



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# REDUKCE TLAKU VODÍKU PŘED VSTŘIKOVÁNÍM DO POHONNÉ JEDNOTKY

HYDROGEN PRESSURE REDUCTION BEFORE INJECTION INTO THE POWER UNIT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Švestka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Jiří Švestka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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

## Redukce tlaku vodíku před vstřikováním do pohonné jednotky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodík, jako plyn, disponuje širokou škálou jedinečných vlastností, které z něj činí perspektivní palivo pro pohony automobilů. Jedním z hlavních překážek je jeho nízký objemový energetický obsah, což klade důraz na potřebu uskladňování a distribuce tohoto plynu pod vysokým tlakem, a to konkrétně při hodnotách 20, 35 a 70 MPa. Vzhledem k plynulým změnám spotřeby a rovněž vlivu teploty, je zásadní zajistit udržení vhodného a konstantního tlaku jako vstup pro efektivní fungování vodíkového pohonu.

### Cíle bakalářské práce:

Zpracujte přehled chování vodíku při snižování tlaku.  
Rozpracujte rešerši fungování a konstrukční řešení redukčních ventilů.  
Navrhněte ideový konstrukční návrh vhodného redukčního ventilu, vhodného pro kusovou výrobu.  
Zdůvodnění použitých materiálů a technologie výroby redukčního ventilu z pohledu vodíku.  
Příklad zástavby ventilu do vodíkového hospodářství pohonné jednotky.

### Seznam doporučené literatury:

KOTCHOURKO, Alexei a JORDAN, Thomas. Hydrogen Safety for Energy Applications Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards. 1. Cambridge: Elsevier, 2022. ISBN 978-012-820492-4.

SANKIR, Mehmet a SANKIR, Nurdan. Hydrogen Electrical Vehicles. 1. Hoboken: Wiley, 2023. ISBN 978-1-394-16638-1.

KLELL, Manfred; EICHLSEDER, Helmut a TRATTNER, Alexander. Hydrogen in Automotive Engineering. 1. Graz: Springer, 2023. ISBN 978-3-658-35060-4.

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

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

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

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

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na klíčovou oblast redukce tlaku vodíku a návržení vhodného regulátoru tlaku pro tento účel. Detailně zkoumá celý proces od výroby vodíku, přes jeho distribuci, až po rozmanité možnosti využití. Specifický důraz je kladen na charakteristické vlastnosti vodíku, které jsou zásadní pro efektivní a bezpečný design redukčního ventilu. V práci je představen návrh vysokotlakého regulátoru tlaku, který je optimalizován pro kusovou výrobu, společně s analýzou dynamiky vodíku při jeho průchodu tímto ventilem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vodík, vodíkový pohon, redukční ventil, regulace tlaku

## ABSTRACT

This bachelor thesis's central argument revolves around the depressurisation of hydrogen and the pressure regulator required to do so. It explores the journey of hydrogen from its production through distribution to the ways of multiple applications. Specific emphasis is placed on the characteristic properties of hydrogen that need to be taken into account during the design of the reduction valve itself. In this thesis, the design of a high-pressure pressure regulator optimized for piece production is presented, together with an analysis of the dynamics of hydrogen as it passes through the valve.

## KEYWORDS

Hydrogen, hydrogen propulsion, pressure reducing valve, pressure regulation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠVESTKA, Jiří. *Redukce tlaku vodíku před vstříkáním do pohonné jednotky*. Online, bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Josef Štětina. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157352>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20. května 2024

.....

Jiří Švestka

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. a Ing. Matěji Pouličkovi za jejich pomoc, rady a ochotu při vypracovávání této bakalářské práce.



# OBSAH

Úvod .....	10
<b>1 Výroba vodíku.....</b>	<b>11</b>
1.1 Reforming zemního plynu .....	11
1.2 Parciální oxidace ropných produktů .....	11
1.3 Samotepelný reforming.....	12
1.4 Zplyňování .....	12
1.5 Elektrolýza .....	12
1.5.1 Alkalická elektrolýza .....	13
1.5.2 Polymerní membránová elektrolýza .....	13
1.5.3 Parní elektrolýza .....	14
1.6 Pomocí termochemických cyklů.....	14
<b>2 Využití vodíku .....</b>	<b>16</b>
2.1 Palivové články .....	16
2.1.1 Druhy palivových článků.....	16
2.2 Spalování vodíku .....	17
2.2.1 Spalování ve spalovacích motorech .....	18
2.2.2 Spalování ve stacionárních turbínách .....	20
2.2.3 Spalování v leteckých motorech.....	20
2.3 Shrnutí využití vodíku .....	20
<b>3 Vlastnosti vodíku .....</b>	<b>21</b>
3.1 Vodíková křehkost .....	21
3.2 Joule-Thomsonův efekt.....	22
<b>4 Cesta vodíku z nádrže do hnacího ústrojí .....</b>	<b>23</b>
4.1 Tlakové nádrže.....	23
4.2 Palivové vedení vedoucí vodík .....	24
4.3 Těsnění .....	24
4.4 Vysokotlaké ventily .....	25
4.5 Vysokotlaký regulátor tlaku.....	26
4.6 Kontrola použitých komponentů .....	27
<b>5 Návrh vysokotlakého regulátoru tlaku.....</b>	<b>29</b>
5.1 Výběr vhodných materiálů.....	29
5.2 Výpočet pružin.....	30
5.3 Výběr vhodných tolerancí a drsností povrchu .....	34
5.4 Kontrola statického zatížení.....	35
5.5 Simulace chování ventilu pomocí programu GT suite .....	37
<b>Závěr .....</b>	<b>39</b>
<b>Použité informační zdroje.....</b>	<b>40</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů.....</b>	<b>43</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>44</b>

## ÚVOD

Zhoršující se geopolitická situace a snaha o snížení emisí z důvodů globálního oteplování jsou hlavní důvody k hledání alternativních paliv a celkové transformaci energetiky. Země EU se zavázaly k uhlíkové neutralitě do roku 2050, avšak ani ostatní státy nezůstávají pozadu, většina dnešních států má strategie k výraznému snížení emisí do druhé poloviny 21. století. Jedním z možných řešení budoucího energetického mixu je větší využití vodíku v různých aplikacích, ať už se jedná o použití v osobní nebo nákladní dopravě, k výrobě elektřiny, případně k uložení energie získané z obnovitelných zdrojů.

Vodíková ekonomika je součástí plánu Evropské unie na snížení emisí do roku 2050 zvaného Zelený úděl. Výroba energie se podílí na emisích skleníkových plynů z více než 75 %. Kromě většího využití vodíku je také počítáno s větším využitím větrných elektráren v mořích, renovací starých budov, zesílení přenosových soustav a snížení emisí metanu. Mezi cíle Evropské unie na cestě k vodíkové ekonomice patří vybudování infrastruktury, příprava potřebné legislativy, využití vodíku v odvětvích, kde lze snížit emise, jedná se například o výrobu oceli nebo chemický průmysl, dále zajistit dostatečnou výrobu vodíku pomocí obnovitelných zdrojů.

Přestože se jedná o perspektivní palivo, existuje mnoho výzev a překážek, které je nezbytné překonat, než se vodík dostane do širokého spektra využití. Proto je těmto problémům třeba věnovat velkou pozornost a vědecký výzkum. Dříve na vodík jako alternativní palivo nebyla zaměřena vědecká pozornost vzhledem k nízké ceně fosilních paliv. Jedním z problémů vyžadujících výzkum je potřeba skladování při vysokém tlaku a následná dekomprese, čímž se zabývá tato závěrečná práce.

# 1 VÝROBA VODÍKU

Vodík je prvek, kterého je ve vesmíru nejvíce, avšak na Zemi se nachází pouze minimální množství vodíku ve formě H<sub>2</sub>. Většina vodíku je uložena ve formě různých organických a anorganických chemických sloučenin. Z tohoto důvodu je potřeba vodík extrahovat do čisté formy, aby bylo možné jeho použití k výrobě energie. Největší množství vodíku je dostupné ve vodě [1], jedná se o extrémně stabilní sloučeninu a její disociace vyžaduje velké množství energie. Dalším způsobem, jak lze vodík získat je jeho extrakce z uhlovodíků.

Většina vodíku, který se dnes vyrábí, je získáván z metanu a zemního plynu. Výsledkem je vodík, který je smíchán s CO nebo CO<sub>2</sub>. Takto vyrobený vodík je vhodný pro většinu průmyslových aplikací, jeho cena závisí na množství nečistot v něm obsaženém. Ve větším využití elektrolýzy momentálně překáží vysoká cena elektřiny [5], která by pro co nejmenší uhlíkovou stopu měla pocházet z obnovitelných zdrojů.

## 1.1 REFORMING ZEMNÍHO PLYNU

V současnosti se jedná o nejpoužívanější metodu výroby vodíku. Ačkoli tato metoda produkuje významné emise CO<sub>2</sub>, existuje možnost zachytávat tyto emise, stlačit je za vysokého tlaku a skladovat je (CCS z ang. capture, concentration, storage), dalším řešením, jak snížit emise je získávat metan z fermentace biomasy, pokud by byla zároveň využita metoda CCS jedná se dokonce o uhlíkově negativní proces. Proces probíhá v zařízení zvaném reaktor, kde zemní plyn reaguje s vodní párou za vysokých teplot (typicky 700–900 °C) a tlacích okolo 2–4 MPa [2] (1). K urychlení reakce se používají katalyzátory z niklu, nebo jiných drahých kovů, aby byl katalyzátor ochráněn, musí se zemní plyn odsířit. Touto reakcí vzniká oxid uhelnatý a vodík. Účinnost se pohybuje mezi 75–80 %.



Vzniklá směs CO a H<sub>2</sub> se nazývá vodní plyn, využívá se v chemickém průmyslu, především k výrobě amoniaku a methanolu [2]. Z této směsi lze získat další vodík za pomoci vodní páry a katalyzátoru (2). Oxid uhličitý se od vzniklého vodíku odstraní pomocí absorpce tlakovým výkyvem, nebo membránovou separací, která je zároveň čistí od dalších nežádoucích složek.



## 1.2 PARCIÁLNÍ OXIDACE ROPNÝCH PRODUKTŮ

Proces spočívá v oxidaci uhlovodíků až do jejich rozdělení na oxid uhelnatý a vodík, jako palivo mohou sloužit zemní plyn, nafta, nebo těžké topné oleje. Probíhá za vysokých teplot (až 1250 °C), s použitím katalyzátoru lze potřebnou teplotu snížit na 850 °C [3]. Produkuje se syntézní plyn bohatý na oxid uhelnatý a vodík (3), ale poměr vodíku ku oxidu uhelnatému je menší než u reformingu zemního plynu, většina tohoto produktu se zužitkuje v chemickém průmyslu. Na území ČR se jedná dokonce o nejpoužívanější způsob výroby vodíku. Účinnost je okolo 70 % [4].



### 1.3 SAMOTEPELNÝ REFORMING

Tato kombinace parního reformingu a parciální oxidace umožňuje použití jakéhokoliv uhlovodíkového paliva. Oba procesy se kombinují takovým způsobem, že výhody parního reformingu (více získaného vodíku) a výhody parciální oxidace (zisk tepelné energie) se spojí tím nejlepším možným způsobem. Přívod vodní páry a vzduchu je navržen tak, aby exotermická reakce parciální oxidace pokryla co nejvíce z energetických nároků parního reformingu, který naopak energii spotřebovává [2]. V procesu se využívá katalyzátorů, na které jsou kladeny vysoké nároky, musí být vhodné k parnímu reformingu i parciální oxidaci. Proces probíhá při 850 °C dle rovnice (3), zároveň vysoká teplota v průběhu procesu způsobuje zvýšené emise oxidů dusíku, které je třeba nákladně čistit.



### 1.4 ZPLYŇOVÁNÍ

Termochemické zplyňování je reakce paliva obsahujícího uhlík se zplyňovacím činidlem, které obsahuje kyslík (vodní pára, vzduch, kyslík) při vysokých teplotách. V závislosti na procesu se používají plyny s obsahem vodíku až 50 %. K zplyňování uhlí dochází průmyslově, využití biomasy a dalších zbytných produktů probíhá v experimentální fázi. Účinnost se pohybuje okolo 50 %. Lze zpracovávat široké spektrum surovin, zplyňování tuhých paliv probíhá při teplotách 800 až 2000 °C za tlaků dosahujících až 4 MPa [2]. Celý proces lze rozdělit na čtyři dílčí procesy:

Sušení – voda obsažená v palivu je odstraněna za teploty přibližně 200 °C. Z chemického hlediska se materiál nijak nemění, ale například vysoký obsah vlhkosti v biomase lze využít k výrobě bioplynu pomocí anaerobní metanové fermentace. Tento plyn obsahuje 60–70 % metanu a může být využit ve spalovacích motorech, nebo k použití v palivových článcích [2].

Pyrolýza – palivo se tepelně rozkládá na uhlík a vodík za teplot 200 až 500 °C bez přístupu vzduchu [2]. Komponenty s nízkou teplotou varu se odpaří, od 280 °C dochází ke vzniku nežádoucích uhlovodíků s dlouhým řetězcem, konkrétně olejů, dehtů a koksu, k tomuto dochází častěji se zvyšující se teplotou.

Oxidace – surovina je spalována s oxidačním činidlem v exotermické reakci, která probíhá za 500 až 2000 °C [2]. Vzniklé teplo pokrývá nároky, které vznikají během dílčích operací zplyňování. Dochází k tvorbě CO, CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O.

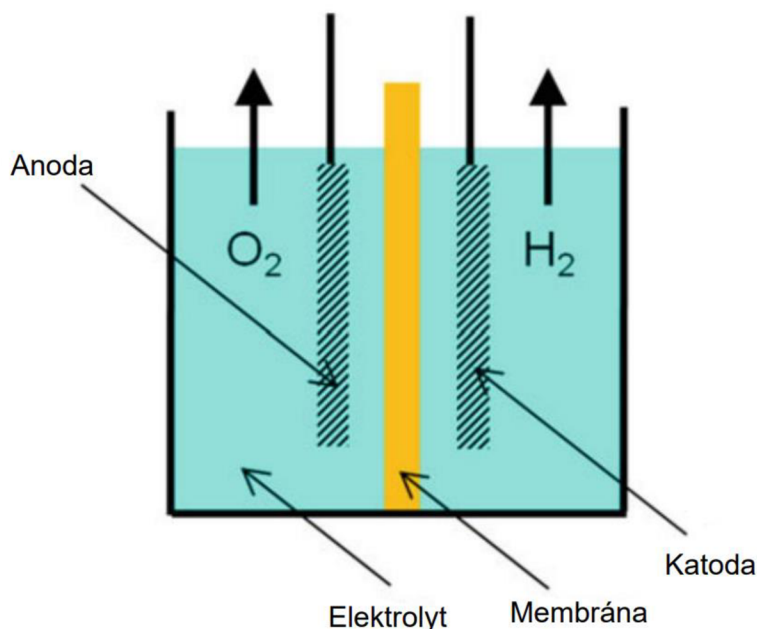
Zplyňování – dochází k reakci produktů z oxidační zóny a uhlíku při teplotách 500 až 1000 °C [2]. Pomocí různých chemických reakcí je dosaženo vzniku oxidu uhličitého, metanu a vodíku.

### 1.5 ELEKTROLÝZA

Základním principem elektrolýzy je štěpení vody na vodík a kyslík. Typické uspořádání se skládá z anody a katody, které jsou odděleny elektrolytem a membránou, dále se zde nachází separátor, nebo membrána pro oddělení vznikajících plynů. Výroba vodíku pomocí elektrolýzy je jeden z možných způsobů ukládání přebytků energie z obnovitelných zdrojů. Na výrobu jednoho kilogramu vodíku je potřeba 55 kWh elektrické energie a 9 litrů vysoce čisté vody [4].

### 1.5.1 ALKALICKÁ ELEKTROLÝZA

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších možností elektrolýzy, má dlouhou historii používání v chemickém průmyslu, zejména k výrobě chloru [5]. Výroba vodíku pomocí alkalické elektrolýzy je velmi pokročilá, a to i z důvodů jednoduchosti metody.



Obr. 1: Schéma jednoduchého alkalického elektrolyzérů [1]

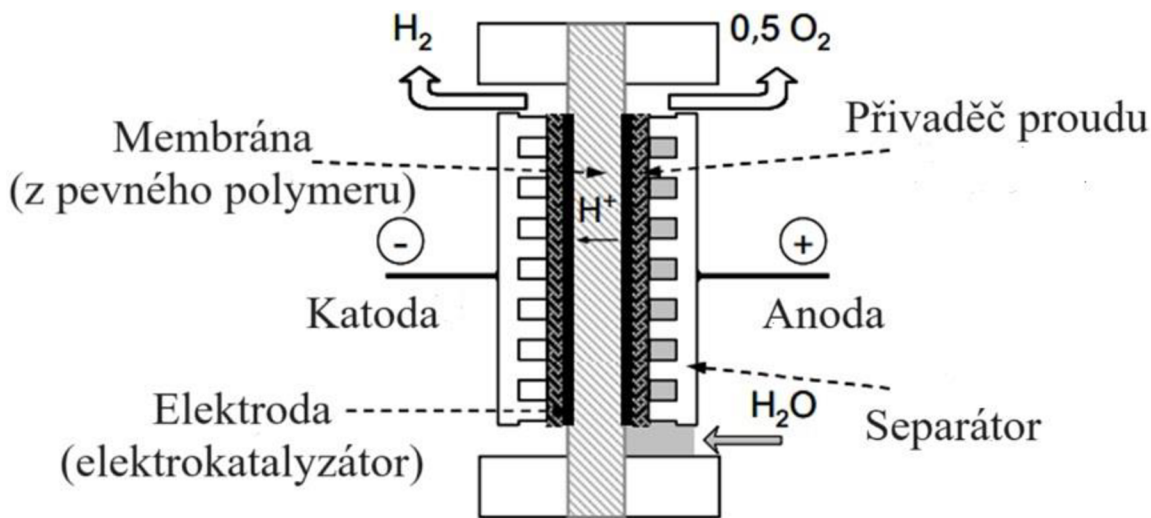
Jako elektrolyt se obvykle využívá alkalické řešení hydroxidu draselného, nebo hydroxidu sodného, přičemž hydroxid draselný je používanější řešení, jeho obsah ve vodě je mezi 25 až 30 %. Kyslík se vytváří pomocí chemické reakce na anodě, vodík na katodě, vzhledem k alkalickému prostředí není nutné používat drahé materiály, elektrody se obvykle skládají z železa potaženého niklem, případně jsou celé z materiálů na bázi niklu [1]. Vyznačují se pórovitou strukturou, aby bylo dosaženo co největší plochy. Jako membrána se dříve používal azbest, z důvodů vysoké toxicity je nahrazován polymerními kompozitními materiály. Operační teplota se pohybuje mezi 60 až 80 °C [5], účinnost průmyslové elektrolýzy dosahuje 69 %.

