifikace

Tato studie je zaměřena na tři různá použití palivových článků: lodě, nákladní automobily a letectví. V této části jsou shrnuta specifika a omezení těchto oblastí s ohledem na konstrukci jejich pohonných jednotek.

3.1.1 Lodní doprava

Použití elektrického pohonu v lodích obnáší řadu překážek, část z nich je relevantní i pro použití vodíkových generátorů:

- Bezpečnostní omezení na **nízká napětí** kvůli vodivému prostředí
- Zpětné **získávání energie** při zpomalování
- **Agresivní prostředí** v případě slané vody

3.1.2 Nákladní doprava

Nákladní automobily jsou klíčovou součástí moderních dodavatelských řetězců. Segment automotive podléhá přísné regulaci a standardizaci, pohonné systémy tedy musí splňovat tyto průmyslové standardy. Mezi hlavní rysy konstrukce nákladních automobilů patří:

- **Omezený** prostor
- Vysoká úroveň **vibrací** a mechanického napětí
- **Dynamický** provozní režim (střídání zrychlování a zpomalování).

3.1.3 Letectví

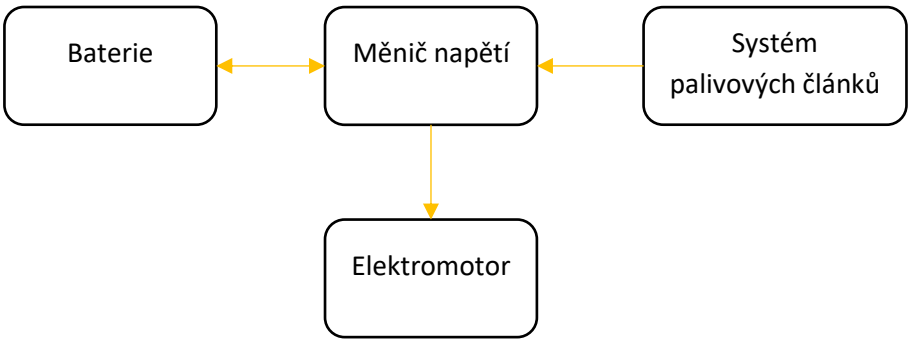
Ze samotné podstaty letectví vyplývá, že se jedná o nejkomplexnější a nejpokročilejší komerční průmyslové odvětví. Na konstrukci elektrických letadel jsou kladeny vysoké nároky především z následujících důvodů:

- **Nízko-napěťové** systémy pro zajištění bezpečnosti
- Co nejnižší možná **hmotnost**
- Předvídatelnost **doletu**

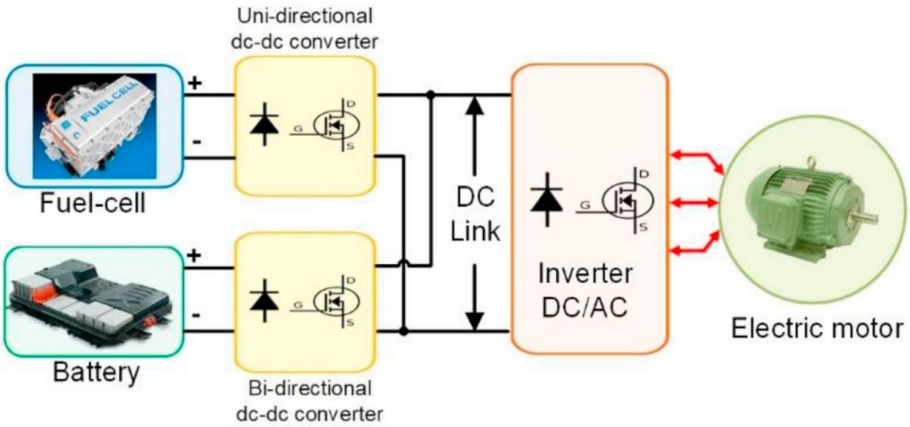
3.2 Elektrické pohony

Vozidlo či plavidlo poháněné elektrickou energií obsahuje mnoho komponent a systémů. Ty, které jsou nezbytné pro pohyb vozidla jsou součástí tzv. pohonného systému. Mezi hlavní komponenty elektrického pohonného systému patří [1] :

1. Elektromotor,
2. Měniče napětí,
3. Baterie,
4. Generátor / prodlužovač dojezdu (systém palivových článků).



Obrázek 1: Zjednodušený diagram elektrického pohonného systému.



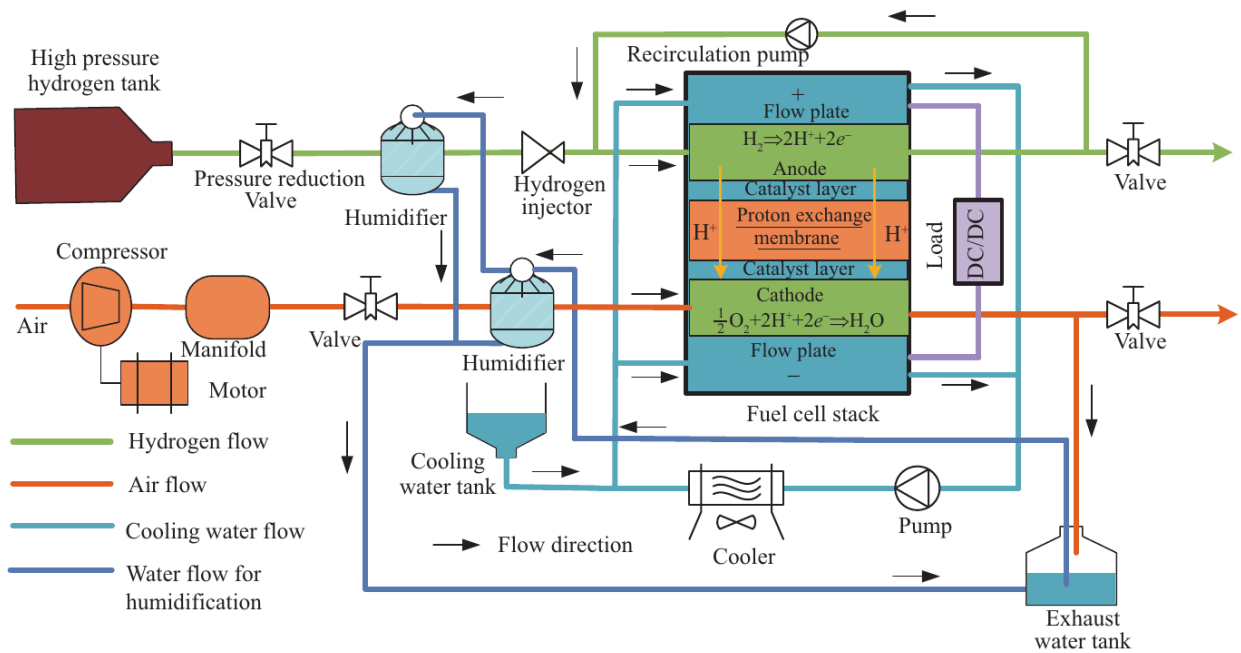
Obrázek 2: Schematický diagram hybridního pohonu s použitím palivových článků. Převzato z [2].

V závislosti na použití nemusí systém obsahovat všechny výše uvedené součásti. Čistě bateriová vozidla (BEV) neobsahují generátor a nabíjí se z elektrické sítě. Oproti tomu vozidla na palivové články nemusí obsahovat baterie, typicky však alespoň nějaké obsahují. Široká škála hybridních pohonů (HEV) kombinuje tyto přístupy, často s použitím klasického spalovacího motoru (ICE).

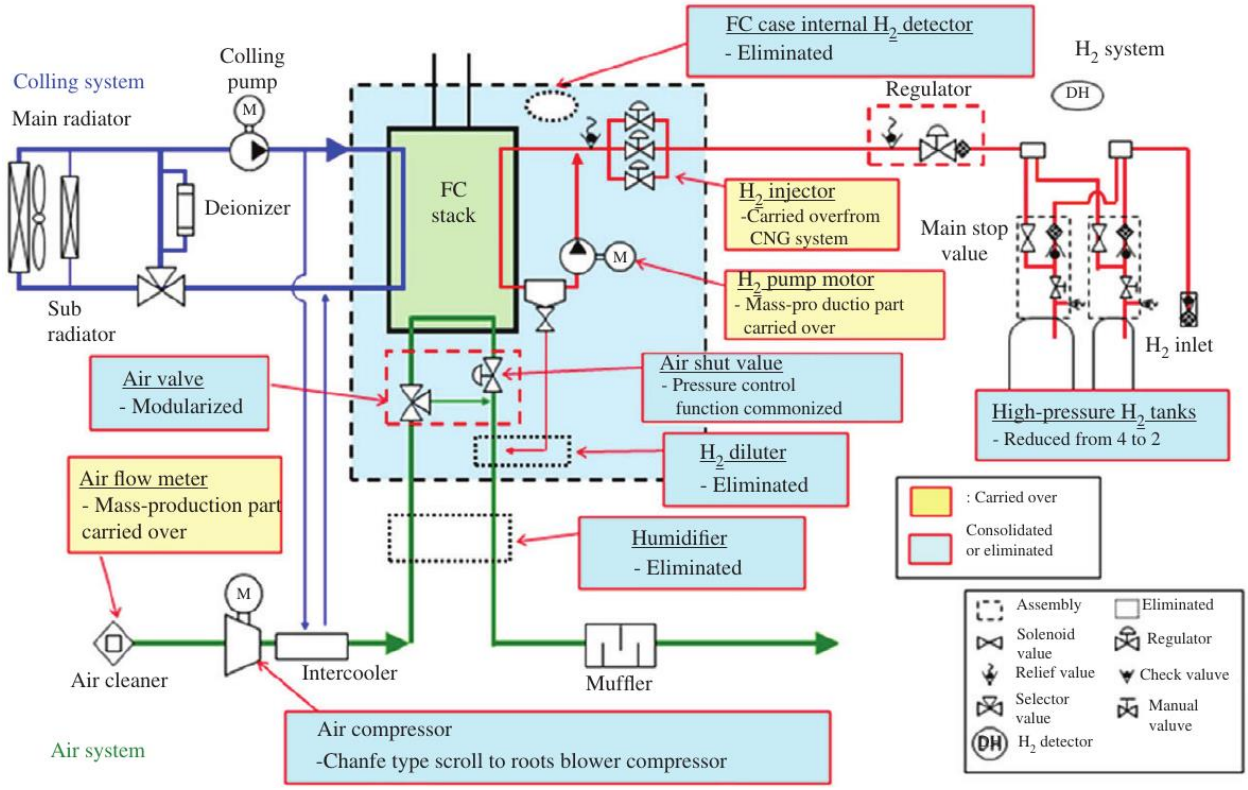
Tato studie se zaměřuje na použití systému vodíkových palivových článků jakožto prodlužovače dojezdu pro primárně bateriový elektrický pohon.

3.3 Systém palivových článků

Generátor založený na vodíkových palivových článcích obsahuje kromě samotného palivového článku ještě řadu dalších komponent nutných k jeho správnému fungování (pro systém palivových článků bude dále používána anglická zkratka FCS – fuel-cell system). Obrázek 3 a Obrázek 4 znázorňují zjednodušené diagramy FCS pro obecný automotive pohon a konkrétní systém vozidla Toyota Mirai.



Obrázek 3: Detailní schéma systému palivových článků. Převzato z [3]

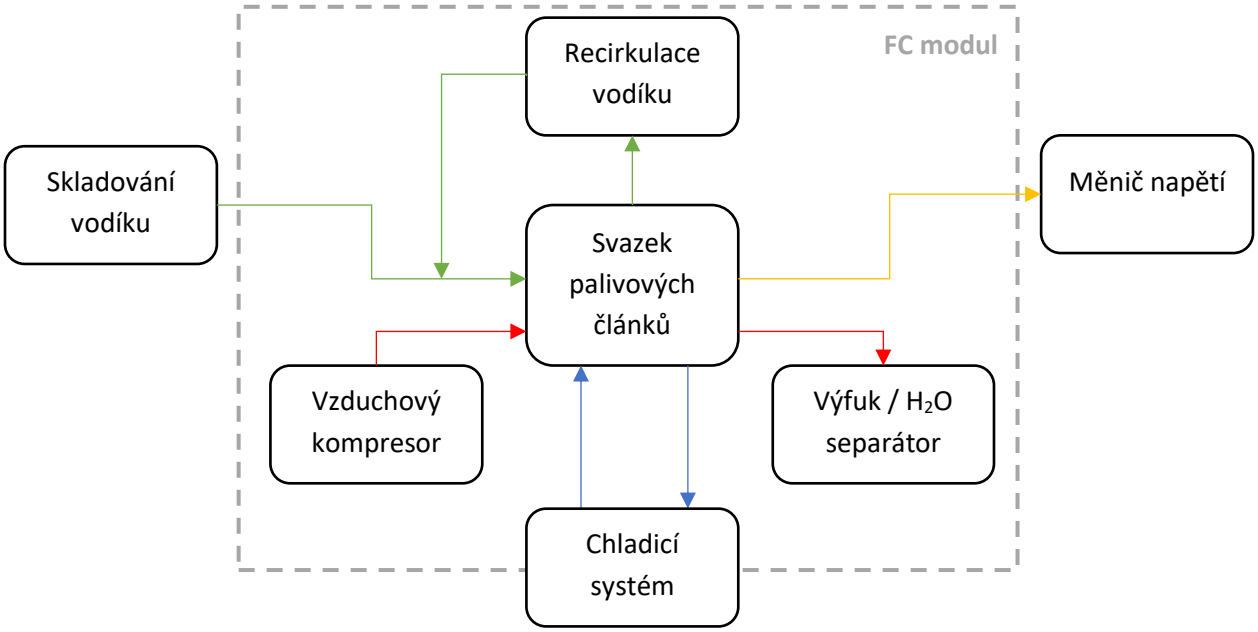


Obrázek 4: Schéma systému palivových článků vozidla Toyota Mirai. Převzato z [4].

Na základě provedené literární rešerše lze usuzovat, že komponenty obecného FC systému jsou následující:

1. Svazek palivových článků

2. Vodíkový systém
    a. Skladování vodíku
    b. Systém recirkulace vodíku
    c. (Zvlhčovač)
    d. (Odlučovač vody)
3. Vzduchový systém
    a. Vzduchový filtr
    b. Vzduchový kompresor
    c. (Zvlhčovač)
    d. (Regulátor tlaku)
    e. (Odlučovač vody)
4. Měnič napětí (stejnosměrný)
5. Chladicí systém
    a. Čerpadlo chladicí vody
    b. Radiátor / tepelný výměník
    c. De-ionizátor
6. Řídicí systém



Obrázek 5: Zjednodušený diagram FC systému se znázorněním části nazývané jako FC modul.

