

Diplomová práce

Inovace zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem

Studijní program:

N0788A270004 Inovační a průmyslové inženýrství

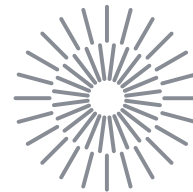
Autor práce:

Bc. Michal Václavík

Vedoucí práce:

prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
Katedra částí a mechanismů strojů

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Inovace zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem

Jméno a příjmení:

Bc. Michal Václavík

Osobní číslo:

S22000269

Studijní program:

N0788A270004 Inovační a průmyslové inženýrství

Zadávací katedra:

Katedra částí a mechanismů strojů

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

Provedte inovaci zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem. Cílem nového řešení je odstranění problému se zamrznáním kondenzátu. Dále integraci odlučovače s odvaděčem do společného celku s cílem snížení hmotnosti.

- 1) Rešerše součástí pro odlučování a odvod vody
- 2) Seznámení s problematikou aktuálního řešení
- 3) Návrh minimálně tří inovovaných konceptů
- 4) Porovnání konceptů a výběr nejvhodnější varianty metodami inovačního inženýrství
- 5) 3D model a výkres sestavy vybraného návrhu
- 6) Závěrečné zhodnocení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce: tištěná/elektronická

Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

[1] MAŠÍN, I. a ŠEVČÍK, L. Metody inovačního inženýrství. 1. vydání. Liberec: Institut technologií a managementu, 2006. 184s. ISBN 80-903533-0-4

[2] LEPŠÍK, P. Nástroje systematické kreativity ke zvyšování efektivity strojů a zařízení. 2021-06-11T07:21:16Z

[3] LEINVEBER, J. a VÁVRA, P. Strojnické tabulky. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4

[4] PEŠÍK, L. Části strojů. 1. díl. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 978-80-7372-573-0

[5] PEŠÍK, L. Části strojů. 2. díl. Liberec: Technická univerzita, 2005. ISBN 978-80-7372-574-7

[6] STŘEDA, I. Základy rovnovážné termodynamiky. 3. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-459-7

[7] DVOŘÁK, V. Mechanika tekutin I Hydrodynamika. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-234-1

Vedoucí práce:

prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.
Katedra částí a mechanismů strojů

Datum zadání práce:

14. listopadu 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petr Lepšík, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Inovace zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje inovaci zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem. V rámci rešerše zmiňuje současné komponenty pro odlučování a odvádění kondenzátu z vlhkého vzduchu. Probírá hlavní problém současného řešení, kterým je zamrzání kondenzátu v plovákovém odvaděči, a navrhuje několik inovačních konceptů, které hodnotí a vybírá pomocí AHP analýzy. V praktické části je popsán průběh vývoje vybraného konceptu a výsledky CFD simulací proudění. Na závěr je vyroben prototyp zařízení a ověřena jeho funkčnost v reálném systému s palivovým článkem.

Klíčová slova

inovace, vodík, palivový článek, odlučovač, odvaděč, zamrzání, kondenzát

Innovation of device for water drainage from a hydrogen fuel cell system

Abstract

The diploma thesis is devoted to the innovation of a device for water drainage from a hydrogen fuel cell system. The research mentions current components for condensate separation and removal from humid air. It discusses the main problem of the current solution, which is the freezing of condensate in the float trap, and proposes several innovative concepts, which are evaluated and selected using AHP analysis. The practical part describes the development process of the selected concept and the results of CFD flow simulations. Finally, a prototype device is fabricated and its functionality is verified in a real fuel cell system.

Keywords

innovation, hydrogen, fuel cell, water separator, steam trap, freezing, condensate

Poděkování

Chtěl bych poděkovat společnosti DEVINN za možnost docházet na odbornou praxi, dále pak panu Jakubu Jačkovi a dalším zaměstnancům vývojového oddělení za nastolení tématu diplomové práce a rady při řešení problému. Poděkování patří i prof. Ing. Ladislavu Ševčíkovi, CSc. za vedení a konzultaci při psaní diplomové práce. V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat mé rodině za podporu a pomoc během celého studia.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Součásti pro odvod vody z palivových článků	12
2.1	Odlučování vody	12
2.1.1	Válcové cyklonové odlučovače.....	12
2.1.2	Speciální cyklonové odlučovače	13
2.2	Odvádění vody	14
2.2.1	Mechanické plovákové odvaděče	14
2.2.2	Solenoidové odváděcí ventily	15
2.3	Integrované odlučovače s odvaděčem.....	15
2.4	Patentovaná řešení	16
3	Současný stav řešeného zařízení	17
4	Navrhované koncepty.....	20
4.1	Koncept A – Koalescenční odlučovač s filtrem	20
4.2	Koncept B1 – Odvaděč s parařinovým ventilem	21
4.3	Koncept B2 – Plovákový odvaděč s elektromagnetem.....	22
4.4	Koncept C – Sifonový odvaděč	23
4.5	Hodnocení a výběr konceptu metodou AHP.....	24
4.5.1	Komplexnost	24
4.5.2	Hmotnost	25
4.5.3	Životnost	25
4.5.4	Spolehlivost.....	26
4.5.5	Porovnání kritérií a celkové hodnocení.....	27
5	Vývoj vybraného konceptu.....	28
5.1	Omezující podmínky.....	28
5.2	Nastavení simulačního softwaru	29
5.3	Postup vývoje.....	30
5.3.1	První návrh.....	31

5.3.2	Druhý návrh	33
5.3.3	Třetí návrh	35
5.4	Podrobný popis finálního návrhu	37
5.4.1	Připojovací část	37
5.4.2	Odlučovací část	38
5.4.3	Odváděcí část	38
5.5	Parametry finálního návrhu	42
6	Experimentální ověření funkčnosti.....	44
6.1	Výroba testovacího prototypu	44
6.2	Zástavba do vodíkového systému	45
6.3	Průběh testu.....	45
6.4	Vyhodnocení testu	46
7	Závěr.....	49

Seznam zkratek

AHP	analytický hierarchický proces – metoda vícekriteriálního hodnocení	-
ASA	akrylonitril styren akrylát – plastový materiál vhodný pro 3D tisk	-
°C	stupeň Celsia – odvozená jednotka teploty	-
Cd	koeficient aerodynamického odporu	-
CFD	Computer Fluid Dynamics – počítačová simulace proudění tekutin	-
d	průměr	m
FDM	Fused deposition modeling – technologie 3D tisku	-
g	gram – dílčí jednotka hmotnosti	-
g/m ³	gram na metr krychlový – dílčí jednotka hustoty	-
g/s	gram za sekundu – dílčí jednotka hmotnostního průtoku	-
h	výška	m
H ₂	chemická značka vodíku	-
H ₂ O	chemické označení vody	-
kg	kilogram – základní jednotka hmotnosti	-
kg/m ³	kilogram na metr krychlový – základní jednotka hustoty	-
kW	kilowatt – násobná jednotka výkonu	-
m/s	metr za sekundu – základní jednotka rychlosti	-
m ³ /min	metr krychlový za minutu – dílčí jednotka objemového průtoku	-
mbar	milibar – dílčí jednotka tlaku	-
ml	mililitr – dílčí jednotka objemu	-
ml/min	mililitr za minutu – dílčí jednotka objemového průtoku	-
mm	milimetr – dílčí jednotka délky	-
NC	normally closed – označení normálně uzavřeného ventilu	-
O ₂	chemická značka kyslíku	-
p	tlak	Pa
Pa	Pascal – základní jednotka tlaku	-
PVC	polyvinylchlorid – označení plastového materiálu	-
Q	objemový průtok	m ³ /s
ρ	hustota	kg/m ³
S	plocha	m ²
V	objem	m ³
v	rychlost	m/s
VDC	volt – jednotka stejnosměrného elektrického napětí	-

1 Úvod

V energetickém odvětví v současné době probíhá transformace od fosilních zdrojů k novým nízkoemisním technologiím. Jednou z protlačovaných možností je i vodík, respektive jeho používání ve vodíkových palivových článkách. Palivové články pro svůj provoz vyžadují vodík a vzduch, jenž se přivádí na jednu, respektive druhou stranu membrány uvnitř článku. Speciální polopropustná polymerová membrána umožňuje proniknout pouze protonům vodíku, které se po průchodu membránou sloučí s kyslíkem ze vzduchu a vzniká voda. Elektrony vodíku musí membránu obejít, a tím generují stejnosměrný elektrický proud. Reakce vodíku a kyslíku je exotermická, kromě vody tedy vytváří i teplo, značná část vody je proto ve formě vodní páry, která zvlhčuje vzduch proudící palivovým článkem. Vlhký vzduch vystupující z článku je výfukovým potrubím veden pryč ze systému do okolní atmosféry. Aby však vlhkost obsažená ve vzduchu nekondenzovala mimo systém s vodíkovým článkem, umísťují se do výfukového potrubí navíc dvě komponenty: odlučovač a odvaděč vody. [1]

Společnost DEVINN z Jablonce nad Nisou je průkopníkem v oblasti vodíkových technologií v České republice. Jedním z jejich vyvíjených produktů je zařízení H2BASE, které by se mělo stát nástupcem naftových generátorů a elektrocentrál. Jednou z částí systému H2BASE je právě i palivový článek včetně odlučovače a odvaděče. S použitým typem odvaděče kondenzátu jsou spojené problémy, protože se v něm stále nachází určitý objem vody, která může při teplotách pod bodem mrazu zmrznout, což by mohlo následně způsobit až poškození membrány v palivovém článku. [2]

Cíl diplomové práce

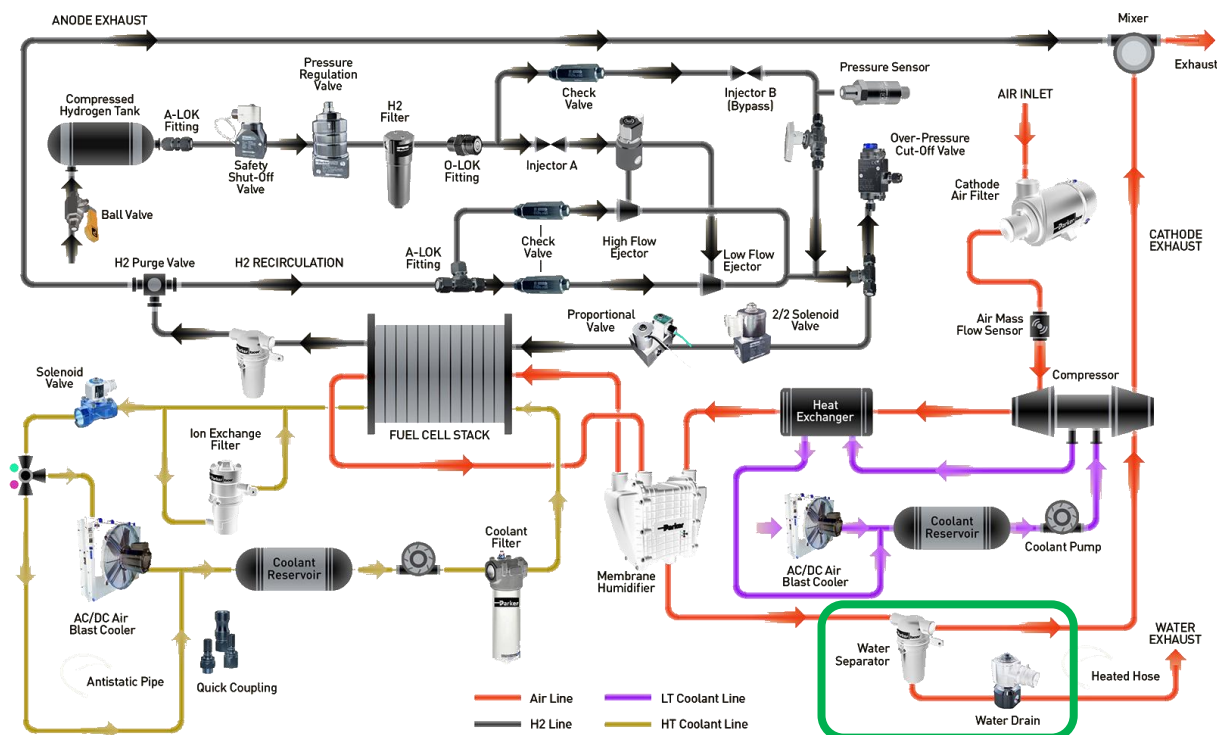
Cílem diplomové práce je provést inovaci zařízení pro odvod vody ze systému s vodíkovým palivovým článkem. Nové řešení odstraní problém se zamrznutím kondenzátu, integruje odlučovač s odvaděčem do společného celku a bude mít nižší hmotnost.

Parametry zadání

Inovované zařízení musí splňovat několik parametrů určených výrobcem palivového článku a rozměrová omezení pro zástavbu do systému. Tlaková ztráta mezi vstupem a výstupem zařízení nesmí přesáhnout 12 mbar při maximálním průtoku vzduchu 1,5 m³/min. Materiál zařízení je nutné zvolit s ohledem na teplotu vzduchu až 80 °C. Zařízení musí mít dostatečnou kapacitu pro odvod vzniklého kondenzátu i při špičkovém průtoku vodíku 0,5 g/s. Zástavbový prostor v systému má rozměry 140x140x400 mm. Vstupní a výstupní vzduchové potrubí bude napojeno přes hadičníky se závitem G 1 1/2".

2 Součásti pro odvod vody z palivových článků

V systému vodíkového palivového článku se zpravidla nacházejí 4 okruhy s různým médiem: vzduchový (oranžově), vodíkový (černě), nízkoteplotní chladicí (fialově) a vysokoteplotní chladicí (žlutě). Diplomová práce se blíže věnuje vzduchovému okruhu, konkrétně jeho výfukové části, kde řeší komponenty odlučovač a odvaděč vody (zelená oblast). [3]



Obrázek 1: Orientační schéma systému palivového článku s vyznačenou řešenou oblastí [3]

2.1 Odlučování vody

Vlhký vzduch, který proudí z vodíkového článku, je nutné vysušit, aby obsažené kapky vody a vlhkost nekondenzovaly mimo zařízení. Za tímto účelem se do výfukového potrubí umísťují odlučovače vody, což jsou zařízení, která odseparují vlhkost obsaženou ve vzduchu a dále do výfukového potrubí pokračuje pouze vysušený proud vzduchu. V systémech s palivovými články jsou nejpoužívanější cyklonové odlučovače. [3]

2.1.1 Válcové cyklonové odlučovače

Cyklonové odlučovače mají nejčastěji tvar válce, do kterého v horní části tečně ústí vstupní potrubí. Proud vlhkého vzduchu je naveden na válcovou stěnu a postupně klesá po šroubovité trajektorii. Díky tomu je obsah vody tlačěn odstředivou silou na stěnu válce, kde vlhkost zkondukuje a ve formě kapek stéká na dno odlučovače. Kondenzát je dále sveden do výtokového potrubí. Proud suchého vzduchu se ve spodní části obrací, směřuje vzhůru výstupním

středovým komínem a pryč z odlučovače do výfuku. Účinnost separace dosahuje až 99 %, ale velmi závisí na zvolení správné velikosti odlučovače. Použití příliš velkého odlučovače způsobí nízkou účinnost separace, naopak poddimenzování povede k tlakovým ztrátám. Většina dostupných válcových cyklonových odlučovačů je primárně určena do jiných energetických celků, ale někteří výrobci již nabízejí i řešení dedikovaná přímo pro vodíkové články. [3, 4, 22]



Obrázek 2: Cyklonový odlučovač Parker Hannifin [3]

2.1.2 Speciální cyklonové odlučovače

Kromě rozšířenějších válcových separátorů existují i odlučovače s jinou konstrukcí. Společnost Mann+Hummel nabízí patentově chráněný cyklonový odlučovač speciálně určený pro použití v systémech s palivovými články. Proud vlhkého vzduchu vstupuje do odlučovače zesponu a následně je lopatkovým kolem uveden do vířivého proudění, které způsobí separaci kondenzátu na stěně kónického potrubí. Díky vysoké rychlosti proudu vzduchu pokračují kapky vody směrem vzhůru a přepadávají přes hranu potrubí do sběrného prstence, odkud nahromaděný kondenzát přes děrované síto odtéká. Vysušený proud vzduchu pokračuje přímým směrem do výstupního potrubí. Výrobce uvádí hodnotu účinnosti odlučování vyšší než 85 %. Výhodou tohoto řešení jsou kompaktnější rozměry a možnost montáže pod úhlem nebo zcela vodorovně. [5]



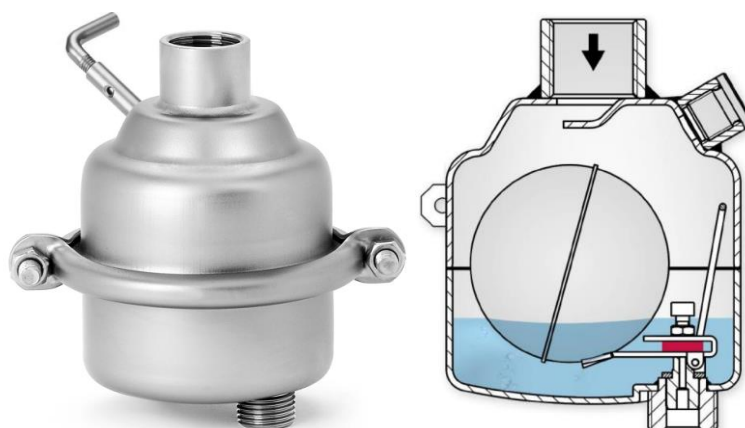
Obrázek 3: Cyklonový odlučovač Mann+Hummel [5]

2.2 Odvádění vody

Odvaděč vody je komponenta, která ze směsi vlhkého vzduchu s kondenzátem propouští vodu a zároveň zamezuje úniku vzduchu ven ze systému. V systémech s palivovými články se umísťují za odlučovače vody, protože ty nejsou utěsněné, a tak se v odseparované vodě může vyskytovat i část vzduchu, který by jinak proudil výtokem pro kondenzát a negativně by se projevoval syčením nebo prskáním. Ve vzduchu se může nacházet i malý obsah vodíku, který projde palivovým článkem. Aby se zabránilo potenciálně nebezpečné situaci, je nutné zamezit úniku vodíku mimo systém. Odváděče vody se primárně používají v energetických systémech, které pracují s párou o vysokém tlaku, existují např. termostatické, termodynamické, plovákové nebo hříčkové odváděče. Ve vodíkových systémech se však vyskytují zejména dva typy odváděčů kondenzátu: mechanické plovákové odváděče a solenoidové odváděcí ventily. [6, 7, 8]

2.2.1 Mechanické plovákové odváděče

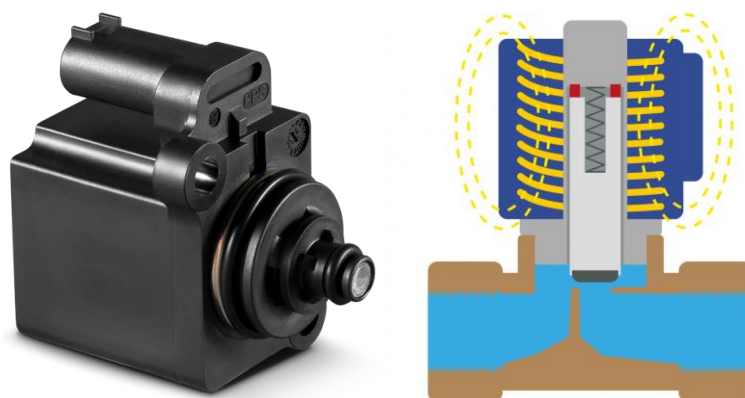
Mechanické plovákové odváděče kondenzátu obsahují dutinu, ve které se nachází kulový plovák s pákou ovládající výpustní ventil. Do dutiny vtéká vstupním otvorem voda a vzrůstající hladina nadnáší vztlakovou silou plovák. Když se v odváděči nachází nulová nebo nízká hladina kondenzátu, plovákem ovládaný výstupní ventil zůstává uzavřený. Jakmile však rostoucí hladina vody dosáhne určité výšky, plovák přes páku otevře výpustní ventil a z odváděče začne odtékat voda. Tím však současně klesne hladina kondenzátu uvnitř, čímž dojde k opětovnému uzavření výtokového ventilu. Výška hladiny proto opět začne stoupat až do úrovně, kde plovák otevírá ventil. Tento cyklus se neustále opakuje a odváděč tak po malých dávkách upouští kondenzát ze systému. Během provozu se mezi vstupem a výstupem z odváděče pořád nachází určitý objem kondenzátu, který slouží jako zábrana proti úniku vzduchu. Tato vlastnost je zároveň i problémem pro použití plovákových odváděčů v rámci vodíkových aplikací. Kondenzát totiž zůstává v odváděči i po ukončení provozu a může docházet k jeho zamrznutí. [8, 9, 10]



