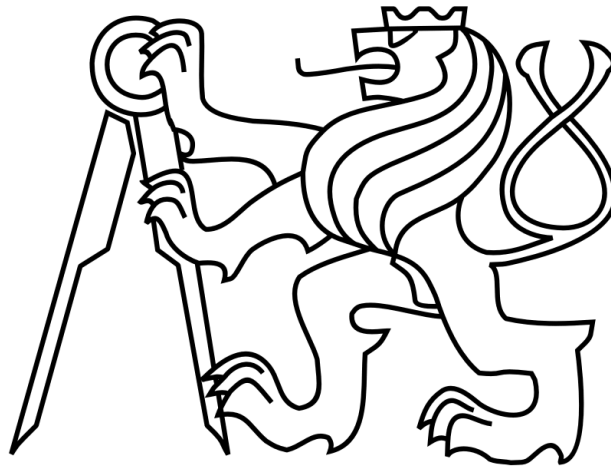


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



Zařízení pro dopravu vodíku
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce:

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Vypracoval:

Edoardo Tasini

2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tasini** Jméno: **Edoardo** Osobní číslo: **509137**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zařízení pro dopravu vodíku

Název bakalářské práce anglicky:

Equipment for hydrogen transport

Pokyny pro vypracování:

- Zpracujte literární, patentovou a průmyslovou rešerši zaměřenou na zásobníky, armatury a zařízení pro dopravu vodíku v rámci vodíkového hospodářství stacionárních i mobilních čerpacích stanic a v technologiích jeho spalování a chemického využití.
- Podrobně se zaměřte na dopravu vodíku s využitím plynovodů pro zemní plyn.
- Navrhněte jednotlivá zařízení a jejich zapojení pro směšování vodíku a zemního plynu pro následnou dopravu v plynovodech, následné využití směsi případně zpětnou separaci vodíku.
- Zpracujte základní technologická schémata jednotlivých řešených uzlů, navrhněte základní parametry zařízení včetně limitů pro jejich materiálové provedení.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Edoardo
Příjmení autora:	Tasini
Název práce česky:	Zařízení pro dopravu vodíku
Název práce anglicky:	Hydrogen transport technologies
Rozsah práce:	počet stran: 52 počet obrázků: 21 počet tabulek: 9 počet příloh: 4
Akademický rok:	2023/2024
Jazyk práce:	Český
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	TZSI
Vedoucí práce	Prof. Ing. Tomáš Jirout, PhD.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma zařízení pro dopravu vodíku vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze, dne.....

.....

Edoardo Tasini

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Tomášovi Jiroutovi, PhD. za ochotný přístup a přínosné připomínky při psaní bakalářské práce. Taktéž bych chtěl vyjádřit vděk pedagogům fakulty strojní ČVUT, kteří mi byli nápomocni během celé doby studia.

Dále bych velice rád poděkoval rodině a přátelům za jejich vzácnou podporu v těch nejtemnějších chvílích, které nechyběli během bakalářského studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá možností přepravy vodíku smícháním do existující infrastruktury plynovodů. Během celé práce bylo provedeno zkoumání technologií používaných ve vodíkovém průmyslu. Dále byly v rámci fází vstřikování vodíku do sítě a následné separace od zemního plynu vypočteny klíčové parametry, jako je rychlost vstřikování vodíku, rozměry potrubí, výkon kompresorů a rozměry membránových modulů. To nakonec vedlo k návrhu dvou strojně technologických schémat potrubí.

Abstract

This thesis deals with the possibility of hydrogen transportation through its blending into existing natural gas pipeline infrastructure. Throughout this study, an exploration of the technologies used within the hydrogen industry was conducted. Moreover, within the stages of hydrogen injection in the gridline and subsequent separation from natural gas, key parameters such as hydrogen velocity, pipeline dimensions, compressors' power and membrane module dimensions were calculated. This ultimately led to the design of two piping and instrument diagrams.

Klíčová slova

Vodík, zemní plyn, blend, potrubní doprava, separace vodíku

Key words

Hydrogen, natural gas, blend, pipeline transport, hydrogen separation

Obsah

1. Úvod	9
2. Výroba vodíku	10
2.1. Elektrolýza vody	10
2.2. Parní reforming	11
2.3. Parciální oxidace ropných zbytků	11
2.4. Startupy a nové firmy zabývající se výrobou vodíku.....	12
2.5. Bílý vodík.....	12
3. Využití vodíku.....	13
3.1. Čistý vodík	13
3.2. Projekt HYFLEXPOWER.....	13
3.3. Projekt FLEX4H2	14
4. Skladování a doprava	15
4.1. Přeprava v nádobách	15
4.2. Blend vodík – zemní plyn	16
4.2.1. Chování vodíku ve směsi.....	16
5. Výpočet směšování vodíku do zemního plynu.....	18
5.1. Výchozí parametry	18
5.2. Výpočet vlastností plynů.....	18
5.3. Výpočet hmotnostních toků a přenášené energie	19
5.4. Návrh vstupu do potrubí.....	20
5.4.1. Výsledky.....	21
6. Návrh komprese vodíku	23
6.1. Tlak vodíku po kompresi.....	23
6.2. Výpočet kompresorů a chladících zařízení	24
7. Technické provedení vstupu.....	27
7.1. Kompresory na vodík	28
7.1.1. Pístové kompresory	28
7.1.2. Membránové kompresory	28
7.1.3. Objemové rotační kompresory	29
7.1.4. Turbokompresory	30
7.1.5. Volba kompresoru.....	31
7.2. Technologie chlazení vodíku.....	31
7.3. Regulační prvky	32
7.3.1. Regulační nádoby	32

7.3.2. Ventily.....	32
7.4. Dimenzování trubek	32
7.5. Statické směšovače.....	33
7.6. P&ID schéma provozu	34
8. Konečné využití blendu	35
8.1. Spalování v turbíně.....	35
8.2. Spalování v kotli.....	35
8.3. Zpětná separace vodíku ze zemního plynu	35
8.3.1. Membránová separace	35
8.3.2. PSA.....	38
8.3.3. Kombinovaná separace membránový modul – PSA	39
8.4. Technické provedení navržené zpětné separace	40
9. Závěr	42
Seznam symbolů	43
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek.....	46
Přílohy	47
Bibliografie.....	48

1. Úvod

Vodík je nezbytným prvkem pro dosažení uhlíkovou neutralitu Evropy do roku 2050, jako účel Evropské zelené dohody. Čistý vodík, vyrobený z obnovitelných zdrojů energie, představuje uložisko energie, které lze využít k výrobě syntetických paliv, pohonu motorů nebo turbín. Vedlejší produkt při spalování vodíku je voda a nevznikají žádné skleníkové plyny.

V roce 2022 představoval vodík méně než 2 % energetického mixu v Evropě, přičemž 96 % tohoto vodíku bylo vyrobeno způsoby vedoucí ke mnoho emisí CO₂. Podle strategické vize „Zelená dohoda pro Evropu“ má podíl vodíku v evropském energetickém mixu vzrůst až na 13-14 % do roku 2050. Tento vodík musí být nízkouhlíkový nebo obnovitelný. Zejména elektrolytický vodík bude hrát klíčovou roli v této transformaci. Evropská vodíková strategie předpokládá postupný rozvoj vodíkových technologií do roku 2050. Cílem první fáze strategie, která probíhá od roku 2020 do konce roku 2024, je instalace nejméně 6 GW vodíkových elektrolyzérů a výroba až 1 milionu tun vodíku z obnovitelných zdrojů. V období 2025 až 2030 se má vodík stát nedílnou součástí energetického systému – cílem je instalovat nejméně 40 GW vodíkových elektrolyzérů a výroba až 10 milionů tun obnovitelného vodíku. V poslední fázi, od roku 2030 až do roku 2050, by měly obnovitelné vodíkové technologie být vyspělé a být nasazeny ve velkém měřítku [1]. Za účelem dosažení těchto cílů, Evropská komise zřídila Evropskou vodíkovou banku. Evropská vodíková banka představuje finanční nástroj sloužící k překonání patové situace ve vodíkovém hospodářství, jež zahrnuje výrobce a spotřebitele vodíku. Výrobci se zdráhají investovat do výzkumu výroby vodíku, protože chtějí mít jistotu jeho distribuce. Spotřebitelé se naopak obávají nejisté dostupnosti vodíku [2].

Česká republika je zemí s bohatou historií chemického průmyslu. Hlavní způsoby výroby vodíku zde představují parciální oxidace ropných zbytků a parní reforming zemního plynu. V současné době má vodík vyrobený v České republice emisní stopu 116 g CO₂/MJ. Pokud by se vodík vyráběl elektrolyzou vody pomocí elektrické energie ze sítě, emisní stopa by se zvýšila na 176 g CO₂/MJ. Tento nárůst je dán geografii České republiky, která omezuje rozsáhlou instalaci obnovitelných zdrojů energie. Vývoj se tedy soustředí spíše na dopravu vodíku, konkrétně na dopravu využívající stávající sestavu plynovodů na zemní plyn. To proto, že Česká republika je důležitým tranzitním státem, který může propojit Evropu s vodíkem z východního, z jižního, nebo ze severozápadního směru [3].