Řada výrobců palivových článků nabízí takzvané FC moduly (terminologie se různí). Pro účely této studie používáme termín FC modul pro FC systém bez skladování vodíku, měniče napětí a vnější části chladicího systému. Tuto část znázorňuje i Obrázek 5. Výhodou tohoto uspořádání je skutečnost, že FC modul je relativně univerzální a zároveň obsahuje klíčové součásti FC systému.

3.3.1 Jednosvazková architektura

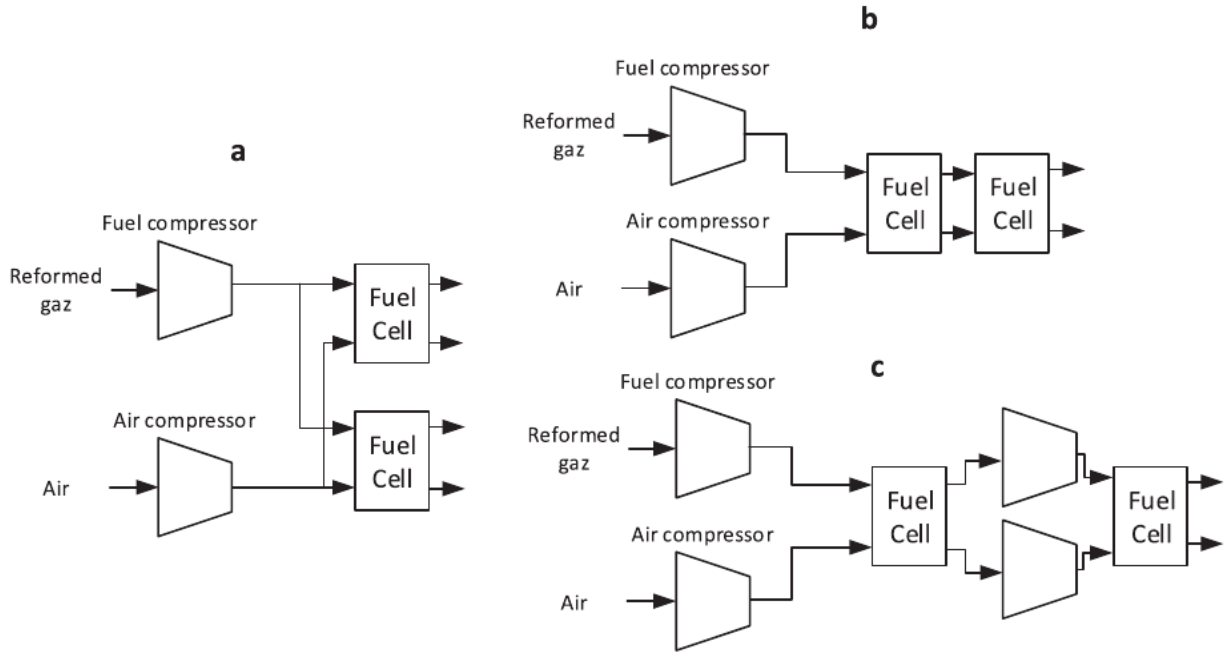
V případě, že požadovaný výkon palivových článků přesahuje jednotky kilowatt, je na místě uvažovat, zda použít jeden velký svazek, či více menších. Jednosvazková architektura se vyznačuje především vyšší kompaktností. Proto je také použita u všech v současné době dostupných osobních automobilů používajících palivové články. Mezi tyto patří Toyota Mirai, Honda Clarity a Hyundai Nexo. Nevýhodou tohoto systému je nutnost přizpůsobení konstrukce pro různé aplikace a z toho vyplývající vyšší cena.

3.3.2 Vícesvazková architektura

Pokud nejsou prostorová omezení zásadní, použití vícesvazkové architektury může mít řadu výhod. Mezi nejdůležitější patří možnost použití standardních produktů dostupných na trhu a tím pádem nižší cena. Nevýhodou tohoto přístupu je narůstající komplexita systému, svazky musí být propojeny jak elektricky, tak z hlediska přívodů a odvodů plynů a chladicího systému [5].

Vícesvazková architektura rovněž umožňuje použití modulárního přístupu. Dle zjištění nedávné studie [6] používá většina prototypů aplikujících palivové články v oblasti lodních pohonů modulární přístup vzhledem jeho lepší škálovatelnosti. V případě lodí rovněž vede použití vícero menších zařízení k lepšímu využití prostoru než v případě jednoho většího zařízení.

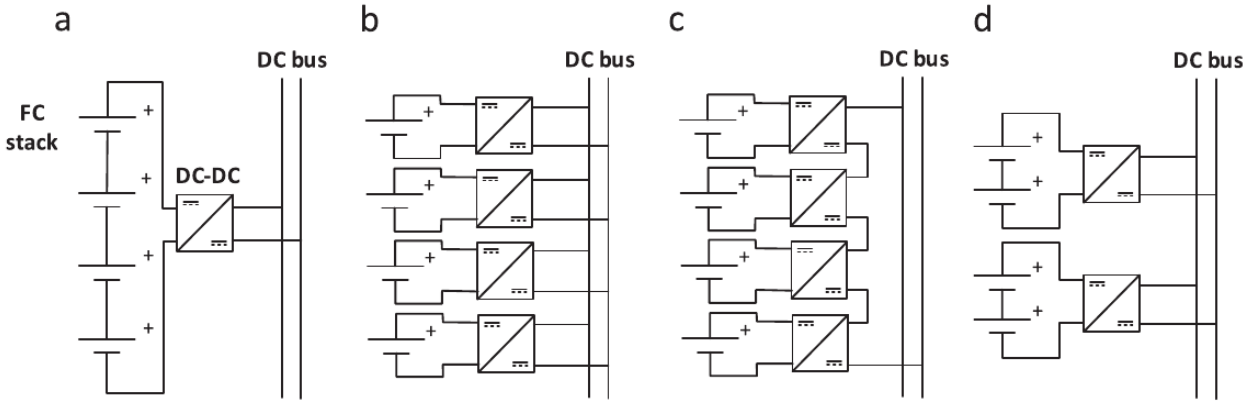
V literatuře lze nalézt různé konfigurace přívodů plynů pro případ vícesvazkové architektury (viz Obrázek 6). Při sériovém zapojení svazků (Obrázek 6b,c) byl pozorován vyšší výkon svazků, než při paralelním zapojení (Obrázek 6a). Výsledný výkon celého systému je ovšem závislý na provozních podmínkách. Dodatečné kompresory (Obrázek 6c) odebírají část výkonu svazků, což vede k nižšímu celkovému výkonu.



Obrázek 6: Konfigurace přívodů plynů pro vícesvazkovou architekturu. Převzato z [5].

Elektrické připojení více svazků skýtá velký prostor pro přizpůsobení konkrétním potřebám projektu. Zapojení může být buď sériové nebo paralelní. Neméně důležitý je i počet měničů napětí, jak znázorňuje Obrázek 7. Sériové zapojení svazků vede k vyššímu celkovému napětí a použití vícero měničů napětí

usnadňuje řízení celého systému [5]. Výkon jednotlivých svazků se v čase mění, možnost řídit každý z nich zvlášť tedy zaručí, že fungují v optimálním režimu a nejsou omezeny nejslabším článkem řetězce.

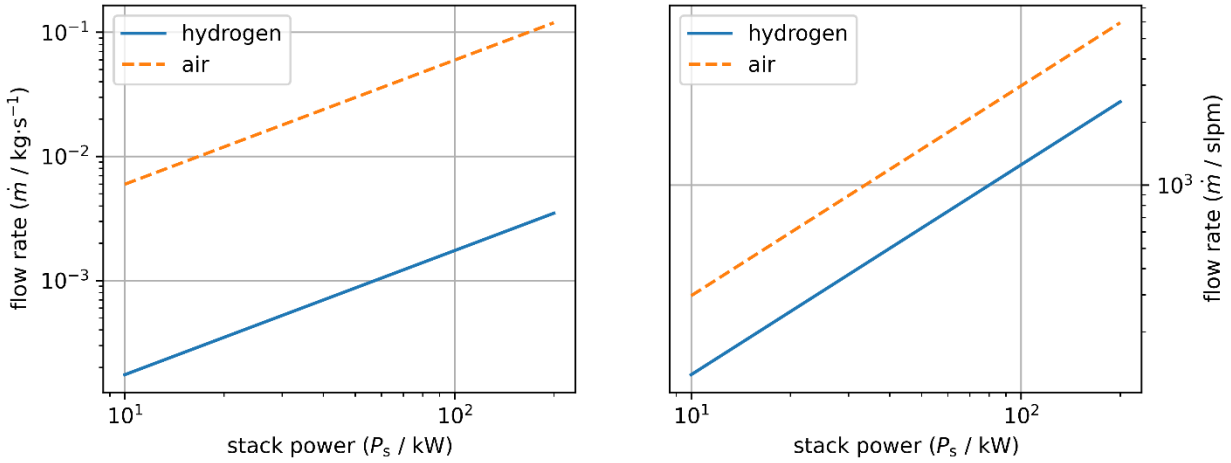


Obrázek 7: Elektrická konfigurace vícesvazkové architektury. Převzato z [5].

K tepelné integraci vícesvazkových systémů nebyly v literatuře nalezeny spolehlivé prameny. V principu se ovšem nabízejí podobné konfigurace, jako v předchozích případech, tj. sériové či paralelní zapojení, společné či individuální řízení. Při konstrukci systému je nutné předcházet jevům, jako je lokální přehřívání, či dlouhá dopravní zpoždění.

3.3.3 Spotřeba plynů

Pro správné dimenzování podpůrných komponent svazku palivových článků je důležité znát závislost spotřeby plynů na parametrech systému, především na výkonu svazku. Tyto závislosti jsou detailně popsány v sekci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**. Závislost hmotnostního průtoku vodíku a plynu na výkonu svazku znázorňuje Obrázek 8. Svazek s výkonem 30 kW má spotřebu 380 slpm vodíku a 890 slpm vzduchu. Toto jsou minimální průtoky odpovídající stechiometrii 1. V praktických aplikacích bude reálná spotřeba cca 1,1x vyšší u vodíku a 2x vyšší u vzduchu



Obrázek 8: Hmotnostní průtok plynů v závislosti na výkonu svazku pro vodík a vzduch. $\lambda = 1$, $U_c = 0.6$ V

3.3.4 Velikost a hmotnost

Konstrukce FC systému podléhá řadě omezení. Mezi nejdůležitější faktory pro mobilní aplikace patří velikost a hmotnost. Úřad pro energetiku Spojených států (DoE) zveřejňuje technické specifikace požadovaných charakteristik pro FC moduly (viz Tabulka 1).

Tabulka 1: Požadavky na charakteristiky FC modulů pro použití v lehkých nákladních automobilech [7]. Hodnoty uvedeny pro systém (modul) bez skladování vodíku, měničů napětí a elektromotoru.

Parametr modulu	Jednotky	2020	Definitivní
Energetická účinnost (ve špičce)	%	65	70
Měrný výkon	kW/kg	0,650	0,650
Výkonová hustota	kW/L	0,650	0,850
Cena	$/kW	40	30

Dle všeho se zdá, že u modulů dostupných na trhu nejsou splněny ani požadavky pro rok 2020. Měrný výkon se typicky pohybuje okolo $0.4\ \mathrm{kW/kg}$ a výkonová hustota okolo $0.4\ \mathrm{kW/L}$ [8]. Některé systémy však mají ještě horší parametry.

3.3.5 Materiály

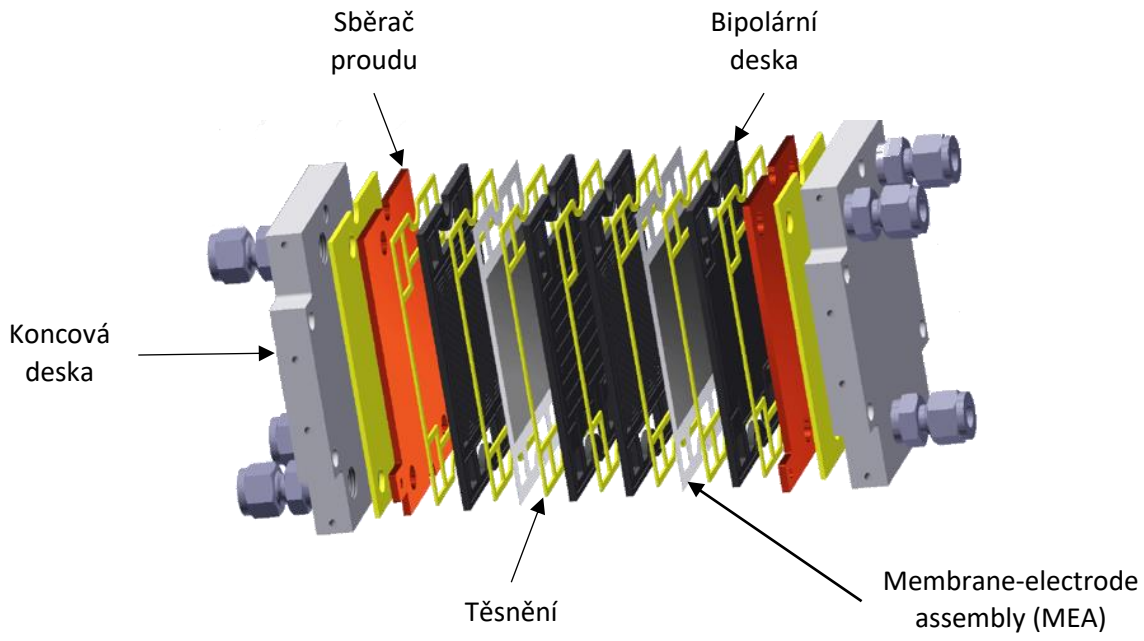
Palivové články jsou citlivé na některé typy nečistot a kontaminantů. Z toho vyplývají zvýšené nároky na čistotu vstupních plynů a rovněž na materiály použité pro konstrukci [9]. Elektrochemické reakce na článcích probíhají s pomocí katalyzátorů na bázi platiny. Tyto jsou náchylné ke otravě jak potenciálními kontaminanty vodíku (CO, H_2S, NH_3), tak nečistotami ve vzduchu (NO_x, SO_x, CO). Protonově výměnná membrána je citlivá na přítomnost určitého typu iontů (Fe^{3+}, Cu^{2+}), které se mohou uvolňovat z některých typů materiálů.

V praxi se tedy jako materiály pro trubky používá nerezavějící ocel (nejlépe 316 chrom-niklové austenitické slitiny) nebo Teflon. Jednotlivé komponenty svazku článků se nejčastěji vyrábějí z nerezavějící oceli, grafitu, či titanu. Protože primární chladicí okruh protéká přímo palivovým článkem, musí být jako chladicí médium použita demineralizovaná voda. Z toho vyplývají omezení pro výměníky a pumpy chladicího okruhu, musejí být vyrobeny z nerezavějící oceli bez pájení mědí. Uvedená materiálová omezení vedou k navýšení celkových pořizovacích nákladů FC systémů.