Obrázek 4: Mechanický plovákový odváděč a jeho princip [8, 10]

2.2.2 Solenoidové odváděcí ventily

Solenoidové ventily jsou modernější alternativou pro odvod vody ze systému palivového článku. Zpravidla se jedná o dvupolohový elektromagnetický ventil se dvěma vstupy, který je mimo provoz trvale uzavřený (2/2 NC). Napájení je zajištěno pomocí 12/24 VDC z nízkonapěťového okruhu systému. Aby ventil mohl odvádět kondenzát, musí být rovněž napojený na řídicí jednotku palivového článku. Podle aktuálního stavu systému jednotka vydává ventilu signály, kdy se má otevřít a uzavřít, aby dle potřeby odpouštěl vodu. Pro lepší funkci je možné ventil spojit s hladinovým čidlem a případně i se sběrnou nádobou na vodu. Při provozu objem vody postupně roste, než dosáhne úrovně hladinového čidla. Sensor vyšle signál do řídicí jednotky, která vydá pokyn solenoidovému ventilu, aby se otevřel. Kondenzát začne odtékat a výška hladiny klesá. Po určité době se ventil opět uzavře, hladina začne stoupat a po dosažení úrovně čidla se celý proces opakuje. Řídicí jednotka, solenoidový ventil a hladinové čidlo v podstatě simulují funkci plovákového ventilu. Uvnitř zařízení se tedy neustále nachází určitá hladina vody, která zabraňuje vzduchu, aby vstupoval do odtokového potrubí pro kondenzát. Před vypnutím palivového článku je z ventilu vypuštěn veškerý obsah vody, která by mohla uvnitř zamrznout. Ze stejného důvodu lze ventil dovybavit i vyhříváním. [7, 11, 12]



Obrázek 5: Solenoidový odváděcí ventil a jeho princip [7, 12]

2.3 Integrované odlučovače s odváděčem

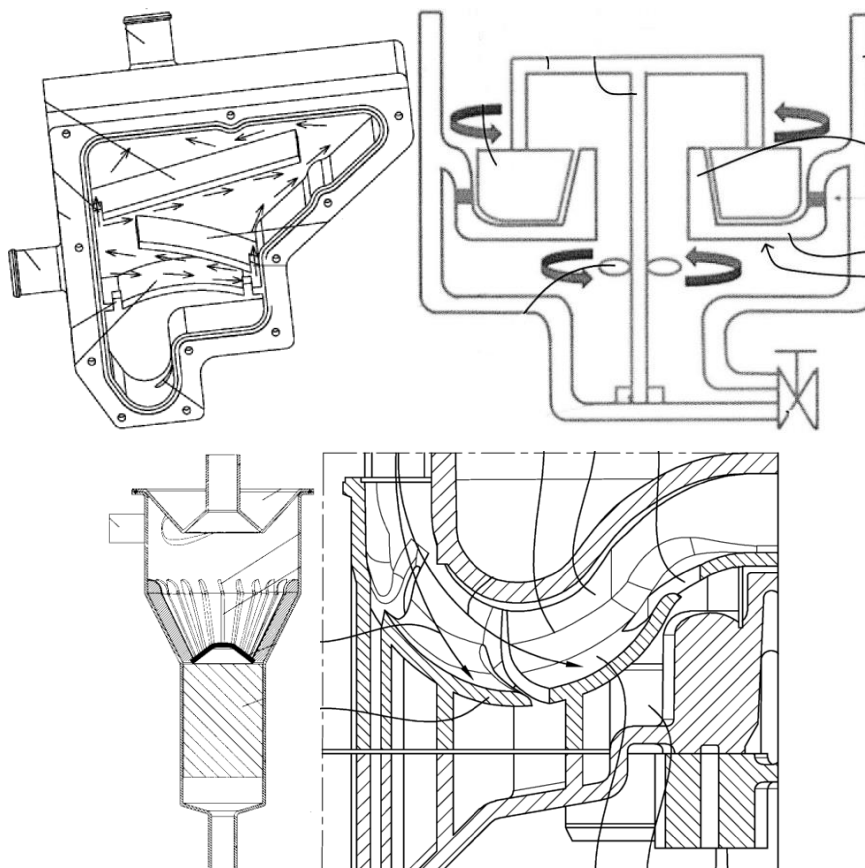
Pro zmenšení rozměrů, snížení hmotnosti a snadnější zástavbu do systémů existují odlučovače, které v sobě mají integrovaný plovákový odváděč kondenzátu. Princip zůstává stejný jako v samostatných řešeních. Vstupující vlhký vzduch se uvede do vířivého proudění, kapky vody jsou odstředivou silou tlačeny na stěnu, ze které stečou dolů. Pod odlučovací částí se namísto jednoduché výpusti nachází plovákový ventil. Hladina kondenzátu pohybuje s plovákem, který ovládá odtokový ventil. Obdobně lze integrovat i cyklonový odlučovač a solenoidový ventil. Ve spodní části odlučovače se nachází čidlo pro měření výšky hladiny. Jakmile úroveň hladiny dosáhne senzoru, otevře se výpustní ventil, kondenzát odteče a ventil se opět uzavře. [3, 13]



Obrázek 6: Odlučovače s integrovaným plovákovým a solenoidovým odvaděčem [3, 13]

2.4 Patentovaná řešení

Kromě aktuálně vyráběných komponent pro odvod vody existuje i mnoho dalších návrhů, které nebyly zatím realizovány, ale jsou chráněny užitným vzorem nebo patentem. Separaci kondenzátu provádějí návrhy např. pomocí přepážkových elementů, na kterých se vlhký vzduch vysráží, nebo lopatkovým kolem, jenž se prouděním roztočí a následně vysokou rychlostí směřuje vzduch na stěny, kde se z něj odloučí voda obdobně jako v cyklonovém separátoru. Pro odvádění vody některé patentované návrhy využívají např. kapilárních kanálek nebo štěrbin, které usměrní kondenzát mimo vzduchové potrubí. [14, 15, 16, 17]



Obrázek 7: Příklady patentově chráněných řešení pro odvod vody [14, 15, 16, 17]

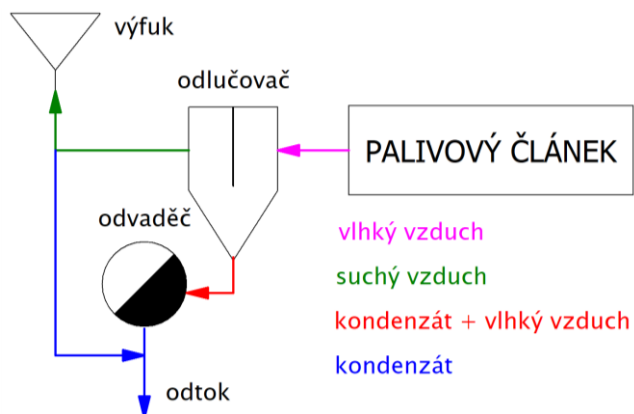
3 Současný stav řešeného zařízení

Česká společnost DEVINN vyvíjí vodíkový systém H2BASE, který najde uplatnění při pořádání venkovních kulturních akcí, na staveništích s omezenou dostupností elektřiny nebo jako záložní zdroj při přírodních katastrofách. Systém se skládá ze tří navzájem propojených modulů: modulu s úložištěm vodíku, modulu s palivovým článkem a výstupního modulu s vysokonapěťovou baterií. Modul s palivovým článkem obsahuje řešení od firmy Ballard se všemi potřebnými periferiemi vodíkového systému. Nasávaný vzduch se filtruje, stlačuje kompresorem a zvlhčuje na potřebné parametry. Na výstupu z článku modul disponuje odlučovačem a odvaděčem produkované vody. Právě tyto dvě komponenty jsou předmětem řešení práce. [2]



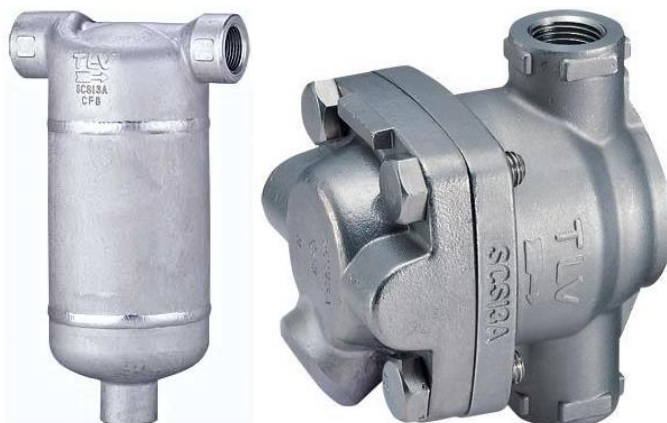
Obrázek 8: Vodíkový systém H2BASE od společnosti DEVINN [18]

V systému H2BASE je odvod vody a vzduchu řešen dle následujícího schématu. Z palivového článku proudí vlhký vzduch do cyklonového odlučovače, kde se vysuší. Suchý vzduch poté pokračuje přímo do výfuku a ven ze systému. Výfuk obsahuje čidlo úniku vodíku, které v případě vyšší koncentrace vodíku ve vzduchu okamžitě vypne palivový článek. Odseparovaný kondenzát společně s částí vlhkého vzduchu teče do plovákového odvaděče, který zamezí průniku vzduchu a do odtoku pod zařízení propustí pouze vodu. Do odtoku je navíc přivedeno i kondenzační potrubí z výfuku, aby případný kondenzát vysrážený ve výfukové trubce nestékal zpět do odlučovače.



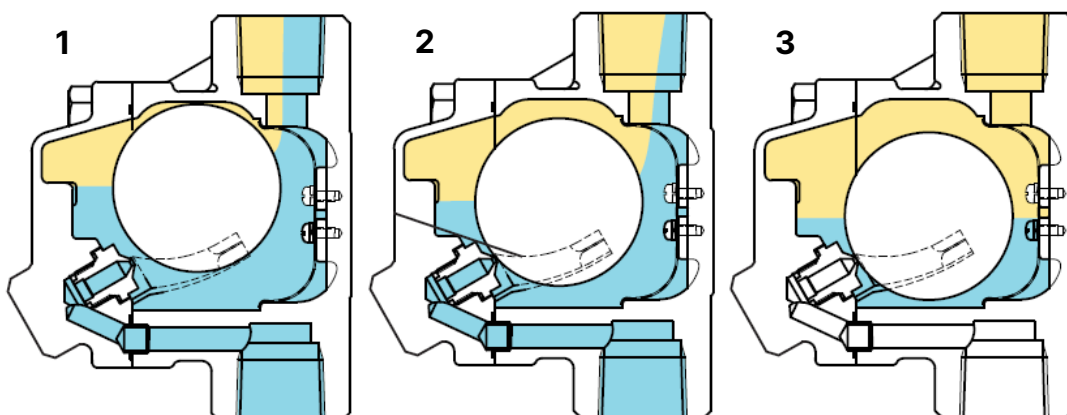
Obrázek 9: Schéma zapojení komponent na výstupu vzduchu z palivového článku

Vzhledem k relativně malému počtu vodíkových aplikací neexistuje na trhu mnoho speciálně navržených komponent pro separaci a odvod vody z palivových článků. Proto jsou v systému H2BASE použity i součásti primárně určené do jiných energetických celků. Odvod vody ze systému zajišťuje řešení od společnosti TLV: cyklonový odlučovač DC7 a plovákový odvaděč SS1VG. Obě součásti jsou dimenzované pro provoz s párou o velkém přetlaku, čemuž odpovídá jejich velmi robustní odlévaná kovová konstrukce.



Obrázek 10: Odlučovač TLV DC7 a odvaděč TLV SS1VG [19, 20]

Při běžném provozu palivového článku pracuje odlučovač i odvaděč bez komplikací. Když je však vodíkový článek mimo provoz, mohou nastat potíže s odvaděčem, který funguje na mechanickém způsobu s kulovým plovákem ovládajícím ventil. Problém spočívá v samotné konstrukci odvaděče, kde pohyb hladiny vody přes plovák ovládá výpustní ventil. Při otevřeném výpustním ventilu slouží nahromaděný kondenzát uvnitř jako zábrana proti úniku vzduchu. Plovák v odvaděči otevírá výpusť až v momentě, kdy hladina vody dosáhne určité výšky (1), aby ventil zůstal ponořený a těsný. Po otevření ventilu část kondenzátu odeče (2), tím klesne hladina a výtok se uzavře. Mezitím však do odvaděče přiteče další kondenzát, který opět hladinu zvedne a otevře ventil. Výška hladiny tak neustále kolísá kolem meze otevírající a uzavírající výpusť. Z toho vyplývá, že uvnitř odvaděče se pořád nachází určitý objem vody (3), a to i při vypnutém palivovém článku, a tedy i nepracujícím odvaděči. [9]



Obrázek 11: Znázornění problémového stavu odvaděče TLV SS1VG [9]

Při teplotách okolního vzduchu nad 0 °C zbytková voda uvnitř nepředstavuje problém, ale když se teploty pohybují pod bodem mrazu, může dojít k zamrznutí kondenzátu v odvaděči a ucpaní potrubí. Vzduch vystupující z palivového článku má za maximálního výkonu článku teplotu pouze kolem 80 °C a při náběhu v záporných teplotách s podchlazeným systémem je ještě chladnější. Po spuštění systému by tak vzduch nestihl rozmrazit odvaděč včas a došlo by k zaplavení výfukového potrubí společně s palivovým článkem, což by vedlo k jeho poškození.



Obrázek 12: Zástavba současného řešení do vodíkového systému

Plovákové odvaděče se používají zejména ve vnitřních a nonstop provozech, kde potíže se zamrznutím nenastávají. V rámci vodíkových aplikací tento problém zatím komplexně vyřešen nebyl, někteří výrobci pouze doporučují pro ochranu před mrazem odvaděč obalit izolací. [4]



Obrázek 13: Odlučovač obalený izolačním návlekm [4]

Další nevýhodou současného stavu je přílišná hmotnost velmi robustních komponent. Odvaděč váží 1,6 kg a odlučovač dokonce 6,5 kg. Předmětem inovace je proto odstranění problému se zamrznutím, výrazné snížení hmotnosti a sloučení odlučovače s odvaděčem do jednoho celku. Nové zařízení by mělo fungovat ideálně pasivním způsobem bez odběru elektrické energie, není proto vhodné zamezit zamrznutí např. vyhříváním. [19, 20]

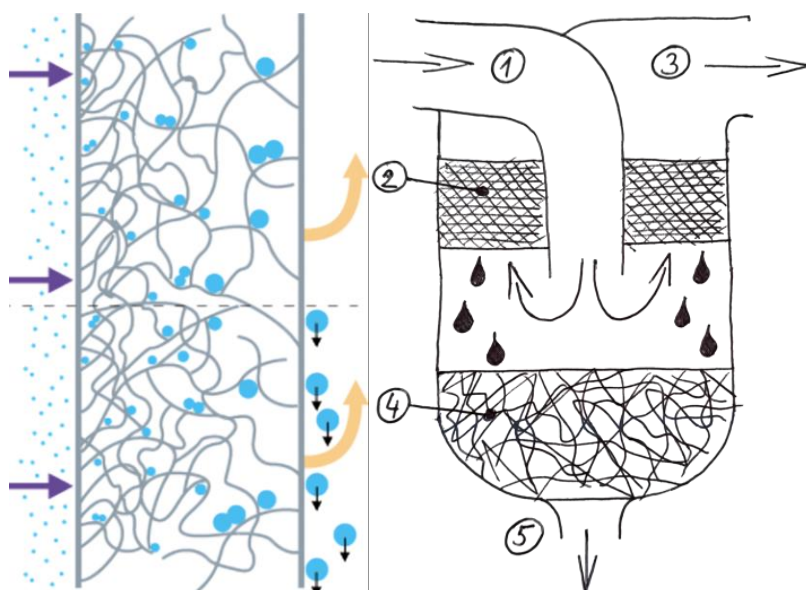
4 Navrhované koncepty

Na základě poznatků získaných z rešerše používaných komponent a problematiky současného zařízení byly navrženy 4 koncepty nového řešení pro odvod vody z vodíkového systému.

4.1 Koncept A – Koalescenční odlučovač s filtrem

První koncept se inspičuje koalescenčními odlučovači, které jsou běžně integrovány do potrubí v energetických, chemických a dalších systémech. Využívají jevu koalescence, tedy spojování dvou nebo více kapek kapaliny v jednu o větším objemu a menším povrchu. Vlhký vzduch (fialově) prochází tzv. odmlžovací podložkou, což bývá většinou drátěný kotouč. Molekuly vody (modře) obsažené ve vzduchu se v podložce zachytí, následně se spojují a vytváří kapky, které spadnou na dno odlučovače, kde kondenzát vytéká. Za drátěným kotoučem proudí z odlučovače už pouze vysušené médium (žlutě). Přes filtrační membránu lze provádět i odvod separovaného kondenzátu. [4, 23]

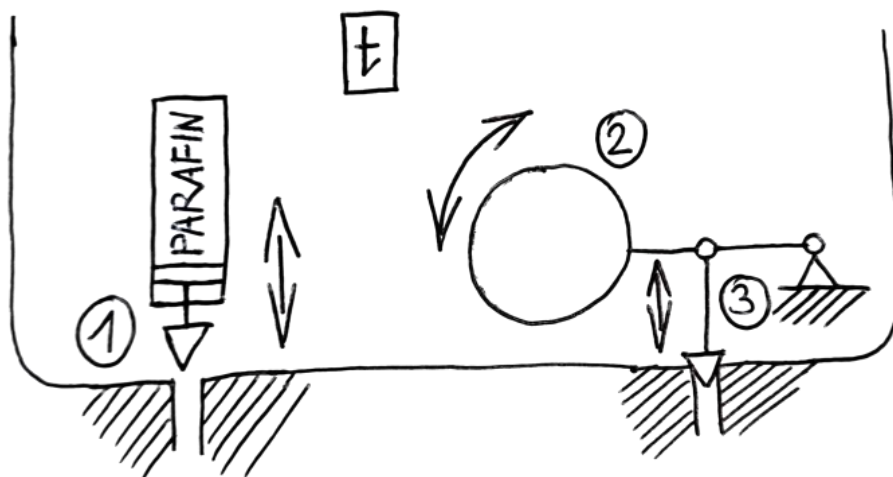
Koncept A začíná vodorovným vstupním potrubím (1), které se dále stáčí dolů a ústí do středu válcového těla. Po výstupu z potrubí se proud vzduchu otočí vzhůru a směřuje skrz drátěný kotouč (2), kde se z něj odloučí obsah vody. Po průchodu kotoučem je vysušený vzduch veden do výstupního potrubí (3). Kapky kondenzátu se na podložce postupně shlukují do větších a následně padají do spodní části zařízení. Pro odvod vody do výtoku koncept využívá filtrační vrstvy (4), kterou může být např. jemný křemičitý písek nebo polymerová filtrační membrána. Vrstva má za úkol propustit kondenzát štěrbinami mezi jednotlivými zrny nebo vlákny filtračního materiálu a zároveň zamezit nebo aspoň zbrzdit a rozbít tok vzduchu, aby nemohl uniknout do výtokového potrubí (5).