Další výzkum se bude zaměřovat zejména na nové struktury elektrolýzových článků a vylepšených materiálů elektrod. Uvnitř elektrolyzérů pak na snížení vzdálenosti mezi elektrodou a membránou, tato velká mezera vede k odporovým ztrátám, což snižuje účinnost. Další možností na zvýšení účinnosti je zvýšení teploty, avšak alkalický roztok je při vyšší teplotě korozivnější, je kladen tedy větší důraz na používané materiály [1]. Jedno z dalších vylepšení je výroba za zvýšeného tlaku, která snižuje velikost plyných bublin v elektrolytu.

### 1.5.2 POLYMERŇÍ MEMBRÁNOVÁ ELEKTROLÝZA

Dokonalejší metodou oproti alkalické elektrolýze je polymerní membránová elektrolýza. Jako elektrolyt zde slouží polymerní elektrolytová membrána (zkráceně PEM). Protony jsou vedeny skrz PEM, po přivedení vnějšího elektrického napětí se uskutečňují příslušné chemické reakce. Voda na anodě oxiduje za vzniku plyného kyslíku, protonů a elektronů,

vzniklé protony jsou vedeny přes PEM a poté jsou redukovány na katodě, kde reagují s elektrony za vzniku plynného vodíku [1].



Obr. 2: Funkční princip PEM článku [6]

Jednotlivé články se skládají ze samotné membrány, vrstvy katalyzátoru, přivaděče proudu a separátorů, které oddělují jednotlivé články. Jako membrány se většinou používají kationtové výměnné polymery na bázi fluoru. Uplatňuje se zde určitá minimální tloušťka membrány z důvodů jejího bobtnání za provozu a smršťování při vypnutém zařízení, toto cyklické namáhání má za následek významné mechanické namáhání. Anoda je obvykle potažena vrstvou iridia, která slouží jako elektrokatalyzátor, katoda bývá potažena platinou, tyto materiály jsou vybírány pro svoji odolnost vůči korozi v kyselině [1]. Vrstva elektrokatalyzátoru na elektrodách se vyrábí elektrolytickým nanášením nebo stříkáním s lisováním za tepla.

Hlavní výhody oproti alkalické elektrolyze jsou delší životnost, nižší náklady z důvodů menších odporů a vyšší účinnost. Hlavní nevýhodou je potřeba drahých kovů do katalyzátorů na jednotlivých elektrodách, což prodražuje výrobu jednotlivých článků. Provozní teplota se pohybuje mezi 50 až 80 °C [5].

### 1.5.3 PARNÍ ELEKTROLÝZA

Další z možných variant je vysokoteplotní elektrolyza vodní páry, která probíhá mezi teplotami 700 až 1000 °C. K výrobě vodíku je používáno menší množství elektrické energie, tato energie však musí být kompenzována zvýšeným přívodem tepelné energie [5]. Jako důsledek vyšší teploty je přepětí na elektrodách mnohem menší než u předchozích případů, z tohoto důvodů není potřeba používat drahé kovy jako katalyzátory na elektrodách, na druhou stranu přináší zvýšená teplota problémy s trvanlivostí systému. V porovnání s ostatními typy elektrolyzy je vyspělost parní elektrolyzy velmi nízká, provádí se výzkum zejména v oblasti vhodných materiálů pro elektrody a elektrolyt.

## 1.6 POMOCÍ TERMOCHEMICKÝCH CYKLŮ

Termochemické mohou složit k výrobě vodíku z tepla, které je produkované v jaderných elektrárnách, nebo pomocí koncentrované sluneční energie. Bylo popsáno více než 100 cyklů

s operačními teplotami mezi 600 až 2500 °C, kdy dochází k disociaci vody [8]. Obecně platí, že s nižší teplotou mají cykly nižší účinnost a vyšší počet chemických mezistupňů.

Jedním z nejpokročilejších cyklů je cyklus síra-jód (S-I), který se skládá ze tří kroků. V prvním kroku vzniká sloučenina HI (5), která se následně oddělí destilací, koncentrovaná H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> může reagovat s HI za vzniku H<sub>2</sub>, I<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O (zpětná reakce). V druhém kroku musí být voda, SO<sub>2</sub> a zbylá kyselina sírová oddělena od kyslíku, nejčastěji kondenzací (6). Jód a veškerá doprovodná voda nebo oxid siřičitý se oddělí pomocí kondenzace v posledním kroku cyklu za vzniku vodíku jako hlavního produktu této reakce (7) [7].



S-I cyklus má řadu klíčových výhod oproti jiným termochemickým cyklům, například všechny pracovní látky existují v plynné nebo kapalné podobě, neprovádí se tedy žádná manipulace s pevnými látkami a proces je vhodný pro nepřetržitý provoz, další výhodou je schopnost vyrábět vodík při vyšším tlaku (až 5 MPa) [7], čímž se snižují náklady na stlačení pro další použití.

## 2 VYUŽITÍ VODÍKU

Pouze malé množství z celosvětové spotřeby vodíku se využije v dopravě. Naprostá většina vodíku se spotřebuje v chemickém průmyslu. Přibližně polovina veškerého vodíku se využije v Haber-Boschově procesu, který se používá pro výrobu amoniaku. Amoniak samotný slouží k výrobě dusíkatých hnojiv, po kterých se očekává zvýšená poptávka s rostoucí světovou populací. Dále se vodík používá v rafinačních procesech k odsíření konečných produktů, výrobě metanolu a v dalších odvětvích jako jsou například: potravinářský průmysl, výroba polovodičů, úprava vody a svařování.

Kromě standardního využití v chemickém průmyslu lze vodík využívat jako nositel energie. Pro dodávky tepla lze vodík spalovat při relativně vysoké teplotě, dále lze využívat vodík k přímé výrobě elektrické energie v palivových článcích. Obě možnosti spojuje vysoká účinnost a nulové emise CO<sub>2</sub> v místě použití.

### 2.1 PALIVOVÉ ČLÁNKY

Palivové články slouží k přeměně chemické energie na energii elektrickou. Narozdíl od spalování dochází k reakci na dvou různých místech [5]. Vodík oxiduje na anodě a dochází k redukci kyslíku na katodě. Tyto reakce musí být od sebe odděleny pomocí elektrolytu, který zajišťuje proudění iontů, ale zabraňuje proudění elektronů. Palivové články se od baterií liší tím, že oddělují funkci přeměny energie a její uchovávání. Reaktanty (v tomto případě kyslík) jsou přiváděny zvenčí, jedná se tedy o otevřený termodynamický systém. Jednotlivé palivové články mají poměrně malý výkon, avšak je možnost vytvářet modulární systémy.

#### 2.1.1 DRUHY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

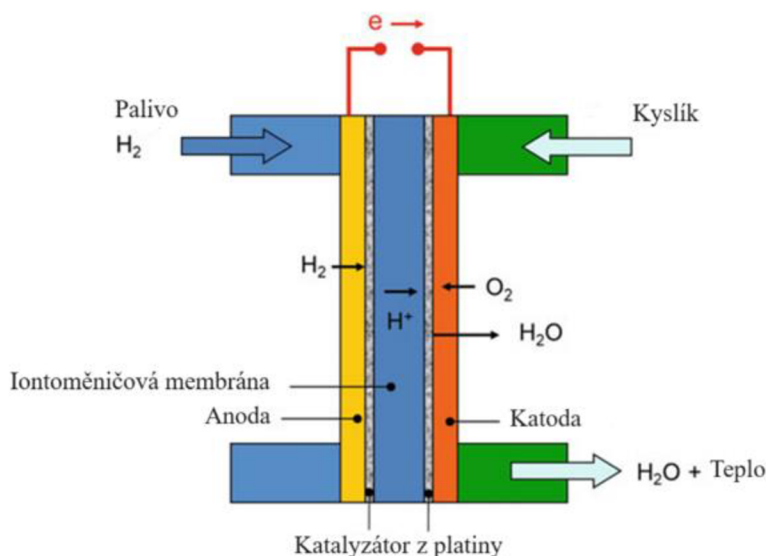
##### AFC (ALKALICKÉ PALIVOVÉ ČLÁNKY)

Řadí se mezi nízkoteplotní palivové články s provozní teplotou menší než 100 °C. První využití bylo při vesmírné misi Apollo a v raketoplánech. Jako elektrolyt se většinou využívá vodný roztok hydroxidu draselného. V takzvané mobilní variantě palivového článku může elektrolyt kolovat, čímž se odvádí odpadní teplo z chemické reakce. Při statickém použití je elektrolyt absorbován v materiálu mezi elektrodami. Z důvodů toxicity je potřeba zamezit jakémukoliv úniku elektrolytu. Používá se pro výkony od 10 až 100 kW, hlavní výhodou systému je jeho jednoduchost [2]. Hlavní nevýhodou je použití hydroxidu draselného jako elektrolytu, což vede ke zkrácení životnosti elektrod z důvodů koroze a citlivost systému na přítomnost CO<sub>2</sub> ve vzduchu. Typický provozní tlak se pohybuje mezi 100 až 300 kPa [13].

##### PEMFC

Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou vynikají nízkou vahou a malým objemem vůči ostatním druhů palivových článků. Jako elektrolyt používají pevný polymer a uhlíkové elektrody s katalyzátorem z platiny nebo platinové slitiny [2]. Ke svému provozu potřebují pouze vodík a kyslík obsažený ve vzduchu. Jejich účinnost se snižuje s obsahem oxidu uhelnatého ve vzduchu. Kvůli použití drahých kovů jsou relativně drahé. Využívají se nejčastěji v dopravě, ať už se jedná o osobní automobily, autobusy, či nákladní dopravu. Provozní tlak se pohybuje mezi 300 až 400 kPa [14].





Obr. 3: Princip palivového článku s polymerním elektrolytem [2]

### PAFC

Jako elektrolyt je používána kyselina fosforečná, která je obsažena v teflonové matrici z karbidu křemíku. Elektrody obsahují katalyzátory z platiny, které je potřeba více než u ostatních typů [2]. Nejsou příliš náchylné na nečistoty v palivu. Kvůli velkému množství drahých kovů jsou palivové články drahé, účinnost je relativně nízká oproti jiným typům, dosahuje přibližně 40 %. Rozmezí provozního tlaku se pohybuje mezi 100 až 500 kPa [38].

### MCFC

Tento druh palivového článku se řadí mezi vysokoteplotní palivové články, jeho pracovní teplota se pohybuje okolo 650 °C [2], provozní tlak se pohybuje v relativně širokém rozmezí 100 až 800 kPa. Nachází využití v elektrárnách, průmyslu a vojenských aplikacích. Jako palivo není potřeba používat čistý vodík, kvůli vysoké operační teplotě se metan a další lehké uhlovodíky přeměňují na vodík přímo v palivovém článku. Vzhledem k vysokým teplotám také není potřeba použití drahých kovů na elektrodách. Hlavní nevýhodou je nízká životnost a to přibližně 5 let.

### SOFC

Jedná se o vysokoteplotní palivový článek s provozní teplotou 750–1000 °C [2], standardní provozní tlak se pohybuje mezi 100 až 800 kPa. Jako elektrolyt se využívá tvrdá neporézní keramická směs. Stejně jako u typu MCFC není z důvodů vysoké teploty potřeba použití drahých kovů na elektrodách. Tento typ palivového článku snáší i větší množství síry v palivu, to dovoluje využívat jako palivo zemní plyn, bioplyn a plyny vyrobené z uhlí. Hlavní nevýhodou je potřeba ohřevu palivového článku před dosažením provozní teploty.

## 2.2 SPALOVÁNÍ VODÍKU

Stejně jako ostatní paliva a hořlavé plyny může být vodík používán v kombinaci s kyslíkem ke spalování. Hlavním produktem této chemické reakce je voda. Pro speciální případy, jako jsou například raketové motory lze přidat i chlor a fluorid ke zvýšení teploty spalování. Zpravidla se této metody příliš nepoužívá z důvodů vysokých nákladů, vysoké reaktivity a vzniku nebezpečných toxických produktů. Vodík může být spalován k topení, pohonu

různých druhů vozidel nebo v plynových turbínách k výrobě elektřiny. Ačkoliv teoretické spalování vytváří pouze vodu, při spalování se vzduchem mohou vznikat nebezpečné oxidy dusíku, nicméně existují strategie, jak lze snížit obsah NO<sub>x</sub> pod úroveň běžných paliv [5]. Jednou z možností je spalovat velmi chudou směs v poměru se vzduchem, což snižuje teplotu hoření. Další možností je recirkulace výfukových plynů nebo katalytických hořáků. Hlavní rozdíl oproti jiným palivům je ve vysoké difuzivitě, nízké energii vznícení. Kvůli jeho vlastnostem je vodík velmi stabilní a účinné palivo. Jeho hlavní nevýhodou je velmi nízká hustota, která snižuje objemovou účinnost.

### 2.2.1 SPALOVÁNÍ VE SPALOVACÍCH MOTORECH

Princip motoru spalujícího vodík je založen na konvenčním spalovacím motoru, který může být upraven pro spalování samotného vodíku, nebo na vodík bohatého plynu. Hlavní změny se odehrají při přípravě směsi a samotném spalovacím procesu. Dále je nutno zajistit, že veškeré materiály používané v systému a přicházející ke kontaktu s vodíkem jsou pro tuto aplikaci vhodné [2]. Ačkoli se většina výzkumu zabývá možnostmi pohonu pomocí výroby elektřiny z palivových článků, spalovací motor na vodík lze považovat za možnou alternativu, a to především z důvodů vyspělosti spalovacího motoru, který je vyvíjen již více než 100 let.

Vodík se významně liší od ostatních konvenčních paliv používaných v dnešní době. Vlastnosti vodíku v porovnání s běžně používanými palivy jsou uvedeny v tabulce 1. K zapálení směsi vodíku se vzduchem je potřeba méně než desetina energie než u ostatních paliv, zároveň rychlost hoření je výrazně vyšší, a to i u velmi chudých směsí [9]. Motor je zatížen rychlou změnou tlaku, což vede k většímu hluku při spalování. Absence uhlíku umožňuje, alespoň teoreticky, spalování bez vzniku CO<sub>2</sub>, v realitě existují stopy znečišťujících látek z důvodu přítomnosti mazacího oleje ve spalovací komoře. Jediné relevantní emise při spalování vodíku jsou oxidy dusíku, kterým je potřeba věnovat zvláštní pozornost.