4 Palivové články: svazky a moduly

4.1 Svazky

Jednotlivé palivové články elektricky sériově spojené tvoří dohromady svazek palivových článků. Svazek rovněž obsahuje vnitřní distribuci plynů (paliva i oxidantu) a rozvodné kanálky pro chladicí vodu. K podpůrným částem systému je svazek připojen pomocí vstupů a výstupů plynů, elektrických konektorů a rozhraní pro monitorování napětí na jednotlivých článcích. Obrázek 9 schematicky znázorňuje svazek svou palivových článků. V praktických aplikacích je článků větší počet a celý svazek je umístěn v ochranném obalu.



Obrázek 9: Schematický diagram svazku palivových článků.

Jelikož je svazek jádrem celého systému, jedná se o komplexní zařízení. Jeho výkon je ovlivněn řadou faktorů počínaje od molekulární úrovně (katalyzátory, složení a struktura elektrod a membrány), přes mikro-fluidní úroveň (tok plynů a vody v úzkých kanálcích), až po makroskopickou úroveň (konstrukce jednotlivých komponent). Detailní popis všech faktorů není v možnostech této studie. Zaměřujeme se tedy na parametry, které jsou relevantní pro praktické použití svazků článků. Mezi tyto patří:

- Výkon (špičkový a kontinuální)
- Počet jednotlivých článků
- Napětí
- Hmotnost
- Objem
- Typ chlazení
- Cena

Tabulka 2: Technické požadavky DoE na svazky palivových článků v lehkých nákladních automobilech. [6]

Parametr svazku	Jednotky	2020	Definitivní
Měrný výkon	kW/kg	2	2
Výkonová hustota	kW/L	2,25	2,5
Cena	$/kW	20	15

4.2 Dodavatelé

Přímé porovnání nabídek od jednotlivých dodavatelů je komplikované, jelikož se většinou liší ve více než jednom parametru. Pokusíme se však porovnat nabídky na základě následujících kritérií:

- Měrný výkon (poměr výkonu a hmotnosti)
- Výkonová hustota (výkon na jednotku objemu)
- Cena za kW

Švédský výrobce palivových článků **PowerCell** Sweden AB nabízí variabilní vodou chlazený model svazku s označením S2. Maximální špičkový výkon je 35,5 kW a napětí se pohybuje mezi 250 V (OCV) a 145 V (při špičkovém výkonu). PowerCell dále dodává FC moduly (MS-30 a MS-100), které obsahují vzduchový kompresor, výměník tepla a pomocné komponenty.

Intelligent energy je britská společnost primárně zaměřená na lehké svazky pro letecké aplikace. V jejich nabídce je však rovněž řada těžších svazků FCM-80x pro stacionární aplikace. Maximální nabízený výkon je 4 kW. Pro dosažení výkonu 32 kW je tedy nutné spojit 8 svazků. Nominální napětí svazků je 48 V a jsou vzduchem chlazené.

Ballard Power je jedním z pionýrů technologie palivových článků. Na základě dlouholeté zkušenosti s výrobou systémů palivových článků nabízejí širokou škálu řešení zaměřenou především na heavy-duty mobilní aplikace. V rámci nové generace svazků palivových článků FCgen-LCS má největší model výkon 56 kW.

Tabulka 3: Svazky palivových článků: seznam modelů.

PowerCell	S2	35.5	264	290	145	43	28000
Intelligent Energy	FCM-804	4		80	48	20	18000
Ballard	FCvelocity–9SSL	21	110		70.2	17	13000
Ballard	FCgen-LCS	56	260		156	33.7	33800
Proton Motor	PM 400	30		110	60	56	

Tabulka 4: Svazky palivových článků: Porovnání dodavatelů[1].

Výrobce	Model	Specifický výkon (kW/kg)	Hustota výkonu (kW/L)	Cena (EUR/kW)
PowerCell	S2	0,83	1,01	788,73
Intelligent Energy	FCM-804	0,20	0,05	4500
Ballard	FCvelocity–9SSL	1,24	1,52	619
Ballard	FCgen-LCS	1,66	1,96	603

Tabulka 5: Moduly palivových článků: seznam modelů

Výrobce	Model	Max. výkon (kW)	OCV (V)	Napětí při max. výkonu (V)	Hmotnost (kg)	Objem (L)	Cena (EUR)
PowerCell	MS-30	30	290	145	150	214	75000
PowerCell	MS-100	60	500	292	170	276	150000
Hydrogenics	HyPM HD 30	31	120	60	75	76	40000
Proton Motor	HyRange	45	138	75			137800
Ballard	FCveloCity ®-MD	30	180	85	125	162	
Horizon	VL 30	30	180	100	80	65	
Intelligent Energy	2.4 kW module	2.4	120	70	4.4	13	37000

[1] FC svazek vozidla Toyota Mirai se skládá z 370 sériově zapojených článků (cca 250 V při 0.66 V na článek), výkon je 114 kW, objem 37 l, and hmotnost 54 kg, elektromotor funguje s napětím 650 V. Svazek je vyroben s titanovými bipolárními deskami.

Svazek od firmy Toyota již byl upraven a použit v nákladních automobilech, autobusech a experimentálně i na lodi (Energy Observer) [22].

Tabulka 6: FC moduly: porovnání dodavatelů.

Výrobce	Model	Specifický výkon (kW/kg)	Hustota výkonu (kW/L)	Cena (EUR/kW)
PowerCell	MS-30	0.20	0.14	2500
PowerCell	MS-100	0.35	0.22	2500
Hydrogenics	HyPM HD 30	0.41	0.41	1290
Proton motor	HyRange			3062
Ballard	FCveloCity®-MD	0.24	0.19	
Horizon	VL 30			
Intelligent Energy	2.4 kW module	0.55	0.18	15416

5 Vodíkový systém

Vodík je palivem palivového článku. Rovněž se jedná o vysoce hořlavý plyn s velmi nízkou hustotou. Ve vozidle či plavidle musí být plněn, skladován a přiveden do palivových článků dle potřeby. Všechny tyto činnosti musí splňovat přísné bezpečnostní požadavky.

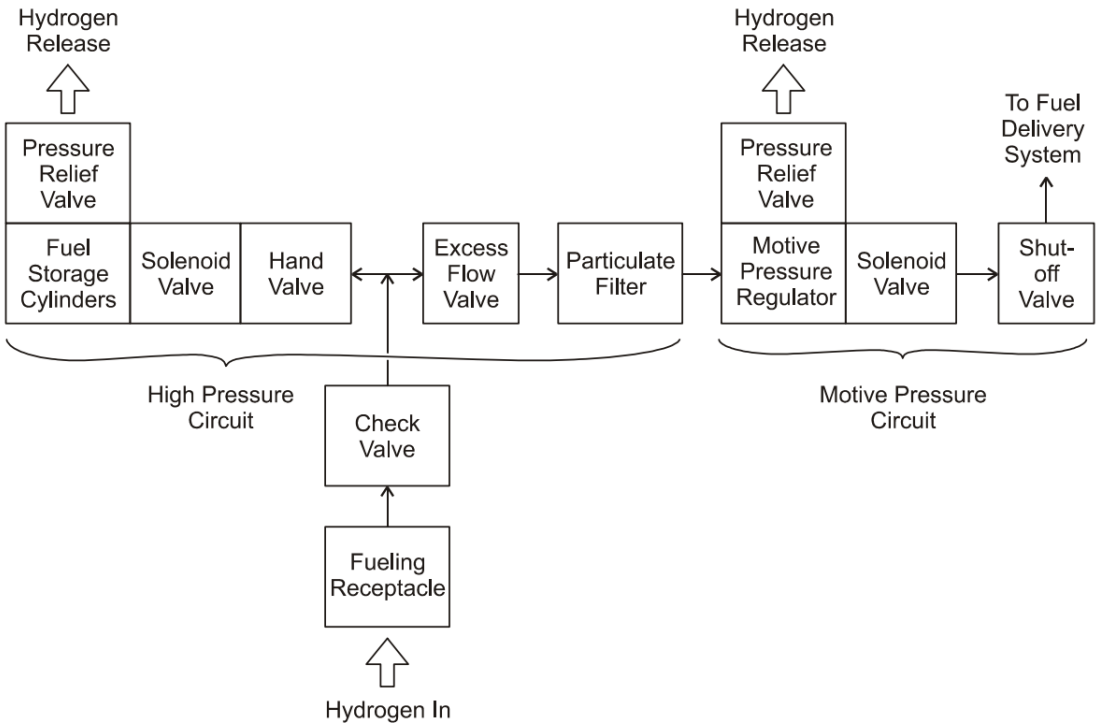
5.1 Skladování vodíku a plnící systém

Vzhledem ke své velmi nízké hustotě při běžných podmínkách musí být vodík převeden do stavu s lépe vyhovujícím poměrem energie ku objemu. Toho lze obecně dosáhnout následujícími způsoby [10]:

1. Stlačení,
2. Zkapalnění (a stlačení),
3. Chemická transformace (hydridy, čpavek, atd.), a
4. Fyzisorpce (nanoporézní uhlík, zeolity, atd.)

Pokud nám je známo, pouze první dvě možnosti jsou v současné době komerčně dostupné. V dalším textu se tedy budeme věnovat pouze skladování vodíku ve stlačené či zkapalněné formě.

Obrázek 10 znázorňuje příklad systému pro skladování a plnění stlačeného vodíku. Za povšimnutí stojí rozdělení na vysokotlakou (high pressure) a nízkotlakou (motive pressure) část.



Obrázek 10: Systém pro skladování a plnění vodíku. Převzato z [11].

5.1.1 Stlačený vodík

Nejrozšířenějším řešením pro skladování vodíku je jeho stlačení. Tlak, při kterém se vodík skladuje, záleží na konkrétním použití, nejčastěji se však jedná o 350 bar nebo 700 bar. Detaily k hustotě vodíku v závislosti na teplotě a tlaku jsou uvedeny v sekci **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, pro zjednodušení uvádí Tabulka 7 rychlý přehled potřebného objemu nádob.

Tabulka 7: Objem potřebný k uskladnění 1 kg stlačeného vodíku při 20°C. Upraveno z [8].

Tlak (bar)	Objem (L)
1	11934,0
100	128,7
200	68,4
300	48,4
350	42,7
450	34,9
700	25,7

Proces stlačování vodíku spotřebovává energii, běžně se jedná cca o 10 % energetického obsahu vodíku [10].

Na základě použitých materiálů se nádoby na stlačený vodík dělí do následujících kategorií [10]:

- **Type I**: Celokovové tlakové nádoby (hliník či ocel)
  - Nejlevnější
  - Nejvyšší hmotnost
  - Tlak do 500 bar
- **Type II**: Ocelová nádoba s kompozitním plášť ze skelných vláken
  - Cca o 50 % dražší než Type I
  - Cca o 30-40 % lehčí než Type I
  - Největší tolerance vysokých tlaků
- **Type III**: Plně kompozitní plášť s kovovou vložkou
  - Cca o 50 % dražší než Type II
  - Cca o 50 % lehčí než Type II
  - Tlak do 450 bar
- **Type IV**: Plně kompozitní
  - Nejdražší
  - Nejnižší hmotnost
  - Tlak do 1000 bar

Nádoby sice představují hlavní část systému pro skladování vodíku, ke svému fungování však potřebují pomocné komponenty, jako jsou redukční ventily, držáky, bezpečnostní ventily a trubky. Při porovnávání různých řešení je tedy třeba uvažovat celý systém. Pro hlavní parametry systému vydal DoE požadavky, které shrnuje Tabulka 8. Stejné parametry jsou v další části použity pro porovnání nabídek od různých dodavatelů[2].

Tabulka 8: DoE požadavky pro skladování vodíku ve stlačené formě v lehkých nákladních automobilech [12].

Parametr úložiště	Jednotky	2020	2025	Definitivní
Gravimetrická kapacita systému	kWh/kg	1.5	1.8	2.2
Volumetrická kapacita systému	kWh/l	1.0	1.3	1.7
Cena systému	$/kWh	10	9	8

Certifikace

Každé použití nádob na stlačený vodík vyžaduje vlastní certifikaci, často je potřeba různé certifikace i pro jednotlivé trhy (viz Tabulka 9).

[2]Toyota Mirai má dvě 700 bar Type IV nádoby s celkovou kapacitou 122.4 l. Hmotnostní zlomek vodíku v systému je 5.7 %, což znamená gravimetrickou kapacity 1.9 kWh/kg.

Tabulka 9: Certifikace, normy, nařízení a regulace pro nádoby na stlačený vodík.

Označení	Typ dokumentu	Region	Stacionární skladování	Převoz plynu	Použití ve vozidlech
EC79	Regulace	EU			X
HGV2	Regulace	USA			X
PED	Nařízení	EU	X		
TPED	Nařízení	EU		X	
R-134	Norma	International			X
EN 12245	Norma	EU	X	X	
ISO 11119-2	Norma	International		Type III	
ISO 11119-3	Norma	International		Type IV	

Dodavatelé

Norská společnost Hexagon Composites ASA s přes svou dceřinou společnost **Hexagon Purus** GmbH vyrábí řešení pro skladování vodíku v různých aplikacích včetně lodí a osobních i nákladních vozidel. V nabídce má jak samotné Type IV kompozitní nádoby, tak celé skladovací systémy. Nádoby jsou k dispozici v různých tlakových rozsazích až po 700 bar.

Britská společnost **AMS Composite Cylinders** Ltd. dodává lehké nádoby na vodík pro tlaky až do 300 bar. Jejich primárním zaměřením jsou drony, ale dle jejich vlastního prohlášení jsou schopni dodat řešení pro různé specifikace.

Composite Technical Systems je italský výrobce nádob na vodík až do tlaku 300 bar. V současné době nabízejí nádoby s maximálním objemem 9 L.

Společnost **Steelhead Composites** z USA vyrábí nádoby na vodík v širokém rozsahu velikostí a tlaků. Nádoby jsou vyrobeny z hliníkového jádra s pláštěm z uhlíkových vláken.

Carbotainer je španělská společnost s vlastním patentem na 300 bar nádoby o maximálním objemu 45 L.

Luxfer je britská společnost, která nabízí nádoby na stlačený vodík jak pro 350 bar, tak pro 700 bar. Luxfer má oficiální české zastoupení společností R&T ČR s.r.o.

Tabulka 10: Seznam komerčně dostupných tlakových nádob na vodík.

Výrobce	Typ	Tlak (bar)	Průměr (mm)	Délka (mm)	Objem (L)	Hmotnost H_2 (kg)	Hmotnost lahve (kg)	Cena (EUR)	Certifikace
Hexagon Purus	IV	350	509	2342	350	8.4	112	5800	EC79
Hexagon Purus	IV	700	319	906	36	1.4	34	4620	EC79
Hexagon Purus	IV	950	515	2783	254	12.4	365		PED
Carbotainer	III	300	264	1545	45	0.95	28.7	550	
Steelhead Composites	III	350	435	2616	270	6.2	165	6100	
Luxfer	IV	350	415	1614	150	3.6	74	4554	EC79
Luxfer	IV	350	415	3165	322	7.8	141	7328	EC79
Luxfer	IV	700	332	1161	53	2.13	58	4995	EC79

Tabulka 11: Parametry tlakových nádob na vodík od různých dodavatelů.