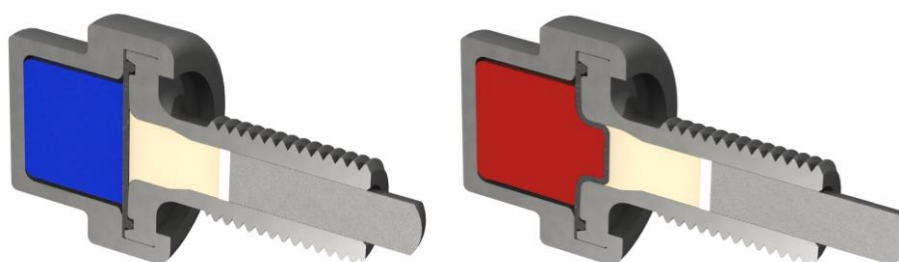
Obrázek 14: Princip koalescenční membrány a schéma konceptu A [21]

4.2 Koncept B1 – Odvaděč s parafínovým ventilem

Koncept B1 konstrukčně vychází z cyklonového odlučovače s integrovaným plovákem ovládaným (2) výpustním ventilem (3). Problém se zamrznutím kondenzátu koncept řeší přidáním dalšího ventilu, který využívá technologie tzv. voskového akčního členu. Válcové tělo ventilu (1) v sobě obsahuje patronu s parafínovým voskem, který výrazně mění svůj objem v závislosti na okolní teplotě vzduchu a vody. Během činnosti palivového článku se teplota uvnitř odvaděče pohybuje přibližně okolo 60 °C. Při těchto standardních provozních podmínkách je vosk v kapalné fázi a má zvětšený objem (červeně), čímž tlačí na píst akčního členu. Vysunutím pístnice dojde k uzavření výpustního protizámrazového ventilu a kondenzát je odváděn pouze skrze plovákový mechanismus na základě výšky hladiny vody. Pokud není vodíkový článek aktivní a teplota okolního prostředí se blíží 0 °C, vosk v patroně ztuhne, zmenší svůj objem (modře) a umožní tak zasunutí pístu. Otevřením ventilu může nahromaděný kondenzát odtéct a nezpůsobí zamrznutí zařízení. Po oteplení nad teplotní rozhraní parafín opět zkapalní, roztáhne se a uzavře ventil. Přesná hodnota teploty uzavření/otevření závisí na konkrétním ventilu. Za teplot např. kolem 20 °C může v odvaděči zůstat zbylý kondenzát, ale vzhledem k dané teplotě to nepředstavuje problém. Voskem ovládané ventily nabízí např. společnost ThermOmegaTech. Parafínový ventil lze dodatečně aplikovat i do současného plovákového odlučovače bez nutnosti vývoje nového zařízení. [24]



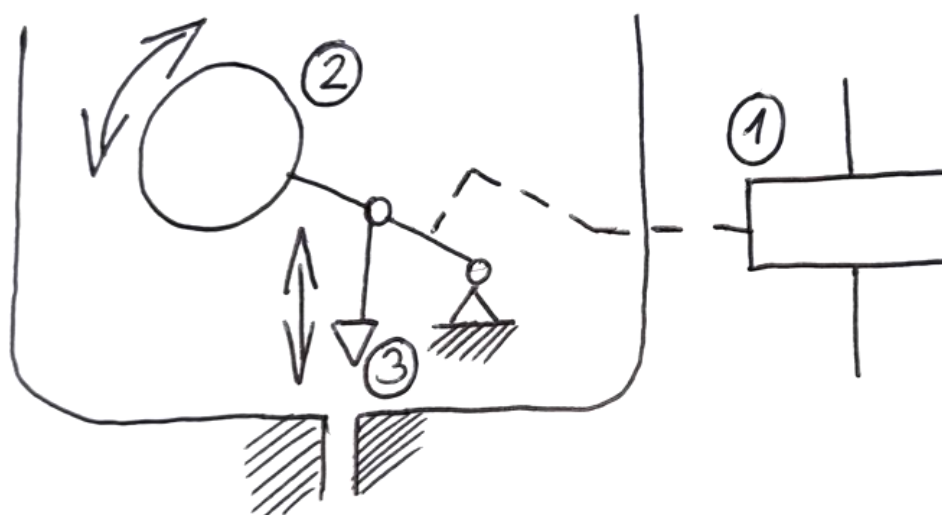
Obrázek 15: Schéma konceptu B1



Obrázek 16: Voskový akční člen ventilu (pevný/kapalný stav) [24]

4.3 Koncept B2 – Plovákový odvaděč s elektromagnetem

Koncept B2 má základ opět ve standardním cyklonovém odlučovači s integrovaným plovákovým ventilem. Aby se zabránilo problému se zamrznutím zbytkového kondenzátu, je do konceptu instalovaný permanentní elektromagnet (1), který otevírá plovákový ventil. Při provozu zařízení a palivového článku je v systému přítomné stejnosměrné elektrické napětí, které je přivedeno i k elektromagnetu. Když je permanentní elektromagnet pod napětím, ztrácí magnetické vlastnosti. V rámci konceptu to znamená, že při činnosti systému není elektromagnet aktivní a nepřitahuje plovák (2). Odvod vody tak probíhá běžným způsobem. Když palivový článek přestane generovat elektrickou energii, v systému dojde k poklesu napětí a permanentní elektromagnet začne působit magnetickým polem. Vzniklá síla způsobí přitažení plováku a jeho zvednutí do horní polohy nad úroveň hladiny, při které se otevírá výpustní ventil (3). Tím dojde k odtoku zbylého kondenzátu. Během odstavení systému je ventil trvale otevřený a v zařízení nezůstává žádná voda. Koncept je možné sestavit z již existujících komponent pro odvod vody a není nutné vyvíjet zcela nový odlučovač a odvaděč. [25]



Obrázek 17: Schéma konceptu B2

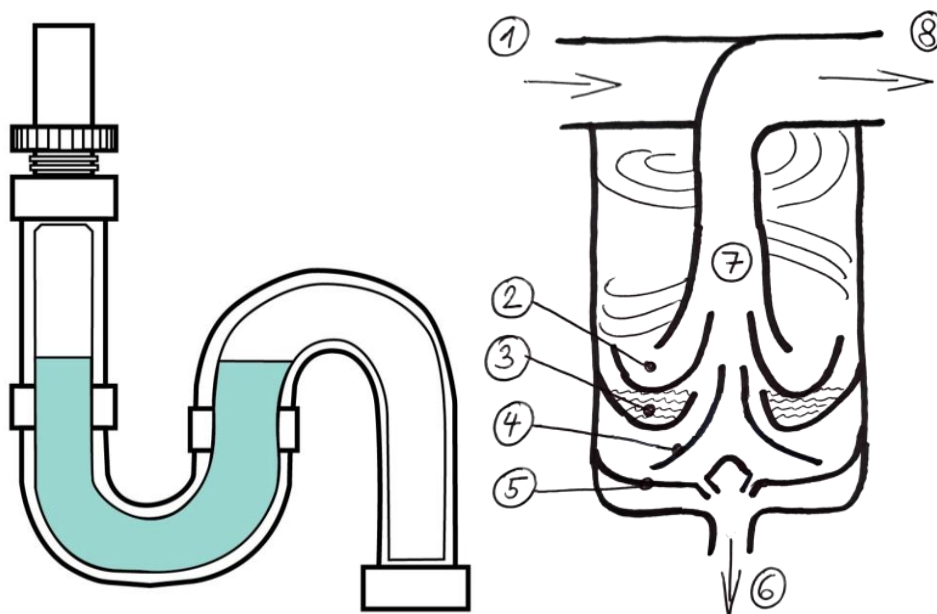


Obrázek 18: Permanentní elektromagnety [25]

4.4 Koncept C – Sifonový odvaděč

Koncept je inspirován funkcí zápachové uzávěry neboli sifonu, což je jednoduchá součást používaná na vstupu do odpadní kanalizace. Jedná se o potrubí ve tvaru písmene U, které po naplnění vodou zabraňuje průniku nežádoucích pachů z kanalizačního potrubí do prostor, kde se vyskytují lidé. Výška hladin v sifonu je důsledkem hydrostatického tlaku na obou koncích stejná. Když na vstup sifonu přiteče určitý objem vody, na výstupu se stejný objem vytlačí přes přeпад a hladiny se opět vyrovnají. Podobný princip by bylo možné aplikovat i na odvod kondenzátu z palivového článku. Sifon propustí kondenzát, ale zamezí průniku vzduchu. [26]

Koncept C byl navržen tak, aby neobsahoval žádné pohyblivé části. Na vstupu (1) proudí do zařízení vlhký vzduch, který je skrze šroubovicové potrubí naveden tečně na válcovou stěnu odlučovače. Rotací se postupně z proudu vzduchu odděluje obsah kondenzátu, obdobně jako u cyklonového odlučovače. Většina proudu vysušeného vzduchu je následně nasměrována přes prostor nad horní lopatkou (2) do centrálního komínu (7), který ji vytahuje do výstupního potrubí (8) v horní části zařízení. Naopak odloučená voda se drží na stěně odlučovače a po šroubovici klesá do mezery mezi vrchním a prostředním elementem (3), kde se postupně hromadí, než přeпадne přes hranu lopatky do prostoru pod ní (4). Ve štěrbině (3) tak vzniká sifonová zábrana, která nedovoluje zbylé části vzduchu, jež nebyla rovnou vtažena komínem, vstoupit do spodní části odvaděče určené pouze pro odtok kondenzátu. Přelitím přes hranu sifonu se voda dostává nad poslední odváděcí člen (5), což je síto s několika malými otvory. Přes něj kondenzát stéká do odtokového potrubí (6). Aby nedošlo k zamrznutí kondenzátu v sifonové prohlubni, jsou elementy opatřeny drobnými dírami, které umožní postupné vyprázdnění zařízení při nečinnosti palivového článku.



Obrázek 19: Sifonová uzávěra a schéma konceptu C [27]

4.5 Hodnocení a výběr konceptu metodou AHP

AHP analýza je metoda pro výběr nejvhodnější varianty pomocí párového porovnávání. Všechny navržené koncepty byly nejprve popsány z hlediska několika hodnotících kritérií. Hodnotila se jejich komplexnost, hmotnost, životnost a spolehlivost. Dalším krokem bylo vzájemné párové porovnání jednotlivých konceptů v každém z kritérií. Stejným způsobem byla navzájem porovnána hodnotící kritéria, čímž se stanovila jejich relativní váha pro hodnocení. Pro hodnocení byla zvolena stupnice 1/9 (významně horší) – 9 (významně lepší) v pořadí řádek – sloupec. Na závěr byl vypočítán celkový výsledek hodnocení. [31]

4.5.1 Komplexnost

Komplexnost udává, jakou měrou je koncept složitý. Zohledňuje např. počet komponent v sestavě konceptu, použití elektroniky nebo pohybující se součásti.

Koncept A disponuje jednoduchou konstrukcí bez pohyblivých částí. Uvnitř válcové konstrukce se nachází pouze drátěný kotouč a filtrační vrstva na dně. Celkem bude koncept obsahovat přibližně 6 hlavních dílů.

Koncept B1 vychází z existujícího cyklonového odlučovače s integrovaným odvaděčem. Jediným novým prvkem je protizámrazový parafinový ventil, který zařízení příliš nekomplikuje. Odhadovaný počet základních dílů je 10 až 15.

Koncept B2 řeší odtok kondenzátu pomocí plovákového ventilu s dodatečným elektromagnetem, který bude nutné připojit na elektrický okruh systému. Předpokládá se sestava opět složená z 10 až 15 součástí.

Koncept C zahrnuje několik tvarových elementů na dně zařízení. Z hlediska vyrobitelnosti a montáže bude nutná vícedílná konstrukce. Návrh neobsahuje plovákový ventil ani jiné pohyblivé součásti. Koncept se odhadem bude skládat z 5 součástí.

Tabulka 1: AHP analýza – kritérium Komplexnost

Komplexnost	A	B1	B2	C	
A	1	3	5	1/3	
B1	1/3	1	3	1/5	
B2	1/5	1/3	1	1/7	
C	3	5	7	1	
Součet	4 1/2	9 1/3	16	1 2/3	Průměr
A	0,22	0,32	0,31	0,20	26%
B1	0,07	0,11	0,19	0,12	12%
B2	0,04	0,04	0,06	0,09	6%
C	0,66	0,54	0,44	0,60	56%

4.5.2 Hmotnost

Kritérium odhaduje celkovou hmotnost konceptu, která se stanovuje podle konstrukce zařízení, zvoleného materiálu a použitých komponent.

Koncept A bude mít plastovou konstrukci těla zařízení. Drátěný kotouč bude vyroben z nerezové oceli nebo jiného korozi-vzdorného kovu. Spodní filtrační vrstva bude tvořena buď pískem nebo polymerem. Hmotnost je možné odhadnout na základě odlučovače s podobnou konstrukcí. Např. zařízení od firmy Mann+Hummel má hmotnost 0,5 kg. Společně s koalescenčním členem a filtrační vrstvou by mohla být hmotnost konceptu cca 1 kg. [5]

Koncept B1 je plánován jako úprava nabízeného řešení přidáním parafinového ventilu. Momentálně na trhu existují pouze kovové separátory integrované s plovákovým odvaděčem. Hmotnost by tedy byla vyšší, ale oproti současnému rozdělenému robustnímu řešení by se i tak snížila. Orientačně lze hmotnost konceptu vypočítat z udávaných hmotností nabízeného integrovaného odlučovače s odvaděčem a parafinového ventilu. Např. odlučovač Mankenberg AS2 váží 2,5 kg a ventil ThermOmegaTech HAT cca 0,4 kg, celkem tedy 2,9 kg. [13, 24]

Koncept B2 bude opět pouhou úpravou dostupného řešení na trhu. Zařízení bude proto kovové a hmotnost navýší i použití elektromagnetu. Při použití odlučovače Mankenberg AS2 a elektromagnetu o hmotnosti cca 0,2 kg, bude koncept vážit zhruba 2,7 kg. [13, 25]

Koncept C umožňuje celoplastové provedení. Jednotlivé díly budou spojovány šroubovými spoji, případně lepením. Hmotnost konceptu bude také odhadem odpovídat odlučovači od výrobce Mann+Hummel, tedy 0,5 kg. [5]

Tabulka 2: AHP analýza – kritérium Hmotnost

Hmotnost	A	B1	B2	C	
A	1	7	5	1/3	
B1	1/7	1	1/3	1/9	
B2	1/5	3	1	1/7	
C	3	9	7	1	
Součet	4 1/3	20	13 1/3	1 3/5	Průměr
A	0,23	0,35	0,38	0,21	29%
B1	0,03	0,05	0,03	0,07	4%
B2	0,05	0,15	0,08	0,09	9%
C	0,69	0,45	0,53	0,63	57%

4.5.3 Životnost

Kritérium životnost hodnotí dobu, po kterou lze daný koncept zařízení odhadem používat bez potřeby údržby nebo výměny komponent.

Koncept A obsahuje dvojici filtračních elementů. Přestože vzduch z palivového článku má vysokou čistotu a odloučený kondenzát neobsahuje žádné minerály, může stále docházet k pozvolné degradaci filtrů. Aby se zařízení časem nezanесlo, bude potřebná údržba obou membrán.

Koncept B1 disponuje plovákovým ventilem, u kterého je vhodná občasná výměna těsnění. Dále koncept používá druhý ventil s parafínovým voskem. Působením vnějších vlivů může docházet k postupnému opotřebení vosku a následně je nutné vyměnit voskový člen nebo celý ventil. Protizámrazový ventil také vyžaduje pravidelně provádět zkoušku funkčnosti.

Koncept B2 opět obsahuje plovákový ventil s gumovým těsněním, jenž podléhá postupné degradaci. Pro přitažný elektromagnet se nepředpokládá nutnost údržby.

Koncept C s tvarovými elementy nemá žádné pohyblivé části nebo těsnící prvky, které by podléhaly opotřebení. Návrh proto nevyžaduje žádné servisní zásahy.

Tabulka 3: AHP analýza – kritérium Životnost

Životnost	A	B1	B2	C	
A	1	3	1	1/5	
B1	1/3	1	1/3	1/7	
B2	1	3	1	1/5	
C	5	7	5	1	
Součet	7 1/3	14	7 1/3	1 1/2	Průměr
A	0,14	0,21	0,14	0,13	15%
B1	0,05	0,07	0,05	0,09	6%
B2	0,14	0,21	0,14	0,13	15%
C	0,68	0,50	0,68	0,65	63%

4.5.4 Spolehlivost

Spolehlivost vyjadřuje míru, jakou koncept plní svoji funkci za všech podmínek provozu. Bere do úvahy např. účinnost odlučování, únik vzduchu nebo možné zamrznutí při nízkých teplotách.

Koncept A využívá jako jediný k odlučování vody ze vzduchu koalescenčního principu namísto obvyklé cyklony. Obě řešení dosahují podobné účinnosti separace. Možným problémem pro koalescenční systém je zamrznutí kapek vody zachycených na drátěném kotouči a případně i zahlcení filtrační vrstvy na dně zařízení.

Koncept B1 odstraňuje nevýhodu zamrznutí běžného plovákového odvaděče pomocí parafínového ventilu. Při výběru ventilu je potřeba dbát na parametr teploty otevření, aby nahromaděný kondenzát mohl při nízkých teplotách odtéct.

Koncept B2 při nečinnosti palivového článku otevře elektromagnetem plovákový ventil, nemůže tedy dojít k jeho přimrznutí. Elektromagnety se obecně vyznačují vysokou spolehlivostí.

Koncept C je navržen jako trvale otevřený, jedinou bariérou proti úniku vzduchu do odtokového potrubí je sifon utěsněný vodou. Při prázdném sifonu je vzduch usměřován tvarovanými lopatkami odvaděče a tlakovými poměry uvnitř zařízení, dokonalou těsnost ale zaručit nelze.

Tabulka 4: AHP analýza – kritérium Spolehlivost

Spolehlivost	A	B1	B2	C	
A	1	1/5	1/7	1/5	
B1	5	1	1/3	3	
B2	7	3	1	3	
C	5	1/3	1/3	1	
Součet	18	4 1/2	1 4/5	7 1/5	Průměr
A	0,06	0,04	0,08	0,03	5%
B1	0,28	0,22	0,18	0,42	27%
B2	0,39	0,66	0,55	0,42	50%
C	0,28	0,07	0,18	0,14	17%

4.5.5 Porovnání kritérií a celkové hodnocení

Nejvýznamnějším hodnotícím kritériem byla s výrazným nárůstem určena Spolehlivost. Vysoká spolehlivost je nezbytná pro správnou funkčnost konceptu. Nejnižší důležitost má kritérium Životnost, protože se nepředpokládá častá údržba žádného z navrhovaných konceptů.

Tabulka 5: AHP analýza – párové porovnání kritérií

Kritérium	K	H	Ž	S	
Komplexnost	1	1	3	1/5	
Hmotnost	1	1	3	1/3	
Životnost	1/3	1/3	1	1/5	
Spolehlivost	5	3	5	1	
Součet	7 1/3	5 1/3	12	1 3/4	Průměr
Komplexnost	0,14	0,19	0,25	0,12	17%
Hmotnost	0,14	0,19	0,25	0,19	19%
Životnost	0,05	0,06	0,08	0,12	8%
Spolehlivost	0,68	0,56	0,42	0,58	56%

Celkový výsledek konceptů dle hodnocení funkčních kritérií je dán součtem součinů výsledku jednotlivého konceptu v konkrétním kritériu s váhou daného kritéria. Z výsledků AHP analýzy vyplývá, že hodnotící kritéria nejlépe splňuje Koncept C, a proto bude dále rozvíjen.

Tabulka 6: AHP analýza – celkové výsledky

Koncept	Celkový výsledek
A – Koalescenční odlučovač s filtrem	14%
B1 – Odvaděč s parafinovým ventilem	19%
B2 – Plovákový odvaděč s elektromagnetem	32%
C – Sifonový odvaděč	35%

5 Vývoj vybraného konceptu

Vybraný koncept neobsahuje žádné externí nakupované součásti. Vývoj proto probíhal pro kompletní zařízení včetně odlučovače a odváděcí části.