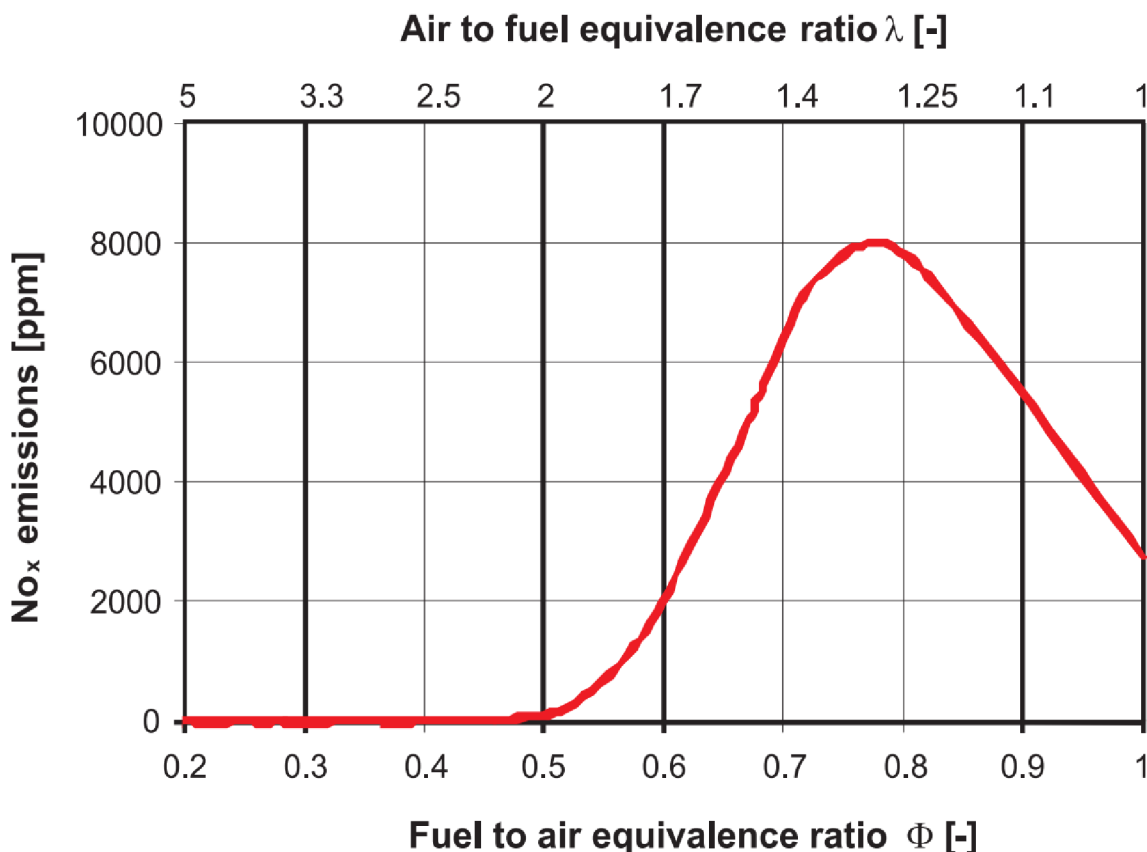
Tabulka 1: Vlastnosti vodíku v porovnání s konvenčními palivy [2]

Veličina	Benzín	Nafta	Metan	Vodík	Jednotky
Hustota (v kapalném stavu)	750 ÷ 770	820 ÷ 840	423	70,8	kg/m <sup>3</sup>
Teplota při atmosférickém tlaku	15	15	-162	-253	°C
Hustota (v plynném stavu) *	-	-	0,716	0,090	kg/m <sup>3</sup>
Molární hmotnost	≈ 98	≈ 190	16,043	2,016	kg/kmol
Bod varu**	30 ÷ 190	210 ÷ 355	-161,5	-252,8	°C
Teplota samovznícení**	230 ÷ 450	250	595	585	°C
Poměr míchání se vzduchem	14	14,7	17,2	34,3	kg <sub>vzduchu</sub> / kg <sub>paliva</sub>
Minimální energie potřebná k zapálení	0,24	0,24	0,29	0,017	mJ

\* Při teplotě 0 °C a atmosférickém tlaku

\*\* Při atmosférickém tlaku

Přípravu směsi lze rozdělit do dvou skupin. V první metodě se vodík smíchá se vzduchem ještě před spalovací komorou. V druhém případě je vodík vstřikován přímo do spalovací komory během cyklu, palivo lze dodávat i vícekrát za jeden cyklus. Při stechiometrickém spalování jsou emise oxidu dusíku vysoké, proto je nutné spalovat chudší směsi se součinitelem přebytku vzduchu  $\lambda$  větším než 2,2 [2], při spalování takto chudé směsi nevznikají téměř žádné oxidy dusíku. Součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  popisuje množství skutečně přivedeného vzduchu k teoretickému množství potřebnému pro ideální shoření směsi. Jeho převrácenou hodnotou je  $\Phi$ , jedná se tedy o součinitel přebytku paliva vůči vzduchu.



Obr. 4: Závislost obsahu  $\text{NO}_x$  na ideálním poměru vzduchu s palivem [10]  
(Překlad: Fuel to air equivalence ratio  $\Phi$  – ekvivalenční poměr paliva vůči vzduchu  $\Phi$ , Air to fuel equivalence ratio  $\lambda$  – ekvivalenční poměr vzduchu vůči palivu  $\lambda$ )

### SPALOVÁNÍ S EXTERNÍ TVORBOU SMĚSI

Hlavní výhodou externí tvorby směsi je její jednoduchost a nízké tlaky v systému. Vstřikování se provádí v sacích otvorech, pokusy o centrální míchání směsi se ve spojení s vodíkem neosvědčily. V závislosti na trvání vstřiku může být vodík vstřikován po celou dobu pracovního cyklu, nebo sekvenčně, které probíhá jednotlivě pro každý válec, ideálně zároveň se sacím zdvihem [5].

### TVORBA VNITŘNÍ SMĚSI NEBO PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ VODÍKU

Při tvorbě vnitřní směsi se palivo vstřikuje přímo do příslušného válce, během jednoho cyklu může proběhnout jeden i více vstřiků. Pokud je palivo vstříknuto do válce až po uzavření

sacího ventilu lze vyloučit zpětný zážeh. Předčasné zapálení směsi se může objevit z důvodů nehomogenity směsi, ale lze tomuto jevu předejít pomocí pozdního vstřiku paliva.

Systémy s časnou tvorbou směsi pracují s vodíkem o tlaku 1 až 4 MPa. V případě pozdního vstřikování paliva je potřeba tlak minimálně 5 MPa v závislosti na kompresním poměru. Pokud je vstřikování prováděno až během spalování tlak se zvyšuje na 10 až 30 MPa [2]. Kvůli větším tlakům se zvyšuje objemová účinnost, ale je limitována maximálním použitelným tlakem u vstřikovačů paliva.

### 2.2.2 SPALOVÁNÍ VE STACIONÁRNÍCH TURBÍNÁCH

Vodík se jeví i jako perspektivní palivo ke snížení emisí v oblasti energetiky, lze ho spalovat ve spalovacích turbínách samostatně, nebo vytvářet směs se zemním plynem. Při používání je důležité myslet na rozdílné vlastnosti obou plynů, kvůli menší hustotě vodíku je potřeba vyšší objemový průtok paliva. Zároveň kvůli rozdílné hustotě není průběh snižování emisí lineární. Změny v konstrukci turbíny je nutno posuzovat z hlediska množství spalovaného vodíku, většina je schopna spalovat vodík až do 30 % objemu směsi [11]. Nad 50 % objemu jsou potřeba větší změny spalovacího prostoru, zároveň je třeba použít materiály kompatibilní s vodíkem a zajistit dostatečnou těsnost celého systému.

### 2.2.3 SPALOVÁNÍ V LETECKÝCH MOTORECH

Z důvodů snížení emisí  $\text{CO}_2$  i v leteckém průmyslu dochází k návrhu úplně nových turbín přizpůsobených spalování vodíku. Tento pokrok je veden firmami jako jsou například Siemens, Rolls Royce nebo Kawasaki. Změny většiny komponentů jsou minimální, největší rozdíl je ve spalovacím prostoru [5]. Poměr vzduchu paliva vůči přivedenému vzduchu je více než dvojnásobný ve srovnání s leteckým benzínem, zároveň vodík hoří rychleji, proto je potřeba kratší spalovací komora.

Historicky bylo několik pokusů o využití proudových motorů na vodík v letectví. První pokusy probíhaly v 50. letech minulého století v USA a Sovětském svazu. Tehdy byl také proveden zkušební let bombardéru B-57, kdy byl motor přepnut na vodík během letu [12]. V SSSR se povedl kompletní let se startem i přistáním pomocí motoru přestavěného na tekutý vodík.

## 2.3 SHRNUÍ VYUŽITÍ VODÍKU

K využití vodíku v dopravě je potřeba značná změna tlaku, vodík je běžně skladován při tlacích 20–70 MPa, z těchto tlaků musí být tlak snížen na provozní tlak daných technologií, největší změna v tlaku nastává u palivových článků, které pracují s tlakem pod 1 MPa. U využití vodíku ve spalovacích motorech není potřeba tak zásadní změna tlaku. Ideální tlak při přímém vstřikování je co nejvyšší, v realitě je naráženo na limity vstřikovačů, tlak může dosahovat až 30 MPa.

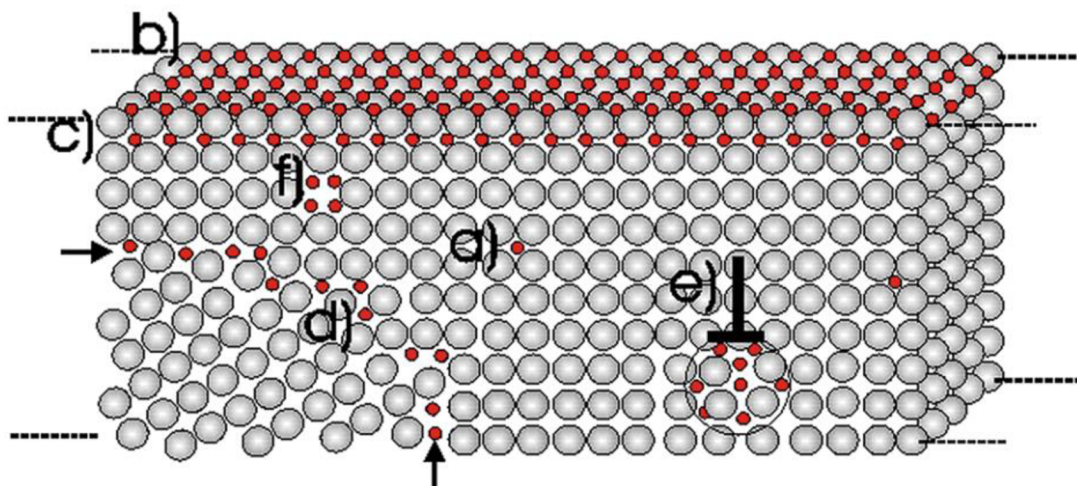
### 3 VLASTNOSTI VODÍKU

Naprostá většina hmoty ve vesmíru je tvořena vodíkem, teorie velkého třesku předpokládá, že vznikl před 13,5 miliardami let jadernou fúzí společně s héliem a lithiem, z těchto atomů vznikly postupně všechny ostatní prvky. Ve vesmíru se vodík vyskytuje v atomární formě především nízké teplotě a nízkým tlakům. Mezihvězdný plyn se skládá téměř výhradně z vodíku, zároveň vodík tvoří hlavní složku hvězd, kde při přeměně na hélium uvolňuje teplo, které umožňuje život ve vesmíru.

#### 3.1 VODÍKOVÁ KŘEHKOST

Dochází ke snížení mechanických vlastností, zejména plasticity, dále dochází ke snížení meze pevnosti v tahu, únavové pevnosti a lomové houževnatosti. K vodíkové křehkosti dochází v mnoha materiálech včetně nízkolegovaných ocelích, superslitinách a hliníkových slitinách [16]. Nerezové oceli jsou všeobecně méně náchylné k vodíkové křehkosti. K poškození materiálů dochází při nízkém napětí a v materiálu vzniká křehký lom.

Vodíkovou křehkost lze rozdělit na dvě skupiny: vratnou a nevratnou [16]. K pronikání do materiálů dochází pomocí difuze. Vzhledem k velikosti atomu vodíku dochází k pronikání atomů přímo do krystalické mřížky. Atomy vodíku difundují nejčastěji na hranice zrn, do dislokací apod. (viz. obr. 5). Tuto změnu je možné zvrátit pomocí uzdravovacího žíhání, které probíhá za teplot okolo 200 °C [17]. Atomy, které difundují do oblastí karbidů nelze již zvrátit z důvodů velké aktivační energie. Tyto atomy vytváří lokálně ložiska  $H_2$  a vzniká v těchto bodech zvýšený tlak.



Obr. 5: Nejčastější vodíkové pasti [16]

- a. v intersticiálních místech
- b. v povrchové vrstvě materiálu
- c. v podpovrchové vrstvě
- d. na hranici zrn
- e. v dislokacích
- f. vakance

Existují dvě metody, jak zmenšit dopady vodíkové křehkosti. První metodou je úprava povrchu, typicky se využívá povlakování, které se používá proti tzv. vnější vodíkové

křehkosti. Povrchovou úpravou černěním lze snížit difuzi atomů do materiálu v porovnání s vzorky, které neprošly povrchovou úpravou. K povlakování je možné použít i Ni, Cd, Al a Al-Ni, tyto materiály také výrazně snižují náchylnost k vodíkové korozi [16]. Další možnosti, jak snížit náchylnost povrchu jsou nitridace, nebo nauhličování povrchu. Druhou metodou, jak zabránit vodíkové křehkosti v materiálu je redukce určitých prvků jako C, Si, P, S, a naopak přidání Ni, Al, či Mo.

### 3.2 JOULE-THOMSONŮV EFEKT

V případě ideálních plynů je předpokládáno, že mezi jednotlivými molekulami nejsou žádné interakční síly, a že objem molekul je zanedbatelně malý vůči objemu plynu [2]. Při zvýšeném tlaku přestávají tyto předpoklady platit a je nutno využít přístup jako k reálnému plynu, pro aproximaci se používá van der Waalsova rovnice (8) [18], nebo faktor reálného plynu. Látkově závislé konstanty  $a$  a  $b$  potřebné do rovnice lze převzít z literatury,  $a = 0,025 \text{ m}^6\text{Pa/mol}^2$ ,  $b = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$  [2].

$$p = \frac{rT}{v-b} - \frac{a}{v^2} \quad (8)$$

Joulův-Thomsonův efekt se hojně využívá při zkapalňování plynů. Samotný efekt popisuje změnu teploty při expanzi plynu, aniž by došlo ke zkapalnění, vykonané práci, nebo přenosu tepla s okolím. Závisí na interakci molekul mezi sebou, z tohoto důvodu se u ideálních plynů vůbec nepozoruje. Při teplotě okolí se všechny reálné plyny kromě vodíku, neonu a hélia při expanzi ochlazují [1]. Samotný Joule-Thomsonův efekt je reflektován pomocí Joule-Thomsonova koeficientu, který vyjadřuje rychlost změny teploty v závislosti na tlaku (při konstantní entalpii) (9).

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{v}{c_p}(T\alpha - 1) \quad (9)$$

Kladný Joule-Thomsonův koeficient znamená, že dochází k poklesu teploty při izoentalpickém poklesu tlaku. V T-s diagramu (viz. příloha 1 a 2) se toto chování projeví jako klesající izoentalpická čára s poklesem tlaku, vodík má toto chování za nízkých teplot [34]. Při teplotách nad 100 K je Joule-Thomsonův koeficient záporný, což znamená, že s klesajícím tlakem se teplota zvyšuje, v T-s diagramu se to znamená, že izoentalpická čára stoupá s klesajícím tlakem. Za podmínky, při jakých se skladuje vodík pro automobilní aplikace se koeficient pohybuje okolo  $\mu_{JT} \approx -0,5 \text{ K/MPa}$  [18]. K nárustu teploty v palivovém systému vozidla dochází zejména při plnění palivové nádrže, nebo naopak při jejím vyprazdňování.

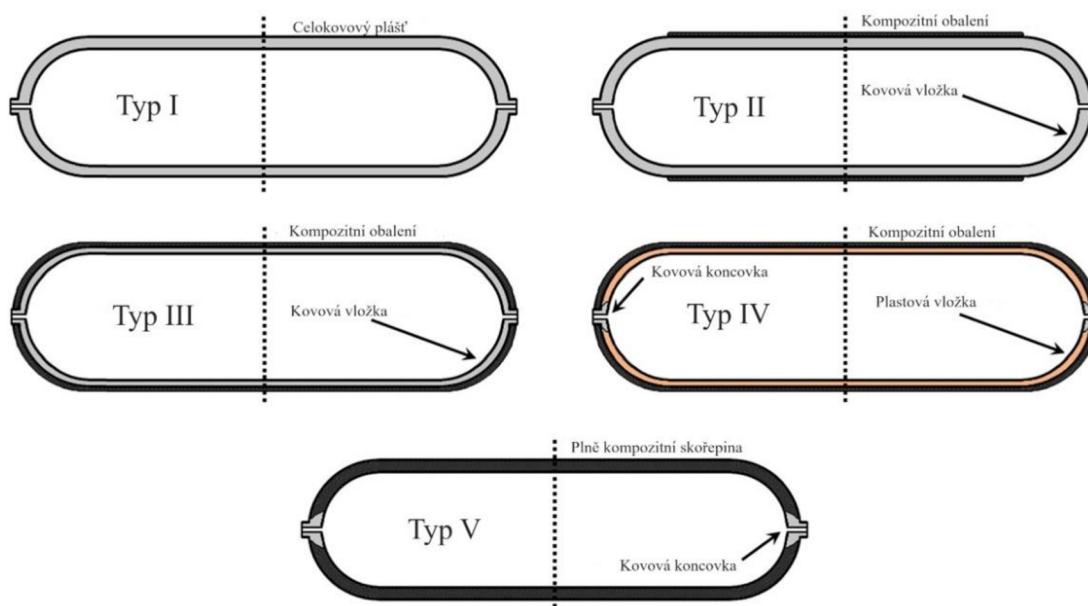
## 4 CESTA VODÍKU Z NÁDRŽE DO HNACÍHO ÚSTROJÍ

Ve vodíkovém hospodářství v dopravních prostředcích se nachází mnoho komponentů, které se jinde nevyskytují, případně tyto komponenty musí být kompatibilní s vodíkem. Vodík putuje z nádrže přes vysokotlaký ventil, dále přes rozdělovač až k vysokotlakému regulátoru tlaku, kde se tlak snižuje až na potřebu konkrétního systému.

### 4.1 TLAKOVÉ NÁDRŽE

Pro skladování vodíku v plynné formě se vodík obvykle stlačuje na tlaky 20, 35 a 70 MPa, tímto způsobem lze skladovat vodík po dlouhou dobu za předpokladu, že použité materiály nádrží zabráňují difuzi vodíku. Z důvodů vysokých tlaků a bezpečnosti jsou nádrže relativně těžké, běžně váží 20–40 kg na 1 kg skladovaného vodíku [2]. Samotné nádrže mají nejčastěji válcovitý tvar, a to z důvodů lepšího rozložení tlaku.