Výrobce / tlak	Gravimetrická kapacita (kWh/kg)	Cena za kg H_2 (EUR)
Carbotainer		
300	1.1	17.4
Hexagon Purus		
350	2.3	20.7
700	1.3	99.0
Luxfer		
350	1.6	33.1
700	1.2	70.4
Steelhead Composites		
350	1.2	29.5

Velikost a hmotnost

Konkrétní volba systému pro skladování vodíku závisí na řadě parametrů, mezi nejdůležitější patří objem a hmotnost. U samotných nádob se poměr hmotnosti uloženého vodíku ku hmotnosti nádoby pohybuje okolo 7,5 % pro 350 bar. Nádoby na 700 bar musejí být robustnější a jejich hmotnostní poměr je cca 5 %. Pro celý systém včetně držáků a ventilů je hmotnostní poměr cca 5,5 % pří 350 bar a 3 % při 700 bar.

Pokud vezmeme v úvahu jak hmotnostní poměr, tak cenové hladiny, lze dojít k závěru, že systém pracující při 700 bar je opodstatněn pouze pokud jsou v dané aplikaci významná omezení dostupného prostoru, např. tedy v osobních automobilech. V jiných aplikacích vycházejí cenově dostupněji celkově lehčí nádoby s tlakovým rozsahem 250 – 350 bar.

5.1.2 Zkapalněný vodík

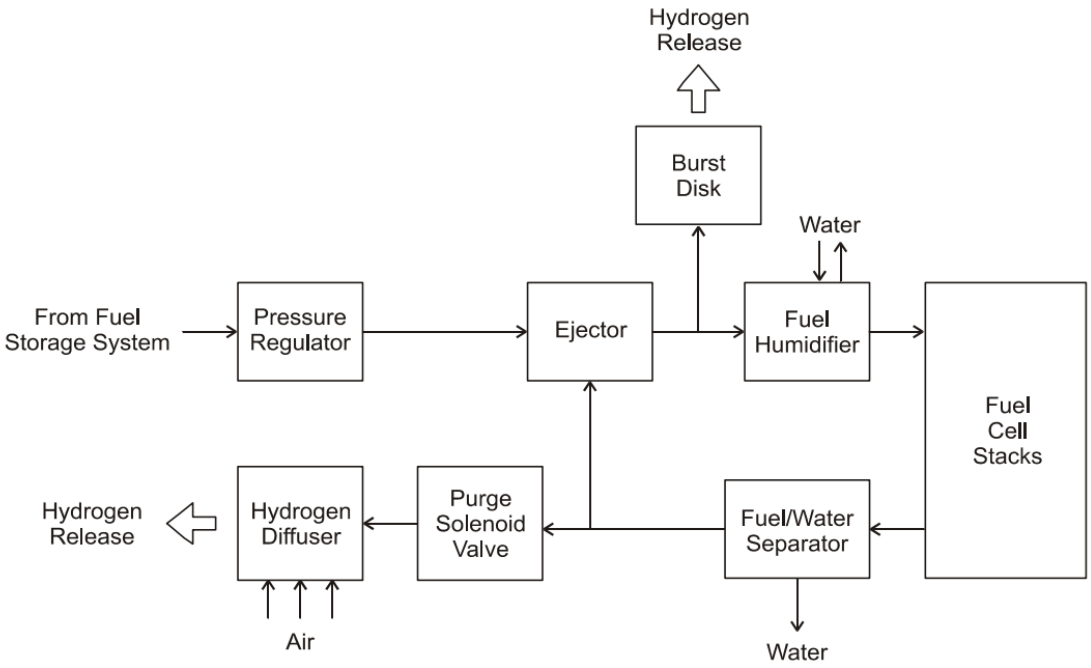
Vyšší hustota kapalného vodíku v porovnání s plynným (i po stlačení) je lákavou volbou pro celkově kompaktnější systémy pro skladování. Vzhledem k velmi nízké teplotě varu vodíku (-253°C) je však proces zkapalňování složitý a energeticky náročný. Spotřebuje se při něm ekvivalent 40 % energetického obsahu vodíku oproti cca 10 % při stlačování [10]. Zkapalněný vodík byl použit v konceptu BMW Hydrogen 7 z roku 2006, který používal spalovací motor na vodík. V novějším prototypu BMW Next s palivovými články je už však použito skladování stlačeného vodíku při 700 bar.

Hmotnostní poměr nádob se zkapalněným vodíkem může dosáhnout až 14 % [8]. Je však potřeba počítat s nutností dodatečné izolace nádrží.

5.2 Přívod vodíku

Přívod vodíku do svazku palivových článků se nachází v nízkotlaké části vodíkového systému. V praktických aplikacích je v této části zahrnuta recirkulační smyčka (viz Obrázek 11) nutná pro ekonomické nakládání

s vodíkem při zachování dostatečného přísunu paliva do svazku. Recirkulační smyčku může být buď aktivní s použitím pumpy, nebo pasivní s použitím ejektoru.



Obrázek 11: Systém pro přívod vodíku. Převzato z [11].

5.2.1 Ejektor

Ejektor je pasivní zařízení umožňující míchání dvou proudu do jednoho s pomocí trysky. V systému na přívod vodíku je recirkulující vodík z výstupu palivového článku nasáván do proudu čerstvého vodíku ze skladovacího systému. Nevýhodou ejektoru je relativně úzké rozmezí průtoků, při kterých je dané zařízení funkční.

5.2.2 Dodavatelé

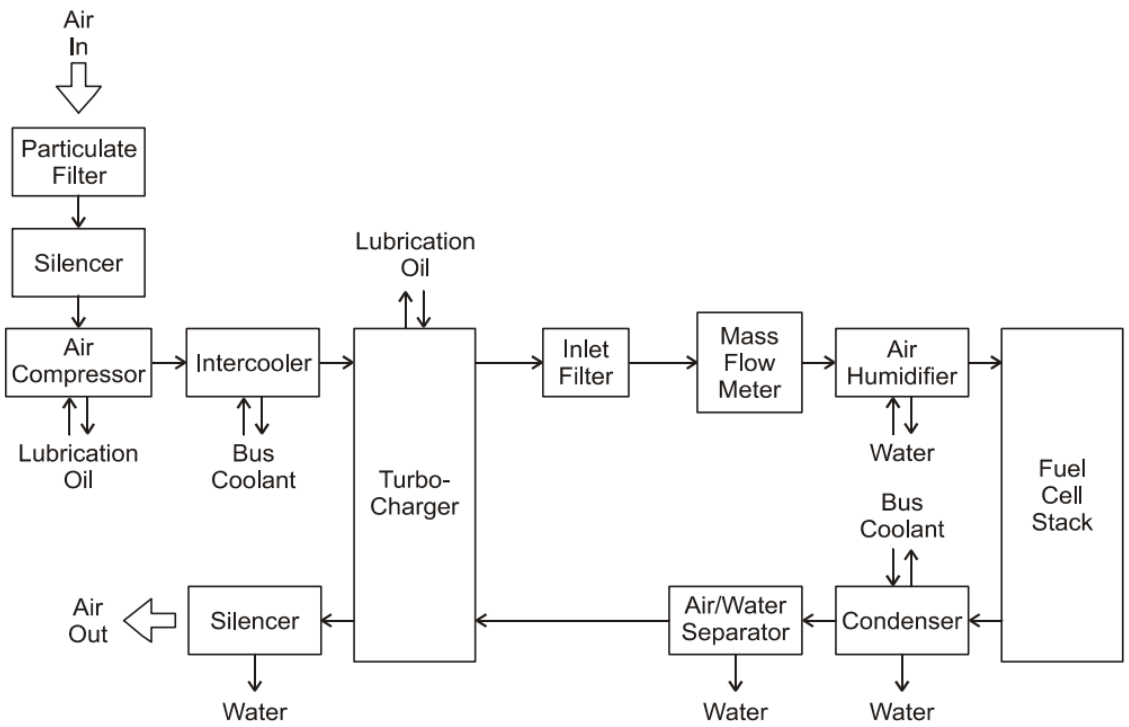
Recirkulační pumpy vyrábí společnost **Air Squared**, Inc. z USA. Jejich pumpy jsou založené na technologii spirálového kompresoru a jedna z řad je přímo určena pro použití s FC systémy.

Portfolio produktů německé firmy **Gardner Denver Thomas** GmbH zahrnuje i bezolejovou pumpu pro recirkulaci vodíku.

Firma **Fox Venturi Products** z USA vyrábí ejektory pro vodíkové systémy. Rozšířené použití přinášejí tzv. ejektorové systémy dodávané francouzskou společností **Ad-Venta**.

6 Vzduchový systém

Kromě paliva (vodík) musí být do palivového článku přiváděn rovněž oxidant. V běžných aplikacích je oxidantem nejčastěji vzduch. Komponenty zajišťující přívod vzduchu do palivového článku se souhrnně nazývají vzduchový systém (Obrázek 12 znázorňuje příklad z autobusu poháněného palivovými články).



Obrázek 12: Diagram vzduchového systému. Převzato z [11].

V závislosti na provozních podmínkách systému existuje několik možností pro realizaci aktivního prvku vzduchového systému: dmychadlo, kompresor, nebo turbodmychadlo. Dmychadla jsou vhodná pro použití v menších či středně velkých systémech. Pro větší systémy jsou většinou vhodné kompresory, nebo jejich kombinace s turbodmychadlem.

Speciální možností pro použití FC systémů v letectví je takzvaný NACA vstup pro vzduch. Využívá se energie okolo proudícího vzduchu a kompresor v tomto případě není potřeba. Pro konstrukci leteckých pohonů je důležité vzít v úvahu nízkou okolní teplotu. Doba života vodních kapiček rychle narůstá s nadmořskou výškou [13]. Následná tvorba částeček ledu musí být brána v úvahu vzhledem k relativně vysoké produkci vody v FC systémech.

6.1 Vzduchový kompresor

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro porovnávání kompresorů je tlakový poměr, tj. poměr výstupního a vstupního tlaku. Pro zamezení kontaminace článků musí být kompresory použité v FC systémech vžd bezolejové. Používané typy konstrukcí kompresorů jsou [14]:

- Spirálový kompresor
  - Vysoký tlakový poměr
  - Velké prostorové nároky
  - Použito v prototypu FC systému od firmy Volkswagen
- Šroubový kompresor
  - Velké průtoky
  - Vysoký tlakový poměr
  - Nezanedbatelné úniky
  - Použito ve starší generaci Hondy Clarity

- Rootsův kompresor (lalokové čerpadlo)
  - Nízká účinnost
  - Vysoký tlakový poměr
  - Cenově výhodný
  - Použitý v Toyotě Mirai
- Odstředivý kompresor
  - Jednoduchá konstrukce, vysoká účinnost
  - Kompaktní
  - Nízký tlakový poměr
  - Použité v současné generaci Hondy Clarity (dva stupně)

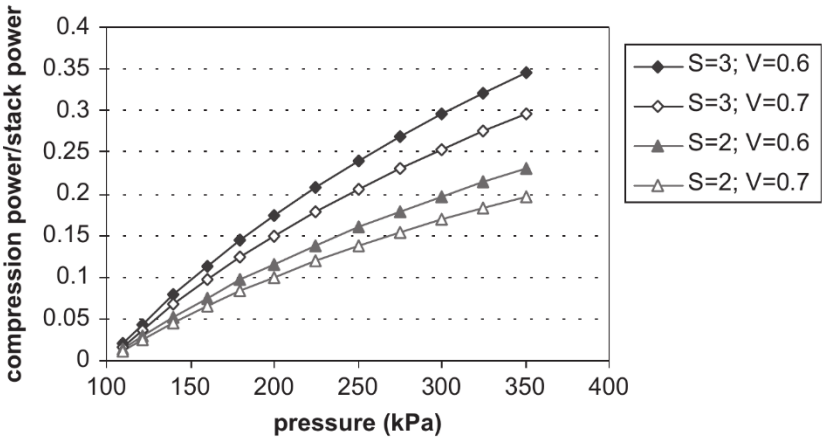
6.2 Turbodmychadlo

Turbodmychadla jsou hojně používána v běžných osobních automobilech se spalovacími motory. Turbodmychadlo stlačuje plyn vstupující do motoru s použitím energie obsažené v plynu vystupujícím z motoru. Stejný princip lze použít i ve vzduchovém systému palivového článku.

Klasické turbodmychadlo je v podstatě odstředivý kompresor poháněný turbínou. Tyto komponenty jsou napřímo mechanicky spojeny. U E-turbodmychadla (či elektricky asistovaného nebo hybridního turbodmychadla), které používá Daimler či General Motors není toto přímé spojení použito [14]. Místo toho turbína vyrábí elektřinu, která se ukládá do baterií či superkapacitorů. Kompresor je následně poháněn elektřinou, díky čemuž je jeho start rychlejší.

6.3 Účinnost

Každý kompresor spotřebovává pro své fungování energii. Tento příkon snižuje celkovou účinnost FC systému, jelikož část elektrické energie je spotřebována uvnitř systému. Obrázek 13 znázorňuje závislost poměru energie spotřebované kompresorem ku energii svazku článků v závislosti na tlaku.



Obrázek 13: Výkon kompresoru v závislosti na tlaku pro různé hodnoty stechiometrie (S) a napětí článku (V). Předpoklady: atmosférický tlak na vstupu, vstupní teplota je 20 °C, účinnost kompresoru je 70 %. Převzato z [8].

6.4 Dodavatelé

Spirálové kompresory vhodné pro použití s palivovými články jsou v nabídce společnosti **Air Squared** v různých specifikacích.

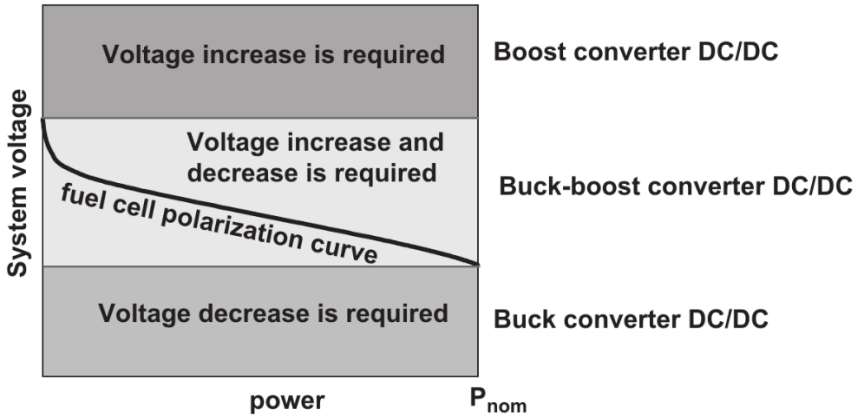
Gardner Denver Thomas nabízí řadu vzduchových kompresorů v rámci své řady pro palivové články.