5.1 Omezující podmínky

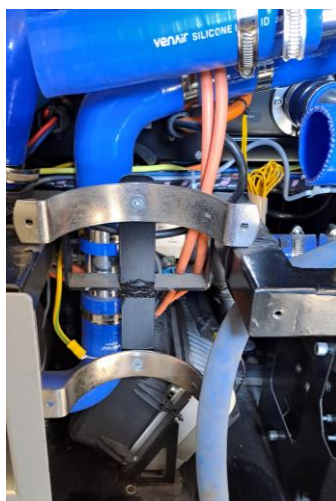
Při vývoji nového řešení bylo nutné dodržet několik omezujících parametrů. Odváděcí zařízení musí být schopné pojmout maximální objemový průtok vzduchu určený výrobcem palivového článku a současně nesmí způsobit tlakovou ztrátu ve výfukovém potrubí nad stanovenou mez. Výrobce uvádí i maximální průtok vodíku, který sice neproudí odváděcím zařízením, ale bude sloužit pro výpočet odváděcího průtoku kondenzátu. Důležitým parametrem je i teplota vzduchu, které musí zvolený materiál součásti odolat. Dalšími omezeními jsou rozměry volného prostoru pro zástavbu a přípojovací průměry vstupních a výstupních potrubí.

Tabulka 7: Parametry médií v systému s palivovým článkem

Parametr	Hodnota
Maximální průtok vzduchu [m ³ /min]	1,5
Teplota vzduchu [°C]	50–80
Maximální tlaková ztráta výfukového potrubí [mbar]	12
Maximální průtok vodíku [g/s]	0,5

Tabulka 8: Zástavbové parametry pro montáž

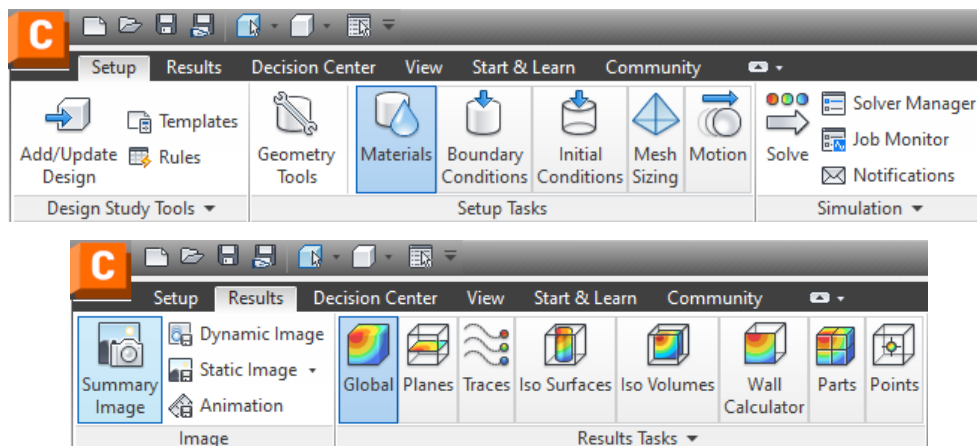
Parametr	Hodnota
Volný prostor [mm]	140x140x400
Přípojovací rozměr potrubí pro vzduch	Závit G 1 1/2“
Přípojovací rozměr potrubí pro kondenzát	1/2“



Obrázek 20: Volný prostor pro zástavbu odváděcího zařízení

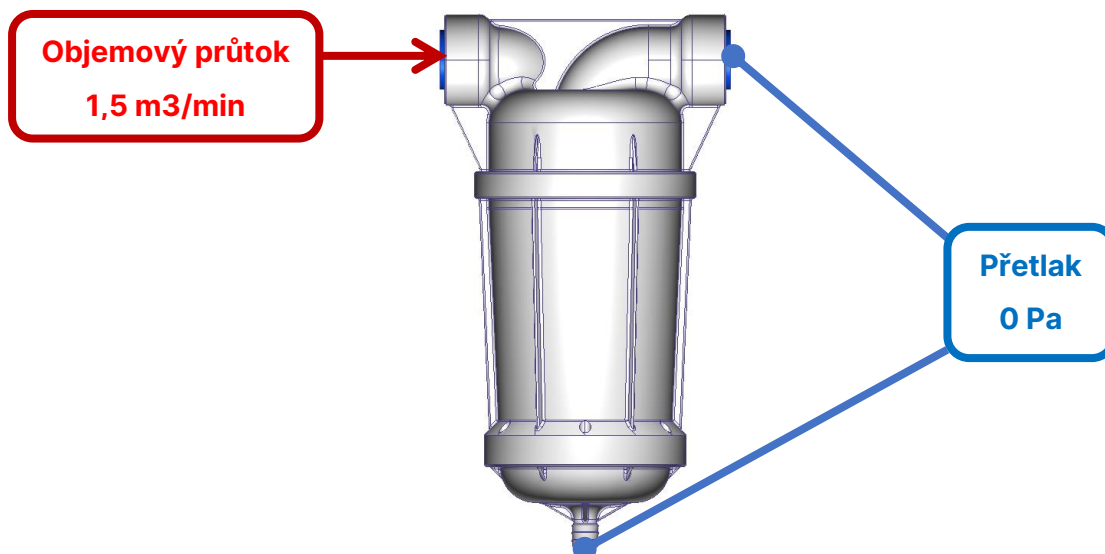
5.2 Nastavení simulačního softwaru

Pro vývoj zařízení byl využit program Autodesk CFD 2024, který slouží pro numerickou simulaci proudění kapalin a plynů. Nástroj disponuje jednoduchým a intuitivním pracovním prostředím, které uživatele postupně provádí nastavením, výpočtem a vyhodnocením simulace.



Obrázek 21: Pracovní prostředí softwaru Autodesk CFD 2024

Úvodním krokem v programu je import simulované geometrie, která musí být uzavřená. V modelovacím nástroji bylo proto nutné vyplnit všechny vstupní a výstupní otvory odváděcího zařízení. Výpočetní software si následně do modelu automaticky vložil nové tělo kopírující vnitřní tvar součásti. Dalším krokem v nastavení bylo přiřazení materiálů jednotlivým objemovým tělům v modelu. Pro pevnou geometrii, tedy samotnou součást, byl zvolen nabízený materiál PVC, který nejvíce odpovídá zamýšlenému materiálu prototypu zařízení. Zbývající těla tvoří geometrii, kudy bude proudit simulované médium. Jako materiál byl proto nastaven vlhký vzduch. Dále bylo provedeno určení okrajových podmínek. Do vstupního otvoru byl dle zadání umístěn objemový průtok $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$ a do obou výstupních otvorů byl nastaven přetlak 0 Pa , jelikož ústí do okolní atmosféry.

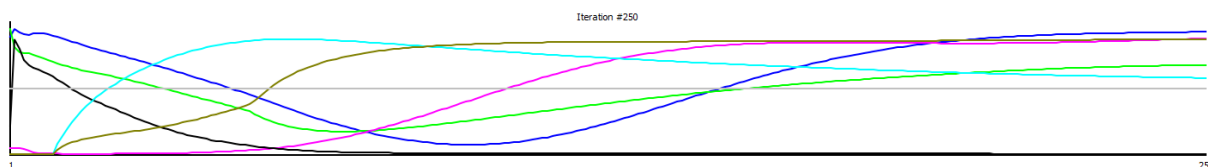


Obrázek 22: Okrajové podmínky zadané v CFD softwaru

Následně se mohlo přistoupit k vygenerování výpočetní sítě. Velikost jednotlivých elementů byla ponechána na výchozí automatický režim. Posledním bodem v rámci preprocessingu bylo nastavení simulačního řešiče. Zde došlo ke stanovení výpočetní metody, počtu iterací výpočtu a vybrání kalkulovaných veličin. Metoda výpočtu byla ponechána na výchozí možnosti Modified Petrov-Galerkin, počet iterací nastaven na 250 a jako vyhodnocované parametry byly vybrány statický tlak a rychlost proudění. Nastavení řešiče rovněž zahrnovalo možnost výběru mezi laminárním a turbulentním charakterem proudění. Pro správné určení typu proudění bylo potřeba vypočítat Reynoldsovo číslo a porovnat jej s kritickou hodnotou 2300. [28]

$$Re = \frac{v*d}{\nu} \quad (1)$$

Předpokládaná rychlost proudění vzduchu ve zvoleném průměru potrubí 36 mm a maximálním průtoku 1,5 m³/min dosahuje 24,6 m/s. Dalším parametrem pro výpočet je kinematická viskozita v proudícího vlhkého vzduchu s relativní vlhkostí 100 % a teplotou 60 °C, která dle tabulek činí 1,9*10⁻⁵ m²/s. Po dosazení do vzorce vychází Re = 46535, jedná se tedy o turbulentní proudění. Podrobné nastavení všech parametrů simulačního řešiče zobrazuje Příloha I. Po spuštění simulace bylo potřeba sledovat graficky znázorněnou míru konvergence jednotlivých fyzikálních veličin, jenž během výpočtu postupně s každou iterací mění svoji hodnotu. Pro správné výsledky simulace musí zůstat hodnoty veličin v rámci několika závěrečných iterací téměř shodné. Pokud nedojde pro nastavený počet iterací k ustálení hodnot, je nutné přidat další iterace a pokračovat ve výpočtu, dokud se parametry nestabilizují. [29]



Obrázek 23: Ukázka konvergování výpočtu

Po skončení výpočtu mohly být zobrazeny výsledky. Pro vývoj dané součásti byla vyhodnocována trajektorie proudění částic média, která byla vykreslena v podobě stop zanechaných za každou vstupující částicí. Dále byly na barevných mapách analyzovány tlakové poměry a rychlost proudění.

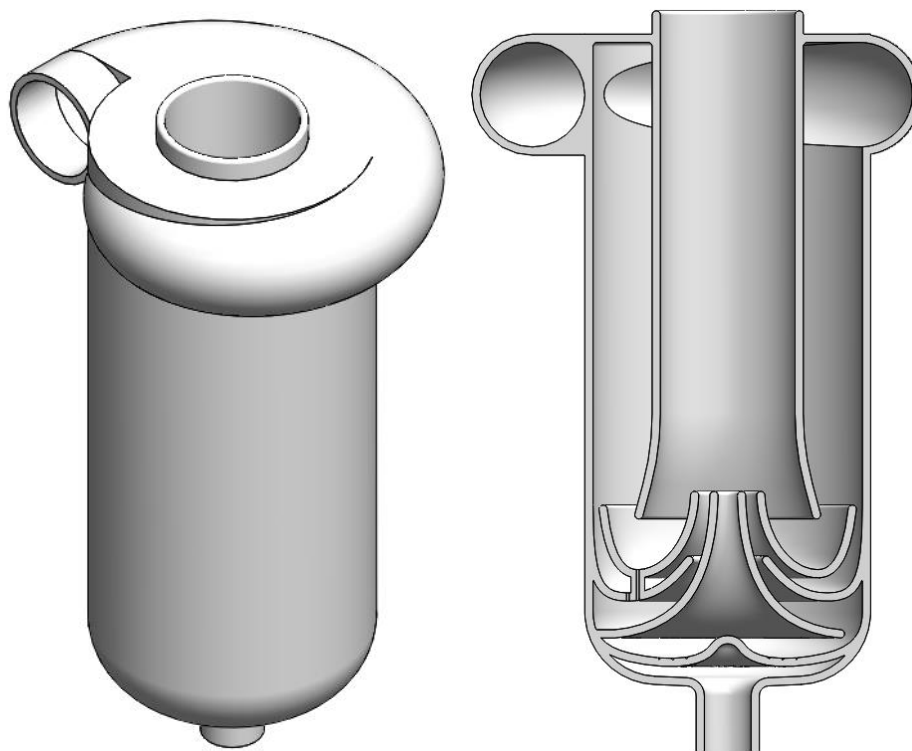
5.3 Postup vývoje

Vývoj začal tvorbou 3D modelu prvního návrhu na základě vybraného Konceptu C. Pro ověření funkčnosti byl model podroben CFD simulací proudění a na základě zjištěných výsledků byla konstrukce zařízení postupně upravována až po finální řešení. Celkem bylo provedeno na 30 simulací odlišných návrhů. Tato kapitola podrobněji popisuje 3 hlavní milníky během vývoje. Všechny simulace byly prováděny se stejnými okrajovými podmínkami a nastavením řešiče.

5.3.1 První návrh

Popis konstrukce

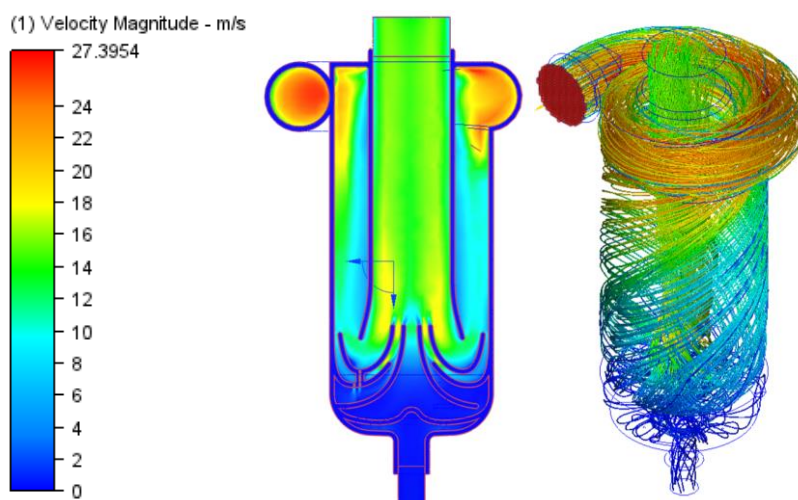
Prvotní návrh navazuje na vybraný Koncept C. Vstupní šnekové potrubí je inspirováno tvarem turbodmychadla, aby byl vlhký vzduch rovnoměrně distribuován po celém obvodu válcového odlučovače. Odseparovaná voda stéká do spodní části zařízení, kde se nachází několik vhodně tvarovaných lopatek. Ty mají za úkol usměrnit toky vysušeného vzduchu a vody, aby nedocházelo k vniknutí proudu vzduchu do odtoku pro kondenzát a opačně. Středově souměrné tvarové elementy jsou umístěny nad sebe do čtyř úrovní. Horní lopatka ve tvaru U má dvě funkce. Jednak otáčí tok vzduchu o 180 stupňů vzhůru to výfukového potrubí a dále vnější stěnou odděluje vzduch od vody, která stéká do prostoru pod lopatkou. Druhý element plynule navazuje na válcovou stěnu odlučovače a ekvidistantně kopíruje horní lopatku. Mezi těmito elementy se nachází štěrbin, ve které se hromadí kondenzát, čímž je utěsněn spodní odváděcí prostor od separátoru a znemožněn únik vzduchu. Kondenzát dále přepadává přes konec lopatky do prostoru pod ní. Třetí lopatka vychází z vnějšího průměru a konvexně se přibližuje k ose, kde vytváří komín. Úkolem této lopatky je nasměrovat vzduch, který se dostane společně s vodou pod horní element, do výfukového potrubí a také svádět kondenzát níže, kde přepadne přes okraj lopatky. Závěrečným čtvrtým prvkem je síto s několika malými otvory, kterými se kondenzát odvádí pryč do výtokového potrubí. Doplňkovou úlohou elementu je také usměrnit vzduch, jenž by se přes předchozí lopatky dostal do spodní části zařízení, vzhůru do středového komínu.



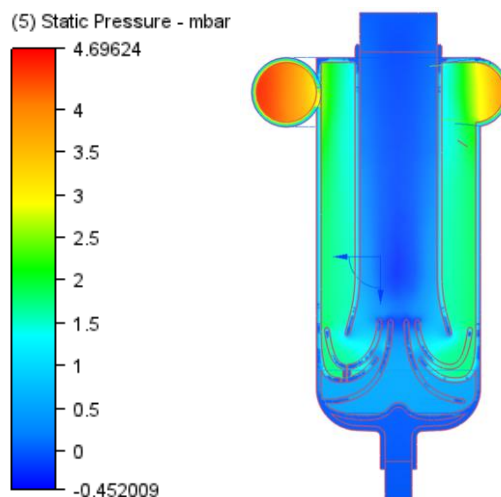
Obrázek 24: 3D model a řez prvního návrhu

Výsledky simulace

Na následujícím obrázku jsou znázorněny výsledky rychlosti a trajektorie proudění. Maximální rychlost ve středu vstupního potrubí dosahuje 27 m/s. Průměrná hodnota rychlosti na vstupu do součásti činí 22 m/s, což odpovídá danému průtoku 1,5 m³/min a průměru vstupního potrubí 38 mm. Na řezu podélnou rovinou je patrné rozložení rychlostí proudění uvnitř zařízení. Ve válcové části se dosahuje vyšších rychlostí na vnější stěně, což potvrzuje i trajektorie proudění částic, které jsou tlačeny na obvodovou stěnu a po šroubovitě dráze postupně klesají na dno. Tento fakt je nezbytný pro správnou funkci cyklonového odlučování. Z trajektorie je zřejmý i pohyb částic v prostoru pod tvarovými lopatkami. To značí možný nežádoucí únik vzduchu do výtokového potrubí pro kondenzát. Další obrázek ukazuje tlakové poměry v zařízení. Tlak a trajektorie spolu úzce souvisí, neboť částice proudí cestou s největším tlakovým rozdílem. Jelikož je tlak pod lopatkami nižší než na vstupu do středového komínu, některé částice unikají pod lopatky. Tlaková ztráta mezi vstupem a výstupem vzduchu činí okolo 4 mbar, splňuje tak požadavek výrobce palivového článku.



Obrázek 25: Výsledky CFD simulace prvního návrhu – rychlost a trajektorie

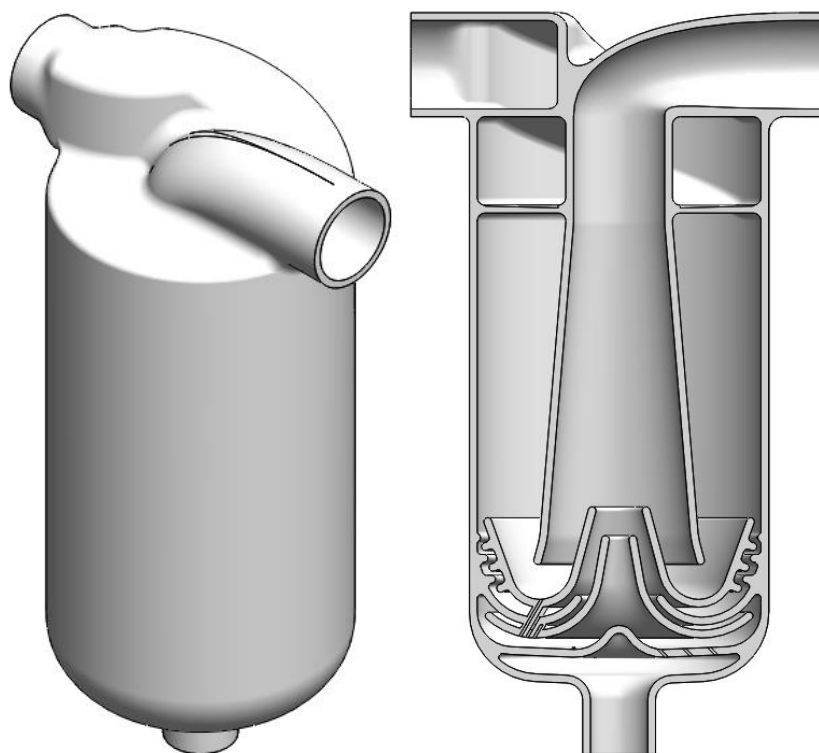


Obrázek 26: Výsledky CFD simulace prvního návrhu – statický tlak

5.3.2 Druhý návrh

Popis konstrukce

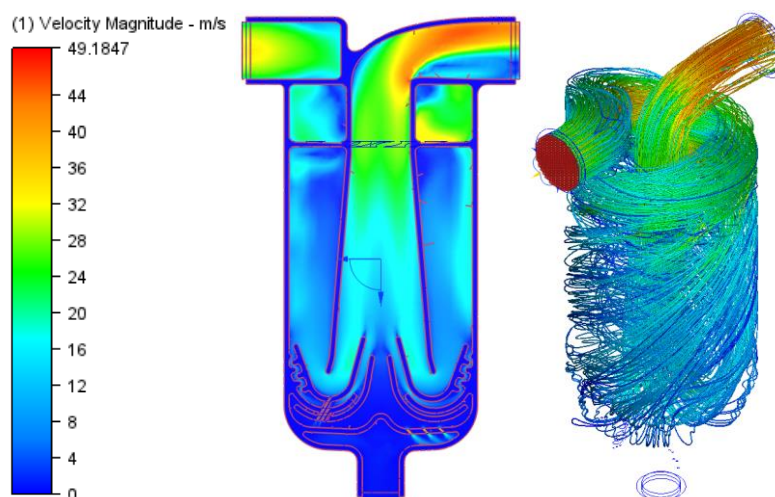
Mezi prvním a druhým hlavním návrhem proběhla zhruba desítka dílčích mírně upravených návrhů. Hlavní novinkou druhého návrhu je tzv. inline konstrukce. Vstup pro vzduch již není umístěn tečně k válci a výstup středem nahoru, ale nyní jsou proti sobě kolmo k ose válce. Toto řešení usnadní zástavbu do vodíkového systému, protože současný odlučovač disponuje obdobnou konstrukcí. Inline návrh však omezuje použití vstupního šnekového potrubí. Nově vstupní proud ústí tečně do odlučovacího válce a dále prochází skrz rozváděcí štěrbinu, aby se rozdělil rovnoměrně po celém obvodu. Bez štěrbin by proud vzduchu prudce klesal ihned po vstupu do válce. Vzduch po stěnách šroubovitě klesá a separuje se z něj voda, stejně jako v prvním návrhu. Po odseparování je suchý vzduch přes horní U-element vtažen kónickým komínem do výfuku. Kondenzát stéká pod horní lopatku a opět plní sifon. Před začátkem sifonu je přidáno několik výstupků, které mají za úkol zbrzdit a rozbit případný vedlejší tok vzduchu, aby nedocházelo k vyfukování vody ze sifonu, než dojde k jeho naplnění a utěsnění. Další změnou konstrukce je přidání druhého sifonu, což by mělo ještě více znesnadnit unikání vzduchu do výtoku pro kondenzát. Ze všech prohlubní vedou malé kanálky, které svádějí vodu do výtoku, aby po odstavení zařízení nemohlo dojít k zamrznutí. Posledním elementem je mírně pozměněné síto s několika drobnými otvory. Z důvodu všech předchozích úprav musel být zvětšen průměr tělesa, zařízení se natáhlo a byly zmenšeny průměry připojovacích potrubí pro vzduch.