Typ I je nejvíce používaný druh tlakové nádoby. Jedná se o celokovovou konstrukci s provozními tlaky nejčastěji mezi 15–30 MPa. Vzhledem ke své váze se nehodí k použití v automobilních aplikacích, ale nachází své uplatnění v ostatních odvětvích průmyslu. Nádrž typu II se skládá z kovové vnitřní části (obvykle Al), která je obalena skelnými vlákny, případně uhlíkovými vlákny. Nádrže typu III obsahují vnitřní kovovou složku, která je již celá obalena kompozity, které vydrží namáhání od vnitřního tlaku, který se pohybuje nejčastěji kolem 35 MPa. Pro osobní automobily je se nejčastěji využívá typ IV, jehož pracovní tlak je 70 MPa [20]. Nádrž se skládá z vnitřní plastové vložky, která je obalena silnou vrstvou uhlíkových vláken, vnější vrstvu tvoří skelná vlákna. Kvůli použití uhlíkových vláken se jedná o nejdražší řešení. Typ V je v současnosti ve vývoji, nemá speciální vložku, ale integruje funkci permeační bariéry do samotného materiálu směsi [5]. Kromě typu V jsou všechny nádrže popsány normou ISO 11439:2013.



Obr. 6: Typy tlakových nádrží [19]

Typický systém skladování vodíku obsahuje kromě tlakové nádrže také zpětný ventil, uzavírací ventil a teplotně iniciovaný přetlakový ventil pro ochranu proti vnějšímu tepelnému zatížení (např. požáru) [2]. Pro dojezd 500–600 km je pro osobní automobil potřeba okolo

5 kg vodíku, toto množství je většinou uloženo ve 2, nebo 3 nádržích, které jsou spolu propojeny pomocí vysokotlakého vedení.

Pro bezpečné tankování vodíku lze použít normu SAE 2701, která popisuje tankování po dobu asi 3 minut pro vozidla osobní dopravy. Pro prevenci značnému zvýšení teploty v nádrži kvůli Joule-Thomsonově efektu musí být vodík ochlazen na  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , případně až na  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2]. Pro těžkou dopravu jako jsou nákladní automobily, nebo autobusy v současnosti norma neexistuje, ale kvůli nižšímu skladovacímu tlaku je nárůst teploty nižší než u osobních automobilů. Typická doba tankování paliva u nákladních automobilů a autobusů se pohybuje okolo 20 minut, s maximálním hmotnostním tokem 120 g/s.

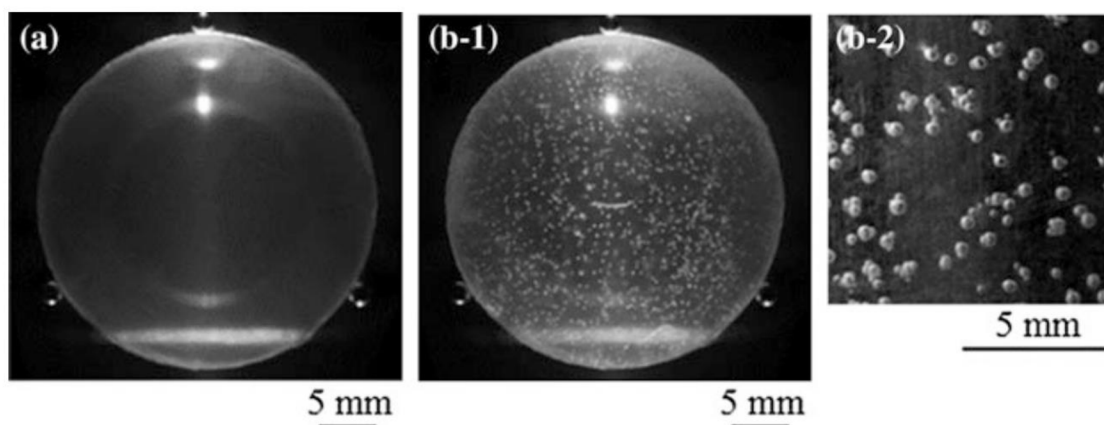
## 4.2 PALIVOVÉ VEDENÍ VEDOUCÍ VODÍK

Problematika palivového vedení pro přenos vodíku mezi jednotlivými subsystémy je především o volbě vhodného materiálu, který dokáže vydržet vlastnosti vodíku, zejména vodíkovou křehkost, další problémy plynou z ekonomičnosti celého systému a jeho odolnosti proti vysokým tlakům. Z obecných zkušeností vyplývá, že mezi vhodné materiály patří nízkopevnostní uhlíkové slitiny, hliníkové slitiny, slitiny mědi a austenitické oceli. Jako naopak nevhodné se jeví vysokopevnostní a feritické oceli [5].

Samotné potrubí musí být bezešvé, upevněno tak, aby se na něj nepřenášely vibrace. V souladu s předpisy pro vozidla na vodíkový pohon nesmí při případném úniku vytvářet výbušnou atmosféru v uzavřených prostorech. Prostor pro cestující musí být od vodíkového systému oddělen, ideální je instalovat potrubí do otevřené části podvozku [2]. Pokud jsou součástí pro přepravu plynu v uzavřených částech, přítomnost vodíku musí být kontrolována pomocí senzorů a prostor musí být vybaven nuceným větráním.

## 4.3 TĚSNĚNÍ

Těsnění jsou kritickým prvkem v celém vodíkovém hospodářství, zajišťují těsnost celého systému, ať už ve spojení potrubí, nebo v jednotlivých ventilech, případně v palivových člancích. Hlavní problémy spojené s těsněním vodíku plynou ze zvláštních vlastností vodíku [5], zejména vysoké difuzivité a schopnosti zhoršovat vlastnosti materiálu, v kombinaci s velkými změnami teplot v celém systému se jedná o značný problém.



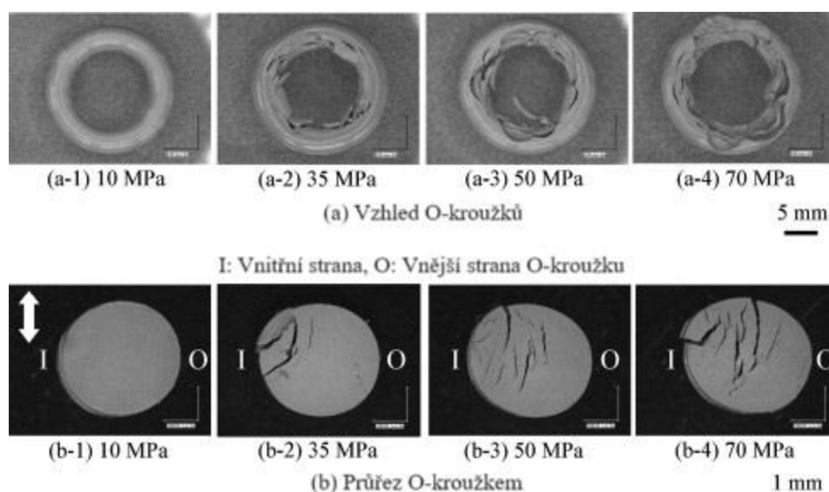
Obr. 7: Puchýřovitá trhlina v průhledné válcovité pryži, **a** bez zatížení, **b-1** po zatížení 10 MPa, **b-2** detail po zatížení [1]



Dekomprese různých plynů může způsobovat vnitřní trhliny v gumových materiálech, tyto trhliny označujeme jako puchýře. Na obr. 7 lze pozorovat tyto puchýře při zatížení vodíkem o tlaku 10 MPa. Toto poškození lze ovlivnit použitými materiály, poškození bývá vážnější u materiálů s větším obsahem vodíku a horšími tažnými vlastnostmi, naopak k větší odolnosti pryže je vhodná pryž s větším obsahem oxidu křemičitého [1].

V zásadě existují dvě skupiny materiálů vhodně pro těsnění vodíku, první z nich jsou slitiny mědi a druhé jsou polymerní materiály jako jsou polychlórtrifluorethylén nebo polytetrafluorethylen. Mezi materiály komerčně dostupné se řadí například teflon, neopren, dakron, mylar, viton, NBR kaučuk a Kel-F [5]. Nejvíce zatěžující operací pro těsnění je plnění tlakových nádrží, kdy se teplota pohybuje až okolo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a plnicí tlaky jsou 70-80 MPa (pro osobní dopravu).

U O-kroužků dochází při zatížení vysokotlakým vodíkem k nárůstu objemu nazývanému také zduření. Prostředí, ve kterém jsou O-kroužky provozovány má velký vliv na trvanlivost součásti, trhliny se v materiálu objevují dříve s vyšším tlakem a teplotou [21]. O-kroužky na obr. 8 byly provozovány při daném zatížení v jedno minutových cyklech za teploty  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



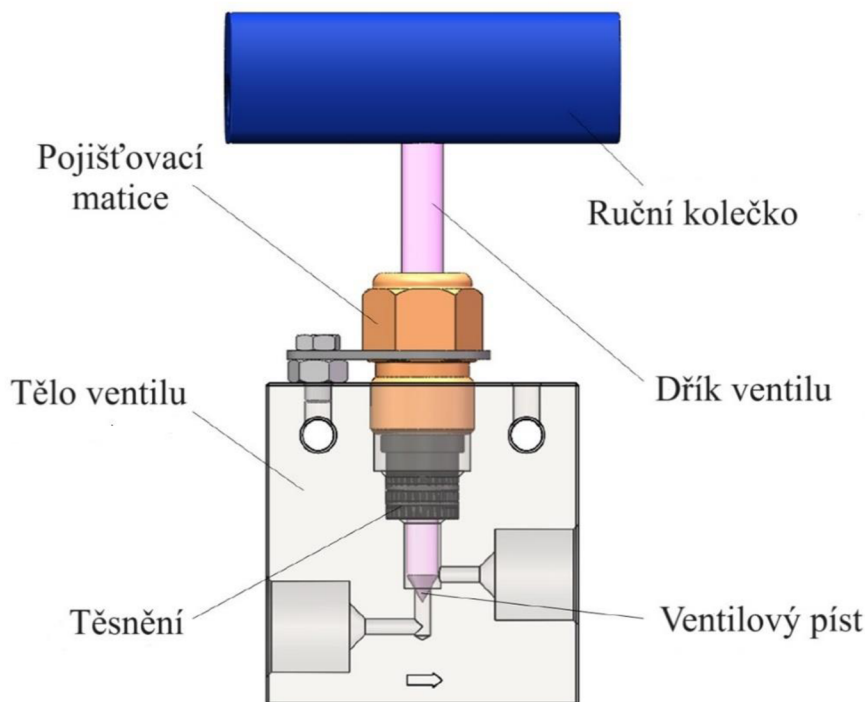
Obr. 8: Testování O-kroužků [21]

#### 4.4 VYSOKOTLAKÉ VENTILY

Vysokotlaké ventily jsou důležitou součástí vodíkového hospodářství, řadí se ihned za nádrž a pomáhají tak regulovat tok vodíku celým systémem. Jedním z často využívaných ventilů se stal jehlový ventil, a to především kvůli svému jednoduchému tvaru, schopnosti ustát velké tlaky a dobré těsnosti [22]. Jako materiál se používají hliníkové slitiny a nerezové oceli, existuje snaha o co největší využití hliníkových slitin z důvodů úspory váhy, části, které jsou nejvíce v kontaktu s hliníkem by měly být z nerezové oceli, nebo alespoň projít povrchovou úpravou [20].

Ventilový píst je nejdůležitější součástí celého ventilu, ovlivňuje proudění ventilem a celkovou stabilitu celého systému. Běžně používané písty mají tvar přímého kuželu, jedná se o jednoduchý tvar, často se využívá u vstřikovačů paliva k regulaci vstřikování. Mezi další tvary patří píst s kuzelem s obloukovým okrajem, který má větší plochu při malém otevření a změny při různých otevřeních jsou více postupné, dále se využívá komolého kuželu, který efektivně zpomaluje erozi plynů. Rychlost ve ventilu může dosahovat až  $1150\text{ m/s}$  u přímého

kuželu a u komolého kuželu, u kuželu s obloukovým okrajem může dosahovat až 970 m/s [22].



Obr. 9: Manuální vysokotlaký jehlový ventil [22]

#### 4.5 VYSOKOTLAKÝ REGULÁTOR TLAKU

Hlavním úkolem vysokotlakých ventilů je regulovat tlak ze vstupní hodnoty v nádrži na tlak použitelný pro konkrétní aplikaci. Používají se mechanicky řízené ventily, je potřeba zajistit přesnou regulaci z důvodů řazení vstřikovačů paliva přímo za regulátor, výrazné kolísání tlaku může vést k vyšší spotřebě paliva, aby byla zajištěna přesná regulace, využívají se dvoustupňové regulátory, které jsou vhodné zejména do podmínek, kde i malá odchylka tlaku může znamenat porušení hnacího ústrojí, například v palivových člancích. U spalovacích motorů na vodík s přímým vstřikem není změna tlaku tak výrazná, proto lze využít jednostupňovou regulaci.

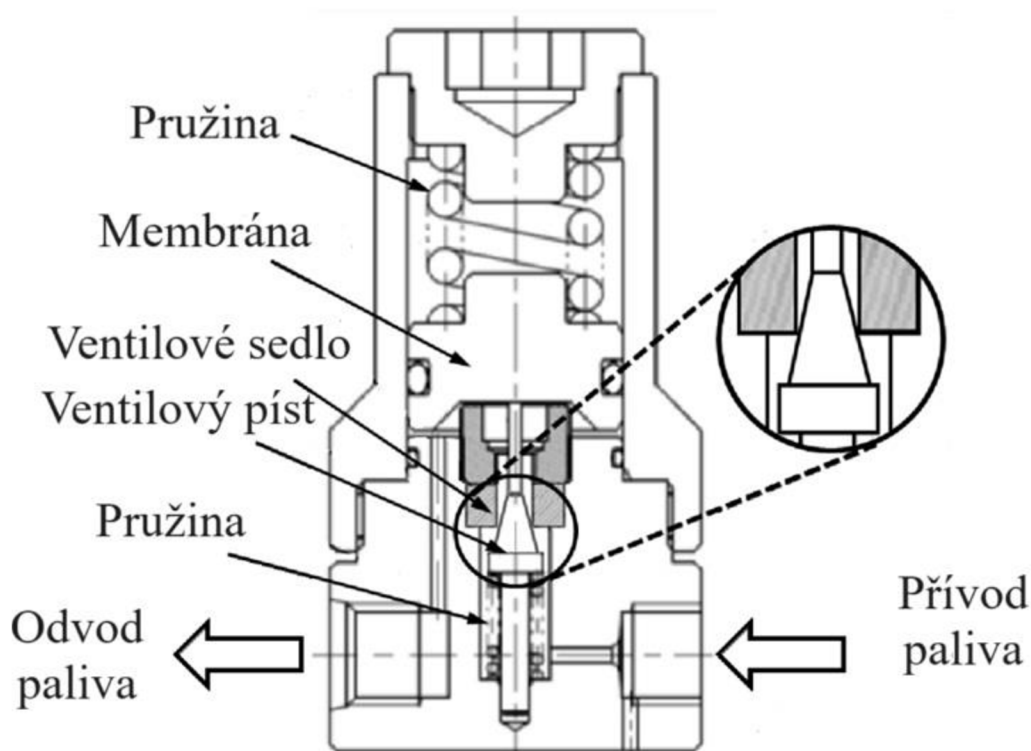
Samotný ventil se skládá z vysokotlaké a nízkotlaké části, ve vysokotlaké se nachází ventilový píst, který může být podpořen pružinou pro větší stabilitu. V nízkotlaké části se nachází membrána, případně píst, tlačná pružina a matice na úpravu síly předpětí. Všechny materiály v regulátoru musí být kompatibilní s vodíkem, vhodná je tedy nerezová ocel, pro ušetření váhy v automobilovém průmyslu se také využívá hliníkových slitin.

Regulátor funguje na mechanickém principu, ve vrchní části se nachází matice, která vytváří předpětí v tlačné pružině, v okamžiku, kdy do regulátoru vstoupí vodík o vysokém tlaku, na membráně, nebo pístu se vytvoří síla, která překoná sílu od předpětí, pružina se stlačí a ventilový píst se uzavře, po poklesu tlaku v důsledku expanze plynu se ventilový píst otevře a začne nový cyklus [24].

Existují dva druhy mechanických regulátorů, membránový a pístový. Regulátor s membránou je vhodný spíše pro menší výstupní tlaky, zaručuje dobrou těsnost z důvodů těsnění kovu na kov. Regulátor s pístem je vhodný pro vyšší výstupní tlaky, na rozdíl od membrány lze ovlivnit plochu pístu a tím měnit sílu předpětí potřebnou k regulaci, hlavní problém je s těsněním celého procesu.

Na trhu je dostupná široká nabídka vysokotlakých regulátorů, nabízí je řada firem, například: Bosch, Kawasaki, Hamai, Pressure Tech. Hlavní nevýhodou mechanických regulátorů tlaku je ve vysoké hlučnosti a vibracích [25], existují návrhy, jak těmto problémům zabránit.

Kromě mechanických ventilů existují i regulátory na pneumatický pohon, využívají se zejména pro plnění tlakových nádrží, dají se plynule regulovat pomocí PLC programování, jejich hlavním úkolem je držet plnicí tlak ve stanoveném koridoru a zabránit přehřátí [26]. V automobilovém průmyslu se nevyžívají z důvodů vyšší váhy, rozměrů a potřeby stlačeného vzduchu.