Cílem této práce je zkoumat stávající a vyvíjející se technologie pro skladování, přepravu a zpracování vodíku. Úvodní část se věnuje rešerši vodíkových technologií. Konkrétně druhá kapitola se zabývá produkcí, třetí využitím a čtvrtá přepravou vodíku. Pátá kapitola se zabývá návrhem přepravy vodíku ve směsi se zemním plynem. Následně jsou představeny výpočtové modely zkoumající tuto problematiku. Šestá kapitola se zabývá výpočtem kompresí a chlazení vodíku, jehož výsledkem je celkový potřebný mechanický příkon a tepelný výkon. Sedmá kapitola je věnována rešerši a technickému provedení vstupu vodíku do plynovodní soustavy. Zde je také představen strojně technologické výkres provozu. V osmé kapitole jsou nakonec porovnány různé výstupy, jako je spalování v turbíně nebo zpětná rekuperace vodíku ze směsi.

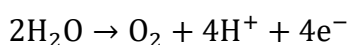
2. Výroba vodíku

Přestože je vodík nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, na Zemi se nenachází ve volné formě, ale pouze v chemických sloučeninách. Proto musí být vyráběn chemickými procesy. Vodík lze vyrábět různými způsoby a z různých zdrojů energie. Proto se vodík klasifikuje jinou barvou dle způsobu výroby a dle množství produkovaných emisí [4].

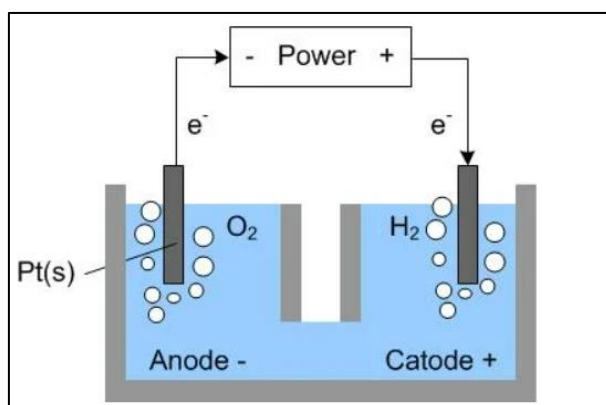
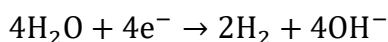
2.1. Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces, při kterém dochází k rozštěpení vody na kyslík a plynný vodík za působení elektřiny. Tento nesamovolný chemický proces probíhá tak, že elektrický proud protéká mezi anodou a katodou, které jsou ponořeny do elektrolytu (voda).

U anody dojde k oxidaci (ztrátě elektronů):



U katody dojde k redukci (získání elektronů):



Obr. 1: Schéma elektrolýzy vody [5]

Produkty této reakce jsou čistý kyslík, který vzniká na anodě, a čistý vodík, který vzniká na katodě. Proces může probíhat i za pokojové teplotě a je potřeba mít jenom elektřinu k dispozici. Nicméně, účinnost současně dostupných elektrolyzátorů se pohybuje mezi 50 % až 70 %, což je poměrně nízká.

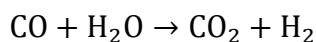
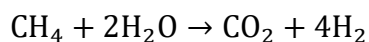
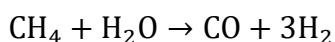
Vodík vyrobený touto metodou se dělí na základě původu elektřiny použité při elektrolýze. Pokud je elektřina vyrobena z konvenčních elektráren spalujících uhlí, tak je vodík klasifikován jako *černý* nebo *hnědý*. Pokud je elektřina vyrobena z obnovitelných zdrojů energie, jako jsou větrné, sluneční, nebo vodní elektrárny, vodík je pak klasifikován jako *zelený*. Evropská vodíková strategie klade důraz na tento druh vodíku. Hlavním problémem tohoto způsobu výroby vodíku je jeho závislost na lokálních meteorologických podmínkách, proto nezaručí nepřetržitou výrobu elektrické energie. Zelený vodík by zatím sloužil jako akumulátor energie v případech přebytku obnovitelné elektřiny v síti, které nastávají při náhlém zlepšení podmínek pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů. Mezi tato zlepšení se řadí náhlý nárůst rychlosti větru nebo dostatek slunečního svitu [2].

Řada Evropských států zvažuje možnost využití a zvětšení objemu energie vyrobené z jádra. Největšími zastánci zvětšení objemu produkce jádra jako zdroj nízkouhlíkové energie v evropském energetickém mixu jsou zatím Švédsko a Nizozemsko. Vodík, který je vyrobený z jaderné energie, je klasifikovaný jako *růžový*. V rámci české vodíkové strategie se zvažuje možnost výroby vodíku v blízkosti jaderných elektráren. Výhodou je nepřetržitý tok elektřiny, který umožňuje stálý provoz elektrolyzátorů. Dále se zvažuje využití vysokoteplotního rozkladu vody na bázi vysokoteplotních reaktorů, avšak tato technologie je zatím ve výzkumu [3] [6].

2.2. Parní reforming

Parní reforming je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. To je chemický proces, při kterém se zemní plyn sloučí s vodní párou. Při vysokých teplotách tato směs společně reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého, který lze následně sloučit s vodní párou. Díky tomuto sloučení vzniká vodík a oxid uhličitý.

Chemické rovnice procesu:

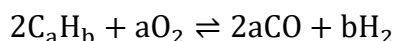


Všechny reakce jsou endotermické, proto probíhají při teplotách 1200 °C – 1400 °C, nebo 700 °C – 900 °C za přítomnosti katalyzátoru. Celkově je účinnost tohoto procesu poměrně vysoká, pohybuje se kolem 75 % [7].

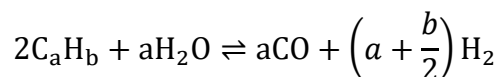
V roce 2020 parní reforming metanu tvořil 96 % vyrobeného vodíku v Evropě. Vodík získaný tímto způsobem je klasifikovaný jako *šedý*, protože vznikne při spalování zemního plynu a v důsledku toho se uvolňuje velké množství skleníkových plynů. Pokud se tento způsob výroby spojí s metodami na zachycení a uložení nebo zpracování oxidu uhličitého (CCS nebo CCU), vyrobený vodík by se klasifikoval jako *modrý*. Evropská strategie vodíku má za cíl omezit tuto metodu a zároveň podpořit výrobu vodíku elektrolýzou z obnovitelných zdrojů energie [2].

2.3. Parciální oxidace ropných zbytků

Tato metoda spočívá v zplyňování a zpracování ropných frakcí po destilaci ropy v rektifikačních kolonách. Jsou to především těžké zbytky z vakuové destilace, nebo z termického a katalytického štěpení. Lze zpracovat také i plynné a kapalné suroviny z primární a sekundární těžby ropy. Pro parciální oxidace uhlovodíkových surovin je potřeba použít kyslík o čistotě 95 až 99 %. Reakce je exotermní a reakční směs dosáhne teploty až 1 500 °C:



Následně se zbývající část suroviny, která nereagovala, zplyňuje vodní párou. Reakce je endotermní a vede ke snížení teploty produktů na 1 350 °C. Navíc při této reakci vznikne větší množství vodíku:



Zpracované suroviny obsahují i sírné sloučeniny, proto se výsledná plynná směs po oxidaci skládá ze CO, CO₂, H₂O, H₂, H₂S a COS [8].

Z toho je patrné, že při této metodě výroby vodíku vzniká mnoho škodlivých plynů, které se převážně vypouští do atmosféry. Přesto jde o nejrozšířenější způsob výroby vodíku v České republice. Je to metoda s vysokou životaschopností, ale je postupně omezována v důsledku zvyšující se ceny emisních povolenek. Proto je v rámci české vodíkové strategie nutné tuto metodu spojit s metodami na zachycení a uložení nebo zpracování CO₂ (CCS nebo CCU). Tak by významná část vyrobeného vodíku v Česku přešla z klasifikace *černé* do *modré* [3].

2.4. Startupy a nové firmy zabývající se výrobou vodíku

Na základě trendu postupného snižování využívání fosilních paliv vzniklo několik startupů a společností specializujících se na výrobu vodíku. Za zmínku stojí firma *Enapter*, která má základny v Thajsku, Rusku, Itálii a Německu. Vize firmy Enapter je zpřístupnění výroby vodíku firmám nebo domácnostem díky sadě AEM elektrolyzérů. Navíc se tato společnost v roce 2021 umístila na prvním místě v soutěži *Earthshot Prize*, kterou založil princ William z Walesu, jejímž cílem je najít a podpořit udržitelná řešení pro klimatickou krizi. S vyhranou cenou 1 milion dolarů se *Enapter* zaměřuje na vytvoření závodu pro sériovou výrobu svých katalyzátorů [9].