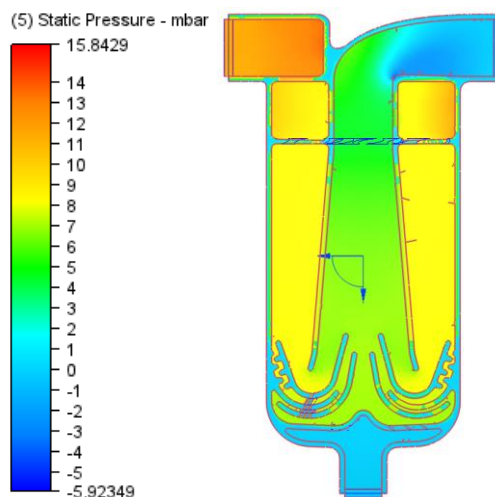
Obrázek 27: 3D model a řez druhého návrhu

Výsledky simulace

Simulace druhého návrhu proběhla se shodným nastavením jako předchozí. Výsledky značí téměř 100% nárůst maximální rychlosti proudění na 49 m/s, což je dáno zejména zmenšením průměru potrubí na 34 mm a úpravou jeho tvaru. Maximum se nachází za ohybem ve výstupním potrubí, protože průřez v ohybu je nekonstantní a na vnitřku se nachází ostrá hrana, což způsobuje ještě větší redukci reálného průřezu. Nevhodný tvar kolena zvyšuje i tlakovou ztrátu zařízení. Ta nyní dosahuje 11 mbar a velmi se přibližuje limitní hodnotě 12 mbar pro celé výfukové potrubí. Nahrazení šnekového vstupního potrubí rozváděcími štěrbinami mírně zhoršuje rovnoměrnou distribuci páry po obvodu odlučovacího válce a má vliv i na nárůst tlakové ztráty, ale nikterak zásadně. Žádoucí šroubovitý pohyb částic média po stěnách zůstal zachován. Přerobování tvaru odváděcích lopatek na dně zařízení vhodně změnilo rozložení tlaku. V prostoru nad spodním elementem došlo k navýšení statického tlaku na hodnotu shodnou s tlakem ve výfukovém komínu. Tlakový rozdíl mezi prostorem nad a pod lopatkami klesl, čímž je zamezeno úniku vzduchu do výtokového potrubí. Tento fakt potvrzuje i obrázek trajektorie proudění.



Obrázek 28: Výsledky CFD simulace druhého návrhu – rychlost a trajektorie

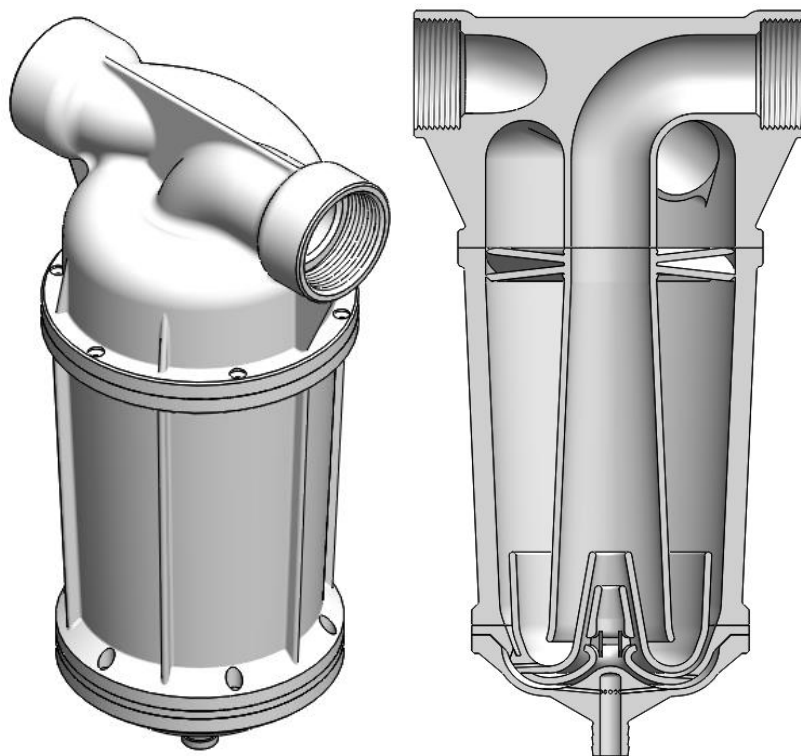


Obrázek 29: Výsledky CFD simulace druhého návrhu – statický tlak

5.3.3 Třetí návrh

Popis konstrukce

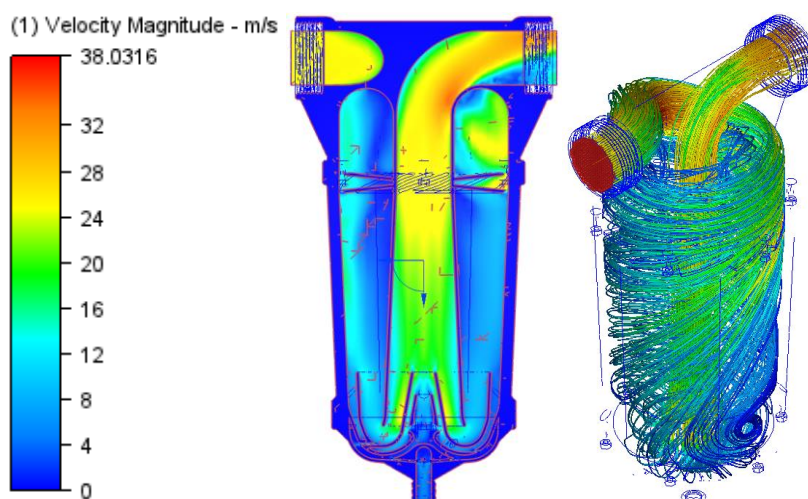
Třetí návrh upravuje nedostatky druhé verze, a navíc přidává několik nových prvků. Vstup a výstup pro vzduch je nyní opatřen trubkovými závity pro našroubování hadičníků. Spodní výtok pro kondenzát má hadičník přímo integrován do zařízení. Vzhledem k nárůstu tlakové ztráty předchozího návrhu došlo k opětovnému zvětšení průměrů vstupního a výstupního potrubí na 36 mm. Čtvercový průřez části vstupního potrubí byl změněn na kruhový, aby mohlo být vylepšeno vedení výstupní trubky. Problematický ohyb s ostrou hranou a proměnným průřezem má nově konstantní kruhový průřez a větší rádius, čímž by mělo dojít ke snížení tlakové ztráty. Úprava potrubí si vyžádala i nárůst rozměrů odlučovacího válce. Větší průměr je vykompenzován ztenčením stěn na 2 mm, reálně tedy velikost zařízení zůstala obdobná. S redukcí tloušťky se pojí i přidání žeber po vnějším obvodu válce, aby byla zachována dostatečná tuhost konstrukce. Rozváděcí lopatky na vstupu do odlučovacího válce jsou nyní mírně nakloneny a štěrbininy mají větší průřez opět za účelem snížení tlakové ztráty. Pro lepší proudění kondenzátu po stěnách má hlavní tělo nově kónický tvar. Ve spodní části zařízení byl odstraněn druhý sifon, protože se ukázal jako nadbytečný a zvyšoval komplexnost konstrukce. Dále byly zrušeny lamče proudu pod horním elementem. Jejich funkci přebíral zahnutý konec druhé lopatky, který má za úkol zbrzdit a usměrnit nahromaděnou vodu v sifonu, aby nedocházelo k jejímu vyfukování proudem vzduchu do komínu.



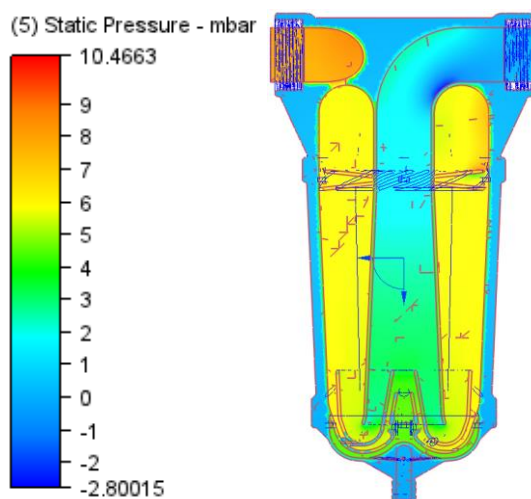
Obrázek 30: 3D model a řez třetího návrhu

Výsledky simulace

Zvětšení průřezů potrubí snižuje rychlosti průtoku. Maximum na vnitřku ohybu výstupního potrubí má aktuálně hodnotu 38 m/s. Všechny proběhlé úpravy průřezů, rozváděcích lopatek a vedení mají pozitivní vliv na tlakovou ztrátu zařízení, která se snížila o čtvrtinu na 8 mbar a s rezervou splňuje požadavek palivového článku. Změna geometrie rozváděcích lopatek neměla zásadní vliv na distribuci vzduchu po stěnách. Proudění má stále šroubovitou klesající trajektorii. Většina proudu vzduchu je následně horním elementem odkloněna vzhůru do komínu a pouze malá část prochází sifonem. Simulace všech návrhů byly prováděny pro stav, kdy sifon ještě není naplněný a utěsněný vodou. Jakmile dojde k akumulaci dostatečného objemu vody v sifonu, bude nad horní lopatkou směřovat do výfukového komínu všechen vzduch. Odstranění druhého sifonu nezměnilo tlakové poměry ve spodní části zařízení. Tlak na dně je stále shodný se vstupem do komínu, a tak nedochází k úniku vzduchu do výtoku pro kondenzát. Třetí návrh dostatečně naplňuje veškeré požadavky na správnou funkci odlučování a odvádění vody, proto již v rámci diplomové práce nebude dále rozvíjen a může se přistoupit k jeho realizaci.



Obrázek 31: Výsledky CFD simulace třetího návrhu – rychlost a trajektorie



Obrázek 32: Výsledky CFD simulace třetího návrhu – statický tlak

5.4 Podrobný popis finálního návrhu

Pro lepší vyrobiteľnosť bol finálny návrh konštrukcie rozdelený na 5 komponent. Skladá sa z horného víka (červeně), odlučovacieho válce (modře), horního tvarového elementu (šedě), středního tvarového elementu (zeleně) a spodního víka (žlutě). Podle funkce lze zařízení rozdělit na 3 části: připojovací, odlučovací a odváděcí.

5.4.1 Připojovací část

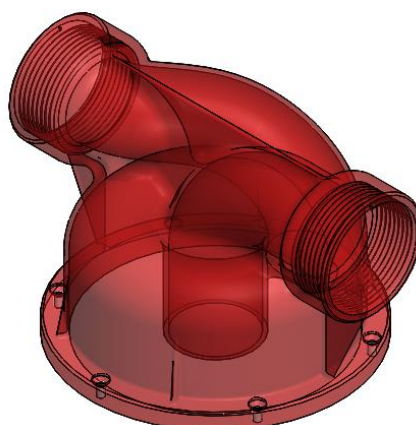
Připojovací část umožňuje napojení zařízení na vzduchové hadice vodíkového systému. Plní dvě dílčí funkce. Vstupní část navádí proud vlhkého vzduchu potrubím na rozváděcí lopatky odlučovacieho válce a výstupní usměrňuje vysušený vzduch komínem do výfukové hadice.

Vstupní část

Na vstupu je potrubí opatřeno trubkovým závitem G 1 1/2" pro našroubování hadičníku s hadicí. Za závitem se vnitřní průměr potrubí zúží na 36 mm a tento průřez pokračuje až do konce. Zvolený průměr je největší možný, se kterým je možné zařízení zastavět do systému. Vstupní hadice má vnitřní průměr 38 mm, průtočný průřez se tak mírně zmenší. Ihned za závitem se vedení stáčí doleva, aby obešlo středovou výfukovou trubku, a následně třetinu otáčky klesá po pravotočivé šroubovici. Výstup potrubí se nachází o 38 mm níže než vstup a tečně přiléhá ke stěně válce. Zde vstupní část zařízení končí.

Výstupní část

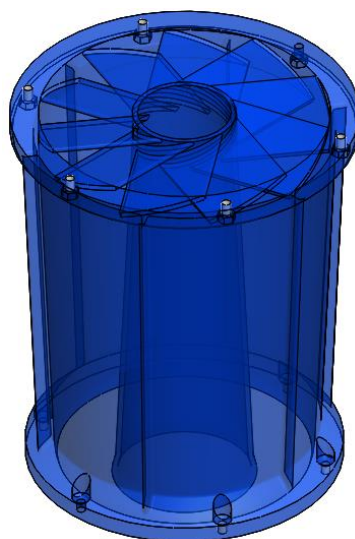
Výfukový komín slouží k vedení vysušeného vzduchu z odlučovacieho válce do výstupního potrubí za zařízením. Komín začíná ve středu prohlubně nad horním tvarovým elementem a směrem vzhůru se postupně zužuje až na průměr 36 mm. Ve vrchní části se komín stáčí obloukem s poloměrem 38 mm do vodorovného směru. Na konci výfuku je opět umístěn závit G 1 1/2" pro připojení výstupní hadice.



Obrázek 33: Horní víko zařízení se vstupní a výstupní částí

5.4.2 Odlučovací část

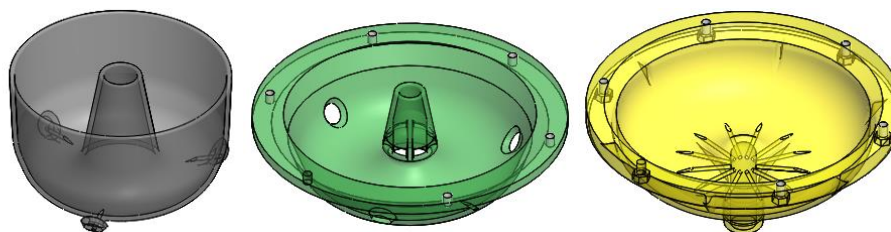
Úkolem odlučovací části je odseparovat obsah vody ze vstupujícího vlhkého vzduchu. Využívá se k tomu stejného cyklonového způsobu jako u obdobných separátorů. Odlučování probíhá na stěnách válce o vnitřním průměru 112 mm. Pro optimální distribuci proudu vzduchu po celém obvodu je v horní části umístěno 10 rozváděcích lopatek natočených pod úhlem 30°, na které proudí vzduch ze vstupní části zařízení. Po průchodu lopatkami je proud tlačěn odstředivou silou na stěny válce, kde po šroubovicové trajektorii klesá a postupně se z něj odlučuje voda. Válec se směrem dolů mírně kónicky zužuje, aby se kapky vody lépe držely na obvodu.



Obrázek 34: Odlučovací válec s rozváděcími lopatkami a výstupním komínem

5.4.3 Odváděcí část

Odváděcí část zastává v zařízení funkci doposavad plněnou plovákovým ventilem, tedy propouští kondenzát do výtoku a zároveň zabraňuje průchodu vzduchu. Odváděč se skládá ze tří dílů, které společně tvoří sifonovou uzávěru a usměrňují proud vzduchu do výfuku.



Obrázek 35: Komponenty odváděcí části zařízení

Horní lopatka usměrňuje a obrací většinu proudu vysušeného vzduchu směrem do výfukového komínu. V prostoru mezi horní a druhou lopatkou se nachází sifonová prohlubeň, do které stéká odseparovaný kondenzát ze stěn odlučovacího válce. Kondenzátem naplněný sifon slouží jako zábrana proti proudu vzduchu, aby nevnikal do výtokové části zařízení. Pro připojení odtokové hadice je spodní část zařízení vybavena integrovaným hadičníkem 1/2".

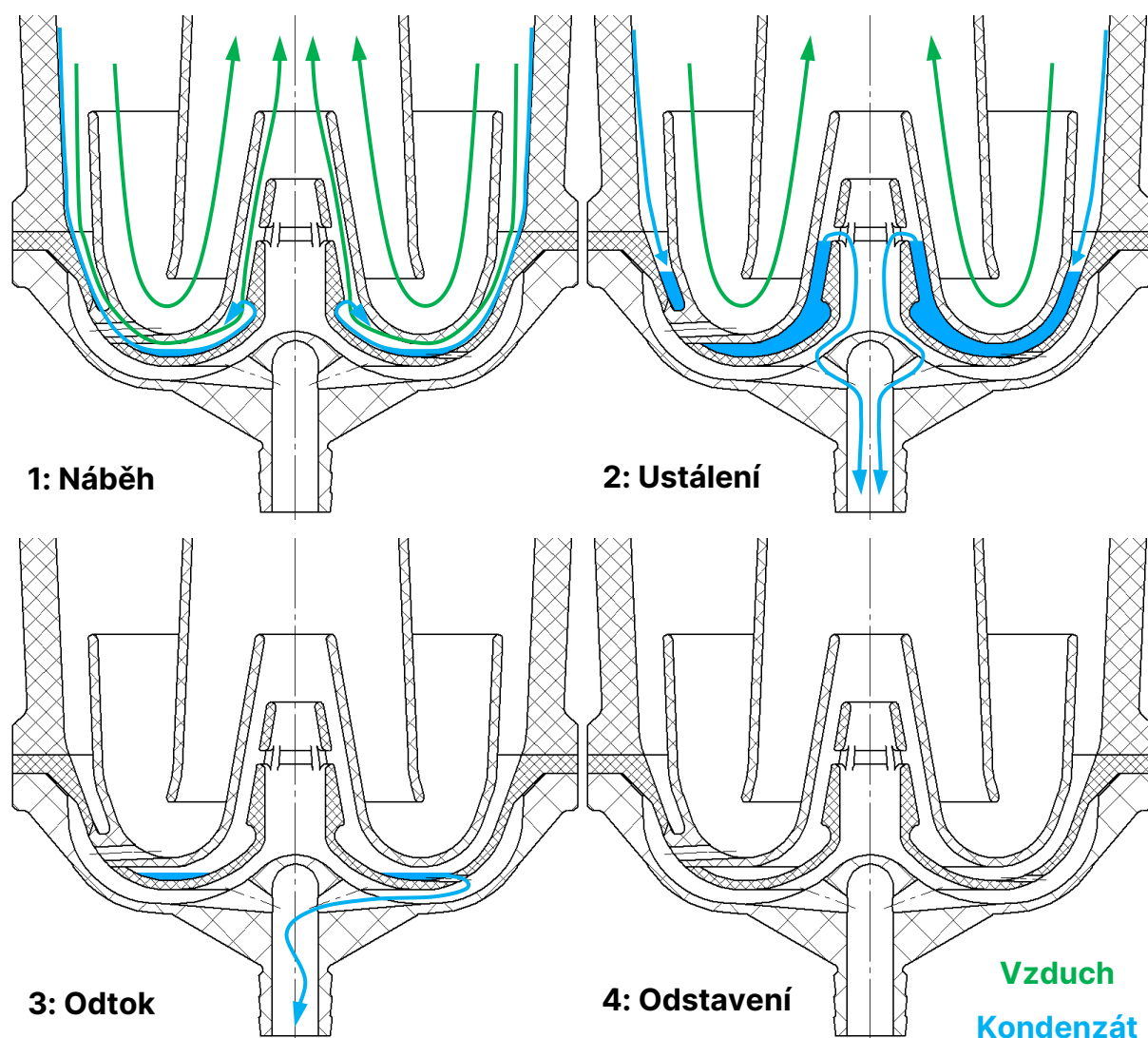
Provozní stavy sifonové zábrany

1: Náběh Při náběhu palivového článku nebude sifon zcela utěsněn kondenzátem a bude částečně propouštět vzduch. V této situaci by proud vzduchu mohl vyfouknout objem vody z prohlubně sifonu do výfuku, kde je nežádoucí. Pro tyto případy druhá lopatka disponuje zahnutým koncem, který zbrzdí a navede vyfukovanou vodu mimo směr komínu.