Obr. 10: Manuální vysokotlaký regulátor tlaku [23]

#### 4.6 KONTROLA POUŽITÝCH KOMPONENTŮ

Na území Evropské unie platí nařízení Evropského parlamentu a rady (ES) č.79/2009, které upravuje schvalování vozidel na vodíkový pohon, kromě toho upravuje testování součástí k použití do vozidel na vodíkový pohon. Jedná se zejména o komponenty jako: nádrže, ventily, palivové vedení, regulátory tlaku, bezpečnostní senzory [33]. Nejvíce zkouškám jsou podrobovány tlakové nádrže, ostatní komponenty musí projít těmito zkouškami:

1. Zkouška materiálu: kovové konstrukční části nesmí být náchylné k vodíkové křehkosti, nesmí docházet k únavovým trhlinám v materiálu [33].
2. Zkouška odolnosti proti korozi: konstrukční části musí být schopny odolávat korozi [33], z tohoto důvodu jsou komponenty vystaveny působení daných chemických látek.
3. Zátěžová zkouška: součásti musí být schopny nepřetržitého provozu, provádí se řada zkušebních cyklů za předem stanovených tlakových a teplotních podmínek [33].
4. Zkouška tlakovým cyklem: konstrukční části musí odolat velkým změnám tlaku, v krátkém časovém intervalu se mění tlak z atmosférického na maximální pracovní tlak a poté klesne zpět na atmosférický tlak [33]. Během zkoušky nesmí dojít k viditelné deformaci.
5. Zkouška vnitřní těsnosti: daná součást se vystaví tlaku za různých teplotních podmínek a sleduje se těsnost, vnitřní netěsnost nesmí přesáhnout stanovenou hodnotu [33].
6. Zkouška vnější netěsnosti: účelem je prokázat, že dané komponenty nevykazují vnější netěsnost, zároveň nesmějí vykazovat známky pórovitosti [33].

## 5 NÁVRH VYSOKOTLAKÉHO REGULÁTORU TLAKU

Jako vhodné konstrukční řešení je voleno pístové řešení regulátoru, na rozdíl od membránové varianty umožňuje regulaci v mnohem širším spektru tlaků. Hlavní nevýhodou pístového regulátoru oproti membránovému řešení je jeho nižší těsnost a z tohoto důvodu vyšší požadavky na přesnost jednotlivých komponent. Samotný regulátor se skládá ze spodní části, víka, které odděluje regulační pružinu od oblasti, ve které pracuje vodík, tyto komponenty jsou spojeny pomocí vrchní části regulátoru. Otevírání a zavírání ventilu zajišťuje píst, který dosedá na sedlo.

### 5.1 VÝBĚR VHODNÝCH MATERIÁLŮ

Jako materiál pro tělo regulátoru (kromě víka) je volena austenitická nerezová ocel EN 1.4404 (ČSN 17349, AISI 316L, X2CrNiMo17-12-2). Tato ocel je volena pro svoji vysokou odolnost vůči vodíkové křehkosti, zároveň se jedná o materiál vhodný pro 3D tisk. Z hlediska chemického složení obsahuje méně než 0,03 % uhlíku, mezi 16,5 až 18,5 % chromu a 10 až 13 % niklu [27]. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti materiálu EN 1.4404 [27]

Mez kluzu $R_{p0,2}$	200 MPa
Mez pevnosti $R_m$	500–700 MPa
Tvrdość	215 HB
Prodloužení A	40 %
Mez kluzu $R_{p0,2}$ při 100 °C	165 MPa

Pro víko regulátoru tlaku je volen materiál EN 1.4980 (X6NiCrTiMoVB25-15-2). Jedná se o austenitickou nerezovou ocel s vysokou odolností proti vodíkové křehkosti, využití nachází zejména v letectví a energetice. Obsahuje mezi 0,03 až 0,08 % uhlíku, 13,5 až 16 % chromu a mezi 24 až 27 % niklu. Přehled mechanických vlastností je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti materiálu EN 1.4980 [35]

Mez kluzu $R_{p0,2}$	600 MPa
Mez pevnosti $R_m$	900–1150 MPa
Prodloužení A	15 %
Mez kluzu $R_{p0,2}$ při 100 °C	580 MPa

Jako materiál pro pružiny je volena slitina EN 2.4711, hlavní složky tvoří kobalt (39–41 %), chrom (19–21 %), nikl (15–18 %) a molybden (6,5–7,5 %) [28]. Slitina má především po tepelném zpracování dobré mechanické vlastnosti, vysokou korozivzdornost a vysokou únavovou pevnost. Pevnost v tahu v žíhaném stavu má hodnotu 830–1035 MPa, po

zušlechtění lze dosáhnout pevnosti 1515–2000 MPa [37]. Mezi hlavní oblasti využití patří výroba pružin, petrochemický průmysl, letecký a vesmírný průmysl. Modul pružnosti ve smyku  $G$  pro 20 °C má hodnotu 82 GPa, při 100 °C se hodnota sníží na 81 GPa [29].

Sedlo a držák těsnění jsou součásti, které jsou zatěžovány zejména působením tlaku. Pro tuto aplikaci vyhovuje semikrystalický termoplast PEEK vyztužený uhlíkovými vlákny, které tvoří 30 % hmotnosti. Jedná se o materiál, který v kontaktu s vodíkem nedegraduje a má relativně vysokou pevnost v tlaku (180 MPa) [36].

Jako těsnění mezi víkem a pístem je použit materiál PTFE (obchodní název teflon), jedná se o materiál kompatibilní s vodíkem a nízkým součinitelem tření, lze ho používat v širokém rozsahu teplot.

Pro materiál O-kroužků je volen FKM, jedná se o fluorovodíkový kaučuk, který má široké použití v rámci teploty (-40 až 230 °C) [32], vyznačuje se vysokou odolností proti různým chemikáliím, hydraulickým olejům, palivům a dalším. Využívá se v odvětvích jako jsou automobilový průmysl, letecký průmysl, potravinářský průmysl, nebo rafinace ropných produktů.

## 5.2 VÝPOČET PRUŽIN

Ve vysokotlakém regulátoru tlaku se nachází dvě tlačné pružiny, první větší pružina zajišťuje regulaci vodíku, druhá menší pružina slouží k podpoře a stabilizaci pístu, který uzavírá nízkotlakou oblast. Aby byla zaručena funkčnost a bezporuchovost regulátoru, tlačné pružiny musí projít kontrolou pevnosti, zároveň jsou získány při výpočtu důležité informace, které budou sloužit k nastavení regulátoru.

Tabulka 4: Volené parametry pružin

Volený parametr	Malá pružina	Velká pružina
Střední průměr pružiny – $D_p$	7,5 mm	40 mm
Průměr drátu – $d_p$	1,5 mm	8 mm
Počet činných závitů – $n_a$	5	4
Maximální pohyb – $\Delta y$	1 mm	1 mm
Předpětí – $F_i$	24,3 N	-

Menší pružina je vedena v díře o průměru 10 mm, a zároveň je vedena trnem s průměrem 5 mm, minimální vůle mezi trnem a vnitřním průměrem pružiny je volena 0,5 mm, vůle mezi dírou a vnějším průměrem pružiny je volena 1 mm, z těchto důvodů je malý průměr pružiny volen 1,5 mm a střední průměr závitů 7,5 mm. Z důvodů zástavbových rozměrů je počet činných závitů pružiny volen  $n_a = 5$ . Nejdříve je nutno vypočítat tuhost pružiny pomocí rovnice (10) [31].

$$k = \frac{Gd_p^4}{8D_p^3n_a} \quad (10)$$

$$k = \frac{81000 \cdot 1,5^4}{8 \cdot 7,5^3 \cdot 5}$$

$$k = 24,3 \text{ N/mm}$$

K výpočtu maximálního smykového napětí je potřeba určit maximální zatěžující sílu (11), která se skládá ze síly předpětí, která je volena, a síly maximálního stlačení, pružině je dovolen maximální pohyb 1 mm.

$$F = F_i + \Delta y \cdot k \quad (11)$$

$$F = 24,3 + 1 \cdot 24,3$$

$$F = 48,6 \text{ N}$$

Pro výpočet maximálního smykového napětí v pružině je důležité znát poměr vinutí  $C$  (12).

$$C = \frac{D_p}{d_p} \quad (12)$$

$$C = \frac{7,5}{1,5}$$

$$C = 5$$

K výpočtu maximálního smykového napětí (13) je využit Bergsträsseův součinitel z důvodu, že zahrnuje vliv posouvající síly i vliv zakřivení drátu [31].

$$\tau_{max} = \frac{4C+2}{4C-3} \cdot \frac{8FD_p}{\pi d_p^3} \quad (13)$$

$$\tau_{max} = \frac{4 \cdot 5 + 2}{4 \cdot 5 - 3} \cdot \frac{8 \cdot 48,6 \cdot 7,5}{\pi \cdot 1,5^3}$$

$$\tau_{max} = 355,91 \text{ MPa}$$

Maximální smykové napětí vyšlo pod mez pevnosti s vysokou bezpečností, pružiny všeobecně nedosahují mezního stavu pevnosti, dříve dosáhnou mezního stavu únavy z důvodů cyklického zatěžování, proto je nutno provést kontrolu mezního stavu únavy (15), k výpočtu tohoto stavu je nezbytné znát amplitudovou sílu působící na tlačnou pružinu (14).

$$F_a = \frac{|F_{max} - F_{min}|}{2} \quad (14)$$

$$F_a = \frac{|48,6 - 24,3|}{2}$$

$$F_a = 12,15 \text{ N}$$

$$\tau_a = \frac{4C+2}{4C-3} \cdot \frac{8F_a D}{\pi d^3} \quad (15)$$

$$\tau_a = \frac{4 \cdot 5 + 2}{4 \cdot 5 - 3} \cdot \frac{8 \cdot 12,15 \cdot 7,5}{\pi \cdot 1,5^3}$$

$$\tau_a = 91,54 \text{ MPa}$$

Amplitudové smykové napětí vyšlo s dostatečnou bezpečností, při změně tlaku se pracovní oblast malé pružiny nezmění. U drátů menších než 10 mm je mez únavy nezávislá na materiálu a pevnosti v tahu, na základě experimentů byla zjištěno maximální amplitudové napětí  $\tau_A = 241 \text{ MPa}$  pro pružiny, jejichž povrch nebyl upraven kuličkováním a  $\tau_A = 398 \text{ MPa}$  pro pružiny s povrchem upraveným kuličkováním [31]. Z bezpečnostních důvodů je nutno vypočítat první rezonanční frekvenci (16) [30], aby mohlo být vyloučeno rezonanční kmitání.

$$f_e = \frac{3560 d_p}{n_a D_p^2} \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (16)$$

$$f_e = \frac{3560 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot (7,5 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \sqrt{\frac{81 \cdot 10^9}{8300}}$$

$$f_e = 59 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

Hodnota první vlastní frekvence vyšla vysoká, nemůže ji být dosaženo za běžného provozu.

Velká tlačná pružina slouží k samotné regulaci vodíku, nejprve je potřeba vypočítat plochu, na kterou působí tlak vodíku, průměr pístu je volen 10 mm z důvodů velkého tlaku působící na danou plochu, píst je spojen s nízkotlakou oblastí pomocí čepu o průměru 5 mm, z tohoto důvodu je plocha, na kterou tlak působí mezikruží.

$$S_p = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad (17)$$

$$S_p = \frac{\pi \cdot (10^2 - 5^2)}{4}$$

$$S_p = 58,9 \text{ mm}^2$$

Po výpočtu plochy, na kterou tlak působí lze vypočítat sílu předpětí (18), která je potřeba k regulaci na zvolený tlak 10 MPa, zároveň k síle předpětí je nutno připočítat sílu od menší pružiny, kterou musí velká pružina překonat.

$$p = \frac{F_i}{S_p} \Rightarrow F_i = p \cdot S_p + F_m \quad (18)$$

$$F_i = 10 \cdot 58,9 + 48,6$$

$$F_i = 637,6 \text{ N}$$

Průměr drátu velké pružiny je volen 8 mm. Pružina je vedena v otvoru o průměru 50 mm, mezi vnějším průměrem pružiny a stěnou vrchní části regulátoru je ponechána vůle 1 mm, proto je střední průměr závitů volen 40 mm. Dle ČSN EN 13906-1 je minimální počet činných závitů  $n_a \geq 2$  pro pružiny vinuté za studena, respektive  $n_a \geq 3$  pro pružiny vinuté za tepla [30], z tohoto důvodu je počet činných závitů  $n_a = 4$ , pokud by bylo více, snižovala by



se tuhost pružiny. Pro výpočet celkového zatížení je třeba znát tuhost pružiny, která je získána po dosazení do rovnice (10) [31].

$$k = \frac{81000 \cdot 8^4}{8 \cdot 40^3 \cdot 4}$$

$$k = 162 \text{ N/mm}$$

Celkové maximální zatížení tlačné pružiny se skládá ze síly předpětí a stlačení pružiny o maximální vůli mezi vedením pístu a pístem (11), tato vůle je volena 1 mm, k výpočtu je třeba znát i poměr vinutí pružiny, který je získán z rovnice (12), poté lze vypočítat maximální smykové napětí (13) ve velké pružině, opět je využito Bergsträsseova součinitele.

$$F = 637,6 + 1 \cdot 162$$

$$F = 799,6 \text{ N}$$

$$C = \frac{40}{8}$$

$$C = 5$$

$$\tau_{max} = \frac{4 \cdot 5 + 2}{4 \cdot 5 - 3} \cdot \frac{8 \cdot 799,6 \cdot 40}{\pi \cdot 8^3}$$

$$\tau_{max} = 205,86 \text{ MPa}$$

Vzhledem k velké bezpečnosti u všech stavů namáhání a malé plochy pístu lze zajistit regulaci i větších tlaků, předpětí lze zvednout o více než 50 % bez obavy překročení maximálního smykového napětí. Stejně jako v přechozím případě je nutno pružinu zkontrolovat vůči meznímu stavu únavy (15), tuto kontrolu nelze provést bez vypočítání amplitudové síly (14)

$$F_a = \frac{|799,6 - 637,6|}{2}$$

$$F_a = 81 \text{ N}$$

$$\tau_a = \frac{4 \cdot 5 + 2}{4 \cdot 5 - 3} \cdot \frac{8 \cdot 81 \cdot 40}{\pi \cdot 8^3}$$

$$\tau_a = 20,85 \text{ MPa}$$

Amplitudové smykové napětí vyšlo poměrně malé, není nutno se obávat překročení meze únavy. V případě regulace vyšších tlaků zůstane amplitudová síla stejná, proto se ani tehdy riziko dosažení meze únavy nezvyšuje. Jako první by došlo k meznímu stavu kontaktu závitů. Z důvodů vyloučení rezonanční frekvence je nutno vypočítat první rezonanční frekvenci dle rovnice (16).

$$f_e = \frac{3560 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot (40 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \sqrt{\frac{81 \cdot 10^9}{8300}}$$

$$f_e = 13,9 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

První rezonanční frekvence je příliš vysoká, než aby mohla být dosažena v běžném provozu.

Tabulka 5: Vypočítané hodnoty

Vypočítaný parametr	Malá pružina	Velká pružina
Tuhost pružiny – $k$	24,3 N/mm	162 N/mm
Zatěžující síla – $F$	48,6 N	799,6 N
Poměr vinutí – $C$	5	5
Maximální smykové napětí – $\tau_{max}$	355,91 MPa	205,86 MPa
Amplitudová síla – $F_a$	12,15 N	81 N
Amplitudové napětí – $\tau_a$	91,54 MPa	20,85 MPa
První rezonanční frekvence – $f_e$	$59 \cdot 10^6$ Hz	$13,9 \cdot 10^6$ Hz

### 5.3 VÝBĚR VHODNÝCH TOLERANCÍ A DRSNOSTÍ POVRCHU

Je nutné zvolit vhodné tolerance vzhledem k funkci jednotlivých ploch, pokud by byly na všech plochách všeobecné tolerance, docházelo by k netěsnostem vysokotlakého regulátoru tlaku, případně by nebyla zaručena smontovatelnost všech součástí. Naopak, pokud by byly použity přesné tolerance na všech komponentech, náklady na výrobu by se zněkolikanásobily.

Na vnějším plášti spodní části regulátoru, která má průměr 80 mm, není na většině povrchu nutné volit jiné než všeobecné tolerance, pouze na části, kde se je vyřezaný závit je vhodné zvolit toleranci délkového rozměru p6 a geometrickou toleranci válcovitosti stupně IT 7 s normální přesností, pro plochu o průměru 70 mm, která je v kontaktu s vrchní částí ventilu bude použita délková tolerance js6 a geometrická tolerance válcovitosti stupně IT 7. Pro díru, ve které se pohybuje píst, je volena tolerance délkového rozměru H7, dále geometrická tolerance válcovitosti a kolmosti s tolerančním stupněm IT 7. Nejpřesnější tolerance z celého regulátoru tlaku se nachází na dosedacích plochách spodní části ventilu s víkem. Na tyto plochy je volena geometrická tolerance rovinnosti stupně přesnosti IT 5 a drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ , pro délkové rozměry na dosedacích plochách s víkem je volena tolerance H6. Všechny ostatní nepopsané rozměry mají všeobecnou toleranci střední třídy přesnosti.