V Česku působí podobná společnost, pod názvem *Leancat*. Založená v roce 2016 Vladimírem Matolínem, profesorem na matematicko – fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze, se tato společnost zaměřuje na výzkum nových katalyzátorů pro elektrolyzéry. Tým této společnosti vyvinul způsoby výroby elektrolyzérů s nižším obsahem drahých kovů, jako je například platina. Nyní se *Leancat* primárně zabývá vývojem a konstrukcí testovacích stanic palivových článků, ale také se zaměřuje na výrobu a prodej vlastních elektrolyzérů [10].

2.5. Bílý vodík

Je vhodné zmínit i existenci *bílého* vodíku. Touto barvou se označuje vodík, který se nachází v přírodních ložiscích Země. Velké nahromadění přírodního vodíku bylo dlouho považováno za nemožné, jelikož vzniká pouze za výjimečných podmínek v zemské kůře a plášti, v důsledku chemických reakcí, které jsou převážně spojeny s oxidací železných minerálů.

Za účelem vyhodnocování hladiny metanu v podloží Lotrinska ve Francii vyvinuli vědci z laboratoře *GeoResources* Francouzského národního vědeckého výzkumného centra sondu schopnou měřit plyn rozpuštěný ve vodě ve skalních útvech až do hloubky 1 200 metrů. Díky této technologii identifikovali vysoké koncentrace vodíku v podzemí, které se v hloubce 1 250 m zvýšily až na 20 %. Tento objev by mohl být velkým zlomem pro energetiku, a předpokládá se, že podobná ložiska mohou existovat i v Alpách a Pyrenejích. [11].

3. Využití vodíku

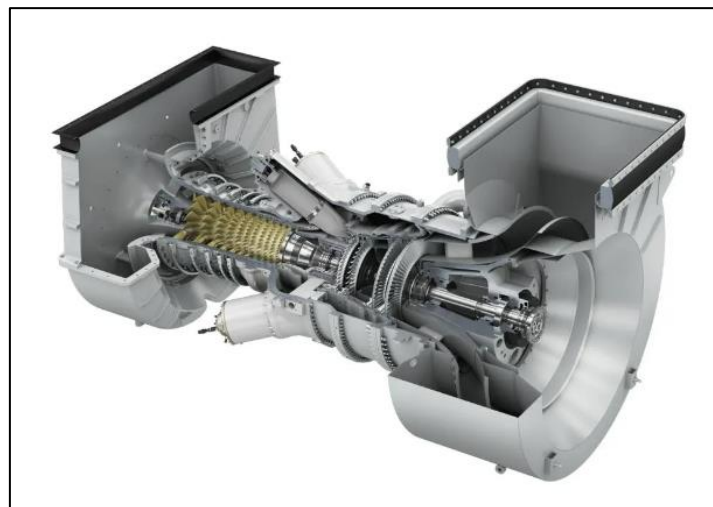
3.1. Čistý vodík

Samotný vodík lze použít v různých oblastech [12] [13]. V palivových článcích může být využit k přeměně jeho chemické energie na elektrickou, za účelem pohonu autů, kamionů nebo vlaků. K tomuto účelu je vyžadován vodík s čistotou minimálně 99,97 % [14]. V jiných průmyslových oblastech je pro použití obecně vyžadován vodík s čistotou minimálně 98 % [14]. V chemickém průmyslu se používá při výrobě amoniaku, nebo syntetických paliv. V hutnictví je důležitým prvkem při redukci železné rudy, také probíhají studie zkoumající jeho využití při výrobě tepla při zpracování kovů.

Existuje i mnoho výzkumů zabývajících plynových turbín, které mohou fungovat na 100 % vodíku. Současné plynové turbíny jsou schopny pracovat se směsí s nízkou koncentrací vodíku. Hlavním problémem při návrhu plynových turbín poháněné směsí zemní plyn – vodík je změna charakteristik spalování. V důsledku nižší objemové hustoty energie směsi ve srovnání se samotným zemním plynem, musí být rychlost proudění směsi vyšší. Proto se při spalování zkracuje doba mezi vstřikováním a zážehem. Dále se zvětšují tlakové a teplotní meze pro dosažení výbuchu. Největším nebezpečím je riziko zpětného prošlehnutí plamene (flashback). Řešením je snížení množství spalovaného paliva, což vede k posunutí plamene dále od hořáku. Nevýhodou tohoto řešení je snížení výkonu turbíny. Spalování směsi vodíku má tendenci probíhat při vyšších teplotách než spalování samotného zemního plynu, což může zvýšit emise NO a NO₂. Další negativum představuje odpadní produkt spalování, tj. vysokoteplotní pára, snižující životnost součástí turbíny v důsledku koroze a tečení materiálu [15].

3.2. Projekt HYFLEXPOWER

HYFLEXPOWER je projekt který zahrnuje firmy Siemens Energy, ENGIE, Centrax, Arttic, Německé letecké centrum (DLR) a čtyři evropské univerzity. Jeho cílem bylo navrhnout elektrárnu na výrobu elektřiny z vodíku prostřednictvím plynových turbín s nízkými emisemi. Tento projekt vedl k vytvoření turbíny SIEMENS SGT-400, která byla instalována v závodě firmy Smurfit Kappa ve francouzském městě Sailat-sur-Vienne.

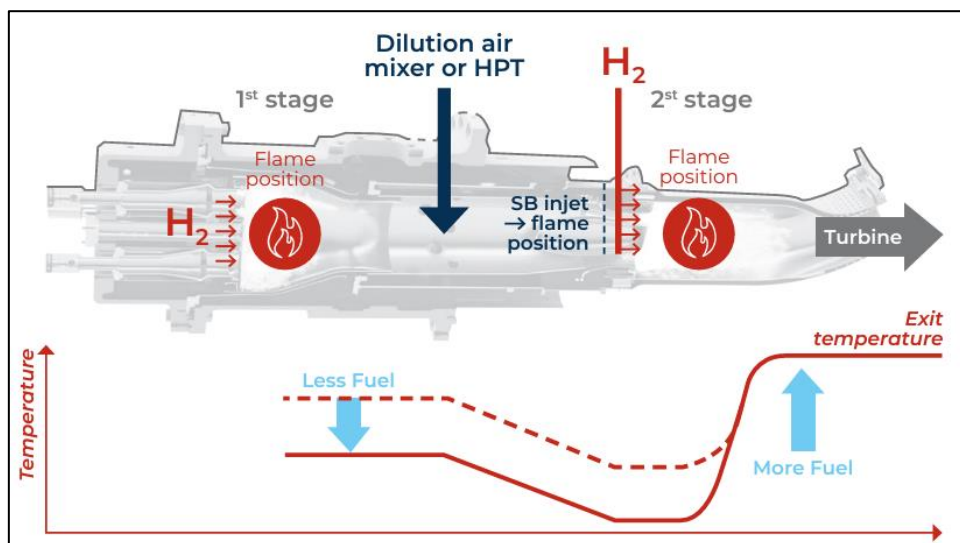


Obr. 2: Řez turbíny SGT-400 [16]

Tato turbína je vybavena speciálními hořáky, které snižují emise NO_x až na 15 ppmv (15 % O_2). Turbína lze provozovat se směsí plynu obsahující až 10 % vodíku. Při použití difuzních hořáků, které nesnižují emise NO_x , je možné turbínu provozovat se směsí obsahující až 65 % vodíku.

3.3. Projekt FLEX4H2

FLEX4H2 je projekt vedený společností Ansaldo Energia a zahrnuje dalších osm společností z Francie, Německa, Švýcarska, Belgie a Norska. Zahájen v začátku roku 2023, tento projekt plánuje do roku 2026 vytvořit plynovou turbínu fungující se 100 % vodíkem. Turbína bude pracovat se sekvenčním spalováním vodíku při konstantním tlaku (Obr. 3) pro dosažení nízkých hodnot emisí NO_x i při náročných podmínkách spalování vodíku. [17].



Obr. 3: Sekvenční spalování v turbíně GT36 [18]

4. Skladování a doprava

Vodík je pouze nosičem energie, nikoliv jeho zdrojem. Jak při jeho výrobě, tak při konečném využití dochází k energetickým ztrátám. Celková energetická účinnost procesu přeměny vodíku zahrnuje kromě samotné přeměny vodíku v elektrickou energii i skladování a přepravu tohoto prvku.