7 Elektrický systém

Z pohledu elektrické integrace je FC systém zařízení generující stejnosměrný proud (DC) s nelineárním průběhem proudově-napěťové charakteristiky. Napětí při jmenovitém výkonu je většinou cca poloviční oproti maximálnímu napětí v bezproudém stavu. Většina elektrických zátěží nedokáže fungovat v takto širokém rozpětí napětí [8]. Pro integraci FC systému do vozidla či plavidla je tedy nutné zařadit dodatečné elektronické komponenty. Návrh konkrétního systému závisí na specifikaci, nicméně ve většině případů jsou FC systémy připojeny k DC sběrnici elektrického pohonného systému. Vysoce proměnlivé napětí palivového článku tedy musí být převedeno na konkrétní napěťovou úroveň DC sběrnice, o což se stará stejnosměrný napěťový měnič (též DC/DC měnič).

7.1 Napěťové měniče

Jelikož palivové články (na rozdíl od baterií) slouží pouze jako generátory, používají se jednosměrné napěťové měniče. V závislosti na konfiguraci systému musí měnič buď snižovat napětí palivového článku (*buck converter*), nebo jej navyšovat (*boost converter*), jak zobrazuje Obrázek 14.



Obrázek 14: Typy DC/DC měničů v závislosti na napětí systému. Převzato z [8].

Při vyšších napětích (cca nad 15 kW) vyžadují měniče napětí vodní chlazení pro dostatečný odběr tepla. S chlazením měniče je tedy třeba počítat při návrhu chladicího systému.

7.1.1 Dodavatelé

Německá společnost **Aradex** AG nabízí dva modely DC/DC měničů navržených pro proměnlivá napětí palivových článků a podporujících širokou škálu napětí od 48 V do 770 V. Výstupní napětí 650 V je navrženo pro automotive systémy.

Tame-Power je francouzská společnost vyrábějící portfolio produktů pro převod napětí. Nabízení zařízení uzpůsobená pro vysoké hodnot proudu, kterými se vyznačují systémy s palivovými články.

7.2 Nabíjení baterií

Nabíjení Li-ion baterií probíhá ve dvou fázích:

1. Konstantní proud,
2. Konstantní napětí.

V první fázi napětí baterie postupně vystoupá na maximální hodnotu (typicky 4,2 V na článek). Poté se napětí drží na konstantní hodnotě, aby nedošlo k poškození systému.

Jelikož je proudově-napěťová charakteristika palivových článků značně odlišná, než je tomu v případě baterií, přímé připojení FC systému k bateriím většinou není možné. Při použití DC/DC měniče je napětí FC systému upraveno na úroveň, na které pracují baterie. Zároveň je možné řídit výstupní výkon systému, což umožňuje nabíjení baterií pomocí palivových článků.

8 Chlazení

Kromě elektrické energie produkují palivové články i nezanedbatelné množství tepla. Konkrétní hodnota tepelného toku závisí na provozních podmínkách. K jeho přibližnému odhadu však lze použít úvahu vycházející z účinnosti článku. Z té vyplývá, že tepelný výkon článku je přibližně srovnatelný s výkonem elektrickým.

8.1 Chlazení palivových článků

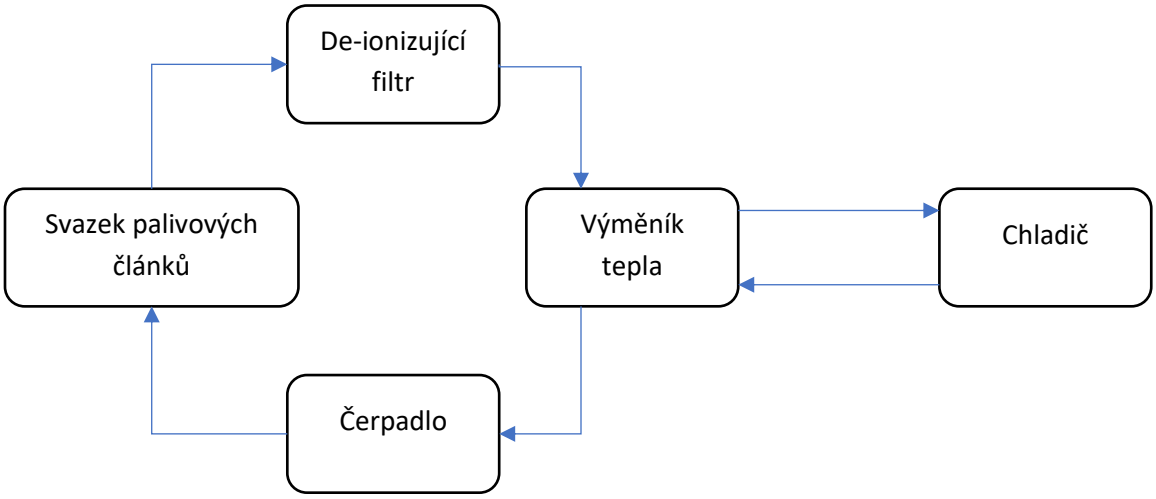
Dle zjištění nedávných studií [15] odpovídají náklady na chladicí systém cca 8 % celkových nákladů FC systému. Za většinu vyprodukovaného tepla je zodpovědný svazek palivových článků. Zároveň chlazení palivových článků klade zvýšené nároky na chladicí systém (nevodivé chladicí médium, rychlá dynamika atd.). K chlazení palivových článků existují různé přístupy [15]:

- Chlazení vzduchem
- Pasivní chlazení
- Vodní chlazení
- Chlazení s se změnou skupenství

První dva přístupy, tj. vzduchové a pasivní chlazení jsou vhodné spíše pro menší systémy cca do 10 kW výkonu. Nejčastějším přístupem u větších systémů je vodní chlazení, kterému se tato sekce věnuje nejvíce. Krátce shrneme i současný stav technologií používajících chlazení odpařováním a dvoufázové chlazení, jakožto příklady chlazení se změnou skupenství.

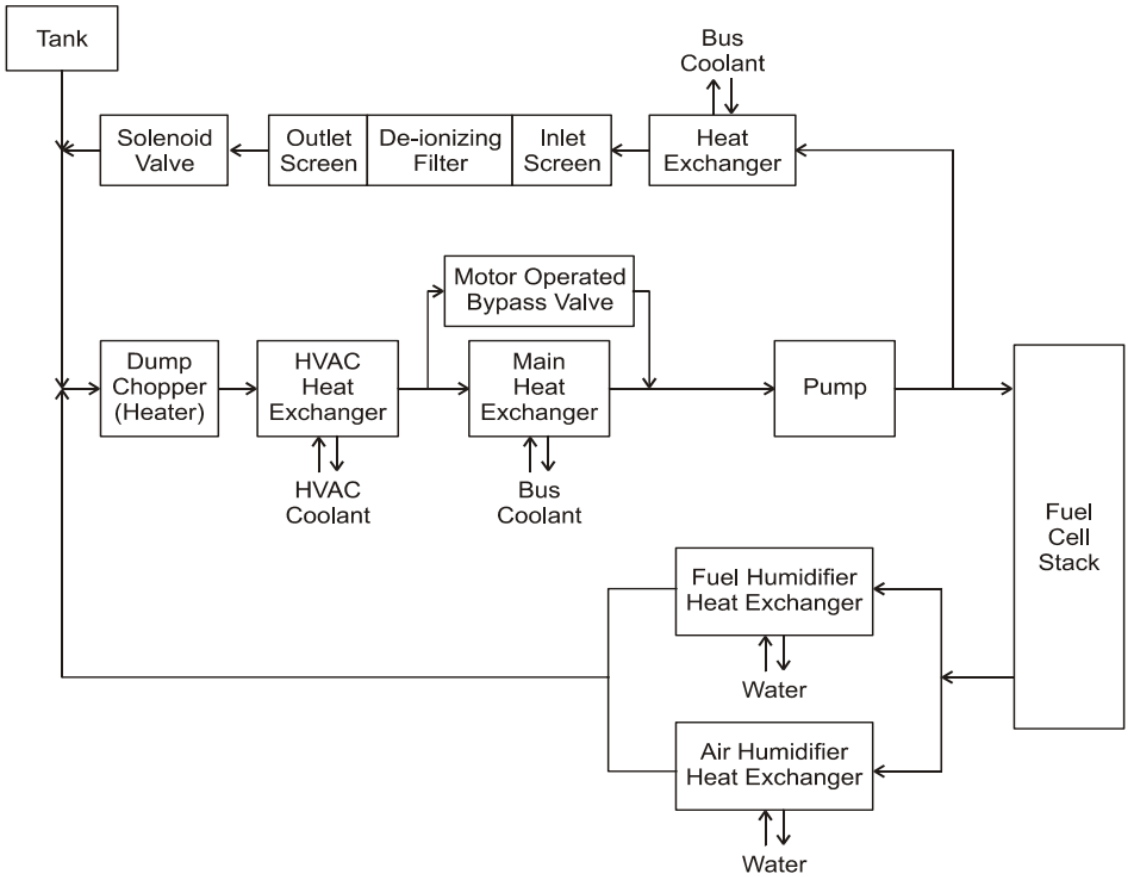
8.1.1 Vodní chlazení

Chlazení svazku palivových článků kapalným chladivem vyžaduje dodatečná zařízení a úpravy, jak znázorňuje Obrázek 15. Chladicí médium protéká mezi bipolárními deskami svazku v připravených kanálcích. Chladicí kapalina musí být nevodivá, aby nedošlo ke zkratování svazku. Chladivo je protéká systémem pomocí čerpadla a teplo je odváděno do externího chladiče přes výměník tepla.



Obrázek 15: Zjednodušený diagram chladicího systému.

Obrázek 16 zobrazuje komplexnější chladicí systém autobusu poháněného palivovými články. Systém je vybaven integrací tepla, ve kterém je odpadní teplo ze svazku článků použito k předehřívání zvlhčovačů. Dále je systém propojen s ohříváním kabiny (HVAC: heating, ventilation, air-conditioning). Za povšimnutí stojí i smyčka v horní části, která obsahuje de-ionizační filtr a online monitoring vodivosti. Tento prvek zabraňuje zvýšení vodivosti nad požadovanou mez. Systém obsahuje rovněž topení, které se používá na předehřívání svazku při studeném startu.



Obrázek 16: Schematický diagram komplexního chladicího systému. Převzato z [11].

Nejčastěji používaným chladicím médiem je demineralizovaná voda. [11]. V případě použití čisté vody lze sjednotit vodní hospodářství se zvlhčovači (pokud jsou použity). V případě vozidel či plavidel vyskytujících se v oblastech s teplotami pod bodem mrazu je však jako chladicí médium nutné použít směs vody s čistým ethylen-glykolem [11].

Nedávné studie zjišťovaly možnosti použití tzv. nanotekutin pro chlazení palivových článků. Nanotekutina je směsí běžné tekutiny s pevnými nanočásticemi, které zvyšují její tepelnou kapacitu a zlepšují přenos tepla. Přídavek 0,05 % nanočástic oxidu hlinitého snižuje potřebnou teplosměnnou plochu o 20 % a velikost chladiče o 10 % [15].

8.1.2 Chlazení se změnou skupenství

Využití potenciálu výparného tepla pro chlazení palivových článků je lákavé. Obecně lze najít dva přístupy k chlazení vhodné pro větší svazky:

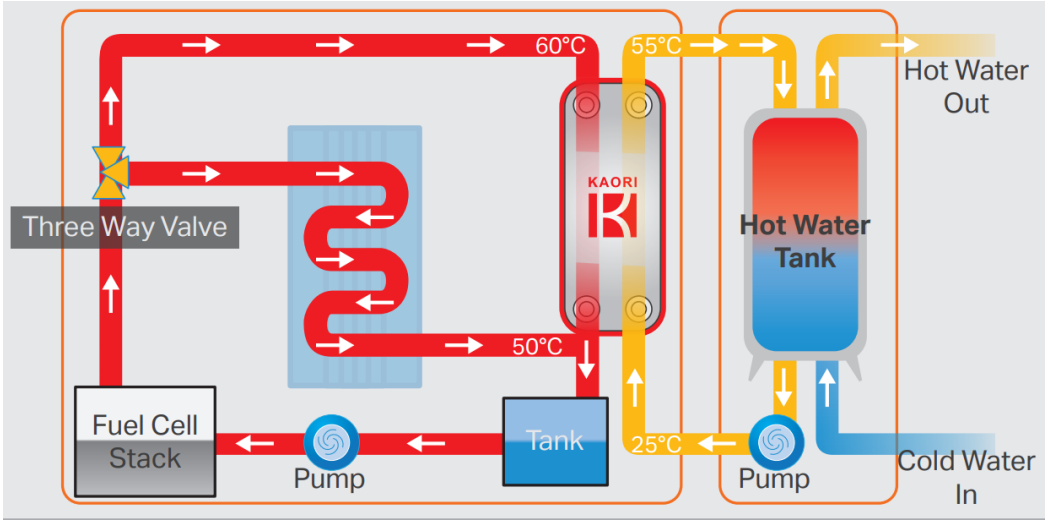
- Dvoufázové chlazení
- Chlazení odpařováním

V prvním případě se jedná o použití média, jehož bod varu se nachází v pracovní oblasti palivového článku (60-80 °C). Tento přístup sice zlepšuje přenos tepla a vede ke zmenšení velikosti chladicího systému, vyžaduje však přítomnost dodatečného kondenzátoru. Rovněž může být celý systém hůře řiditelný při vyšších teplotách [15].

Chlazení odpařováním si klade za cíl sjednotit chlazení a zvlhčování do jednoho procesu. Vstřikováním kapalné vody do kanálků palivových článků dochází ke zvlhčování a odpařená voda s sebou odnáší vyprodukované teplo. Systém musí obsahovat dodatečný kondenzátor. Přestože na úrovni prototypů jsou zdokumentovány systémy s výkonem až 30 kW, na trhu zatím stále nejsou komerčně dostupné větší svazky používající chlazení odpařováním [16].

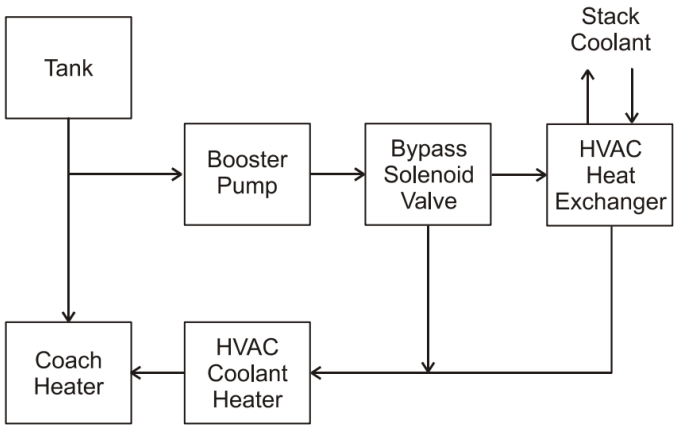
8.2 Využití tepla

Velké množství tepla vyprodukované při provozu palivových článků je zodpovědné za jejich nízkou elektrickou účinnost v porovnání s bateriemi. Produkce tepla ale nemusí být vždy nevýhodou. V mnoha situacích lze teplo využít, čímž se zvyšuje celková účinnost systému. U PEM článků je tato situace komplikována jejich relativně nízkou provozní teplotou, ale voda o teplotě okolo 60 °C je stále dobře využitelná např. pro ohřívání kabiny auta či ohřev užitkové teplé vody na lodi (viz Obrázek 17).