Pro největší průměr víka ventilu je volena délková tolerance js6 a geometrická tolerance válcovitosti s tolerančním stupněm IT 7. Na těsnící plochy se spodní částí regulátoru jsou voleny tolerance kompatibilní s protilehlou plochou, délkové tolerance jsou voleny k5, dále je volena geometrická tolerance rovinnosti s tolerančním stupněm IT 5 a drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ . Na vrchní část víka dosedá horní část regulátoru, z tohoto důvodu je na této ploše volena geometrická tolerance rovinnosti s tolerančním stupněm IT 7 a maximální drsnost povrchu  $R_z$  6,3  $\mu\text{m}$ . Pro díru, ve které se pohybuje píst, je volena rozměrová tolerance H6, geometrická tolerance válcovitosti stupně přesnosti IT 6 a maximální drsnost povrchu v díře  $R_z$  6,3  $\mu\text{m}$ . Plocha, na kterou píst dosedá musí být vyrobena se stejnou přesností jako těsnící plochy víka, tedy geometrická tolerance rovinnosti a kolmosti se stupněm přesnosti IT 5 a

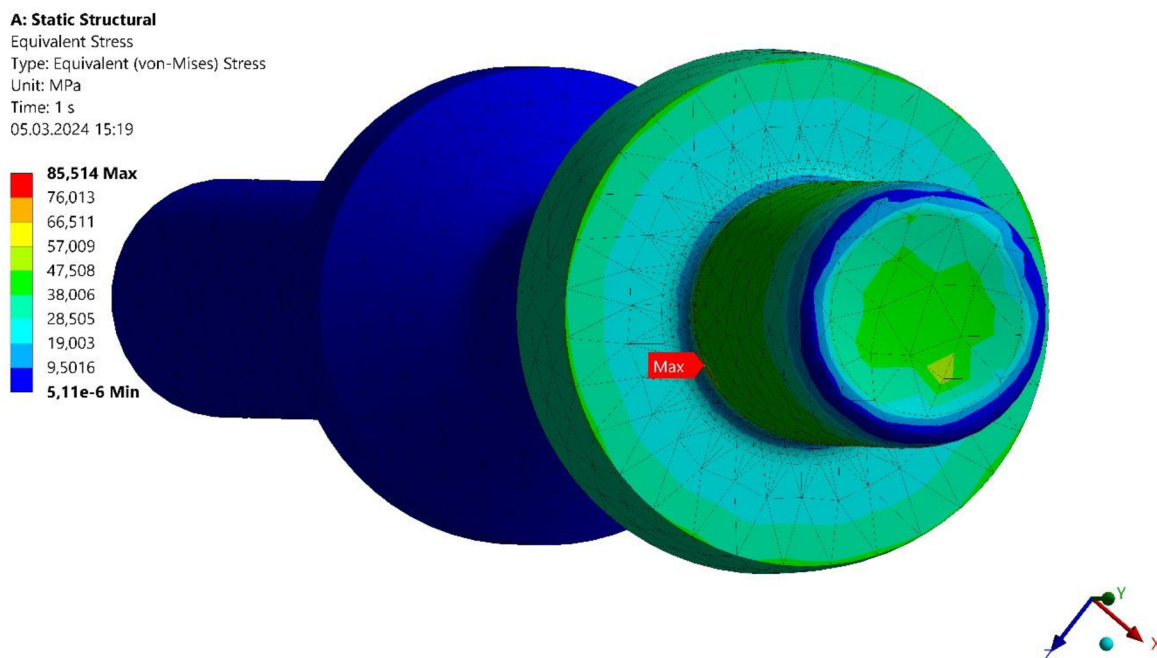
drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ . Na nepopsaných částech víka se vyskytují všeobecné tolerance střední třídy přesnosti.

U nefunkčních průměrů pístu je volena rozměrová tolerance k6 a geometrická tolerance válcovitosti stupně přesnosti IT 7. Vrchní část pístu, která se pohybuje v díře víka, je tolerována pomocí rozměrové tolerance k5, geometrickou tolerancí válcovitosti stupně přesnosti IT 6 a je zde volena maximální drsnost povrchu  $R_z$  6,3  $\mu\text{m}$ . Nejpřesnější plocha celého pístu je dosedací plocha s víkem, kde je volena geometrická tolerance rovinnosti a kolmosti se stupněm přesnosti IT 5 a maximální drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ . Další důležitou plochou, je kužel, který odděluje nízkotlakou a vysokotlakou oblast regulátoru, na této ploše je volena maximální drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ .

Vnější části vrchní části regulátoru tlaku není nutno tolerovat jinými než všeobecnými tolerancemi střední třídy přesnosti. Pro vnitřní průměry je volena rozměrová tolerance H7, geometrická tolerance válcovitosti a kolmosti s tolerančním stupněm IT 7 a maximální drsnost povrchu  $R_z$  6,3  $\mu\text{m}$ . Nejpřesnější rozměry jsou nutné na dosedacích plochách, z důvodu, že částečně slouží i jako těsnění, proto je na těchto plochách volena geometrická tolerance rovinnosti stupně přesnosti IT 5 a maximální drsnost povrchu  $R_z$  4  $\mu\text{m}$ .

## 5.4 KONTROLA STATICKÉHO ZATÍŽENÍ

Z důvodu vysokých tlaků je předpokládáno vysoké zatížení jednotlivých částí regulátoru. Nejvíce zatížené komponenty je nutné podrobit kontrole pomocí programu Ansys workbench, u jednotlivých součástí sestavy musí být nastaveny stejné okrajové podmínky jako v reálné soustavě.



Obr. 11: Statické namáhání pístu v programu Ansys

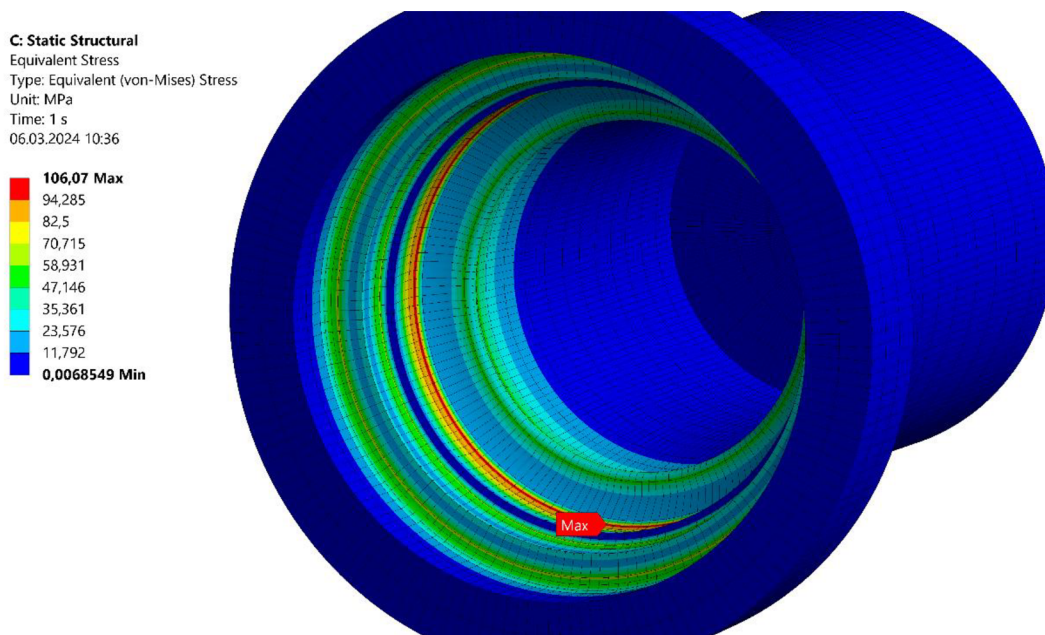
Na plochy pístu regulátoru, které nezapadají do víka, působí tlak 35 MPa, zároveň působí síla 800 N od pružiny na horní plochu pístu. Pohybu modelu je zabráněno na dosedací ploše o

průměru 10 mm. Celková deformace dosahuje maximálně tři tisícín milimetru, proto je zanedbatelná. Ekvivalentní napětí vyšlo nejvyšší v blízkosti rádiusu na dosedací ploše. Z důvodů špatné aproximace rádiusu sítí lze předpokládat, že reálné napětí v daném místě bude nižší. Kompletní statické namáhání pístu je zobrazeno na obr. 11. Daný píst vyhovuje své funkci s dostatečnou bezpečností.

Vrchní část ventilu spojuje všechny součásti dohromady, hlavní zatížení probíhá od víka, na které působí tlak od vodíku. Tuto sílu působící na vrchní část ventilu lze vypočítat pomocí rovnice (19). Se zbytkem vysokotlakého regulátoru je vrchní část spojena pomocí závitů, v tomto místě je tedy zabráněno pohybu modelu. Maximální deformace dosahuje 7  $\mu\text{m}$ , z tohoto důvodu ji lze zanedbat. Ekvivalentní napětí v součásti dosahuje 106 MPa, součást vyhovuje s dostatečnou bezpečností, reálné napětí bude pravděpodobně ještě nižší, a to z důvodu nedokonalé aproximace rádiusu pomocí sítí. Kompletní statické namáhání vrchní části vysokotlakého regulátoru tlaku je zobrazeno na obr. 12.

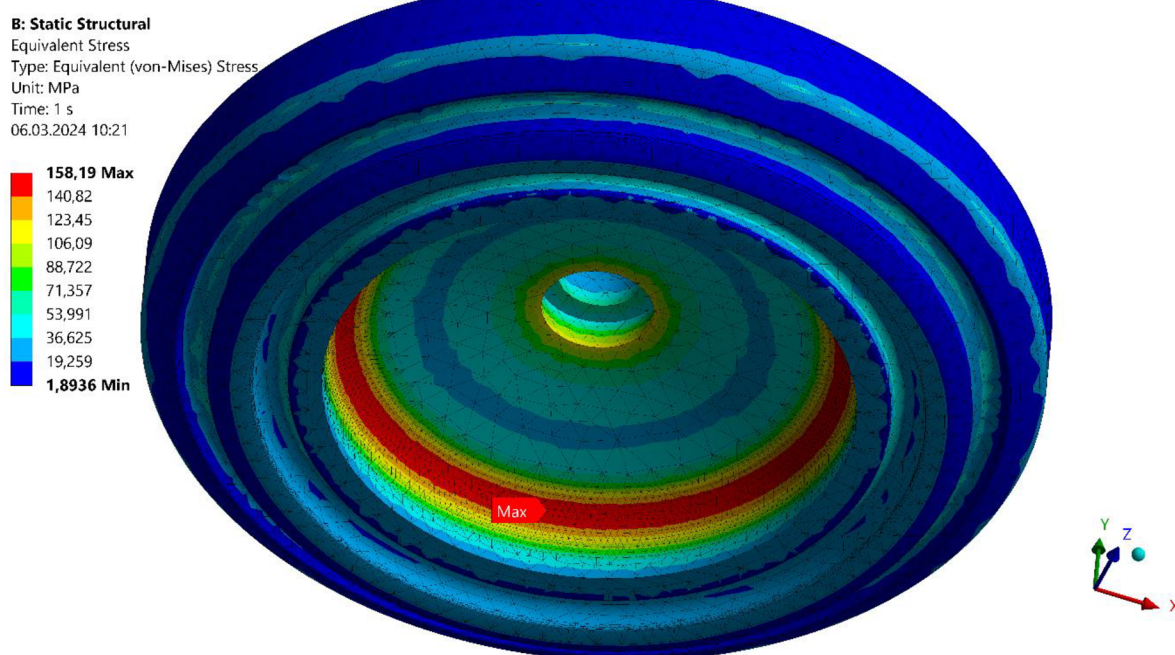
$$F = \frac{\pi \cdot (D_v^2 - d_v^2)}{4} \cdot p \quad (19)$$

$$F = 42635 \text{ N}$$



Obr. 12: Statické namáhání vrchní části regulátoru v programu Ansys

Víko vysokotlakého regulátoru odděluje oblast, která pracuje s vodíkem a oblast, ve které působí tlačná pružina. Ze spodní strany působí na víko tlak 35 MPa, pohybu víka je zabráněno pomocí vrchní části regulátoru, která spojuje všechny komponenty dohromady. Ekvivalentní napětí vychází s dostatečnou bezpečností, maximální deformace vychází 0,017 mm, proto ji z celkového pohledu lze zanedbat. Kompletní statické namáhání pístu je zobrazeno na obr. 13.



Obr. 13: Statické namáhání víka regulátoru v programu Ansys

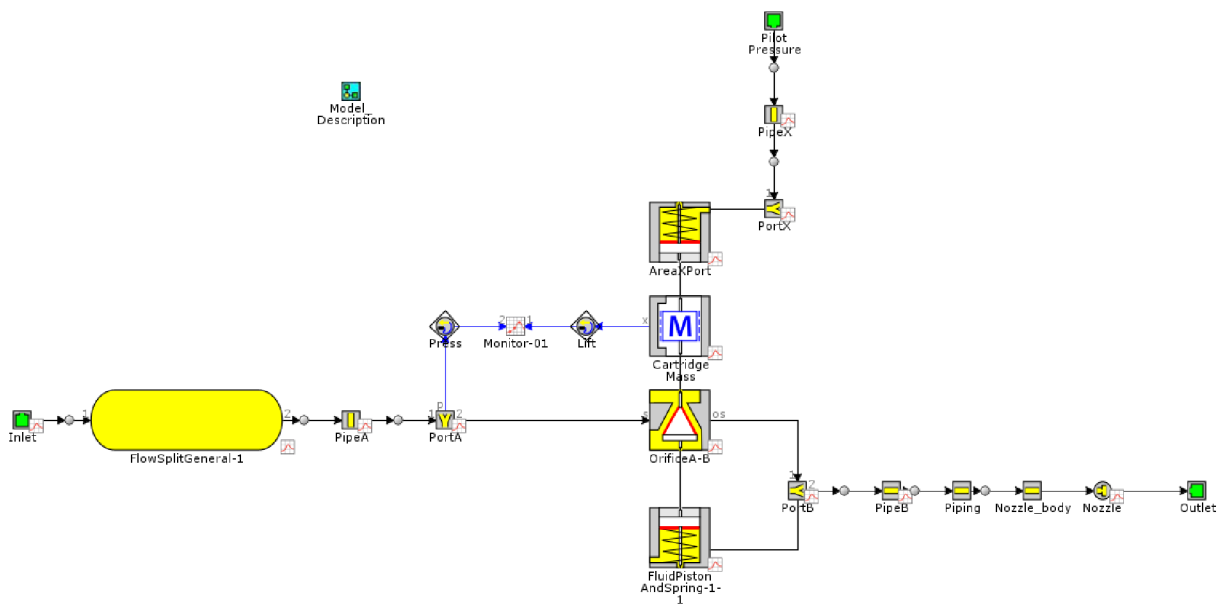
## 5.5 SIMULACE CHOVÁNÍ VENTILU POMOCÍ PROGRAMU GT SUITE

K ověření chování regulátoru tlaku je využito programu GT suite, simulační model se skládá z nádrže o objemu 250 l, dále samotného regulátoru tlaku, který se v programu sestává z jednotlivých komponentů. Tento model se snaží co nejpřesněji napodobit navržený ventil, v části ventilu s velkou pružinou je atmosférický tlak. Po redukčním ventilu je zařazeno potrubí a plyn volně expanduje do atmosféry, tedy není simulován odběr hnacím ústrojím. Kompletní schéma modelu je zobrazeno na obr. 14.

Průměrný tlak za regulátorem dosahuje 10,47 MPa. Průměrná teplota se při průchodu regulátorem zvýšila o 10 °C, přičemž teplota osciluje mezi 308 až 312 K (viz. příloha 4). Průměrné množství dodaného paliva dosahuje 6 g/s, což odpovídá 0,26 l/s, toto množství je více než dostatečné pro pohon osobního automobilu, obvyklý odběr hnacích ústrojí se pohybuje okolo 3 g/s.

Mezi další užitečné informace patří zjištění pohybu pístu, který se pohybuje v rozmezí 0 až 0,1 mm (viz. příloha 5), dále síla vyvíjená vrchní tlačnou pružinou dosahuje nižších rozdílů sil (viz. příloha 6) než se předpokládalo v návrhových výpočtech, amplitudové napětí tedy bude v realitě dosahovat nižších hodnot, u malé tlačné pružiny lze předpokládat i nižší smykové napětí, tedy ještě vyšší bezpečnost. Dále lze z výsledků z programu GT suite usuzovat, že únavové napětí všech komponentů bude nižší než se předpokládalo.

Regulace tlaku vodíku probíhá prostřednictvím nastavovacího kolečka, kterým se upravuje předpětí pružiny. Měření teploty a tlaku vodíku po průchodu redukčním ventilem je vhodné umístit až do potrubí za ventil, především z důvodů pulzací, ke kterým dochází ve ventilu při škrcení vodíku.



Obr. 14: Model v programu GT suite

## ZÁVĚR

Vodík se pro využití v dopravě skladuje nejčastěji při nominálních tlacích 20, 35 a 70 MPa, z tohoto tlaku je nutné regulovat tlak na hodnoty potřebné pro pohonnou jednotku, u výroby elektřiny v palivových článcích, použitelných pro osobní i nákladní dopravu, se jedná o tlak 100–400 kPa. V případě spalovacího motoru záleží potřebný tlak na použité strategii vstřikování, rozsah je mnohem širší než u palivových článků, pohybuje se od 0,15 MPa až po 30 MPa.

Mezi největší problémy vodíku z hlediska regulace tlaku patří těsnost celého systému, nelze kompletně zabránit únikům pracovního média, v případě uzavřených prostor je nutné kontrolovat koncentraci vodíku a vybavit prostor nuceným odvětráváním. Mezi další obtíže patří degradace materiálů působením vodíku a zvýšení teploty v systému, která nemusí být kompatibilní s pohonným ústrojím. Degradaci jednotlivých součástí lze zabránit výběrem vhodných materiálů, na zvýšení teploty nad meze přípustné pro aplikace v pohonném ústrojí lze reagovat pomocí chladiče zařazeného za redukční ventil.