Vodík je obtížně zpracovatelný plyn, jelikož je to velmi malá částice skládající se pouze z jednoho protonu a jednoho elektronu. Kvůli své velmi nízké hustotě, je nutné ho skladovat pod vysokým tlakem a při nízkých teplotách. Vodík je schopen pronikat materiály: prostupuje skrze polyethylenovými stěnami a u ocelí způsobuje tzv. vodíkové zkřehnutí [13]. Vodík je vysoce hořlavý plyn, jeho plamen je při spalování/hoření navíc neviditelný. Tato skutečnost negativně ovlivňuje detekci případných požárů, které jsou vodíkem způsobeny [19]. Při použití veškerých armatur, ventilů a dalších zařízení používaných na transport vodíku je nutné dbát na dobrou těsnost jednotlivých dílů těchto soustav, aby bylo zamezeno úniku vodíku. To je důležité, protože vodík má velmi nízkou inverzní teplotu ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Při expanzi (v případě úniku) při teplotách nad touto hodnotou se vodík rychle zahřívá [20].

Nejvhodnějšími materiály pro potrubí, ventily nebo nádoby ve vodíkovém průmyslu jsou austenitické nerezové oceli, slitiny hliníku, měď a slitiny mědi. Méně vhodné jsou nikl a slitiny niklu, jelikož jsou velmi náchylné k vodíkovému křehnutí. Šedé litiny a houževnaté litiny jsou také nevhodné. Dále, pokud je to možné, je lepší se vyhnout použití dokončovacích metod obrábění, jako jsou broušení nebo honování. Hladší povrch podporuje pronikání vodíku do materiálu [21].

4.1. Přeprava v nádobách

Kvůli své nízké energetické hustotě je nutné vodík skladovat ve speciálních nádržích při vysokém tlaku, obvykle v rozmezí od 350 do 700 barů. Případně lze vodík skladovat v kapalném stavu, a to podchlazením na $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obě metody jsou zřejmě vysoce energeticky náročné. Pro transport by se pak využila cestní nebo kolejová doprava [22].

Nádrže na skladování vodíku lze rozdělit do čtyř typů [23]:

- Tlaková nádoba z oceli nebo hliníku. Je nejlevnější ale také nejtěžší, a maximální tlak skladovaného vodíku je obvykle 200 bar.
- Tlaková nádoba z oceli ovinutá kolem přímé válcové části kompozitním materiálem (z uhlíkových nebo skleněných vláken). Maximální tlak skladovaného vodíku je obvykle 300 bar.
- Tlaková nádoba z oceli plně ovinutá kompozitním materiálem (z uhlíkových nebo skleněných vláken). Maximální tlak skladovaného vodíku je obvykle 700 bar.
- Tlaková nádoba z vysoce zhuštěného polymeru plně ovinutá kompozitním materiálem (obecně první vrstva se skládá z uhlíkových vláken a druhá vrstva se skládá ze skleněných vláken). Jedná se o nejlehčí nádobu, maximální tlak skladovaného vodíku dosahuje obvykle 700 bar.

4.2. Blend vodík – zemní plyn

Způsob dopravy vodíku, který nevyžaduje mnoho energie pro chlazení nebo pro tlačení na vysokých tlacích a nevyžaduje realizace nových nádob, je přimíchání vodíku se zemním plynem ve stávající plynovodní soustavu. Provozovatel přepravní soustavy v České republice, *NET4GAS*, provozuje 4 000 km plynovodů. Kromě toho existují i distribuční firmy, jako je *GasNet*, která provozuje 65 000 km distribučních plynovodů. Plynovodní soustava se dělí podle provozních tlaků [24] [25]:

- Velmi vysoký tlak: 4 až 10 MPa. Potrubí z oceli spojené svařováním, určené pro mezistátní přepravu.
- Vysoký tlak: 0,4 až 4 MPa. Potrubí ocelové nebo měděné, určené pro vnitrostátní distribuci.
- Střední tlak: 5 kPa až 0,4 MPa. Potrubí měděné nebo z polyethylenu, určené pro místní nebo průmyslovou distribuci.
- Nízký tlak: do 5 kPa. Potrubí měděné nebo z polyethylenu, určené pro domovní distribuci.

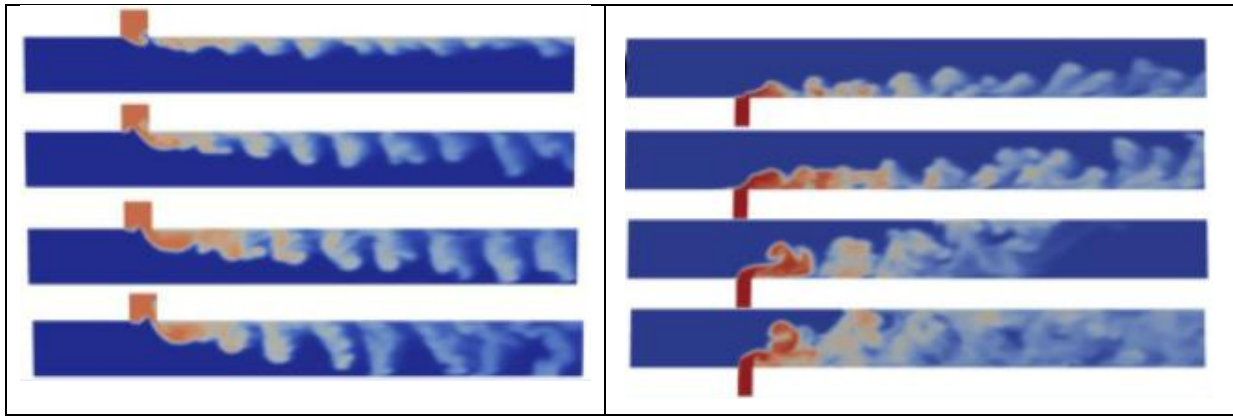
Vodík by se vstříkl do soustavy tam, kde jsou vysoké až velmi vysoké tlaky, aby bylo možné ho přepravovat na velké vzdálenosti. Tím by plynovodní síť sloužila nejen jako dopravní prostředek, ale také jako skladovací zařízení pro vodík.

Tento způsob však přináší mnoho nových výzev. Jednou z nich je zvýšený nárůst únavových trhlin v potrubní oceli v důsledku vodíkového křehnutí nebo nižší těsnost a životnost ventilů. Dále je problémem nižší objemová hustota energie směsi vodíku se zemním plynem ve srovnání se samotným zemním plynem. Táto energetická ztráta se kompenzuje zvýšením rychlosti proudění směsi plynu. Větší rychlost proudění vede ale ke zvýšení tlakových ztrát v potrubí, což způsobuje větší spotřebu energie v kompresních stanicích [13].

4.2.1. Chování vodíku ve směsi

Vstřikování vodíku do proudícího zemního plynu není snadné. Problémy jsou způsobeny především rozdílem molárních hmotností vodíku ($2,02 \text{ g mol}^{-1}$) a zemního plynu, který se převážně skládá z metanu ($16,04 \text{ g mol}^{-1}$). To znamená, že vodík bude mít nízkou hybnost při jeho vstřikování do potrubí, což omezuje jeho pronikání do zemního plynu. Proto je nutné, aby vodík měl vyšší rychlost proudění než zemní plyn. Tento rozdíl může však ovlivnit mechaniku proudění výsledné plynové směsi.

Při zvažování vložení do potrubí přes jednoduchého přechodu ve tvaru T , pronikání může být zlepšeno zmenšením průměru trubice, ze které je vodík přiváděn. Při menších průměrech je rychlost proudění vyšší, což zvyšuje celkovou hybnost. V důsledku své nízké hustoty, vodík má tendenci stoupat, proto je lépe umístit přiváděcí trubku ve spodní části potrubí [13] [26].



Obr. 4: Srovnání míchací schopnosti vodík – zemní plyn při různých rychlostech [26]

Vyšší koncentrace vodíku v blízkosti horní části potrubí vede ke koncentrovanému křehnutí v této části potrubí. Proto se doporučuje mít několik pasivních směšovacích přípravků, umístěných v různých vzdálenostech v potrubí. To by však zvýšilo tlakové ztráty a poklesy v rychlosti proudění.

5. Výpočet směšování vodíku do zemního plynu

Při přepravě vodíku na dlouhé vzdálenosti, zejména při mezistátní přepravě, je vhodnější vodík stlačit do malé trubky vložené v plynovodech o průměru až DN 1 400 [25]. Tento způsob přepravy je již patentován firmou *H2 Clipper* [27] a má výhodu v tom, že vodík má v místě odběru čistotu dosaženou při výrobě. V případě úniku z trubky, by se vodík jednoduše smíchal se zemním plynem, který proudí v plynovodu.