2: Ustálení Jakmile dojde k naplnění sifonové prohlubně kondenzátem, vzduch bude proudit pouze nad horní lopatkou směrem do výfuku a voda bude postupně přepadávat přes hranu sifonu do výtoku. Výška hladiny na vstupu do sifonu bude vlivem přetlaku nižší než na výstupu.

3: Odtok Když z palivového článku přestane proudit vlhký vzduch, nahromaděný kondenzát začne postupně odtékat ze sifonu skrz malý otvor, tak aby se zařízení zcela vyprázdnilo.

4: Odstavení Mimo provoz palivového článku se uvnitř odváděcího zařízení nebude držet žádný zbytkový kondenzát, který by mohl vlivem teplot zmrznout.



Obrázek 36: Provozní stavy sifonové zábrany

Výpočet výšky hladiny v sifonu

Výška hladiny kondenzátu v sifonu bude kolísat podle momentálního tlaku uvnitř zařízení. Z výsledků vypočítaných simulací plyne, že tlak na vstupu do sifonu je větší než za sifonem u vstupu do komínu. Při provozu tedy bude hladina vody na vstupu níže než na výstupu. Rozdíl výšky hladin vychází ze vztahu upravené Bernoulliho rovnice:

$$p_{IN} = p_{OUT} + \rho * g * (\Delta h_{IN} + \Delta h_{OUT}) \quad (2)$$

Dále platí, že úbytek objemu vody na vstupu je roven nárůstu objemu na výstupu:

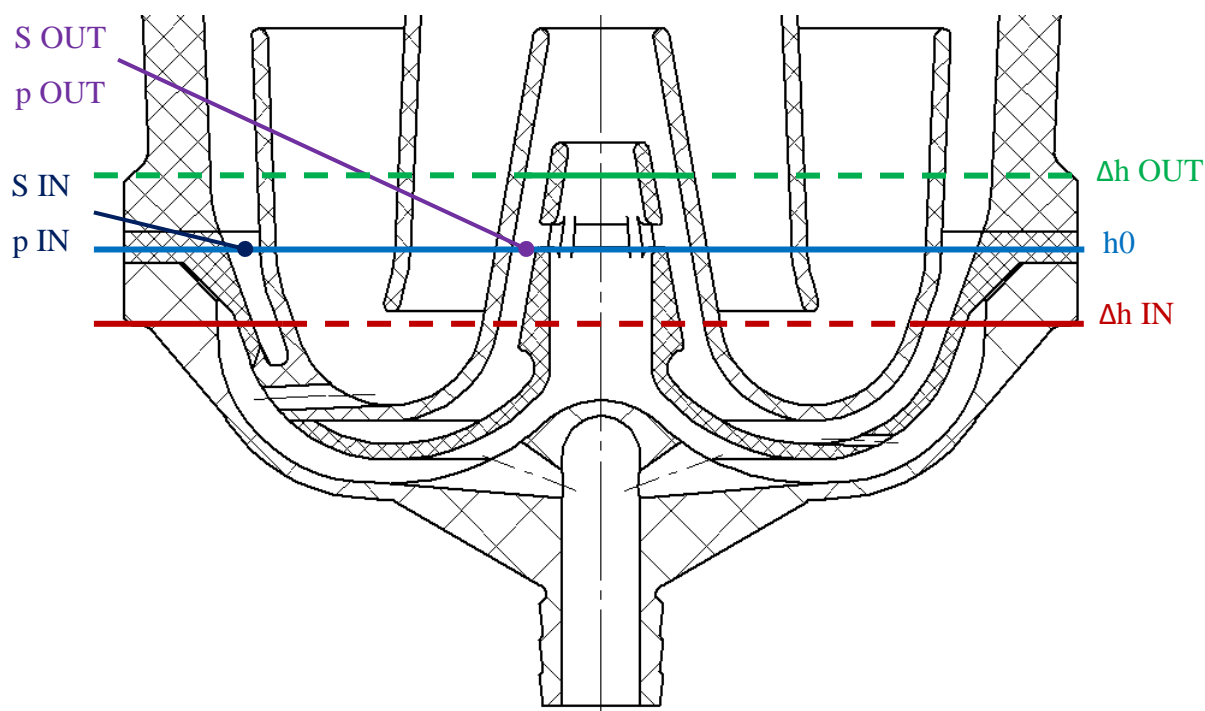
$$V_{IN} = V_{OUT} \quad (3)$$

$$S_{IN} * \Delta h_{IN} = S_{OUT} * \Delta h_{OUT} \quad (4)$$

Po dosazení a úpravě lze vypočítat pokles výšky hladiny na vstupu a nárůst na výstupu:

$$\Delta h_{IN} = \frac{p_{IN} - p_{OUT}}{\rho * g} * \frac{S_{OUT}}{S_{OUT} + S_{IN}} \quad (5)$$

$$\Delta h_{OUT} = \frac{S_{IN} * \Delta h_{IN}}{S_{OUT}} \quad (6)$$

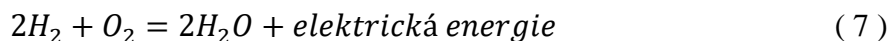


Obrázek 37: Detail odváděcí části zařízení

Největší diference hladin nastane při maximálním průtoku vzduchu zařízením 1,5 m³/min. Pro tento průtok byl simulací zjištěn tlak na vstupu do sifonu 650 Pa a na výstupu 450 Pa. Plochy průřezu sifonu při maximální výšce hladiny 25 mm byly změřeny z modelu zařízení. Dosazením do rovnic byl vypočítán pokles hladiny na vstupu do sifonu 3 mm a nárůst na výstupu o 18 mm. Při klidové výšce hladiny 25 mm zůstane dle výsledků sifon utěsněný. Pokud však bude hladina vody na nízké úrovni, např. krátce po náběhu palivového článku, přetlak na vstupu by mohl snížit hladinu pod úroveň sifonu a způsobit částečné probublávání vzduchu skrz kondenzát. Tento jev by byl však pouze krátkodobý a nepředstavuje problém pro správnou funkci zařízení.

Výpočet průměru odtokových otvorů

Pro správné dimenzování průměrů odtokových otvorů v odvaděči je nutné vědět maximální možný průtok vody odvaděčem. Množství vody vznikající reakcí vodíku a kyslíku lze vypočítat dle celkové chemické rovnice v palivovém článku. Po dosažení molárních hmotností jednotlivých prvků je možné zjistit poměr molárních hmotností dodaného vodíku a vzniklé vody. [33]

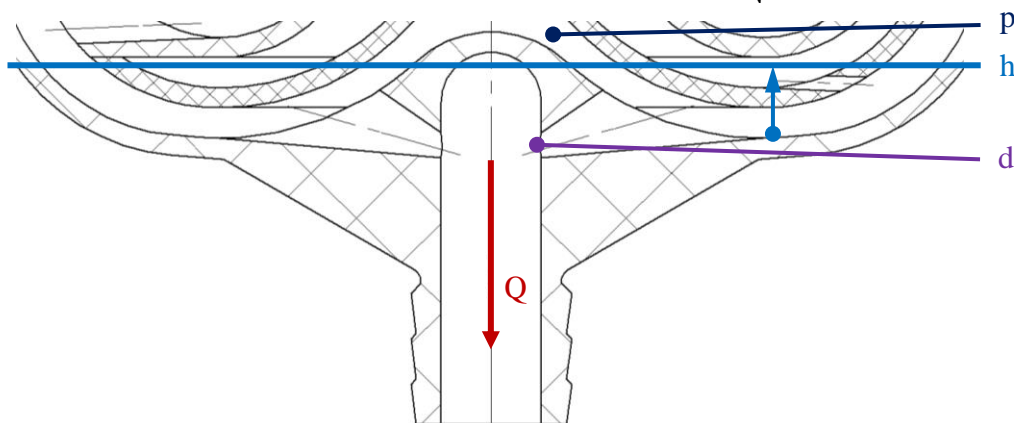


$$2 + 16 = 18 \text{ g/mol} \quad (8)$$

Z rovnice je patrné, že při dodání 2 g/mol vodíku vznikne 18 g/mol vody. Poměr je tedy 1/9, po převodu na kilogramy vznikne reakcí 1 kg vodíku se vzduchem v palivovém článku 9 kg vody. Výrobce palivového článku udává maximální průtok vstupujícího vodíku 0,5 g/s. Při tomto průtoku se na základě zjištěného poměru vytvoří 4,5 g/s vody, což odpovídá 270 ml/min. Do palivového článku však vstupuje také vzduch, který obsahuje vodu ve formě vlhkosti. Maximální průtok vzduchu dle výrobce činí 1,5 m³/min. Při běžných podmínkách s teplotou 20 °C a relativní vlhkostí 70 % je ve vzduchu obsaženo přibližně 12 g/m³ vody. Palivovým článkem tak projde navíc ještě 18 ml/min vody ze vzduchu. Maximální možný průtok vody, kterou je potřeba odvádět, proto činí 288 ml/min. Odtokové kanálky tak budou navrženy s rezervou pro odvod 300 ml vody za minutu. Průměr otvoru lze zjistit pomocí rovnice objemového průtoku a Bernoulliho rovnice, ze které se vyjádří vztah pro rychlost výtoku. Dosažením a úpravou vznikne vzorec pro výpočet průměru výtokového otvoru. [28, 29]

$$gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \rightarrow v_2 = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho} + 2gh_1} \quad (9)$$

$$Q = \alpha * S * \varphi * v = n * \alpha * \frac{\pi d^2}{4} * \varphi * \sqrt{\frac{2p}{\rho} + 2gh} \rightarrow d = \sqrt[4]{\frac{16Q^2}{n^2 \alpha^2 \pi^2 \varphi^2 (2p + 2gh)}} \quad (10)$$



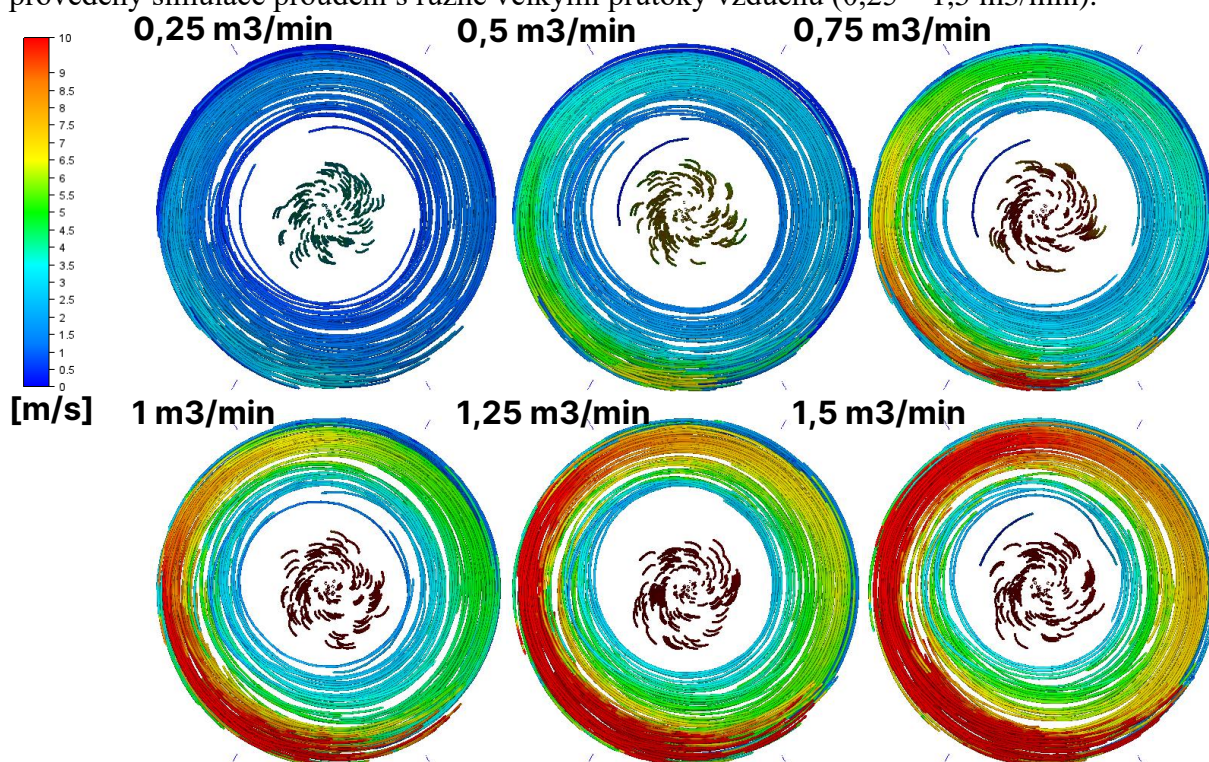
Obrázek 38: Detail odtokových otvorů

Objemový průtok vody Q je dle přechozího výpočtu 300 ml/min, počet výtokových otvoru n byl zvolen 2, součinitel kontrakce α kuželového otvoru činí 0,983, rychlostní součinitel φ 0,961, přetlak ve spodní části odvaděče je dle simulace 200 Pa, hustota vody při teplotě 60 °C činí

983 kg/m³ a výška hladiny h nad výtakovými otvory byla stanovena dle geometrie modelu na 8 mm. Jedná se o optimální výšku hladiny, která bude udržována v odvaděči. Pokud by byla výška hladiny určena pro výpočet průměru otvorů příliš nízko, měla by za následek zbytečně velké otvory a v odvaděči by se nedržel ani při maximálním průtoku žádný kondenzát. V případě nastavení vysoké hladiny pro výpočet budou výtakové otvory naopak velmi malé a v zařízení se bude držet velký sloupec vody. Pro dané hodnoty vychází průměr výtakových otvorů 2,1 mm. [32]

5.5 Parametry finálního návrhu

Pro zjištění, zda bude návrh pracovat správně za všech provozních podmínek, byly na závěr provedeny simulace proudění s různě velkými průtoky vzduchu (0,25 – 1,5 m³/min).

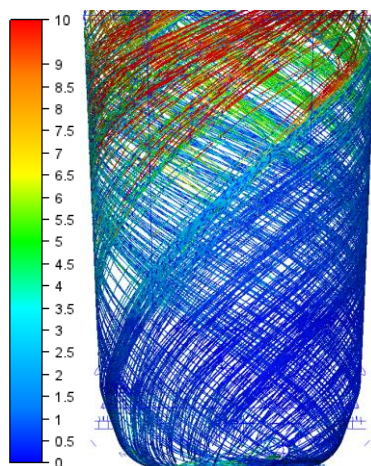


Obrázek 39: Rychlost proudění v odlučovacím válci pro různé průtoky

Ze simulací vyplývá, že zařízení bude fungovat velmi podobně v celé šíři pracovního okna. Pohyb částic za nízkého průtoku ukazuje téměř neměnnou trajektorii v porovnání s maximálním průtokem. Rychlost proudění na stěně odlučovacího válce dosahuje při minimálním průtoku 0,25 m³/min přibližně 2 m/s, za maximálního průtoku 1,5 m³/min pak 10 m/s.

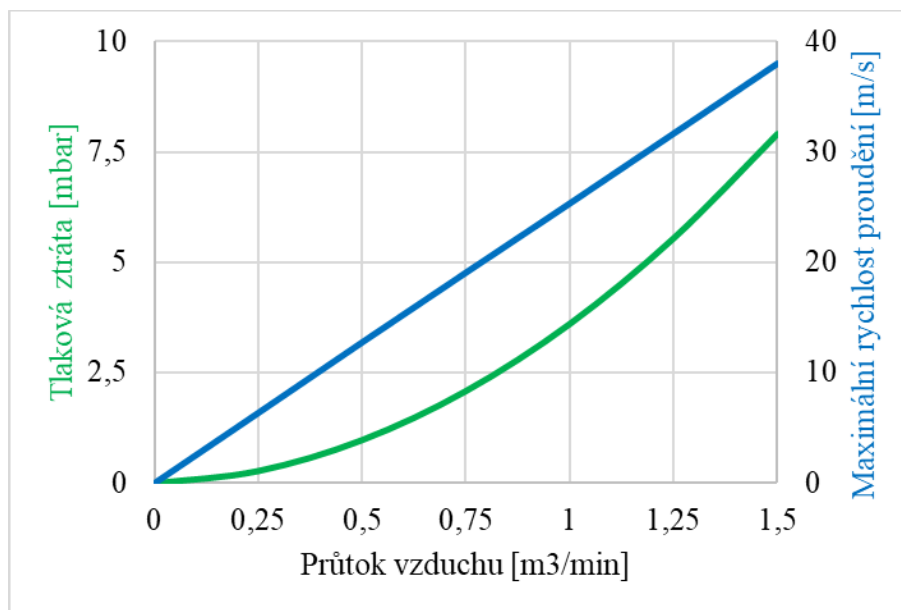
Zobrazené předchozí výsledky simulací neuvažují hmotnost proudícího média, avšak v post-processingu simulace lze zjistit chování hmotných částic rozptýlených v proudícím vzduchu. Následující obrázek ukazuje trajektorii vodních kapek v odlučovacím válci včetně zahrnutí gravitační síly a součinitele odporu vzduchu C_d 0,45. Je patrné, že vlivem působení sil jsou vodní částice tlačeny na vnější stěnu odlučovacího válce a plynule klesají po šroubovitě dráze. [34]

Rychlost [m/s]
Q = 1 m³/min
Částice Ød = 3 mm
ρ = 983 kg/m³
Cd = 0,45



Obrázek 40: Trajektorie proudění vodních kapek s uvážením hmotnosti

Důležitým provozním ukazatelem je i tlaková ztráta mezi vstupem a výstupem. Při průtoku 0,25 m³/min činí ztráta 0,3 mbar a se vzrůstajícím průtokem postupně roste až na maximálních 7,9 mbar. Limitní hodnota tlakové ztráty pro celé výfukové potrubí je výrobcem palivového článku stanovena na 12 mbar. I při nejvyšším průtoku tak existuje rezerva pro ostatní komponenty výfukového systému. Palivový článek však neběží trvale na maximální výkon, reálně bude průtok vzduchu činit přibližně 1 m³/min a tlaková ztráta 3,6 mbar. Parametry finálního návrhu jsou znázorněné v následujícím grafu a tabulce.