Nelze předpokládat, že by se v osobní či nákladní dopravě využívaly jiné regulátory tlaku než manuální, přestože existují pneumaticky a elektricky řízené ventily, nelze je využít především z důvodů zástavbových rozměrů, vyšší hmotnosti a energie potřebné k pohonu samotných regulátorů.

K dosažení lepších výsledků by bylo vhodné navržený redukční ventil vyrobit a otestovat například podle nařízení (ES) č.79/2009 (viz. kapitola 4.6), které je nezbytné pro praktické použití v dopravních prostředcích. Mezi společnostmi, kde lze zajistit testování patří například TÜV SÜD. Dále by bylo vhodné ověřit přesnost výsledků z programu GT suite pomocí reálného měření.

V současném návrhu je volen neobvyklý materiál pružin, vzhledem k vysoké bezpečnosti zejména velké tlačné pružiny by bylo vhodné zvolit levnější materiál k výrobě pružin, případně lze využít v horní části regulátorů dvou pružin z levnějšího materiálu zařazených paralelně. Mezi materiály použitelné pro tuto aplikaci patří například EN 1.4301 nebo EN 1.4310.

Vzhledem k přesným tolerancím by výroba vysokotlakého regulátoru tlaku probíhala pomocí CNC obrábění, zejména na vrchní část regulátoru by bylo vhodné použít metodu 3D tisku s přídatky na obrábění, a to z důvodu úspory materiálu. Následovalo by obrobení na požadované tolerance. Ostatní komponenty potřebné k sestavení redukčního ventilu by bylo vhodné vyrobit pomocí CNC soustružení, především kvůli rotačnímu charakteru jednotlivých součástí. K dosažení přesných tolerancí by bylo nutné využít technologie broušení. Zejména ocel EN 1.4980 a slitina pro pružiny EN 2.4711 jsou méně dostupné materiály, ostatní materiály potřebné ke zhotovení redukčního ventilu jsou běžně dostupné.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SASAKI, Kazunari, Junichiro YAMABE, Hai-Wen LI, Teppei OGURA, Akari HAYASHI a Stephen LYTH, ed. *Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective*. Springer, 2016. ISBN 978-4-431-56040-1.
- [2] KLELL, Manfred, Helmut EICHLSEDER a Alexander TRATTNER. *Hydrogen in Automotive Engineering*. Graz: Spring, 2023. ISBN 978-3-658-35060-4.
- [3] NUTTALL, William a Adetokunboh BAKENNE. *Fossil Fuel Hydrogen: Technical, Economic and Environmental Potential*. Springer, 2020. ISBN 978-3-030-30907-7.
- [4] *Vodíková strategie České republiky* [online]. In: . [cit. 2023-12-18]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie\\_v030b.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf)
- [5] KOTCHOURKO, Alexei a Thomas JORDAN. *Hydrogen Safety for Energy Applications Engineering Design, Risk Assessment, and Codes and Standards*. Cambridge: Elsevier, 2022. ISBN 978-012-820492-4.
- [6] SMOLINKA, T.; GÜNTHER, M.; GARCHE, J.: *Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien*, Fraunhofer, FCBAT, Kurzfassung des Abschlussberichts, NOW-Elektrolysestudie, 2011
- [7] SHERIF, S.A., D. Yogi GOSWAMI, Elias K. STEFANAKOS a Aldo STEINFELD, ed. *Handbook of Hydrogen Energy*. 1. CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4200-5450-7.
- [8] DRENNEN, Thomas E. a Jennifer E. ROSTHAL. *Pathways to a hydrogen future*. Oxford: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-08046-734-4.
- [9] KALASKAR, V., CONWAY, G., HANDA, G., JOO, S. et al., “Challenges and Opportunities with Direct-Injection Hydrogen Engines,” SAE Technical Paper 2023-01-0287, 2023, doi:10.4271/2023-01-0287
- [10] WALLNER, T., “Efficiency and Emissions Potential of Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles,” SAE Technical Paper 2011-26-0003, 2011, <https://doi.org/10.4271/2011-26-0003>
- [11] The Future of Hydrogen as a Gas Turbine Fuel. *Turbomachinery Magazine* [online]. 2023, (4), 20-23 [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://www.turbomachinerymag.com/view/the-future-of-hydrogen-as-a-gas-turbine-fuel>
- [12] ADLER, Eytan J. a Joaquim R.R.A. MARTINS. Hydrogen-powered aircraft: Fundamental concepts, key technologies, and environmental impacts. *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2023, (141) [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100922>
- [13] FERRIDAY, T.B. a Peter Hugh MIDDLETON. Alkaline fuel cell technology - A review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, (46), 18489-18510 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.203>



- [14] HOEFLINGER, Johannes Hoeflinger a Peter HOFMANN. Air mass flow and pressure optimisation of a PEM fuel cell range extender system. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, (45), 29246-29258 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.176>
- [15] *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology* [online]. 1. Springer, 2007 [cit. 2024-01-28]. ISBN 978-0-387-68815-2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-68815-2>
- [16] Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Difusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* [online]. 2020, (33), 759–773 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s40195-020-01039-7>
- [17] BALLAYOVÁ, Kristýna. *VLIV VODÍKU NA VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A VRSTEV* [online]. Brno, 2022 [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=240787](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=240787). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [18] A study on the Joule-Thomson effect of during filling hydrogen in high pressure tank. *Case Studies in Thermal Engineering* [online]. 2023, (41) [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102678>
- [19] A review of toroidal composite pressure vessel optimisation and damage tolerant design for high pressure gaseous fuel storage. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, (41), 22067-22089 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.039>
- [20] YAMASHITA, A., KONDO, M., GOTO, S., and OGAMI, N., Development of High-Pressure Hydrogen Storage System for the Toyota “Mirai”, SAE Technical Paper 2015-01-1169, 2015, [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: doi:[10.4271/2015-01-1169](https://doi.org/10.4271/2015-01-1169).
- [21] YAMABE, Junichiro, Atsushi KOGA a Shin NISHIMURA. Failure behavior of rubber O-ring under cyclic exposure to high-pressure hydrogen gas. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2013, (35), 193-205 [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.034>
- [22] Study on the high-pressure hydrogen gas flow characteristics of the needle valve with different spool shapes. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2023, (48), 11370-11381 [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.073>
- [23] A Simulation Study of Radial Slits Pressure Regulator for Hydrogen Gas. *Asian Simulation Conference* [online]. 2013, 4(6), 288–297 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-45037-2\\_27](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-45037-2_27)
- [24] Modeling a hydrogen pressure regulator in a fuel cell system with Joule–Thomson effect. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, (44), 1272-1287 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.020>

- [25] Pressure analysis on two-step high pressure reducing system for hydrogen fuel cell electric vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2017, (42), 11541-11552 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.077>
- [26] *Tech Talk - Pressure Regulators for Hydrogen Applications - Fuel Cell Technology - Hyfindr Samways* [online]. 2023, 2023 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QrTwj1T1z0s>
- [27] Datový list. *Agst* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: [https://www.agst-steel.de/cs/AISI\\_316L\\_1.4404.pdf](https://www.agst-steel.de/cs/AISI_316L_1.4404.pdf)
- [28] PHYNOX KL. *Kleinmetals* [online]. 2018 [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.kleinmetals.ch/shop/datenblatt/E/559.pdf>
- [29] Technisches Datenblatt. *Ugitech* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: [https://www.ugitech.com/typo3conf/ext/ugitech/Resources/Public/Scripts/download.php?file=fileadmin/uploads/ugitransfer/docs/UGIWEB\\_51857.pdf](https://www.ugitech.com/typo3conf/ext/ugitech/Resources/Public/Scripts/download.php?file=fileadmin/uploads/ugitransfer/docs/UGIWEB_51857.pdf)
- [30] CENTRUM TECHNICKÉ NORMALIZACE. *Šroubové válcové pružiny vyráběné z drátů a tyčí kruhového průřezu - Výpočet a konstrukce - Část 1: Tlačné pružiny*. 2014.
- [31] SHIGLEY, Joseph E., Charles S. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 7. McGraw-Hill, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [32] SSP SEALS. Everything You Need To Know About FKM Seals. *Sspseals* [online]. 2020 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.sspseals.com/blog/everything-you-need-to-know-about-fkm-seals>
- [33] *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 79/2009* [online]. In: . 2009 [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:035:0032:0046:CS:PDF>
- [34] HIRSCHER, Michael, ed. *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage*. WILEY-VCH, 2010. ISBN: 978-3-527-32273-2.
- [35] VIRGAMET. 1.4980, X6NICRTIMOVB25-15-2 - STAINLESS STEEL. *Virgamet* [online]. 2024 [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://virgamet.com/x6nicrtimovb25152-1-4980-s66286-a-286-z5nctdv2515-stainless-steel>
- [36] DRAKEPLASTICS. Product Datasheet Victrex 450 CA30. *Drakeplastics.com* [online]. 2023 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://drakeplastics.com/victrex-450-ca30-carbon-fiber-reinforced-peek-extruded-shapes/>
- [37] ELGILOY. Elgiloy® alloy wire. *Elgiloy* [online]. 2024 [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://www.elgiloy.com/wire-elgiloy-alloy>
- [38] *Recent Trends in Fuel Cell Science and Technology* [online]. Springer New York, NY, 2007 [cit. 2024-05-17]. ISBN 978-0-387-35537-5. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1007/978-0-387-68815-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68815-2_8)

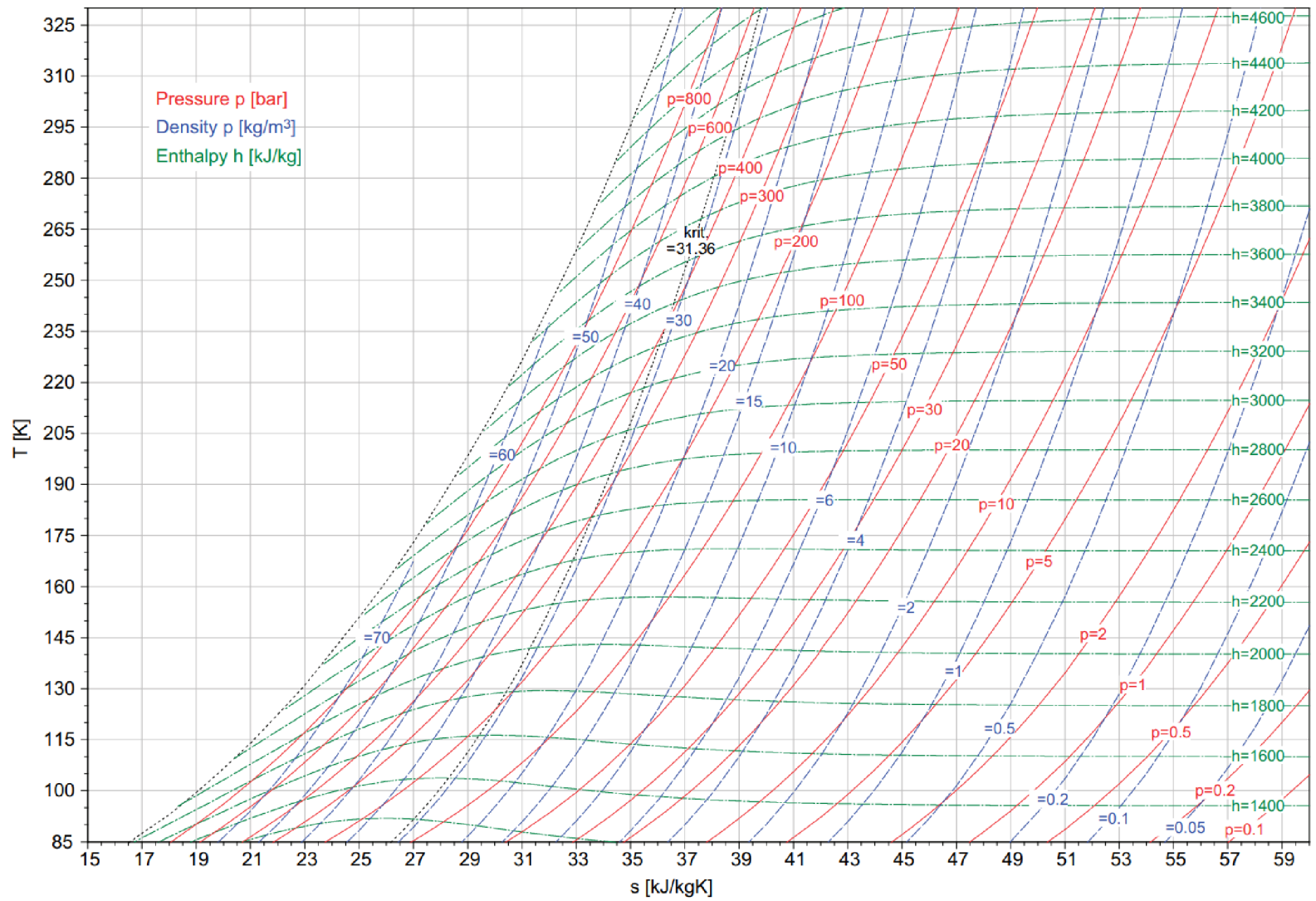
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	[m <sup>6</sup> Pa/mol <sup>2</sup> ]	kohézní tlak
$b$	[m <sup>3</sup> /mol]	objem molekul větší než součet objemů atomů
$C$	[–]	poměr vinutí
$c_p$	[J/kg·K]	měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
$D_p$	[mm]	střední průměr pružiny
$d_p$	[mm]	průměr drátu pružiny
$D_v$	[mm]	velký průměr otvoru víka regulátoru
$d_v$	[mm]	malý průměr otvoru víka regulátoru
$F$	[N]	zatěžující síla
$F_a$	[N]	amplitudová síla
$f_e$	[Hz]	první rezonanční frekvence
$F_i$	[N]	předpětí pružiny
$F_m$	[N]	síla od malé pružiny
$F_{max}$	[N]	maximální zatěžující síla pružiny
$F_{min}$	[N]	minimální zatěžující síla pružiny
$G$	[GPa]	modul pružnosti ve smyku
$H$	[J]	entalpie
$k$	[N/mm]	tuhost pružiny
$n_a$	[–]	počet činných závitů
$p$	[MPa]	tlak vodíku
$r$	[J/kg·K]	měrná plynová konstanta
$S_p$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha na kterou působí tlak vodíku
$T$	[K]	teplota
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$v$	[m <sup>3</sup> /kg]	měrný objem
$\alpha$	[10 <sup>-6</sup> /K]	koeficient tepelné roztažnosti
$\Delta y$	[mm]	dovolený pohyb pružiny
$\lambda$	[–]	součinitel přebytku vzduchu
$\mu_{JT}$	[K/MPa]	Joulův-Thomsonův koeficient
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota materiálu
$\tau_a$	[MPa]	maximální amplitudové napětí
$\tau_{max}$	[MPa]	maximální smykové napětí
$\Phi$	[–]	součinitel přebytku paliva

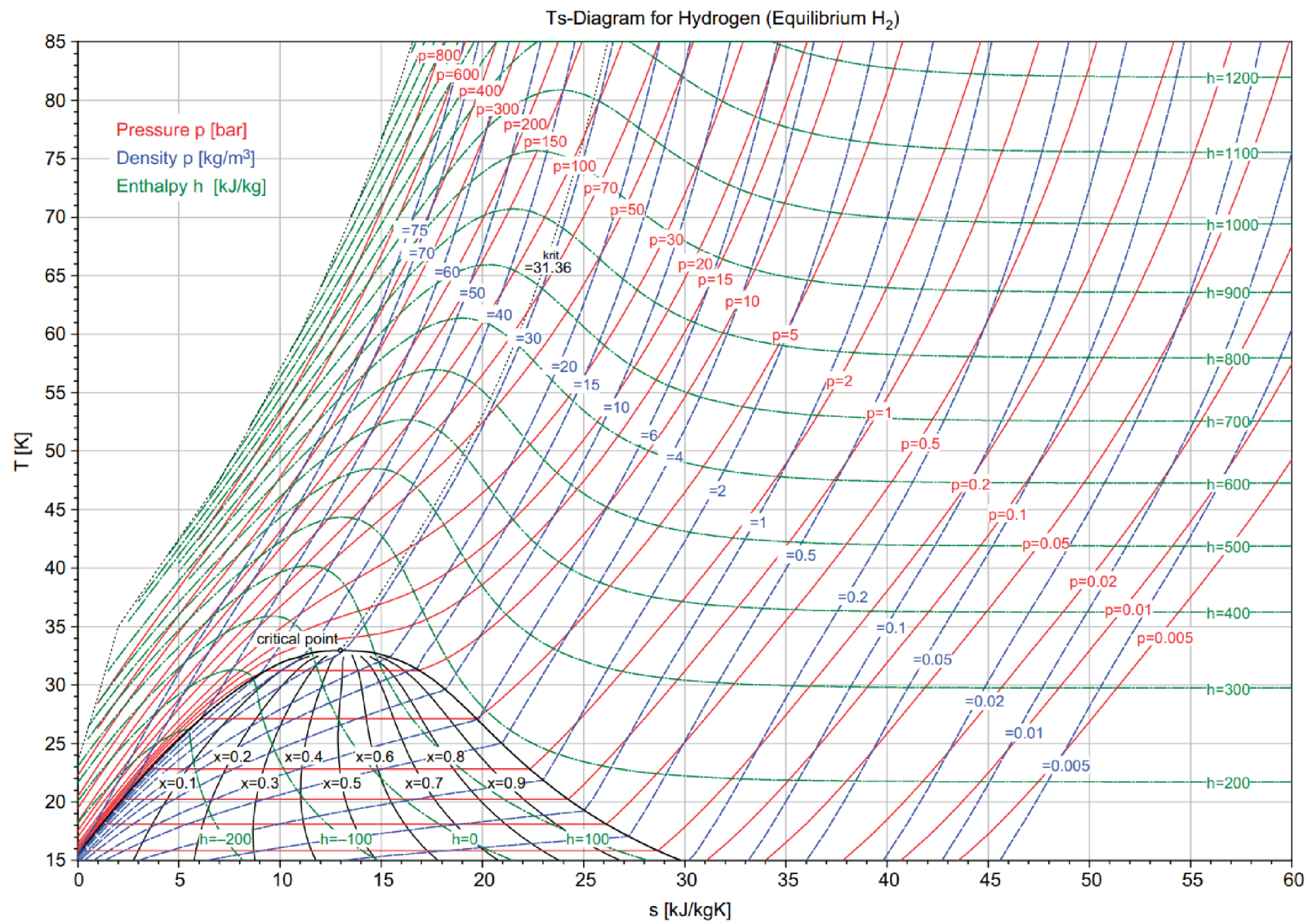
## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: T-s diagram vodíku pro teplotu 85 až 325 K
- Příloha 2: T-s diagram vodíku pro teplotu 15 až 85 K
- Příloha 3: Průběh tlaku při průchodu redukčním ventilem
- Příloha 4: Průběh teploty při průchodu redukčním ventilem
- Příloha 5: Pohyb pístu regulátoru
- Příloha 6: Síla vyvíjená vrchní tlačnou pružinou
- Příloha 7: Výkres sestavy
- Příloha 8: Model regulátoru tlaku