Při přepravě na kratších vzdálenostech lze vodík smíchat se zemním plynem ve stávajících plynovodech. Několik testů, prováděných hlavně v Německu, ukazuje, že přimícháváním vodíku do zemního plynu v poměru až 20 %, nedochází k výrazným ztrátám a problémům při přepravě [28]. Při navrhování dopravního systému a všech jeho součástí (kompresory, přípojky, ventily atd.) je nutné zohlednit problémy, které byly diskutovány v předchozích odstavcích, zejména při volbě materiálu.

5.1. Výchozí parametry

Výpočet vstupních parametrů jako hmotnostní tok a hybnost jednotlivých plynových složek se vztahuje na údaje poskytnuté společností GasNet. To jsou teplota, tlak a množství (v Nm³) zemního plynu proudícího v redukční stanici ve Velkých Němčicích u Brna.

ROČNÍ PRŮMĚR			
\dot{V} [Nm ³]	p [MPa]	T [°C]	ρ_N [kg m ⁻³]
50 000	4	8	0,7061

Tab. 1: Výchozí parametry proudícího zemního plynu [29]

Tyto parametry určují pracovní podmínky pro navrženou přepravní linku. Vybraná směs zemního plynu obsahuje 20 % vodíku. Při návrhu je nutné dodržet předpisy od firmy GasNet [30], které omezují rychlost proudění na 15 m/s v hlavních plynovodech, a na 25 m/s v přípojkách. Tyto předpisy dále stanovují materiály a standardizované rozměry (DN) které je nutné dodržet při dimenzování potrubí.

Při výpočtech se uvažuje ideální chování vodíku, zemního plynu a výsledné směsi. Tím se předpokládá, že plyny se chovají podle ideálních plynových zákonů, a nejsou zahrnuty případné korekční faktory, které by mohly popsat jejich chování v reálných podmínkách přesněji.

5.2. Výpočet vlastností plynů

Pro výpočet hustoty vodíku a zemního plynu při pracovních podmínkách uvedených v tab. 1. vychází se ze stavové rovnici (1) [31].

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1)$$

Po násobení pravé strany jednotkovým zlomkem $\frac{M}{M}$:

$$p \cdot V = m \cdot \frac{R}{M} \cdot T \quad (1.1)$$

Po dělení obou stran hmotností m lze získat tvar ze kterého lze vyjádřit hustotu:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{M} \cdot T \quad (1.2)$$

Molové hmotnosti vodíku a zemního plynu jsou známé [32], ale pro výpočet M směsi se vychází ze vztahu [31]:

$$\frac{1}{M_s} = \sum_i C_i^m \cdot \frac{1}{M_i} \quad (2)$$

Dynamická viskozita vodíku a zemního plynu jsou taky známé [33] [34], ale přesný výpočet μ pro směs dvou složek s velkým rozdílem ve viskozitě je náročné. Nicméně lze použít Wilkeho směšovací pravidlo [35]:

$$\mu_s = \sum_i \frac{y_i \cdot \mu_i}{\sum_{j \neq i} y_j \cdot \phi_{ij}} \quad (3)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{\left[8 \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.1)$$

$$y_i = \frac{\frac{C_i^m}{M_i}}{\sum_j \frac{C_j^m}{M_j}} \quad (4)$$

Při uvažování pracovních podmínek uvedených v tab. 1 a po dosazení do příslušných rovnic se získali následující výsledky.

	CH ₄	H ₂	Směs
M [g mol ⁻¹]	16,0400	2,0156	6,7068
ρ [kg m ⁻³]	3,45	27,45	11,48
μ [μPa s]	10,90	8,35	10,20

Tab. 2: Vlastností plynů při daných pracovních podmínkách

5.3. Výpočet hmotnostních toků a přenášené energie

Hmotnostní tok proudícího plynu nebo směsi plynů lze vypočítat z následujících vztahů [36]:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (5)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \bar{c} \quad (6)$$

$$\dot{m}_i = C_i^m \cdot \dot{m}_s \quad (7)$$

Energetické obsahy (výhřevnost) vodíku a zemního plynu jsou známe [3] [29]. Pro vodík je $E_{H_2} = 33,3 \text{ kWh kg}^{-1}$ a pro zemní plyn se liší podle jeho původu, ale střední hodnota je $E_{CH_4} = 12 \text{ kWh kg}^{-1}$. Pro výpočet E směsi se vychází ze vztahu:

$$E_s = \sum_i C_i^m \cdot E_i \quad (8)$$

Přimícháváním vodíku do zemního plynu se energetický obsah směsi zvyšuje oproti samotnému zemnímu plynu ($E_s = 16,26 \text{ kWh kg}^{-1}$).

Celková energie přenášená tekutým (plynným) médiem je:

$$E_{tot} = \dot{m} \cdot E \quad (9)$$

Hmotnostní tok zemního plynu lze vypočítat při dosažení hodnot z tab. 1 do rovnici (5). Následně celkovou přenášenou energii lze vypočítat ze vztahu (9).

ZEMNÍ PLYN	
$\dot{m} \text{ [kg h}^{-1}\text{]}$	35 305
$E_{tot} \text{ [kW]}$	423 660

Tab. 3: Hmotnostní tok a přenášená energie zemním plynem

5.4. Návrh vstupu do potrubí

Prostřednictvím programu Excel (příloha 1) lze navrhovat různé výpočtové modely. V této práci byly navrženy dva modely, které jsou níže v tab. 4 porovnány. Obojí modely se vztahují k parametrům uvedených v tab. 3. V prvním (model 1) je klíčovým parametrem celkový přenos energie zemním plynem za hodinu. Toto množství musí být zachováno i ve výsledné směsi. Jelikož energetický obsah směsi je větší než u samotného zemního plynu, výsledný hmotnostní tok směsi bude menší. V druhém (model 2) je klíčovým parametrem hmotnostní tok zemního plynu. Toto množství zůstává stejný i pro směs. To znamená, že přenos energie směsi je větší než u samotného zemního plynu.

Je důležité, aby výslední směs byla co nejvíce homogenní, protože případné hromadění vodíku při povrchu potrubí by vedlo ke snížené životnosti oceli v důsledků křehnutí. Jak je zmíněno v podkapitole 4.2.1, různé studie poukazují na to, že hlavními faktory, které ovlivňují míchání, jsou dva. Prvním je nízká průniková schopnost vodíku způsobená jeho nízkou setrvačností. Druhý je působení vztlakových účinků vodíku které jsou způsobeny nedostatečným mícháním.

Ve studii „*Injection of gaseous hydrogen into a natural gas pipeline*“ [26] je zaveden objemový zřed'ovací faktor (10), který představuje poměr průtoku v hlavním potrubí a průtoku vstříkovaného z vedlejší přípojky:

$$\mathcal{D} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \frac{c_D}{c_d} \quad (10)$$

V stejné studii je také uveden koeficient poměru hybnosti, který představuje schopnost vodíku pronikat do zemního plynu (11), (11.1):

$$M_r = \frac{\rho_d \cdot \bar{c}_d^2}{\rho_D \cdot \bar{c}_D^2} \quad (11)$$

$$M_r = \frac{M_d}{M_D} \cdot \mathcal{D}^2 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^4 \quad (11.1)$$

Dalším důležitým parametrem je Reynoldsovo číslo, ze kterého lze určit charakter proudění směsi (pokud je laminární, nebo turbulentní) [37]:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{c} \cdot d}{\mu} \quad (12)$$

Celkově pro získání co nejhomonější směs se doporučuje [26] [38]:

- Vyšší zředovací faktor
- Poměr hybností vyšší než 1, aby vodík pronikl co nejdříve do proudícího zemního plynu
- Vyšší poměr d/D , aby se vodík co nejdříve rozptýlil v hlavním plynovodu

5.4.1. Výsledky

	MODEL 1	MODEL 2
E_{tot} [kW]	423 660	574 059
\dot{m}_s [kg h ⁻¹]	26 055	35 305
\dot{m}_{CH_4} [kg h ⁻¹]	20 844	28 244
\dot{m}_{H_2} [kg h ⁻¹]	5 211	7 061
D [mm]	250	300
\bar{c}_s [m s ⁻¹]	12,84	12,09
d [mm]	150	200
\bar{c}_{H_2} [m s ⁻¹]	23,74	18,10
d/D [-]	0,600	0,667
\mathcal{D} [-]	1,99	1,99
M_r [-]	3,84	2,52
Re [-]	$3,61 \cdot 10^6$	$1,23 \cdot 10^6$

Tab. 4: Srovnání výpočtových modelů 1 a 2

Z výsledků uvedených v tab. 4, lze vyvodit tyto závěry:

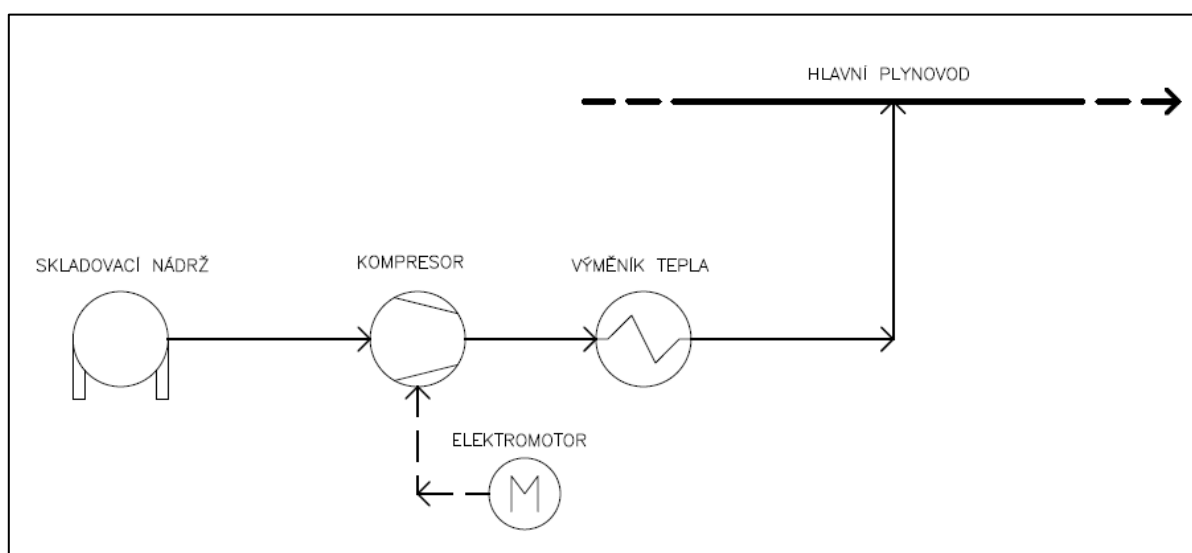
- Při dodržení stejného celkového přenosu energie za hodinu (model 1) se potřebný hmotnostní tok směsi snižuje, což vede k menší spotřebě zemního plynu. Úspora zemního plynu činí až 41 %. Dále k dodržení omezení v proudících rychlostech (15 m/s v hlavních plynovodech, 25 m/s v přípojkách) stačí menší potrubí. Tím se snižují požadavky jak na hlavní plynovod, tak na napájecí trubky.
- Při dodržení stejného hmotnostního toku (model 2) se zvyšuje objem získané energie (až o 36 % vyšší) při nižší spotřebě zemního plynu (úspora činí 20 %). Nicméně nevýhody jsou dvě. Ta první je zvýšená spotřeba vodíku (až 36 % navíc) ve srovnání s modelem 1. Druhou nevýhodou je větší potřebná velikost potrubí, což zvyšuje požadavky na hlavní plynovod a na napájecí trubku.
- Předpoklady pro homogenní směs jsou dodrženy v obou případech s dostatečně vysokými poměry hybností a poměry průřezů potrubí. Dále se proudění směsi nachází hluboce v turbulentní oblasti.

6. Návrh komprese vodíku

Obecně vodík se vyrábí při nízkých tlacích (0,5 až 3 MPa) [9] [20]. Jelikož při vstupu do hlavního plynovodu musí mít tlak 4 MPa, vodík se musí po výrobě stlačit. Požadavky na kompresi jsou [39]:

- Čistota. Vodík je velmi reaktivní prvek, z tohoto důvodu je důležité, aby při kompresi byla přítomnost kyslíku minimální. Čistota je zaručena většinou výrobních metod. Běžný elektrolyzátor dokáže vyrobit vodík s čistotou 99,95 % a víc [9].
- Suchost. Případné kondenzáty vodíku mohou zvýšit korozi a následně snížit životnost kompresorů.
- Teploty nižší než 200°C. Standardně používané materiály dokážou odolat stlačenému vodíku při teplotách až 200 °C, než dojde ke snížení jejich pevností.

Předběžné strojně technologické schéma provedení vstupu vodíku do hlavního plynovodu je uveden v obr. 5. Hlavními uzly, které je třeba řešit, jsou komprese a chlazení vodíku.



Obr. 5: Předběžný schéma vstupu vodíku do hlavního plynovodu

6.1. Tlak vodíku po kompresi

Kompresi vodíku neprobíhá přímo v místě, kde se trubka přepravující vodíku připojí k hlavnímu plynovodu. Z tohoto důvodu je nutné počítat s tlakovými ztrátami v trubce a stlačit vodík na tlak vyšší než 4 MPa.

Tlaková diference při proudění v potrubí lze vypočítat vztahem (13) [37]:

$$\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) - \frac{M}{R \cdot T \cdot \bar{w}^2} \cdot (p_1^2 - p_2^2) + \lambda \cdot \frac{l}{d} = 0 \quad (13)$$

$$\bar{w} = \rho \cdot \bar{c} \quad (14)$$

$$\lambda = \left\{ 2 \cdot \log \left[0,27 \cdot k^* + \left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} \quad (15)$$

$$k^* = \frac{k_{stř}}{d} \quad (16)$$

Metodou půlení intervalů (příloha 2) lze z (13) stanovit tlak p_1 na který se musí vodík stlačit. p_2 je tlak vodíku na konci trubky (4 MPa), délka trubky l se předpokládá 50 m. Jelikož (13) nezahrnuje případná kolena a ohyby potrubí, je nutné počítat s potrubím o větší délce l (100 m). Pro výpočet k^* se vychází ze střední absolutní drsnosti potrubí. Jak je popsáno v kapitole 4, hladší povrch podporuje pronikání vodíku do materiálu. Proto se volila větší drsnost povrchu, $k_{stř} = 0,3$.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5. Je patrné, že tlaková ztráta je větší při větších proudících rychlostech a užších potrubí.

	MODEL 1	MODEL 2
p_l [Pa]	4 015 274	4 006 182
Δp [Pa]	15 274	6 182

Tab. 5: Třecí tlakové ztráty vodíku

6.2. Výpočet kompresorů a chladících zařízení

Jelikož teplota vodíku nesmí překročit 200 °C, je důležité vypočítat, zda komprese může být jednostupňová nebo musí být vícestupňová. Za předpokladu adiabatické komprese, lze maximální dosaženou teplotu určit z rovnosti poměrů [36]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (17)$$

To je však teplota dosažena při idealizované (vrátné) adiabatické kompresi. V případě reálné komprese je množství vynaložené technické práce větší než v ideálním procesu. Pro vyjádření teploty na výstupu komprese lze využít adiabatickou účinnost, která se nesmí zaměňovat s termickou [36]:

$$\eta_{ad} = \frac{T_1 - T_{2id}}{T_1 - T_2} \quad (18)$$

Následně lze vypočítat příkon kompresoru (kompresorů) [37]:

$$P_{ad} = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot \dot{V}_1 \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (19)$$

Jak již bylo zmíněno, v reálném kompresním procesu je množství vynaložené technické práce větší než v ideálním procesu. Proto musí se příkon vydělit termickou účinností:

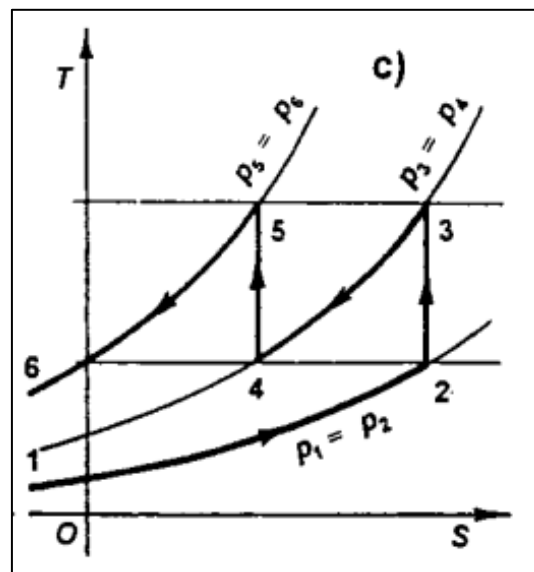
$$P = \frac{P_{ad}}{\eta_t} \quad (20)$$

Technologie, která je při kompresi důležitá, je chlazení. V případě vícestupňové komprese se musí vodík chladit před vstupem do druhého kompresoru. Dále je chlazení vodíku nezbytné před vstupem do trubky, aby se zabránilo výrazným teplotním výkyvům při přimíchávání se zemním plynem. Tepelný výkon chladicích technologií lze vypočítat ze vztahu (21) [36]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (21)$$

Prostřednictvím Excelu (příloha 1) lze vypočítat potřebné příkony kompresorů a tepelné výkony pro chlazení vodíku před vstupem do plynovodní soustavy. Při výpočtech se uvažovalo se vstupním tlakem $p_1 = 15$ bar a teplotou $T_1 = 25$ °C. Poissonovo číslo vodíku, které je poměrem tepelných kapacit při stálém tlaku a stálém objemu, lze určit přesně pro každou teplotu. V každém případě, při uvažování vodíku jako ideálního dvouatomového plynu, se Poissonovo číslo bere jako $k = 1,4$ [36]. Adiabatická a termická účinnost se pro jednoduchost uvažuje stejná $\eta_{ad} = \eta_t = 0,7$ [37]. Entalpie vodíku při různých tlacích a teplotách lze získat z databáze *CoolProp* [40].