Obrázek 41: Graf závislosti tlakové ztráty a rychlosti proudění na průtoku vzduchu

Tabulka 9: Parametry finálního návrhu

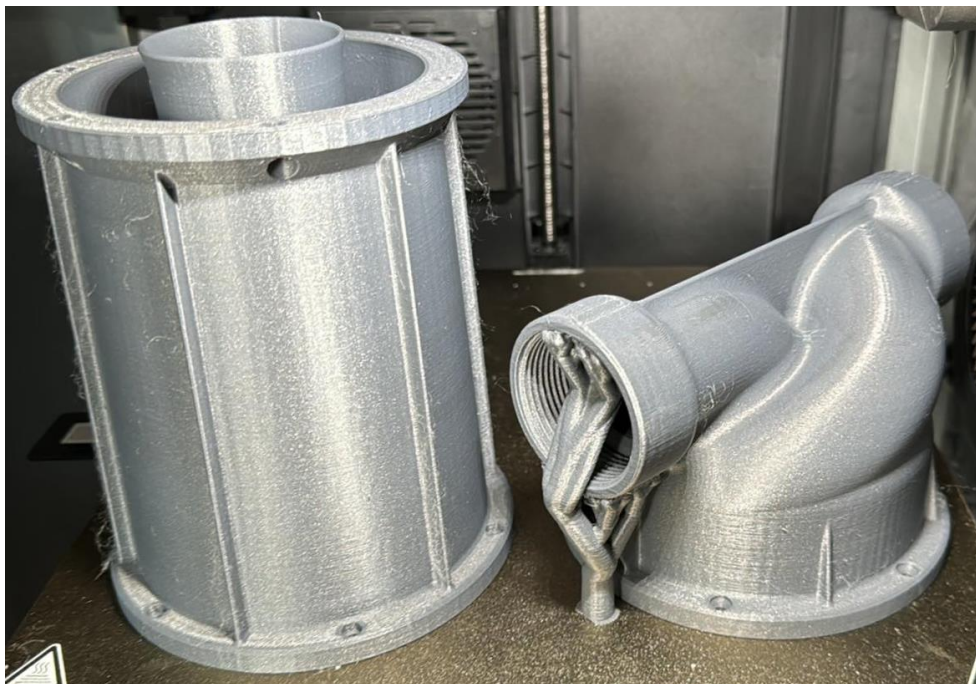
Parametr	Hodnota
Celkové rozměry [mm]	170x134x323
Optimální průtok vzduchu [m ³ /min]	0,25–1,5
Maximální tlaková ztráta [mbar]	7,9
Maximální odváděcí průtok vody [ml/min]	300

6 Experimentální ověření funkčnosti

Výsledky simulací proudění neposkytují veškerá data pro zjištění správné funkčnosti návrhu, velmi obtížné je zjistit např. účinnost separace kondenzátu. Pro ověření, jak bude zařízení fungovat v reálných podmínkách, byl vyroben testovací prototyp, který se vyzkoušel přímo ve vodíkovém systému.

6.1 Výroba testovacího prototypu

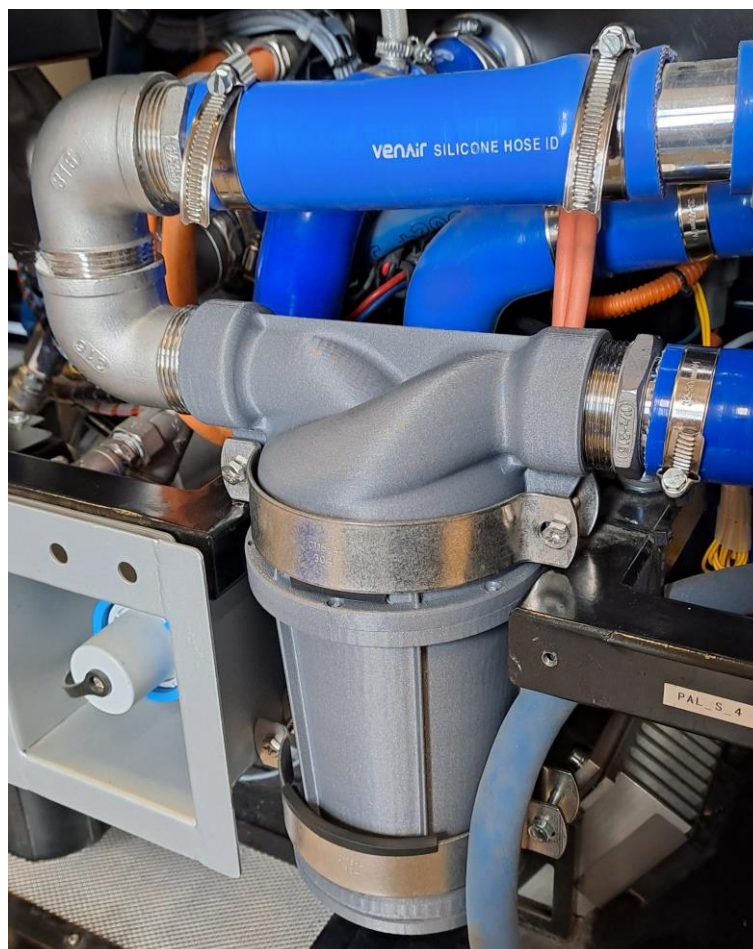
Prototypový návrh zařízení byl vyroben pomocí 3D tisku, konkrétně technologií FDM. Materiálem pro tisk byl vybrán ASA, jelikož má vysokou teplotní odolnost až 93 °C. Po vytisknutí následovalo očištění dílů a montáž do společného celku. Jednotlivé díly jsou spojeny šroubovými spoji se závitem M3 a utěsnění dosedacích ploch je zajištěno silikonovým tmelem. Zkompletovaný prototyp má hmotnost 0,53 kg, je tedy 15krát lehčí než aktuální stav. [30]



Obrázek 42: Výroba součástí prototypu na FDM 3D tiskárně

6.2 Zástavba do vodíkového systému

Prototyp nového zařízení byl umístěn do stejného místa ve vodíkovém systému jako původní odlučovač a odváděč. Před montáží byl do vstupu prototypu našroubován hadičník G 1 1/2“ a na výstup byla připevněna dvojice 90° kolen zakončených stejným hadičníkem. Poté se prototyp umístil do systému a byl připevněn dvěma svěrnými objímkami. Na hadičníky byly nasunuty silikonové hadice, vstupní vedoucí z palivového článku a výstupní do výfuku, které se zafixovaly hadicovými sponami. Obdobně byla na výtokový hadičník připevněna hadice 1/2“.



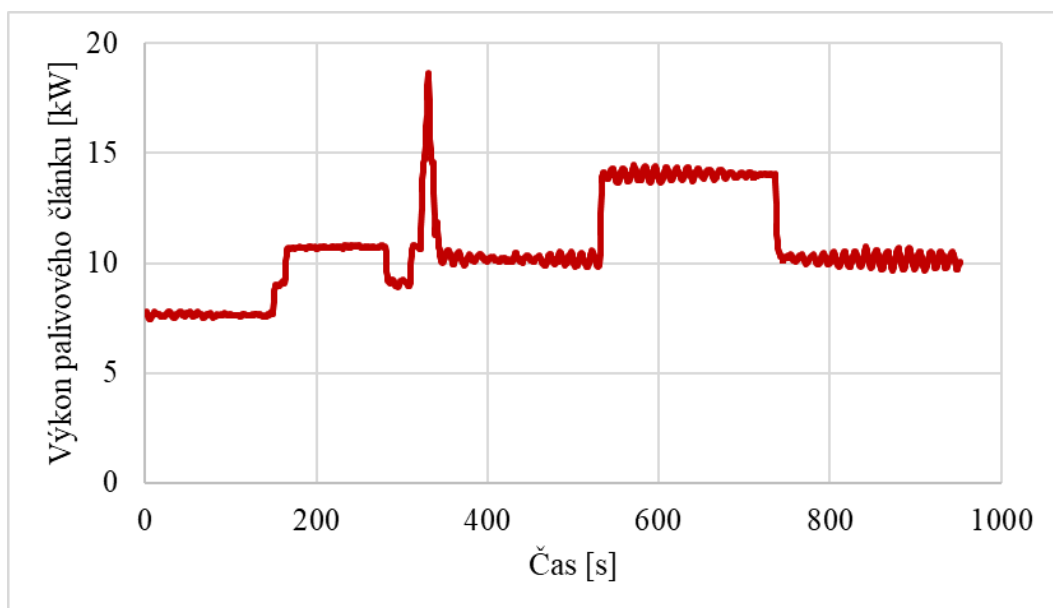
Obrázek 43: Zástavba prototypu do vodíkového systému

6.3 Průběh testu

Před začátkem měření probíhal pozvolný náběh palivového článku v systému H2BASE. Po dostatečném zahřátí a ustálení výkonu bylo zahájeno měření. Hlavním sledovaným ukazatelem funkčnosti byl objem odvedeného kondenzátu. Dále byl vizuálně pozorován vystupující vzduch a odtokové potrubí.

V první fázi měření byl výkon udržován na hodnotě 7,5 kW. Při těchto podmínkách pracovalo odváděcí zařízení správně. Z výfukového komínu vycházel pouze mírně vlhký vzduch bez kapek vody a odtokovým potrubím proudil souvislý tok kondenzátu do sběrné nádoby. Po

uplynutí přibližně 150 sekund byl výkon palivového článku zvýšen na 11 kW. I při tomto režimu nedocházelo k žádným nežádoucím projevům a odváděcí zařízení pracovalo správným způsobem. Zhruba v čase 330 sekund prudce stoupl výkon článku krátce na hodnotu 18,5 kW. V tento moment zařízení nedokázalo zachytit všechny obsah vody a z výfuku vycházely kapky kondenzátu. Následně výkon klesl na 11 kW a zařízení opět správně plnilo funkci. Na začátku 9. minuty testu stoupl odběr elektrické energie a výkon článku narostl na 14 kW. Zařízení mělo znovu problém odseparovat z proudu vzduchu celý obsah vody, který tak vycházel výfukem. Odtokovým potrubím sice proudil kondenzát, avšak ve výrazně menším množství než v případě nižšího výkonu. Na závěr testu byl výkon opět snížen na 11 kW.



Obrázek 44: Graf výkonu palivového článku v průběhu testu

Při všech testovaných výkonech neunikal odtokovým potrubím žádný vzduch, což značí správnou funkci tvarovaných lopatek a sifonové zábrany. Po vypnutí palivového článku vytekl z odváděcího zařízení celý objem nahromaděné vody. V testovaném zařízení by tedy nemělo docházet k zamrznání kondenzátu. Celý test probíhal 15 minut, během nichž zařízení odvedlo celkem přibližně 800 ml vody. Průměrně činil výkon 10,7 kW. Za dobu testu tak palivový článek vytvořil 1320 ml vody a účinnost odváděcího zařízení dosáhla 61 %. Při výkonech do 11 kW, kdy zařízení fungovalo správně, článek vytvořil cca 920 ml vody, z nichž bylo odvedeno 750 ml. Účinnost v době správné činnosti zařízení tak činí 82 %.

6.4 Vyhodnocení testu

Z měření vyplývá, že odváděcí zařízení pracuje správně pouze za určitých provozních podmínek. Maximální výkon palivového článku v systému H2BASE činí 33 kW, ale špičkový výkon během testu byl 18,5 kW. Zařízení však fungovalo správně pouze do výkonu 11 kW, při vyšším

zatížení docházelo k propouštění obsahu vody do výfuku a z odtokového potrubí vycházel pouze malý proud kondenzátu. Špatná funkce může být způsobena několika faktory. Vzhledem k nemožnosti pohledu do vnitřku zařízení během provozu jsou možné příčiny problému pouhými hypotézami. Pro potvrzení či vyvrácení hypotéz by bylo nutné vyrobit prototyp z čirého materiálu nebo provést pokročilejší simulace proudění.

Hypotéza A – Nízká účinnost odlučování

První možností způsobující problém je nízká účinnost odlučování kondenzátu z proudícího vzduchu. Při vyšším výkonu a průtoku vzduchu mohlo dojít k zahlcení rozváděcích lopatek odlučovače, což mohlo způsobit změnu trajektorie proudění v odlučovacím válci a nízkou separaci. Špatnou účinnost může mít za následek i velký obsah vody v kombinaci s vysokou rychlostí vzduchu. Velké množství kondenzátu se během rychlého průchodu separátorem jednoduše nestihlo zcela odloučit a došlo k jeho propuštění do výfuku. Hypotéze však rozporují provedené CFD simulace, které při vyšších průtocích ukazovaly vhodnější trajektorii proudění.

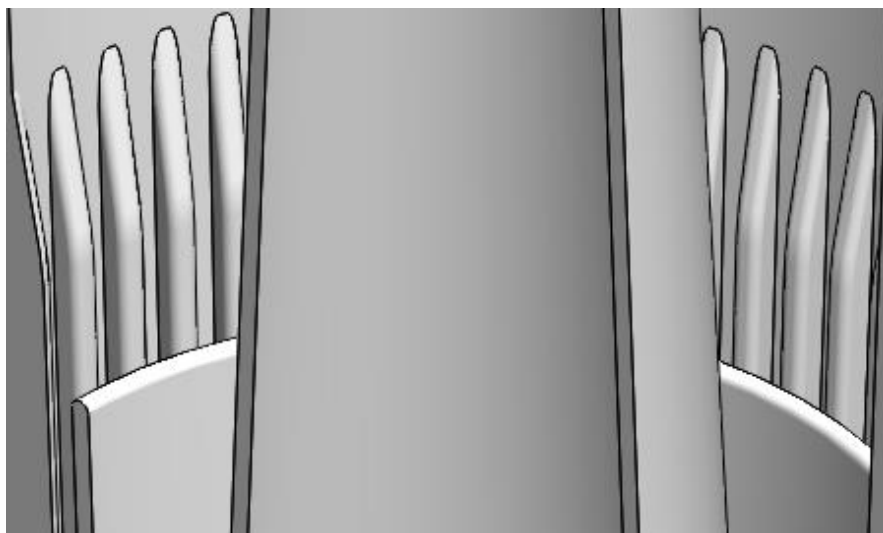
Hypotéza B – Vyfukování vody ze sifonové zábrany

Možným činitelem problému by mohlo být i vyfukování odloučeného kondenzátu přímo ze sifonové zábrany. Vyšší průtok vzduchu mohl způsobit výrazný přetlak mezi vstupem a výstupem sifonu, což by vedlo k poklesu hladiny na vstupu a vyfouknutí celého objemu sifonu směrem do výfukového komínu. Sifon proto obsahuje zahnutý konec lopatky, který zbrzdí a navede vyfukovanou vodu mimo komín. Tvar lopatky je navržený spíše pro případy, kdy sifon není ještě utěsněný, např. při náběhu palivového článku a menších průtocích. Vyšší rychlost průtoku nemusela být lopatkou dostatečně snížena a došlo k vyfouknutí. Hypotéze ale odporují tlakové poměry z CFD simulací a výpočet změny výšky hladiny, dle nichž by i při maximálním průtoku nemělo docházet k poklesu hladiny na vstupu pod úroveň sifonu.

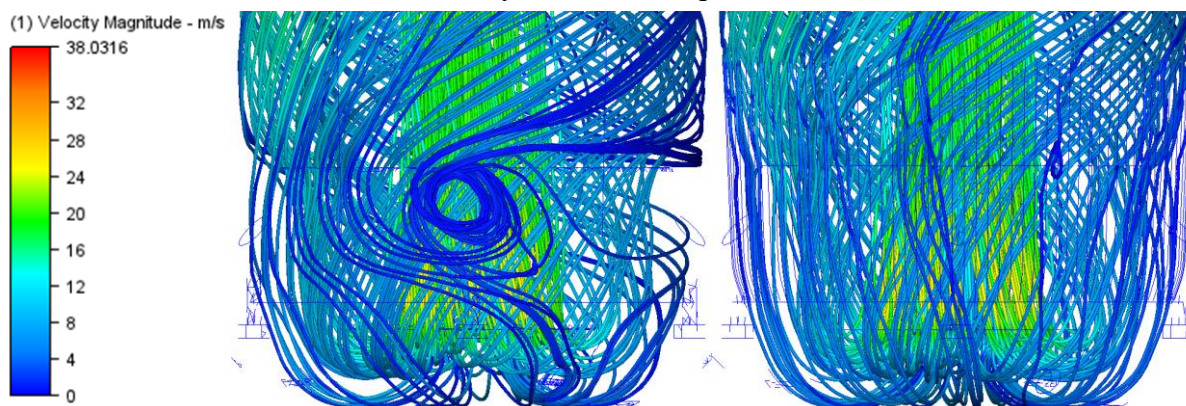
Hypotéza C – Hromadění vody nad horní lopatkou

Špatnou funkci by mohlo způsobovat i hromadění kondenzátu v prohlubni tvořené horní odváděcí lopatkou. Účinnost odlučování mohla být i při vyšším výkonu stále na dobré úrovni, ale separovaný kondenzát se mohl kromě sifonové zábrany dostat i do prostoru nad horní lopatkou u vstupu do komínu. Tímto místem je veden i veškerý proud vzduchu, který tak mohl kondenzát z prohlubně vyfouknout a unášet dále do výfukového potrubí. Horní lopatka je vybavena odtokovými otvory, aby případné malé množství kondenzátu mohlo odtéct. Při vyšším průtoku však nemusela být kapacita otvorů dostatečná. Odloučený obsah vody se mohl nad horní lopatku dostat kvůli špatné trajektorii proudění v oblasti, kde začíná sifonová prohlubeň. Dle CFD simulací má zde totiž vzduch tendenci proudit po obvodu vodorovně, v jednom místě se shlukuje

a tvoří vír. Toto chování může zamezit kapkám vody stéct do sifonové zábrany, naopak je proudem strhne a vytáhne nad horní lopatku, kde se hromadí. Řešením by mohlo být přidání svislých drážek po odvodu spodní části odlučovacího válce, které zamezí vodorovnému proudění vzduchu a povedou kapky vody rovně dolů do sifonu.



Obrázek 45: Detail navrhovaných drážek ve spodní části odlučovacího válce



Obrázek 46: Porovnání trajektorie proudění vzduchu odvaděčem bez/s drážkami
Porovnání simulací proudění vzduchu zařízením bez/s drážkami ukazuje pozitivní vliv úprav na trajektorii vzduchu. Ve variantě s drážkami nedochází k žádnému vodorovnému proudění a netvoří se ani vír. Dle očekávání proud směřuje jednotlivými drážkami přímo do sifonové prohlubně. Pro zjištění reálné funkčnosti úprav by však bylo nutné vyrobit nový testovací prototyp a provést další experiment.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést inovaci zařízení pro odvod vody ze systému s palivovým článkem. Přesněji odstranit problém se zamrzáním kondenzátu v odvaděči, sloučit odlučovač s odvaděčem do společného celku a snížit hmotnost celého řešení.

Nejprve proběhla rešerše momentálně využívaných komponent pro separaci a odvádění kondenzátu. V rámci vodíkových systémů jsou mezi odlučovači zastoupené zejména cyklonové separátory. Odvod vody se nejčastěji řeší mechanickými plovákovými odvaděči nebo solenoidovými ventily. Dále byl detailněji rozebrán současný stav a popsáno inovační zadání.

Na základě zjištěných poznatků byly vytvořeny čtyři koncepty řešení nového zařízení pro odvod vody. První koncept funguje na principu koalescence. Další dva koncepty vycházejí z běžného plovákového odvaděče. Druhý koncept k němu přidává parafínový výpustní ventil a třetí zvedá plovák pomocí permanentního elektromagnetu. Poslední koncept se inspiruje sifonovou uzávěrou, která zabraňuje průtoku vzduchu. Všechny koncepty byly následně popsány z hlediska čtyř hodnotících kritérií, aby bylo možné vybrat nejvhodnější řešení metodou AHP analýzy. Hodnotila se komplexnost, hmotnost, životnost a spolehlivost navrhovaných variant. Jako nejlepší byl vyhodnocen koncept se sifonovou uzávěrou, který se umístil nejvýše ve třech ze čtyřech kritérií. Pro vybranou variantu konceptu byl poté zahájen vývoj.

Prvotní návrh tvaru konstrukce navazoval na koncepční skicu. Pro ověření funkčnosti návrhu bylo využito CFD simulace proudění. Do modelu součásti byly vloženy okrajové podmínky v podobě objemového průtoku vzduchu a tlakových poměrů. Po dokončení simulace byly analyzovány trajektorie částic, rychlost proudění, rozložení tlaku uvnitř zařízení a tlaková ztráta zařízení. Na základě výsledku simulace byl návrh mírně upraven, aby lépe splňoval sledované ukazatele. Pozměněný návrh byl poté opět ověřen simulačním výpočtem. V průběhu celého vývoje bylo provedeno více než 30 simulací pro odlišné návrhy, dokud nebylo dosaženo vyhovujícího stavu. Finální model byl následně rozdělen na několik dílů a vyroben metodou 3D tisku, aby mohla být odzkoušena jeho funkčnost i v reálném prostředí.