Obrázek 17: Využití tepla pro ohřev užitkové vody. Obrázek od KAORI Heat Treatment Co., Ltd.

Jak již bylo zmíněno DoE nabízí příklad použití FC systému k ohřívání prostoru pro cestující v autobuse poháněném palivovými články, jak znázorňuje Obrázek 18. Tato část chladicího systému nepřichází do přímého kontaktu s palivovými články, jako chladicí médium tedy může být použita standardní směs vody a ethylen-glykolu v poměru 50-50.



Obrázek 18: Schéma využití odpadního tepla z FC systému pro ohřívání prostoru pro cestující. Převzato z [11].

8.3 Dodavatelé

Švédská společnost **Swep** International vyrábí výměníky vhodné pro použití s palivovými články. Jsou buď kompletně vyrobeny z nerezavějící oceli, nebo obsahují tenkou vrstvu SiO_2 pro předcházení korozi.

Kaori BPHE sídlí na Taiwanu a ve své řadě M nabízí výměníky, které jsou kompletně vyrobené z nerezavějící oceli.

Další švédská společnost **Alfa Laval** vyrábí celonerezové výměníky s patentovanou technologií.

9 Automatizace a řízení

Úkoly řídicího systému:

- Zajištění bezpečnosti
  - Vypnutí v případě nouzového stavu (řízené zchlazení svazku článků) a zabránění poškození FC systému (monitorování napětí článků)
- Řízení přísunu vodíku
  - Zajištění správného průtoku a tlaku
- Řízení přísunu vzduchu
  - Zajištění správného průtoku a tlaku
- Řízení chladicího systému
  - Chladicí systém může být buď samostatný pro FC systém nebo společný s dalšími komponentami (měniče napětí, baterie atd.).

9.1 Hardware pro automatizaci

9.1.1 Návrh řídicího systému

U lodě či nákladního automobilu lze FC systém koncipovat jako samostatnou jednotku. Integrace s nadřazeným řídicím systémem poté probíhá pomocí DI/DO (digital input, digital output) signálů nebo sériové komunikace.

V osobních automobilech či letadlech jsou prostorová a hmotnostní omezení natolik striktní, že nejschůdnějším řešením pro řídicí systém je jeho integrace s hlavní řídicí jednotkou. V tomto případě je však nutný vývoj a výroba řady součástek na míru.

Hlavní požadavky na řídicí systém v mobilních aplikacích jsou:

- Odolnost vibracím a otřesům,
- Odolnost agresivním klimatickým podmínkám,
- Elektromagnetická kompatibilita (EMC),
- Vysoký stupeň krytí (IP).

Pro různé aplikace (loď, automotive, letectví) jsou rovněž potřebné speciální certifikace komponent.

Tabulka 12: Minimální konfigurace vstupů a výstupů (I/O) pro řídicí systém.

Proces	Automatizační rozhraní	Automatizační úloha
Bezpečnost		
Únik vodíku	1-2x DI, 1x DO	Monitorování koncentrace vodíku.
Bezpečnostní vypnutí	1x DI	Vypnutí v případě kolize/nouze. Signál od nadřazeného systému
Monitoring napětí článků	RS485/CAN, 1x DO	Zabránění poškození článku
Pojistky	1x DI, 1x DO	Monitoring pojistek
Přívod vodíku		
Monitoring vstupního tlaku	1x AI	Množství vodíku v nádobách
Vstupní ventily	?x DO	Bezpečnostní odpojení nádob
H_2 vstřikovací ventil	1x DO	H_2 vstřikování
H_2 směšovací ventil	1x DO	Řízení proplachu
H_2 čerpadlo	1x DO	On/Off řízení recirkulace
Přívod vzduchu		
Monitoring vstupního tlaku	1x AI	Monitoring vstupního tlaku
Chod kompresoru	1x AO	Řízení průtoku
Výstupní tlak vzduchu	1x AO	Řízení výstupního tlaku
Chladicí systém		
Spínání průtoku	1x DI	Zaručuje oběh chladiva okruhem
Teplota chladiva	2x PT100	Řízení teploty svazku

X90 mobile
B&R continues to open up new possibilities in mobile automation with its innovative X90 mobile controllers. The comprehensive set of standardized components is perfect for implementing flexible automation concepts. The heart of the X90 mobile control system is a powerful ARM processor and multifunction I/O channels. Basic features include interfaces for CAN, Ethernet and the real-time POWERLINK bus system.

Interfaces and option boards
The extremely robust cast aluminum housing provides space for up to four option boards. These can add additional I/O channels, interfaces and even a full-fledged safety controller with safe I/O. Additional option boards for WLAN, Bluetooth and GPS interfaces are in planning.

Specially designed for harsh environments
All products in the X90 mobile family are designed for use in harsh industrial environments. They can handle operating temperatures from -40 to +85°C and are resistant to vibration, shock, salt, UV light and oil.

Certified for mobile equipment and outdoor applications
Adherence to specific industry standards for agriculture, forestry, construction and municipal vehicles ensures maximum flexibility when using mobile automation products. In addition, the X90 mobile control system also carries numerous certifications.

Obrázek 19: Řídicí jednotka od firmy B&R Automation.

Hlavní řídicí jednotka (X90 CPU od B&R Automation) společně se vstupně-výstupními moduly stojí cca 2500 EUR. Ceny senzorů a aktivních prvků se odvíjejí především od cen hlavních komponent, jako je recirkulační čerpadlo na vodík či vzduchový kompresor. Potřeba certifikace pro konkrétní aplikace typicky navyšuje cenu senzorů. V každém případě ale cena senzorů většinou netvoří hlavní položku rozpočtu automatizace.

Pro zajištění bezpečného provozu svazku palivových článků je nezbytné monitorovat napětí na každém z jeho článků. Komerční svazky jsou vybaveny potřebným zapojením a mají standardizovaný konektor. Specializované zařízení pro monitorování napětí poté sleduje napětí článků a při poklesu pod zadanou úroveň musí řídicí systém zasáhnout, typicky snížením zátěže svazku.

Otevřené otázky:

- Bude chladicí systém integrovaný s ostatními zařízeními?
- Jak probíhá komunikace s nadřazeným systémem?
    - Digitální signály či sériová komunikace (CAN)
- Je vyžadována komunikace s vodíkovou čerpací stanicí?

9.2 Řídicí software

Vedle konstrukce systému je řídicí software nejdůležitější částí systému, co se týče přidané hodnoty a duševního vlastnictví. Je tedy důležité zajistit jeho efektivní vývoj a spolehlivou použitelnost. Předpokládáme, že vozidlo či plavidlo bude mít vlastní řídící systém, který bude s řízením FC komunikovat. Při vývoji řídicího software FC systému budou použity široké znalosti a základna již vyvinutého zdrojového kódu. Software by měl splňovat následující požadavky:

1. Robustnost a spolehlivost
    a. Řádné testování pro zajištění stability
2. Modularita a znovu použitelnost

   a. Modulární přístup s dobře definovanými rozhraními mezi vrstvami a moduly
3. Bezpečnost
   a. Použití nejnovějších nástrojů pro předcházení náhodným selháním či cíleným útokům

9.2.1 Energy Management System (EMS)

Řízení celého hybridního pohonného systému s bateriemi a palivovými články je náročný úkol vyžadující znalost provozních režimů vozidla či plavidla. V literatuře lze nalézt širokou škálu řídicích strategií od jednoduchých deterministických přístupů až po sofistikované přístupy používající prediktivní modely či umělou inteligenci [2].

Obecný popis řízení pohonného systému EMS přesahuje rámec této studie. Proto se omezíme na popis řízení FC systému a jeho specifika. V reálných aplikacích je však zásadní, jakým způsobem je FC systém integrován do pohonného systému. Různé provozní módy totiž vyžadují odlišné řídicí přístupy.

9.2.2 Řídicí systém palivových článků

Pro zajištění bezpečného a efektivního provozu FC systému je nutné vytvořit robustní řídicí systém. Jedná se velmi široké téma, proto v následujících odstavcích shrneme především požadavky, které jsou kladeny na jednotlivé části řídicího systému. Z obecného hlediska je řízení FC systému komplikováno obtížnou měřitelností stavových proměnných systému, což omezuje použití řídicích metod založených na zpětné vazbě [3].

Řízení přívodu vodíku

V praktických aplikacích se vodík do palivových článků přivádí v takzvaném dead-end módu. Výstupní plyn z článku je přimícháván do čerstvého vodíku ze skladovacího systému a přiveden zpět do svazku článků. Je nutné řídit jak celkový průtok vodíku, tak směšovací poměr, toho lze dosáhnout i pasivně použitím ejektoru. Aby se předešlo akumulaci vodní páry v okruhu, je jeho obsah v pravidelných intervalech vypuštěn do okolního prostředí. Frekvence a délka těchto pulzů je pod kontrolou řídicího systmu.

Řízení přívodu vzduchu

Cílem řízení přívodu vzduchu je poskytnout svazku palivových článků dostatečný přísun vzduchu, který je určen stechiometrií. Typicky je přiváděno vyšší než stechiometrické množství. Průtok vzduchu ovlivňuje jak vlhkost článků, tak jeho chlazení.

Řízení vlhkosti

Udržování vnitřní vlhkosti svazku článků v daných limitech je důležité pro maximalizaci jeho výkonu a životnosti. Příliš nízká vlhkost negativně ovlivňuje kinetiku elektrodových reakcí a zpomaluje transport iontů membránou. Příliš vysoká vlhkost zase vede k zaplavení rozvodných kanálků a zhoršení funkčnosti. Relativní vlhkost tedy musí být udržována mezi 80 % a 100 % [3]. Vlhkost svazku je ovlivněna jeho teplotou, použitými materiály a teplotou vstupních plynů. Dále závisí na kinetice elektrochemických reakcí, geometrii rozvodných kanálků a geometrii a morfologii membrány a elektrod.

Řízení teploty

Oproti běžnému spalovacímu motoru vyžaduje FC systém výrazně přesnější řízení teploty. V ideálním případě se teplota udržuje na 80 °C s rovnoměrným rozložením mezi celami i v rámci plochy každé z cel [3]. Jak lze očekávat z předcházejících odstavců, teplota svazku článků je ovlivněna vlastnostmi vstupních plynů i provozními podmínkami, jelikož účinnost je závislá na výstupním výkonu-

Řízení výkonu

V závislosti na použití se značně liší provozní módy FC systému. Pokud je používán jako prodlužovač dojezdu, je typicky řízen způsobem zapnuto/vypnuto. V tom případě svazek buď dodává konstantní výkon (za optimálních podmínek) nebo je odstaven. V případě dynamičtějšího provozu je však třeba brát v úvahu výkonovou charakteristiku, která je značně nelineární. Řídicí systém potom určuje zátěž svazku s pomocí DC/DC měniče.

Studený start

V průběhu vývoje palivových článků byla otázka jejich fungování v chladném prostředí jedním z hlavních důvodů, který bránil jejich rozšíření do osobních automobilů. V současné době je pro studený start umožněn díky dodatečným topením a řídicímu systému, který musí zajistit [3]:

1. Start svazku v omezeném čase
    a. Současné předpisy vyžadují, aby do 30 s svazek poskytoval 50 % nominálního výkonu při okolní teplotě -20 °C.
2. Prevenci tvoření ledových krystalů, které by nenávratně poškodily články.

10 Scale-up

V této části jsou nastíněny hlavní aspekty zvětšování výkonu systému až do 200 kW kontinuálního výkonu. Rozčlenění do podsekcí odpovídá sub-systémům FC systému.

10.1 Svazek palivových článků

Samostatné svazky s výkonem přesahujícím 100 kW jsou technicky proveditelné a instalují se do nákladních či osobních vozidel. Tyto svazky jsou ale obtížně komerčně dostupné. Jak již bylo zmíněno v sekci 4, běžně dostupné jsou svazky s výkonem do cca 30 kW. Větší svazky jsou většinou nabízeny pouze jako součást modulu zahrnujícího ještě další komponenty.

Jako nejproveditelnější pro systém s 200 kW výkonu se tedy zdá použití vícesvazkové architektury. Ta spočívá ve sdílení podpůrných komponent FC systému více menšími svazky. Technické detaily tohoto přístupu jsou uvedeny v sekci 3.3.2 a jeho důsledky pro ostatní součásti systému jsou popsány v následujících odstavcích.

10.2 Vodíkový systém

Vodíkový systém se skládá z úložiště vodíku a jeho přívodu k palivovým článkům. Zvětšení kapacity skladovací části je relativně přímočaré a většinou se řeší navýšením počtu nádob. Konkrétní řešení závisí na prostorových omezeních dané aplikace.

Přizpůsobení systému pro přívod paliva na vyšší průtoky lze realizovat různými způsoby v závislosti na vícesvazkové architektuře. V případě, že je více svazků napájeno ze stejného úložiště, je pravděpodobně nutné použít recirkulační čerpadlo a řízenou distribuci paliva do jednotlivých svazků.

10.3 Vzduchový systém

Podobná situace jako v případě přívodu vodíku nastává i pří zvyšování průtoku vzduchu. Společně s dostatečně výkonným kompresorem je třeba řídit i ventily nutné ke správné distribuci vzduchu do jednotlivých článků.

10.4 Měnič napětí

Různé elektrické konfigurace vícesvazkové architektury jsou uvedeny v sekci 3.3.2. V každém z případů však nárůst výkonu systému vede ke zvýšeným nárokům na odvod tepla. Je tedy třeba zajistit dostatečnou kapacitu chladicího systému.

10.5 Chlazení

Jak bylo uvedeno výše, produkce tepla u palivových článků množstvím energie zhruba odpovídá produkci elektřinu. Pro 200 kW systém je tedy nutné počítat s minimálně 200 kW tepelného toku. V případě vícesvazkové architektury se jedná o distribuovaný systém vyžadující vícero výměníků tepla a potenciálně i více chladicích okruhů. V každém případě se zvyšují nároky na řídicí systém

10.6 Automatizace

Distribuovaný systém v případě vícesvazkové architektury vyžaduje robustní a pečlivě strukturovaný řídicí systém. Více menších svazků je výhodou z hlediska flexibility. V případě poruchy jednoho z nich jej lze vyřadit z provozu bez odstavení celého zařízení. Všechny potenciální stavy však musejí být správně vyhodnoceny řídicím systémem.