Při výpočtech se srovnali jednostupňová a dvoustupňová komprese vodíku. Výsledky jsou uvedeny v tab. 6. Průběh dvoustupňové komprese je zobrazen na obr. 6. Teploty a tlaky uvedené v tab. 6 odpovídají teplotám zobrazeným na obr. 6.



Obr. 6: T-s diagram dvojstupňové komprese [36]

Při výpočtu dvojstupňové komprese se ukázalo, že chlazení vodíku v mezichladiči (T_4) na záporné teploty snížilo jak celkový příkon kompresorů, tak celkový tepelný výkon. Nicméně kvůli vysokým průtokům a nárokům na chlazení, není vhodné použití kryogenních technologií. Proto se spíše uvažovalo použití chladicích věží. Z tohoto důvodu jsou dosažené teploty vodíku v mezichladiči omezeny na teplotu okolí [41]. V tab. 6 je uvedena nejvhodnější kombinace z hlediska energetické náročnosti ($T_4 = 30$ °C).

	MODEL 1	MODEL 2
JEDNOSTUPŇOVÁ KOMPRESSE		
T_2 [°C]	163,54	163,14
p_2 [MPa]	4,02	4,01
P_{tot} [MW]	2,90	3,91
Q_{tot} [MW]	3,26	4,41
VÍCESTUPŇOVÁ KOMPRESSE		
p_3 [MPa]	2,55	2,55
T_3 [°C]	94,71	94,71
T_4 [°C]	30	30
T_5 [°C]	90,14	89,79
p_5 [MPa]	4,02	4,01
P_1 [MW]	1,46	1,97
P_2 [MW]	1,26	1,69
P_{tot} [MW]	2,71	3,67
Q_1 [MW]	1,35	1,83
Q_2 [MW]	1,72	2,33
Q_{tot} [MW]	3,07	4,16

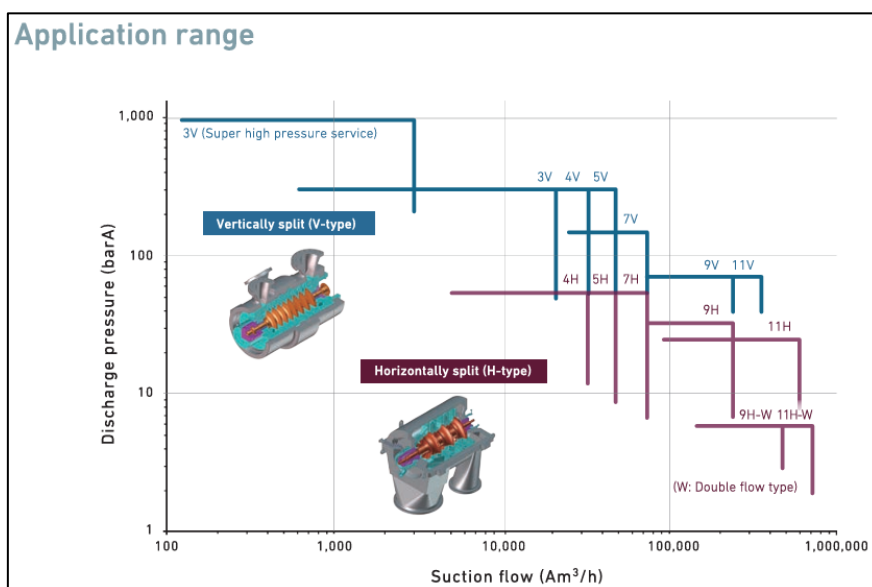
Tab. 6: Energetická náročnost komprese vodíku před vstupu do plynovodní soustavy

Z výsledků uvedených v tab. 6 lze vyvodit tyto závěry:

- Tepelný výkon pro chlazení vodíku vychází větší než mechanický příkon pro stlačení. To je v důsledku vysoké měrné tepelné kapacity vodíku, která se pohybuje kolem $14\,500\text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$ [40].
- U všech případů, celkový instalovaný příkon i výkon činí jednotky megawattů. To je očekávatelné vzhledem k velikosti hmotnostního (tedy i objemového) toku vodíku. Tyto výsledky jsou přijatelné, protože v kompresních stanicích tranzitních plynovodů, kde jsou hmotnostní toky zemního plynu opravdu vysoké, se obecně celkový instalovaný výkon pohybuje od 20 do 80 megawattů [25].
- Dvojestupňová komprese je vhodnější než jednostupňová. Prvním důvodem je výška dosažených teplot. Při jednostupňové kompresi se dosahují teploty kolem 163 °C , což je velmi blízko hraniční hodnotě 200 °C . Při dvoustupňové kompresi se dosahují teploty nižší než 100 °C . Druhým důvodem je energetická úspora, která je patrná při srovnání P_{tot} a Q_{tot} . Obojí mechanický příkon a tepelný výkon jsou o 6 % menší.
- Výpočtový model 1, ve kterém je přenášena energie konstantní, je výhodnější než model 2. Menší hmotnostní toky vodíku vedou na nižší energetické nároky u kompresorů a u chladicích zařízení. Energetická úspora činí 26 %.

7. Technické provedení vstupu

na kompresi a chlazení vodíku jsou vysoké, obě tyto operace vyžadují zařízení o výkonu jednotek megawattů. Kompresory, které by splnily tyto provozní podmínky jsou k dispozici od společností Mitsubishi [42] nebo Baker Hughes [43]. Například z tabulky uvedené na obr. 7 je možné vybrat například kompresor MAC 4H, který má pracovní sací objem nad $10\,000\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ a dokáže stlačit vodík na požadovaných 4 MPa (40 barů). Minimální sací objem kompresoru musí být $4\,200\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ (příloha 1).



Obr. 7: Sada turbokompresorů na vodík společnosti Mitsubishi

Každopádně, tyto speciální kompresory jsou náročné na údržbu a omezují regulaci toku vodíku, který je vložen do plynovodu. Pro snížení nároků na kompresory a na výměníky tepla, lze tok vodíku rozdělit do několika větví, což také usnadňuje regulaci. Ve webové stránce od *Direct Industry* [44] lze porovnat různé kompresory, a většina kompresorů pro vodík dosahuje maximálního výkonu 400 kW. S tímto omezením je možné tok vodíku rozdělit do 4 větví. Výkon do jednotlivých kompresorů je dodáván elektromotory. Jednotlivé elektromotory lze například vybrat z katalogu společnosti VYBO Electric [45].

P_1 [kW]	4 x 364
P_{m1} [kW]	4 x 400
Q_1 [kW]	4 x 338
P_2 [kW]	4 x 314
P_{m2} [kW]	4 x 315
Q_2 [kW]	4 x 430

Tab. 7: Přehled příkonů a výkonů jednotlivých zařízení

Dále se bude v této práci uvažovat pouze s modelem 1, s vícestupňovou kompresí, a s rozdělením toku vodíku do 4 větví.

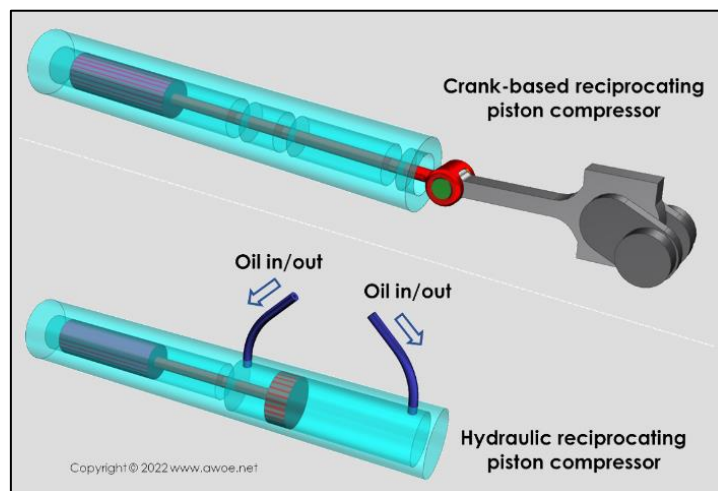
7.1. Kompresory na vodík

Pro kompresi vodíku se používají kompresory postavené podobně jako ty určené pro zemní plyn. Pro zaručení čistoty vodíku je důležité oddělit pracovní objem, kde dochází ke kompresi, od kapalin hydraulického systému. Lepší volbou jsou kompresory bez mazání, aby se zabránilo pronikání olejových par maziva do stlačeného vodíku [20] [46].