Inovované zařízení muselo splňovat několik parametrů daných výrobcem palivového článku. Dle CFD simulací činí maximální tlaková ztráta nového řešení 7,9 mbar, s rezervou tak splňuje limitní hodnotu 12 mbar. Zařízení muselo být dimenzované pro odvod vody vzniklé z průtoku vodíku až 0,5 g/s, což odpovídá 270 ml/min vody, zařízení je s rezervou připraveno na odvod 300 ml vody za minutu. Plastová konstrukce umožnila výrazné snížení hmotnosti z původních 8,1 kg na 0,53 kg.

Testovací prototyp byl odzkoušen přímo v systému s vodíkovým článkem. Během testu byl měřen objem odvedeného kondenzátu a sledováno odtokové potrubí, zda nedochází k úniku

vzduchu. V průběhu testu byl několikrát změněn výkon palivového článku, aby bylo ověřeno chování zařízení při různých průtocích vzduchu. Do výkonu 11 kW fungovalo zařízení správně. Z vlhkého vzduchu byl odseparován kondenzát, který přes sifonovou zábranu vytékal ze zařízení. Když byl výkon zvýšen na 14 kW, zařízení přestalo plnit funkci. Výfukem proudily kromě vzduchu i kapky vody a z odtokového potrubí vytékalo pouze malé množství kondenzátu. Tento problém mohl být způsoben nízkou účinností separace při vyšším průtoku nebo vyfukováním odloučeného kondenzátu proudem vzduchu do výfuku. Pro zjištění konkrétního důvodu by bylo nutné vyrobit model zařízení z čirého materiálu nebo provést pokročilejší CFD simulace. Maximální výkon daného palivového článku činí 33 kW, odváděcí zařízení tak pracovalo správně cca do 1/3 výkonu. Při nízkých výkonech do 11 kW bylo odvedeno 750 ml vody. Za 12 minut testu vytvořil palivový článek 920 ml vody, průměrná účinnost odváděcího zařízení tedy činí 82 %. Ve všech testovacích režimech nedocházelo k úniku vzduchu do odtokového potrubí, což značí správnou funkci sifonové zábrany. Po ukončení testu rovněž všechen kondenzát ze zařízení odtekl a nemohlo by tedy dojít k jeho zamrznutí.

Výsledný model inovovaného zařízení pro odvod vody z palivového článku splňuje všechny cíle a parametry zadání diplomové práce. Experimentální ověření funkčnosti sice zjistilo nedostatky návrhu při vyšším průtoku vzduchu, dalším vývojem by je však bylo možné odstranit.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Orientační schéma systému palivového článku s vyznačenou řešenou oblastí [3]	12
Obrázek 2: Cyklonový odlučovač Parker Hannifin [3]	13
Obrázek 3: Cyklonový odlučovač Mann+Hummel [5]	13
Obrázek 4: Mechanický plovákový odváděč a jeho princip [8, 10]	14
Obrázek 5: Solenoidový odváděcí ventil a jeho princip [7, 12]	15
Obrázek 6: Odlučovače s integrovaným plovákovým a solenoidovým odváděčem [3, 13]	16
Obrázek 7: Příklady patentově chráněných řešení pro odvod vody [14, 15, 16, 17]	16
Obrázek 8: Vodíkový systém H2BASE od společnosti DEVINN [18]	17
Obrázek 9: Schéma zapojení komponent na výstupu vzduchu z palivového článku	17
Obrázek 10: Odlučovač TLV DC7 a odváděč TLV SS1VG [19, 20]	18
Obrázek 11: Znázornění problémového stavu odváděče TLV SS1VG [9]	18
Obrázek 12: Zástavba současného řešení do vodíkového systému	19
Obrázek 13: Odlučovač obalený izolačním návlekem [4]	19
Obrázek 14: Princip koalescenční membrány a schéma konceptu A [21]	20
Obrázek 15: Schéma konceptu B1	21
Obrázek 16: Voskový akční člen ventilu (pevný/kapalný stav) [24]	21
Obrázek 17: Schéma konceptu B2	22
Obrázek 18: Permanentní elektromagnety [25]	22
Obrázek 19: Sifonová uzávěra a schéma konceptu C [27]	23
Obrázek 20: Volný prostor pro zástavbu odváděcího zařízení	28
Obrázek 21: Pracovní prostředí softwaru Autodesk CFD 2024	29
Obrázek 22: Okrajové podmínky zadané v CFD softwaru	29
Obrázek 23: Ukázka konvergovaného výpočtu	30
Obrázek 24: 3D model a řez prvního návrhu	31
Obrázek 25: Výsledky CFD simulace prvního návrhu – rychlost a trajektorie	32
Obrázek 26: Výsledky CFD simulace prvního návrhu – statický tlak	32
Obrázek 27: 3D model a řez druhého návrhu	33
Obrázek 28: Výsledky CFD simulace druhého návrhu – rychlost a trajektorie	34
Obrázek 29: Výsledky CFD simulace druhého návrhu – statický tlak	34
Obrázek 30: 3D model a řez třetího návrhu	35
Obrázek 31: Výsledky CFD simulace třetího návrhu – rychlost a trajektorie	36
Obrázek 32: Výsledky CFD simulace třetího návrhu – statický tlak	36
Obrázek 33: Horní víko zařízení se vstupní a výstupní částí	37

Obrázek 34: Odlučovací válec s rozváděcími lopatkami a výstupním komínem.....	38
Obrázek 35: Komponenty odváděcí části zařízení	38
Obrázek 36: Provozní stavy sifonové zábrany	39
Obrázek 37: Detail odváděcí části zařízení	40
Obrázek 38: Detail odtokových otvorů	41
Obrázek 39: Rychlost proudění v odlučovacím válci pro různé průtoky	42
Obrázek 40: Trajektorie proudění vodních kapek s uvážením hmotnosti	43
Obrázek 41: Graf závislosti tlakové ztráty a rychlosti proudění na průtoku vzduchu	43
Obrázek 42: Výroba součástí prototypu na FDM 3D tiskárně	44
Obrázek 43: Zástavba prototypu do vodíkového systému	45
Obrázek 44: Graf výkonu palivového článku v průběhu testu	46
Obrázek 45: Detail navrhovaných drážek ve spodní části odlučovacího válce.....	48
Obrázek 46: Porovnání trajektorie proudění vzduchu odváděčem bez/s drážkami.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: AHP analýza – kritérium Komplexnost	24
Tabulka 2: AHP analýza – kritérium Hmotnost	25
Tabulka 3: AHP analýza – kritérium Životnost	26
Tabulka 4: AHP analýza – kritérium Spolehlivost.....	27
Tabulka 5: AHP analýza – párové porovnání kritérií.....	27
Tabulka 6: AHP analýza – celkové výsledky	27
Tabulka 7: Parametry médií v systému s palivovým článkem	28
Tabulka 8: Zástavbové parametry pro montáž	28
Tabulka 9: Parametry finálního návrhu	43

Použitá literatura

- [1] Fuel Cells. Energy.gov [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- [2] H2BASE: vodíkový generátor energie [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/produkty/h2base>
- [3] Parker Industrial Hydrogen Usage [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://corpapps.parker.com/interactive-media/parker-hannifin-world/hydrogen-applications/usage.html>
- [4] Pipeline ancillaries. Spirax Sarco [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/pipeline-ancillaries/separators?sc_lang=en-GB
- [5] WaterPro Medium Vertical Generation II [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://shop.mann-hummel.com/en/e-mobility/waterpro-medium-vertical-generation-ii.html>
- [6] What is a Steam Trap? TLV [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.tlv.com/steam-info/steam-theory/steamtrap-basics/what-is-a-steam-trap>
- [7] Purge / Drain valve Type G PC S 028 K69 V.. [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.magnet-schultz.com/en/valves-for-hydrogen-storage-and-fuel-cell-systems/purge/-/drain-ventil>
- [8] Steam traps KA 2. Mankenberg [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.mankenberg.com/en/steam-traps/ka-2>
- [9] TLV. Air & Drain Traps [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.induvalma.es/getfile.php?f=Purgadores%20aire%20INDUVALMA.pdf>
- [10] KA 2 ATEX H2 [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://techprilad.com/images/catalog/manufacturers/mankenberg/mankenberg_ka/mankenberg_tech_ka2atexh2_ua.pdf
- [11] Water discharge control system and method [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=US306629750&_cid=P11-LVX-NSW-48886-1
- [12] Co jsou zač elektromagnetické ventily? Bola [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.bola.cz/poradna/co-jsou-zac-elektromagneticke-ventily>
- [13] Separators AS 2. Mankenberg [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.mankenberg.com/en/separators/as-2>
- [14] Integrated gas-water separator for fuel cell [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN345609164&_cid=P12-LV7TWP-98432-5

- [15] Gas/liquid separator for fuel cell. Google Patents [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/JP2022013359A/en>
- [16] Steam-water separator for fuel cell [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://patent-scope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN357959298&_cid=P12-LV7TWP-98432-6
- [17] Flüssigkeitsabscheider [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://patent-scope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=DE399596205&_fid=WO2023110689
- [18] DEVINN. H2BASE [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://hyfindr.com/media/cache/sylius_shop_product_original/df95ec88c27ca5916279a9dc34eecd8f.jpg
- [19] TLV. DC7 [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www3.tlv.com/global_pdf/tac/a-dc700-hp.pdf
- [20] TLV. SS1VG [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: https://www3.tlv.com/global_pdf/tii/e-svgmd-hp.pdf
- [21] Элементы фильтрующие волокнистопористые ЭФВП [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://filterlarta.by/wp-content/uploads/2020/09/elementy-filtruyushchie-vo-loknistoporistye-efvp.pdf>
- [22] Aatral Engineering. Types of Moisture Separator [online]. Dostupné z: <https://www.aatral-engineering.com/2021/07/types-of-moisture-separator.html>
- [23] Koalescence [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: https://e-learning.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/koalescence.html
- [24] THERMOMEGATECH. Products: Temperature Control Valves (TCV). ThermOmega-Tech, Inc [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.thermomegatech.com/products/>
- [25] Přídržné elektromagnety. Goudsmit Magnetics [online]. [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.goudsmitmagnets.com/cs/solutions/magnetic-handling/grippers/electromagnets>
- [26] Fyzika v praxi [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://fyzikavpraxi.g6.cz/main.php?p=clanek&id=69>
- [27] S-Trap vs. P-Trap. InterNACHI® [online]. [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.nachi.org/gallery/general-6/s-trap-vs-p-trap>
- [28] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. Tabulky a diagramy pro termodynamiku [online]. 2020-10-01T06:48:37Z [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/157826>
- [29] HOUT, Chyva. Sestavení tabulek termodynamických a termofyzikálních vlastností vlhkého vzduchu v závislosti na teplotě a relativní vlhkosti [online]. 2020-11-27T05:35:51Z [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/158240>

- [30] Prusament ASA [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
- [31] VÍCEKRITERIÁLNÍ ROZHODOVÁNÍ [online]. [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.karlin.mff.cuni.cz/~kopa/VRfinal.pdf>
- [32] Výtok z nádob [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: https://kez.tul.cz/get-File/key:b810ffa8cad42b70c0045085231be4f1/9_cviceni_22_23.pdf
- [33] Understanding How a Hydrogen Fuel Cell Works: A Comprehensive Guide [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.lhyfe-heroes.com/about-hydrogen/understanding-how-a-hydrogen-fuel-cell-works-a-comprehensive-guide>
- [34] ING. JAN SAJDL, Ph.D. Aerodynamika. Autolexicon.net [online]. [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/aerodynamika/>

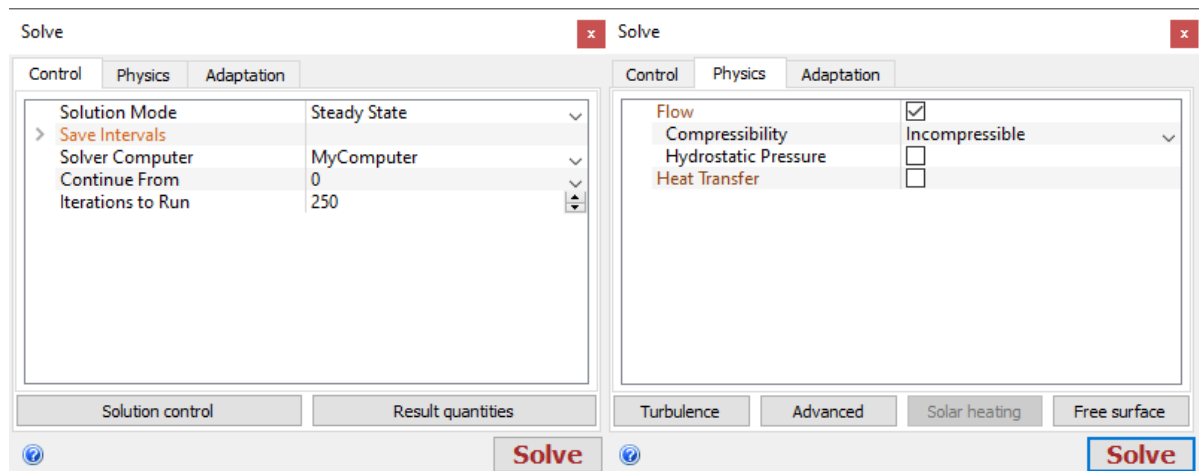
Seznam příloh

Příloha I – Nastavení simulačního řešiče v softwaru Autodesk CFD 2024

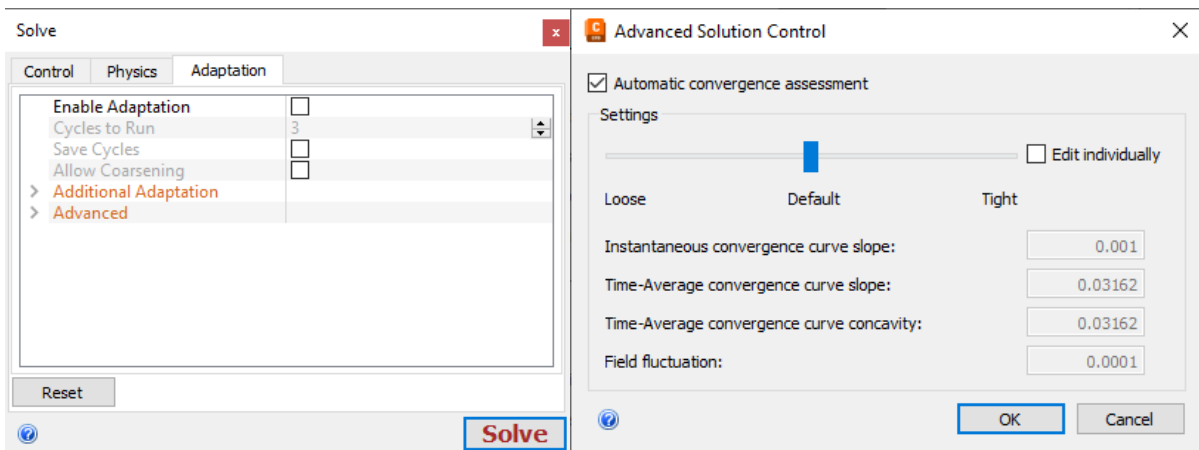
Příloha II – Výkres sestavy inovovaného zařízení pro odvod vody

Příloha III – 3D model sestavy inovovaného zařízení pro odvod vody (elektronicky)

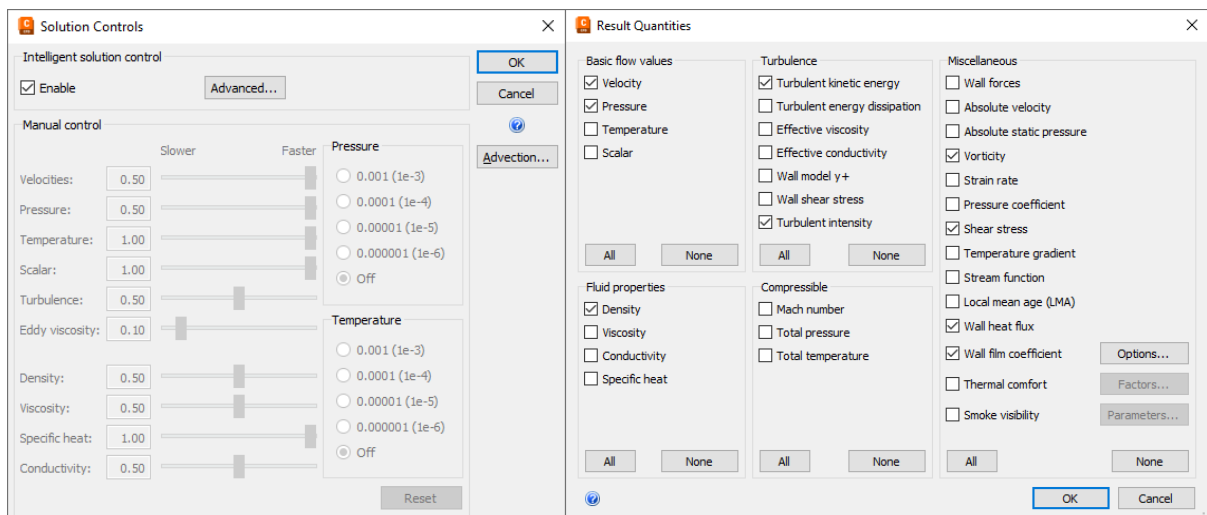
Příloha I – Nastavení simulačního řešiče



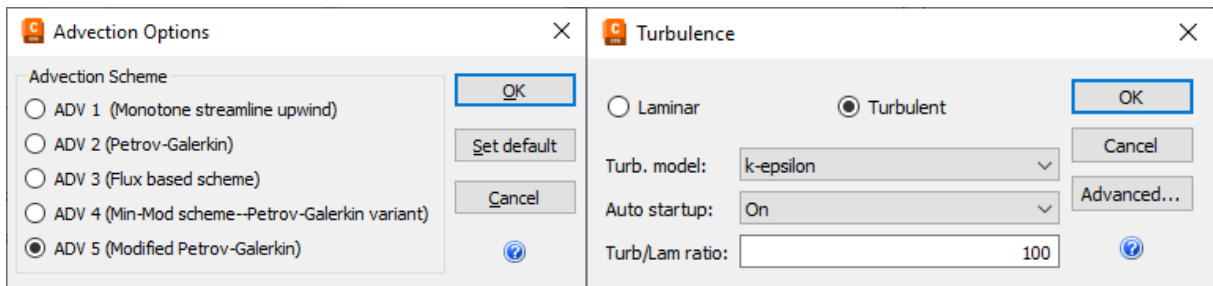
Vlevo – Nastavení počtu iterací, Vpravo – Nastavení fyzikálních vlastností



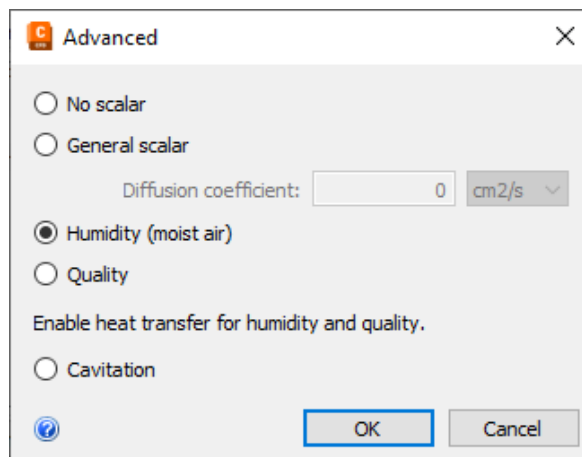
Vlevo – Nastavení adaptace výpočtu, Vpravo – Nastavení automatického řízení konvergence



Vlevo – Aktivní možnost inteligentního řízení výpočtu, Vpravo – Výběr výsledných veličin



Vlevo – Volba schématu advekce, Vpravo – Volba charakteru proudění



Pokročilé nastavení proudění