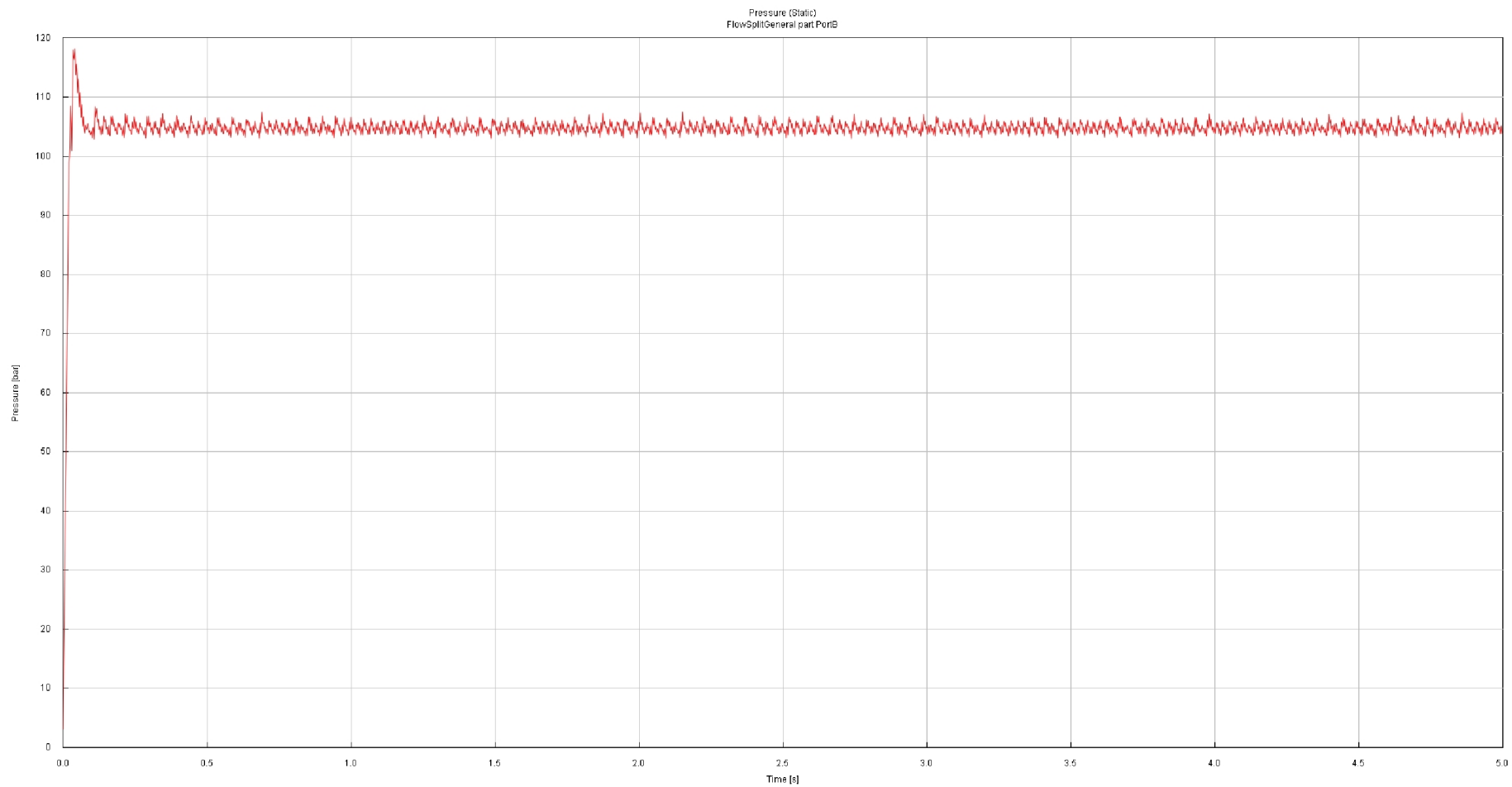
Ts-Diagram for Hydrogen (Equilibrium H<sub>2</sub>)



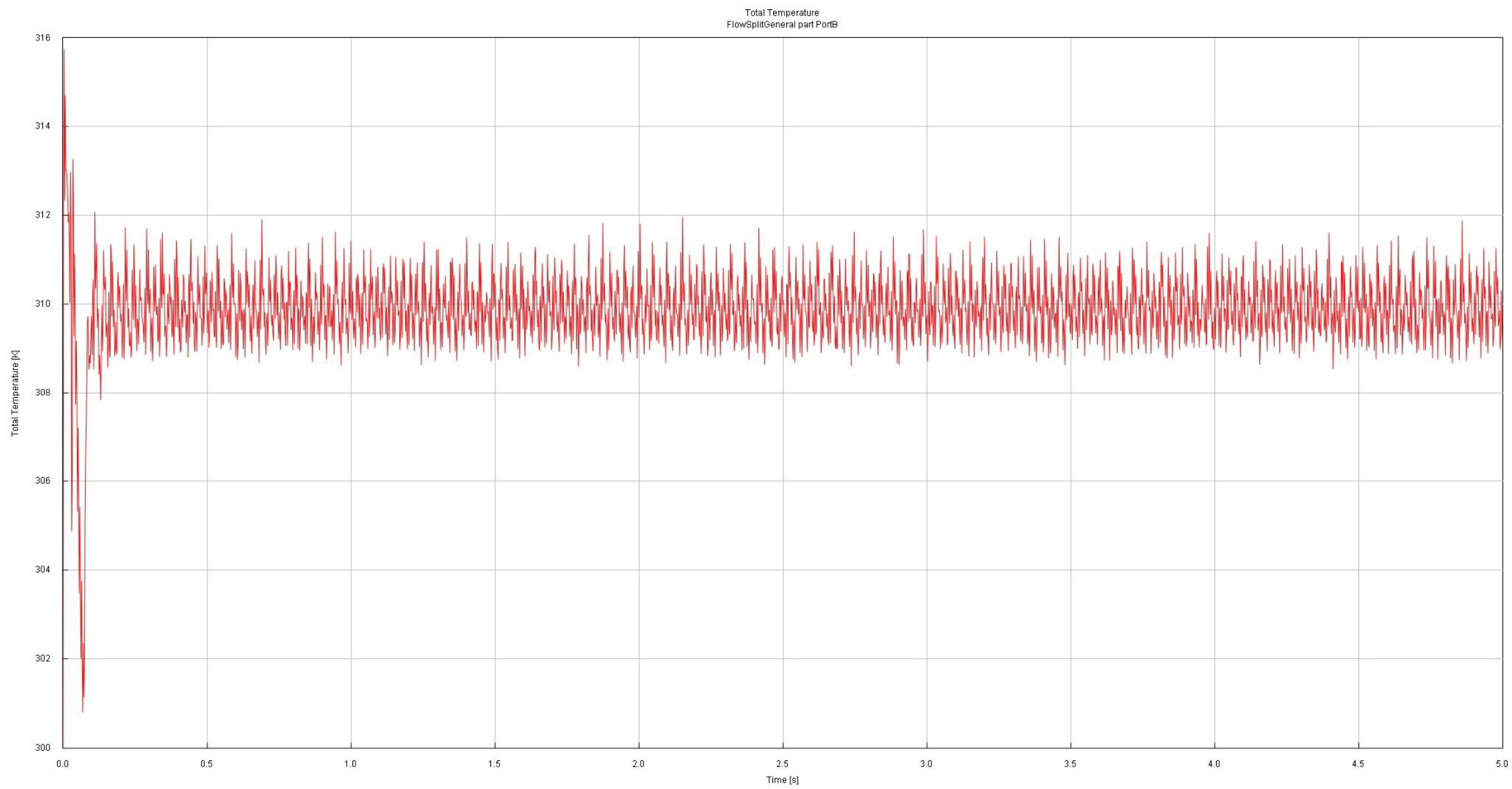
Příloha 1: T-s diagram vodíku pro teplotu 85 až 325 K [34]



Příloha 2: T-s diagram vodíku pro teplotu 15 až 85 K [34]

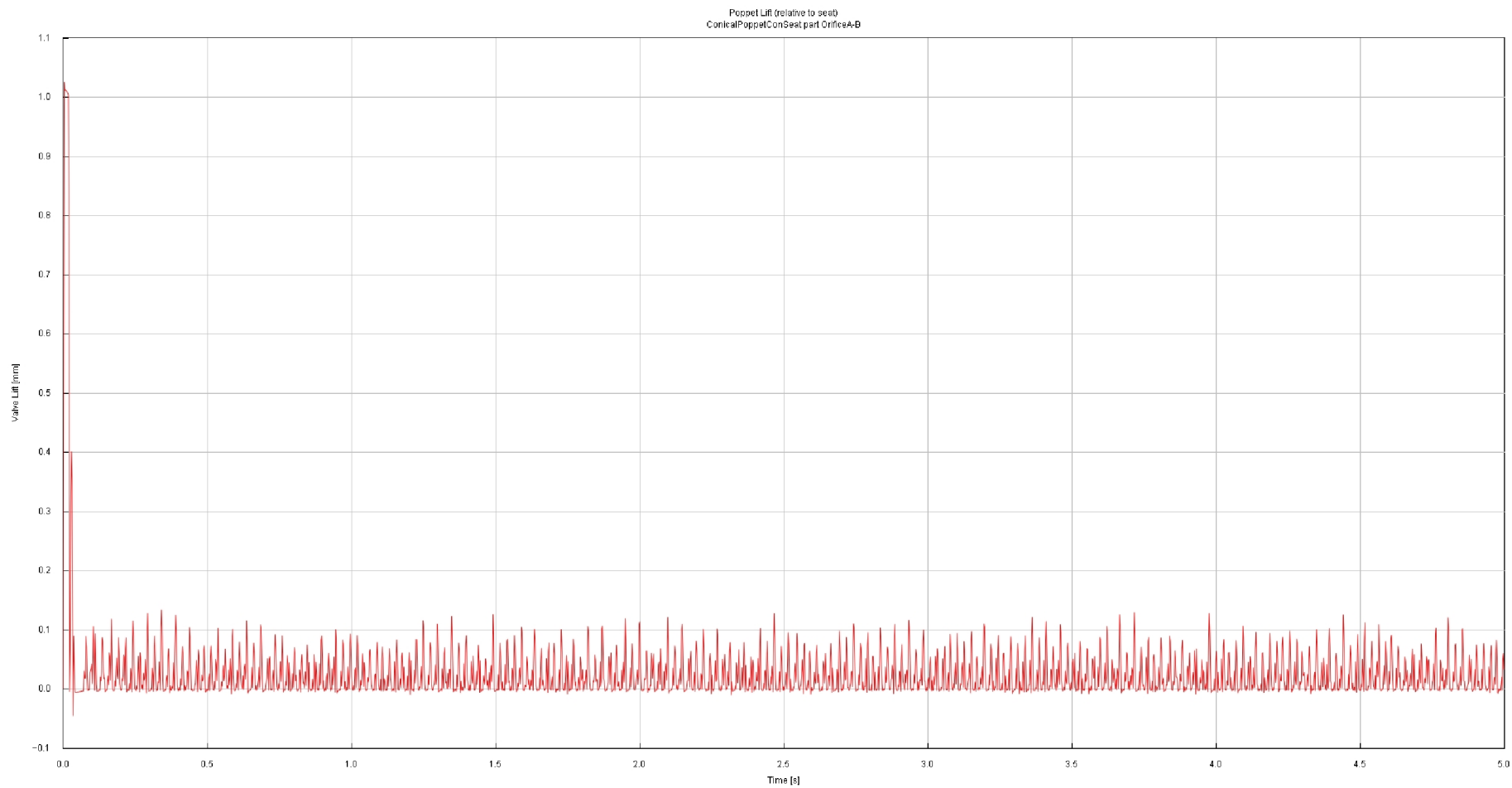


Příloha 3: Průběh tlaku při průchodu redukčním ventilem

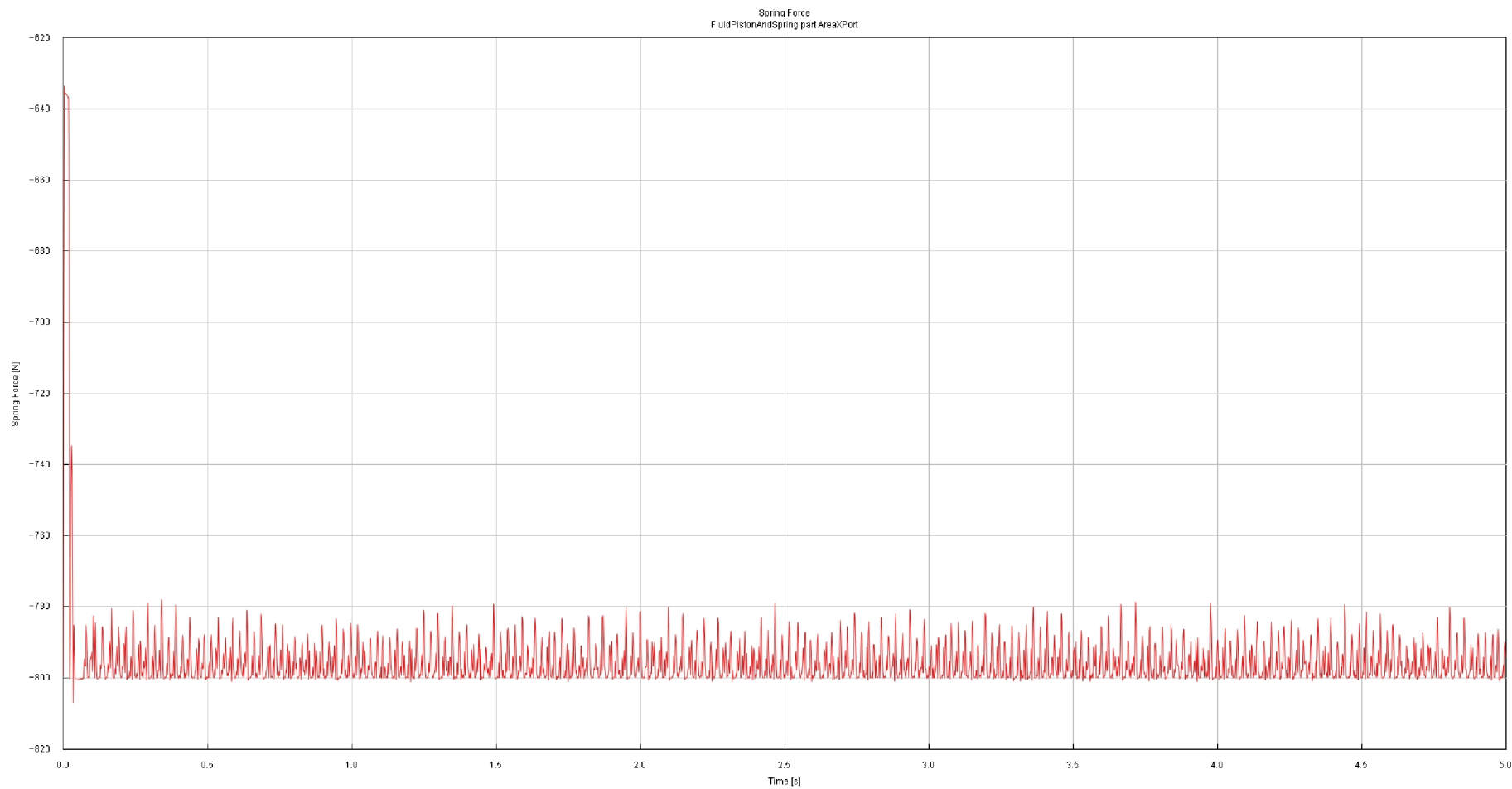


Příloha 4: Průběh teploty při průchodu redukčním ventilem





Příloha 5: Pohyb pístu regulátoru



Příloha 6: Síla vyvíjená vrchní tlačnou pružinou