11 Projekt prototypu

Na základě detailní analýzy z předchozích kapitol zde uvádíme přibližnou specifikaci prototypu FC systému o výkonu 30 kW. Ke konkrétnímu řešení sub-systémů existují různé přístupy, uvádíme tedy přehled pro tři případy, které zhruba odpovídají třem uvažovaným aplikacím:

- **Vysoká hmotnost, nízké napětí** (loď)
  - Více svazků
  - Recirkulační čerpadlo na vodík
  - Vodní chlazení
  - Vzduchový kompresor
  - Snižovač napětí (DC/DC)
- **Kompaktní rozměry, vysoké napětí** (nákladní automobil)
  - Jeden svazek
  - Recirkulační čerpadlo na vodík
  - Vodní chlazení
  - Turbodmychadlo na vzduch
  - Zvyšovač napětí (DC/DC)
- **Ultralehké řešení** (letadlo)
  - Ultralehký svazek
  - Vodíkový ejektor
  - Vzduchové chlazení
  - NACA vstup (bez kompresoru)
  - Zvyšovač i snižovač napětí (DC/DC)

11.1 Rozpočet

Tabulka 13 shrnuje očekávané náklady spojené s vývojem a výrobou prototypu pro každý z výše uvedených případů. Ceny jsou uvedeny pro základní případ 1 (loď) a další sloupce specifikují navýšení nákladů pro případy 2 a 3.

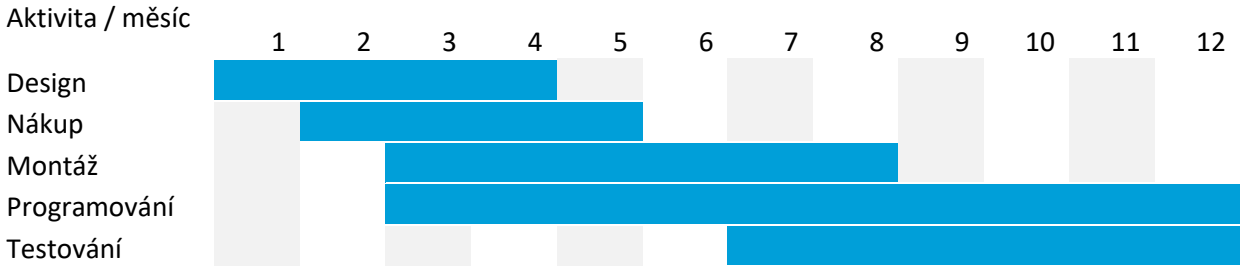
Tabulka 13: Orientační rozpočet pro vývoj a výrobu prototypu vodíkového generátoru s použitím komerčního svazku palivových článků.

Systém / součást	**Cena (EUR)**	**Navýšení pro Případ 2**	**Navýšení pro Případ 3**
Vzduchový systém			
Příslušenství	1000	100%	Neznámé
Kompresor	5000	100%	-
Zvlhčovač	3000	100%	Neznámé
Automatizace			
Akční členy	2500	100%	Neznámé
Řídicí jednotka	3000	100%	Neznámé
Bezpečnost	1500	100%	Neznámé
Senzory	1500	100%	Neznámé
Chlazení			
Příslušenství	1000	50%	Neznámé
De-ionizátor	1000	-	Neznámé
Výměník tepla	1500	100%	Neznámé
Čerpadlo	1000	50%	Neznámé
Svazek pal. článků			
Svazek	20000	20%	1000%
Vodíkový systém			
Přívod paliva	5000	100%	Neznámé
Příslušenství nádob	2000	100%	Neznámé
Nádoby	5800	500%	500%
Výroba			
Montáž	8000	50%	100%
Design	10000	50%	100%
Programování	6000	50%	100%
Nákup	1000	50%	100%
Testování	5000	50%	100%
Elektronika			
DC/DC měnič	10000	20%	Neznámé
Monitor napětí	2500	Neznámé	Neznámé
Celkem	**97300**		

11.2 Řízení projektu

Pro úspěšnou realizaci prototypu vodíkového generátoru bude zapotřebí koordinované úsilí ve vývoji jak hardwaru, tak softwaru. Každá z těchto oblastí se však řídí odlišnými principy, což by mělo být zohledněno v rámci řízení projektu.

Tabulka 14: Časová osa vývoje prototypu FC systému.



11.2.1 Hardware

První prototyp bude sestaven převážně z nakupovaných komponent od externích dodavatelů. Časová osa hardwarové části projektu je tedy relativně přímočará a závisí na dodacích lhůtách komponent. Přibližný průběh zobrazuje pomocí Ganttova grafu Tabulka 14. Seznam nakupovaných komponent je výsledkem fáze návrhu a specifikace. Montáž začíná co nejdříve po obdržení komponent, aby bylo umožněno testování jednotlivých částí. V neposlední řadě by časová osa montáže měla zajistit dostupnost jednotlivých funkčních sub-systémů pro vývoj softwaru a jeho testování. Z těchto důvodů jsou specifikovány následující milníky projektu:

1. **Vzduchový systém** (provizorní konstrukce pro testování)
2. **Vodíkový systém** (provizorní konstrukce pro testování)
3. **Chladicí systém** (provizorní konstrukce pro testování)
4. **Svazek** palivových článků (připojen k provizorním sub-systémům a laboratorní zátěži)
5. Připojení k **úložišti** vodíku
6. Svazek se vzduchovým systémem, vodíkovým systémem a chlazením v definitivní konstrukci
7. Zapojení k reálné zátěži přes **měnič napětí**

11.2.2 Software

Vývoj softwaru je v mnohem menší míře limitován dostupností komponent. Zároveň je však složité vytvořit správnou specifikaci softwarového řešení, když není k dispozici zařízení, jež má být řízeno. Z těchto důvodů bude vývoj softwaru řízen pomocí tzv. štíhlého (lean) či agilního přístupu s použitím cyklu Tvorba – Měření – Ponaučení [17]. Lze odhadnout, že během průběhu projektu může být tento cyklus zopakován třikrát až čtyřikrát, což by mělo vést k mnohem lepším výsledkům než v případě lineárního přístupu. Tento přístup rovněž umožňuje otestování různých strategií řízení (popsáno v sekci 9.2). Díky tomu může být vhodná strategie řízení implementována i v pozdějších fázích projektu dle výsledků testování.

11.3 Masová produkce

Posun od prototypu k masové produkci je vždy velkou výzvou. Jelikož systém uvažovaný v této studii závisí na nakupovaných komponentech, přesun k masové produkci bude především vyžadovat jednání s dodavateli. Na základě předběžných jednání lze předpokládat, že při objednávkách přesahujících 100 ks může množstevní sleva dosáhnout až 40 % pro klíčové součásti systému (svazek článků, nádoby na vodík).

Jako předstupeň masové produkce by bylo nutné zrevidovat konstrukci prototypu tak, aby umožňovala případné změny dodavatelů jednotlivých částí. V softwarové části by musel zdrojový kód být upraven směrem k větší robustnosti umožňující centrální údržbu pro větší množství jednotek v ostrém provozu.

Přechod k masové produkci vyžaduje certifikaci procesů konstrukce a výroby produktu. V závislosti na aplikaci se liší složitost certifikačního procesu. Lze však říci, že nejnáročnější z pohledu certifikace je letecký průmysl. Přehled certifikačních autorit shrnuje Tabulka 15.

Tabulka 15: Certifikační autority pro různé oblasti a aplikace.

Region	Lodní doprava	Nákladní automobily	Letectví
EU	European Maritime Safety Agency (EMSA)	Liší se dle zemí	European Union Aviation Safety Agency (EASA)
USA	Federal Maritime Commission (FMC)	Department of Transportation (DOT)	Federal Aviation Administration (FAA)

12 Příloha I: Fyzikální vlastnosti

Tabulka 16: Obecné vlastnosti.

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Normální teplota	NTP	20	°C
Normální tlak		101 325	Pa

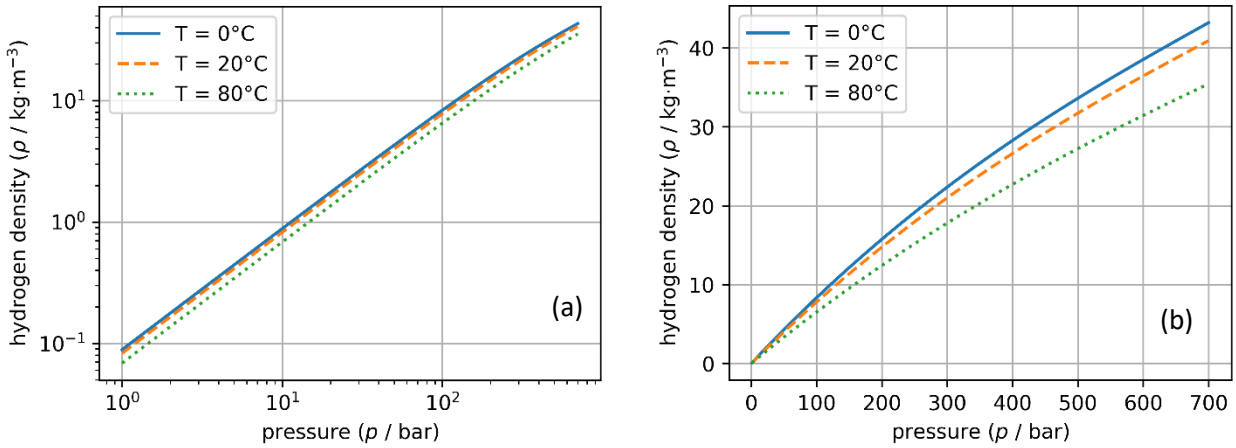
12.1 Vlastnosti vodíku

Za běžné teploty a tlaku je vodík bezbarvý plyn bez zápachu. Jedná se o vysoce hořlavý di-atomický plyn s molekulárním vzorcem H_2. Nejdůležitější vlastnosti vodíku shrnuje Tabulka 17.

Tabulka 17: Vlastnosti vodíku [11].

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Výhřevnost (voda jako pára)	H_{LHV}	$119.96 \cdot 10^6$	$\mathrm{J \cdot kg^{-1}}$
Spalné teplo (voda jako kapalina)	H_{HHV}	$141.80 \cdot 10^6$	$\mathrm{J \cdot kg^{-1}}$
Teplota bodu varu	T_{b}	20	K
Teplota bodu tání	T_{m}	14	K
Hustota plynu (při NTP)	ρ_{g}	0.08376	$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
Hustota kapaliny (při T_{b})	ρ_{l}	70.8	$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
Molární hmotnost H_2	M	2.016	$\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$

Hustota je důležitou vlastností při manipulaci s plyny při různých teplotách a tlacích. Hustota vodíku odpovídá modelu ideálního plynu při nižších tlacích, což potvrzuje křivka přímé úměry, kterou znázorňuje Obrázek 20a. Pro tlak převyšující cca 100 bar (což odpovídá tlaku běžně používanému pro skladování vodíku) je však již odchylka od chování ideálního plynu značná. Je tedy třeba uplatnit příslušné korekce (viz Obrázek 20b). Grafy byly vytvořeny dle polynomiální rovnice přizpůsobené datům z National Institute of Standards and Technology (NIST) [18].



Obrázek 20: Hustota vodíku v závislosti na tlaku pro různé teploty v grafech s (a) logaritmickým měřítkem a (b) lineárním měřítkem.

12.2 Vlastnosti kyslíku / vzduchu

Tabulka 18: Vlastnosti kyslíku.

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Hustota plynu (při NTP)	ρ_g	1.43	$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
Molární hmotnost O_2	M	31.99	$\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$

Tabulka 19: Vlastnosti vzduchu.

Veličina	Symbol	Hodnota	Jednotka
Hustota plynu (při NTP)	ρ_g	1.204	$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
Střední molární hmotnost	M	28.97	$\mathrm{g \cdot mol^{-1}}$

13 Příloha II: Rovnice

13.1 Reakce palivového článku

V palivovém článku typu PEM probíhají komplexní elektrochemické reakce umožněné použitím kovových katalyzátorů. Aniž bychom diskutovali mechanismy reakcí, můžeme shrnout celkovou reakci [19]:

$$\mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O}, \tag{13.1}$$

kterou lze číst tak, že z jedné molekuly vodíku a poloviny molekuly kyslíku vzniká jedna molekula vody. Jelikož se jedná o elektrochemickou reakci, je nutné vzít v úvahu i elektrický náboj s reakcí spojený. Na jednu molekulu vodíku připadají dva elektrony, které procházejí externím obvodem a následně redukují kyslík na druhé elektrodě. Pokud tento vztah vyjádříme pomocí počtu molů místo počtu molekul (tedy násobíme Avogadrovým číslem), získáme:

$$Q = 2nF, \tag{13.2}$$

kde Q je elektrický náboj v Coulombech (C), n je látkové množství vodíku v molech (mol) a $F = 96485\ \mathrm{C} \cdot \mathrm{mol}^{-1}$ je Faradayova konstanta. Z rovnice (13.1) víme, že:

$$n = n_{\mathrm{H_2}} = n_{\mathrm{H_2O}} = 2n_{\mathrm{O_2}} \tag{13.3}$$

Tyto rovnice představují *stechiometrické* (tedy právě potřebné) množství reaktantů, které jsou potřeba pro vytvoření požadovaného náboje.

13.2 Spotřeba plynů

Palivové články fungují v průtočném režimu, je tedy praktičtější vyjádřit příslušné veličiny jako toky. Elektrický náboj za jednotku času je elektrický proud I v Ampérech ($\mathrm{A} = \mathrm{C} \cdot \mathrm{s}^{-1}$) a látkové množství n za čas odpovídá rychlosti chemické reakce $\dot{n}$ v molech za sekundu. Výsledný vztah je:

$$I = 2\dot{n}F. \tag{13.4}$$

Při provozu palivových článků se často používá větší množství reaktantů, než odpovídá stechiometrickému množství. V tom případě se používá termín stechiometrie a symbol λ pro kvantifikaci přebytku reaktantů, tedy $\lambda\dot{n}$ molů. Stechiometrie se může lišit pro katodu a anodu. Zde používáme značení vycházející z typu plynu, tedy $\lambda_{\mathrm{O_2}}$, λ_{Air} and $\lambda_{\mathrm{H_2}}$ pro kyslík, vzduch a vodík.

13.2.1 Samostatný článek

Užitečnější tvar rovnice (13.4) lze získat vyjádřením v běžněji používaných jednotkách (slpm: standardní litr za minutu), to bude uvedeno v další části. U typického palivového článku známe předem jeho výkon spíše než proud. Tyto dvě veličiny jsou pro jeden článek v následujícím vztahu [19, 20]:

$$I = \frac{P_{\mathrm{c}}}{U_{\mathrm{c}}} \tag{13.5}$$

kde P_{c} je výkon článku ve Wattech (W) a U_{c} napětí článku ve Voltech (V). Napětí není předem známé, jelikož je závislé na provozních podmínkách. Jako odhad lze napětí spočíst z měřené účinnosti, nebo použít přibližnou hodnotu $U_{\mathrm{c}} = 0.6\ \mathrm{V}$ [19]. Nakonec získáme vztah pro jeden článek:

$$\dot{n}_{\mathrm{c}} = \frac{P_{\mathrm{c}}}{2U_{\mathrm{c}}F} \tag{13.6}$$

13.2.2 Svazek palivových článků

V případě sériového zapojení více článků vzniká jejich svazek. Pro svazek N článků můžeme sečíst obě stany rovnice (13.6) a získáme:

$$\sum_{i=1}^{N} \dot{n}_{\mathrm{c},i} = \sum_{i=1}^{N} \frac{P_{\mathrm{c},i}}{2U_{\mathrm{c},i}F} \tag{13.7}$$

Pokud budeme předpokládat, že všechny články svazku mají stejné napětí: $U_{\mathrm{c},i} = U_{\mathrm{c}}$ for $i = 1, \dots, N$ (hrubá aproximace) a označíme $\dot{n}_{\mathrm{s}} = \sum_{i=1}^{N} \dot{n}_{\mathrm{c},i}$ spotřebu plynu svazkem a $P_{\mathrm{s}} = \sum_{i=1}^{N} P_{\mathrm{c},i}$ výkon svazku, získáme následující vztah:

$$\dot{n}_{\mathrm{s}} = \frac{P_{\mathrm{s}}}{2U_{\mathrm{c}}F} \tag{13.8}$$

13.2.3 Kyslík / vzduch

Spotřeba plynu na katodě svazku článků závisí na použitém oxidantu. V praktických aplikacích se používá vzduch, ale i použití samotného kyslíku je možné. Odvození začínáme s kyslíkem. Zkombinujeme rovnice (13.3) a (13.8), čímž při zahrnutí stechiometrie získáme následující vztah pro molární průtok kyslíku:

$$\dot{n}_{\mathrm{s,O_2}} = \frac{\lambda_{\mathrm{O_2}} P_{\mathrm{s}}}{4U_{\mathrm{c}}F} \tag{13.9}$$

Praktičtější je vyjádřit průtok jako hmotnostní. Pro tyto účely použijeme vztah pro hmotnost:

$$m = nM, \tag{13.10}$$

kde M je molární hmotnost. Použijeme přibližnou hodnotu $M_{\mathrm{O_2}} = 32 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$ a získáme vztah pro hmotnostní průtok kyslíku:

$$\dot{m}_{\mathrm{O_2}} = \frac{M_{\mathrm{O_2}} \lambda_{\mathrm{O_2}} P_{\mathrm{s}}}{4U_{\mathrm{c}}F} = \frac{8 \cdot 10^{-3} \lambda_{\mathrm{O_2}} P_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c}}F}, \tag{13.11}$$

Uvažujeme-li hustotu kyslíku při NTP: $\rho_{\mathrm{O_2}} = 1.43\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, vynásobíme $42 \cdot 10^3$ pro získání hodnoty v slpm.

Molární hmotnost vzduchu je $M_{\mathrm{Air}} = 28.97 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$ a molární zlomek kyslíku ve vzduchu $x_{\mathrm{O_2/Air}} = 0.21$. Pro hmotnostní průtok vzduchu dostaneme:

$$\dot{m}_{\mathrm{Air}} = \frac{M_{\mathrm{Air}} \lambda_{\mathrm{Air}} P_{\mathrm{s}}}{4x_{\mathrm{O_2/Air}} U_{\mathrm{c}}F} = \frac{34.5 \cdot 10^{-3} \lambda_{\mathrm{Air}} P_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c}}F}, \tag{13.12}$$

Uvažujeme-li hustotu vzduchu při NTP: $\rho_{\mathrm{Air}} = 1.204\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, vynásobíme $47 \cdot 10^3$ pro získání hodnoty v slpm.

13.2.4 Vodík

Molární hmotnost vodíku je $M_{\mathrm{H_2}} = 2.02 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$ a pokud vezmeme v úvahu rovnici (13.3) získáme [8]:

$$\dot{m}_{\mathrm{H_2}} = \frac{M_{\mathrm{H_2}} \lambda_{\mathrm{H_2}} P_{\mathrm{s}}}{2 U_{\mathrm{c}} F} = \frac{1.01 \cdot 10^{-3} \lambda_{\mathrm{H_2}} P_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c}} F}. \tag{13.13}$$

Uvažujeme-li hustotu vodíku při NTP: $\rho_{\mathrm{H_2}} = 0.08376\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, vynásobíme $716 \cdot 10^3$ pro získání hodnoty v slpm.

13.3 Produkce vody

Molární hmotnost vody je $M_{\mathrm{H_2O}} = 18 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$, získáme tedy následující vztah pro produkci vody ve svazku:

$$\dot{m}_{\mathrm{H_2O}} = \frac{M_{\mathrm{H_2O}} P_{\mathrm{s}}}{2 U_{\mathrm{c}} F} = \frac{9 \cdot 10^{-3} P_{\mathrm{s}}}{U_{\mathrm{c}} F}. \tag{13.14}$$

13.4 Účinnost

Účinnost FC systému je ovlivněna řadou faktorů, což odráží jeho komplexní strukturu. Je praktické rozdělit celkovou účinnost systému η_{sys} na účinnosti jednotlivých sub-systémů a komponent, které lze snáze odhadnout.

13.4.1 Účinnost svazku

Účinnost svazku palivových článků lze získat s využitím termodynamických vztahů Celková účinnost svazku η_{stack} má dvě složky:

$$\eta_{\mathrm{stack}} = \eta_{\mathrm{t}} \eta_{\mathrm{e}}, \tag{13.15}$$

kde η_{t} je tepelná účinnost a η_{e} je elektrická účinnost. Kvůli entropickým efektům nelze využít veškerý energetický obsah vodíku, což se odráží v hodnotě tepelné účinnosti $\eta_{\mathrm{t}} = 0.83$ pro PEM palivové články. Jedná se o termodynamický limit účinnosti svazku, která není ovlivněna konstrukcí systému.

Elektrická účinnost znázorňuje, jaké množství užitečné energie je použito ke konání elektrické práce. Pokud uvažujeme produkci vody v plynném skupenství, je teoretické maximální napětí článku při NTP $U_{\mathrm{c,max}} = 1.187\ \mathrm{V}$ [21, 11]. Účinnost článku $\eta_{\mathrm{e,c}}$ je poměr skutečného napětí článku a teoretického maximálního napětí:

$$\eta_{\mathrm{e,c}} = \frac{U_{\mathrm{c}}}{U_{\mathrm{c,max}}}, \tag{13.16}$$

což vede k typickým hodnotám $\eta_{\mathrm{e,c}} = 0.5$ pro přibližnou hodnotu $U_{\mathrm{c}} = 0.6\ \mathrm{V}$ a může dosáhnout až 0.9 při OCV [11].

13.5 Produkce tepla

Přesné množství produkovaného tepla závisí na provozních podmínkách a vychází z entalpické bilance svazku. Odhad produkce tepla lze však získat z úvah o účinnosti. V závislosti na účinnosti článku $\eta_{\mathrm{e,c}}$, tepelný tok $\dot{H}$ ve Wattech:

$$\dot{H} = P_{\mathrm{s}}\left(\frac{1}{\eta_{\mathrm{e,c}}} - 1\right). \tag{13.17}$$

Tento vztah předpokládá, že voda vzniká ve formě plynu. Pokud voda kondenzuje, vzniká dodatečné teplo a pro výpočet účinnosti je třeba použít maximální napětí cely odpovídající spalnému teplu ($U_{\mathrm{c,max}} = 1.23\ \mathrm{V}$).

13.6 Spotřeba paliva

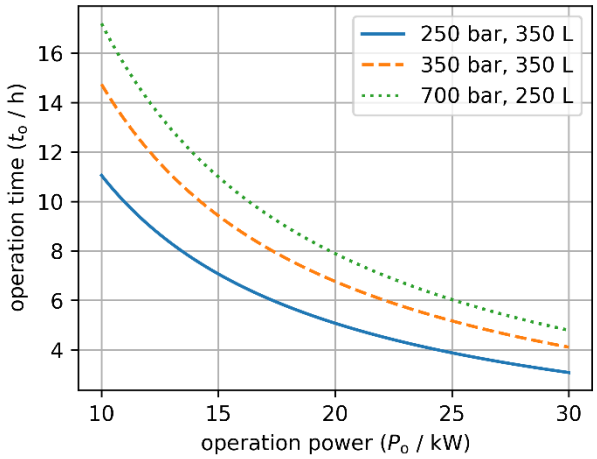
Důležitou charakteristikou mobilních aplikací poháněných vodíkem je jejich dojezd. Z pohledu uživatele se jedná o otázku „Jak daleko dojedu s plnou nádrží?“. Odpověď na tuto otázku je ovlivněna řadou faktorů:

1. velikost nádrží na vodík,
2. účinnost pohonného systému,
3. vlastnosti vozidla / plavidla (hmotnost, tvar atd.),
4. parametry pohybu (rychlost, zrychlení, sklon atd.).

Z tohoto vyplývá, že určit dojezd vyjádřený v litrech na 100 km je složitá úloha i pro známý systém. Vzhledem k tomu, že tato studie je zaměřena široce, není cílem poskytnout informace o dojezdu v této formě. Vypovídací hodnotu má veličina často používaná u běžných spalovacích motorů, tzv. specifická spotřeba paliva [8]:

$$f_{\mathrm{c}} = \frac{1}{\eta_{\mathrm{sys}} H_{\mathrm{LHV}}}. \tag{13.18}$$

Hodnota η_{sys} pro FC systém není konstantní a závisí na provozních podmínkách. Dle [8] se účinnost FC systému s vodíkem a vzduchem pohybuje od $\eta_{\mathrm{sys,\,low}} = 44\%$ do $\eta_{\mathrm{sys,\,high}} = 57\%$, což vede ke spotřebě paliva mezi $68\ \mathrm{g} \cdot \mathrm{kWh}^{-1}$ a $53\ \mathrm{g} \cdot \mathrm{kWh}^{-1}$. Tyto hodnoty lze použít pro odhad provozního času t_{o}, pokud je znám průměrný požadovaný výkon a velikost úložiště vodíku. S uvážení všech těchto efektů získáme hodnoty t_{o} pro různé podmínky Obrázek 21.



Obrázek 21: Provozní čas 30 kW FC systému v závislosti na provozním výkonu pro různé tlaky a objemy nádob na vodík.

14 Příloha III: Přehled konkurentů

V této příloze uvádíme seznam vybraných společností aktivních ve vývoji a produkci elektrických pohonných systémů. Seznam je rozdělen dle primárního zaměření společnosti. **B** značí pohon poháněný bateriemi, **FC** reprezentuje pohon palivovými články:

1. Lodě
    a. Toroidion (FIN): **B**
        i. Též vozidla a letadla
    b. Oceanvolt (USA): **B**
    c. Canadian Electric Boat Co. (CA): **B**
    d. Hydroxy 3000 - prototyp (CH): **FC**
    e. Energy observer – prototyp (FR): **FC**
2. Nákladní automobily
    a. Nikola Motor Company (USA): **B** & **FC**
    b. Hyundai (KR): **B** & **FC**
    c. Toyota (JAP): **B** & **FC**
    d. Daimler + Volvo (DE, SE): **B** & **FC**
3. Letectví
    a. Volocopter GmbH (DE): **B**
    b. Kitty Hawk (USA): **B**
    c. ZeroAvia (USA): **FC**
    d. Pipistrel Aircraft (SLO): **B**
    e. Electrofluidsystems (DE): **B**

15 Literatura

[1] J. Beretta, Automotive Electricity, John Wiley & Sons, Inc., 2010.

[2] D.-D. Tran, M. Vafaeipour, M. El Baghdadi, R. Barrero, J. Van Mierlo and O. Hegazy, "Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies," *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS,* vol. 119, no. 109596, 2020.

[3] J. Gao, M. Li, Y. Hu, H. Chen and Y. Ma, "Challenges and developments of automotive fuel cell hybrid power system and control," *SCIENCE CHINA-INFORMATION SCIENCES,* vol. 62, p. 051201:1–051201:25, 2019.

[4] Y. Nonobe, "Development of the Fuel Cell Vehicle Mirai," *IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING,* vol. 12, pp. 5-9, 2017.

[5] N. Marx, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel and K. Agbossou, "A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 39, pp. 12101-12111, 2014.

[6] J. Markowski and I. Pielecha, "The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport," *Earth and Environmental Science ,* vol. 214, no. 012019, 2019.

[7] "Department of Energy: Technical Targets for Fuel Cell Systems and Stacks for Transportation Applications," 2020. [Online]. Available: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications. [Accessed 2020].

[8] F. Barbir, PEM Fuel Cells: Theory and Practice, 2nd ed., Waltham: Elsevier, 2012.

[9] X. Cheng, Z. Shi, N. Glass, L. Zhang, J. Zhang, D. Song, Z. Liu and J. Shen, "A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation," *Journal of Power Sources,* vol. 165, no. 2, 2007.

[10] R. Moradi and K. M. Groth, "Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 44, pp. 12254-12269, 2019.

[11] A. Lanz, "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies," College of the Desert, Palm Desert, CA, USA , 2001.

[12] "Department of Energy: Hydrogen Storage for light-duty vehicles," 2020. [Online]. Available: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-onboard-hydrogen-storage-light-duty-vehicles. [Accessed 2020].

[13] I. Dincer and C. Acar, "A review on potential use of hydrogen in aviation applications," *Int. J. Sustainable Aviation,* vol. 2, no. 1, 2016.

[14] A. Kerviel, A. Pesyridis, A. Mohammed and D. Chalet, "An Evaluation of Turbocharging and Supercharging Options for High-Efficiency Fuel Cell Electric Vehicles," *Applied Sciences,* vol. 8, no. 2474, 2018.

[15] M. Ramezanizadeh, M. A. Nazari, M. H. Ahmadi and L. Chen, "A review on the approaches applied for cooling fuel cells," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* vol. 139, p. 517–525, 2019.

[16] A. Fly and R. H. Thring, "A comparison of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 41, pp. 14217-14229, 2016.

[17] E. Ries, The Lean Startup, London: Penguin Books, 2011.

[18] J. Zheng, X. Zhang, P. Xu, C. Gu, B. Wu and Y. Hou, "Standardized equation for hydrogen gas compressibility factor for fuel consumption applications," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 41, pp. 6610-6617, 2016.

[19] J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2003.

[20] E. M. Purcell, Electricity and Magnetism, Third Edition, New York: Cambridge University Press, 2013.

[21] I. EG&G Technical Services, Fuel Cell Handbook, 7th ed., Morgantown, USA: U.S. Department of Energy, 2004.

[22] J. Butler, "plugboats.com," 2020. [Online]. Available: https://plugboats.com/new-toyota-fuel-cells-powering-hydrogen-ship-tokyo/.