7.1.1. Pístové kompresory

Pístové kompresory jsou nejjednodušším a nejpoužívanějším typem kompresoru. Tyto kompresory využívají píst, který se pohybuje v uzavřené komoře. Při tomto pohybu dochází ke snížení objemu pracovního prostoru, ve kterém je plyn, a tedy ke zvýšení tlaku. Pohyb pístu může být řízen mechanicky nebo hydraulicky. Dále tyto kompresory mohou být jednočinné, pokud je využívána pouze jedna strana pístu nebo dvoučinné, pokud jsou střídavě využívány obě strany [37].

Tyto kompresory mohou být používány v různých rozsazích tlaků a průtoků. Výhodou je, že mohou být bez mazání při nízkých tlacích nebo středních průtocích. Pro dosažení vyšších tlaků, obvykle nad 350 bar, je však nutné mazání. To představuje riziko pro čistotu vodíku, a proto se používají přídatné prvky, které izolují vodík od jakýchkoli olejových par [20].



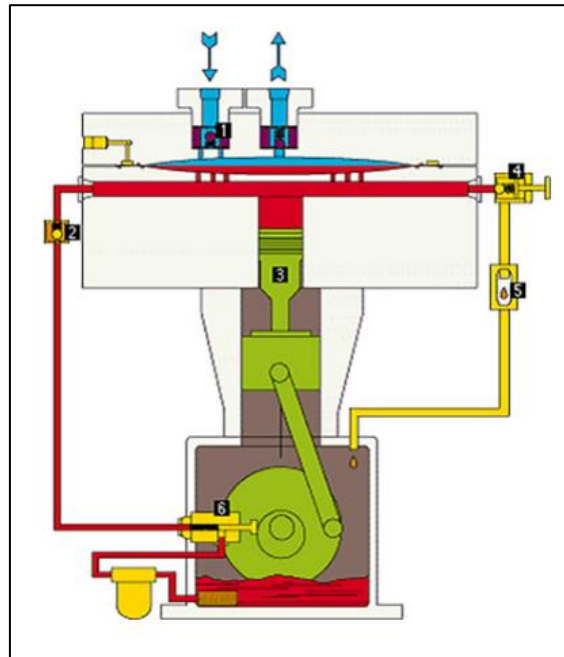
Obr. 8: Mechanický a hydraulický pístový kompresor [20]

7.1.2. Membránové kompresory

U membránových kompresorů dochází ke kompresi změnou objemu pracovního prostoru prohýbáním kruhové membrány. Tlak na membránu lze dosáhnout několika způsoby. Na obr. 9 je znázorněn klikový mechanismus, který generuje tlak na přenosovou kapalinu, která následně působí na membránu [20].

Největší výhodou těchto kompresorů je čistota výsledného stlačeného vodíku. Membrána funguje jako bezpečná hranice mezi stečeným plynem a hydraulickými kapalinami kompresoru. Navíc se tyto kompresory mohou skládat z více membránových sad, které zajišťují absolutní čistotu procesu [47].

Tyto kompresory jsou optimální při vysokých kompresních poměrech a nízkých průtocích. To z nich dělá nejlepší volbou pro kompresi vodíku za účelem skladování ve vysokotlakých nádobách [47].

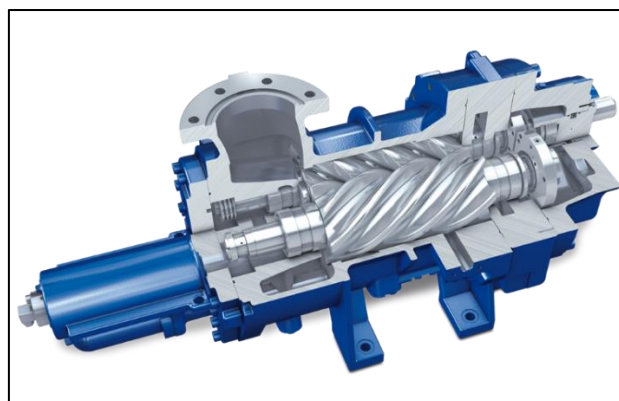


Obr. 9: Schéma membránového kompresoru [47]

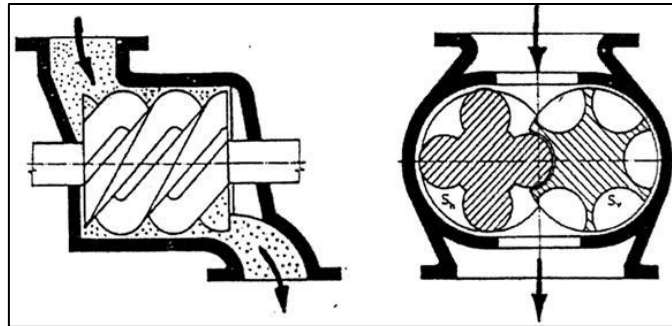
7.1.3. Objemové rotační kompresory

Objemové rotační kompresory využívají dvojici rotorů (hlavní a sekundární), které po sobě odvalují plyn ze sacího prostoru do menší výstupní geometrii, kde tlak je vytvořen akumulací stlačeného plynu [20]. Tyto kompresory jsou optimální při nízkých provozních tlacích a vysokých průtocích. Jejich snadná nastavitelnost je velkou výhodou při výrobě vodíku elektrolýzou, která je vysoce proměnlivá [48].

Jejich velkou nevýhodou je riziko úniku stlačeného plynu zpět do sacího prostoru, což je omezeno pouze nízkou tolerancí mezi rotujícími částmi. U vodíku, s jeho extrémně nízkou hustotou a viskozitou, je toto omezení zvláště obtížné [20]. Nejperspektivnějším typem rotačního kompresoru pro vodík je šroubový (obr. 10 a 11), protože jeho geometrie nejlépe omezuje úniky.



Obr. 10: Šroubový kompresor [48]

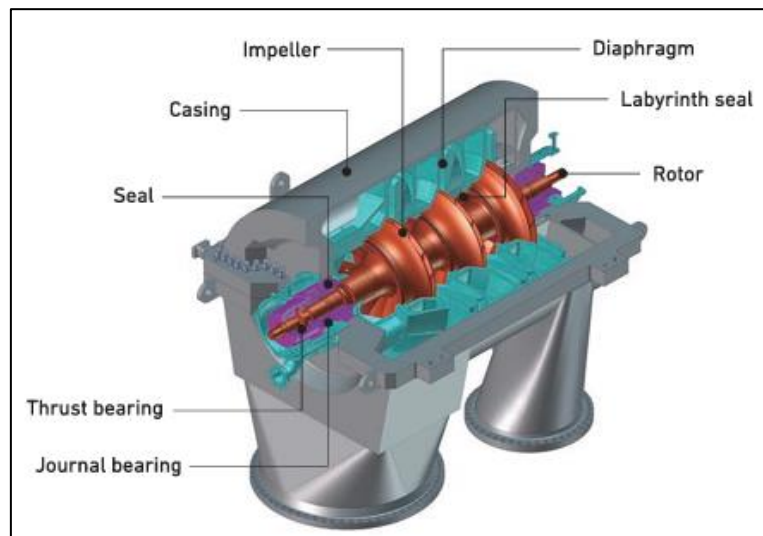


Obr. 11: Schéma šroubového kompresoru [37]

7.1.4. Turbokompresory

Turbokompresory fungují na základě dynamických účinků. Lopatky dodávají stlačenému plynu kinetickou energii, která se postupným zvětšováním průřezu oběžného kola mění na energii tlakovou. Turbokompresory lze rozdělit na axiální a radiální podle směru proudění plynu [20]. Turbokompresory jsou široce využívány v potrubních aplikacích kvůli jejich schopnosti komprimovat vysoké průtoky plynu. Nicméně jsou omezeny z hlediska kompresních poměrů [46].

Nízká hustota vodíku představuje pro tyto kompresory výzvu, protože rychlost oběžného kola musí být vyšší než u ostatních plynů, aby byl dosažen vyšší tlakový poměr [46].



Obr. 12: Radiální turbokompresor na vodík společnosti Mitsubishi [42]



Obr. 13: Lopatky používané v radiálních turbokompresorů [42]

7.1.5. Volba kompresoru

V aplikaci, která je v této práci zkoumána, je nutné stlačit velký průtok vodíku na tlak, který není příliš vysoký. Proto lze vyloučit pístové a membránové kompresory, které jsou ideální volbou pro stlačování vodíku za účelem skladování. Šroubové kompresory mají výhodu snadné regulace, ale tato vlastnost není požadována. Proto pro aplikaci zkoumanou v této práci představují turbokompresory ideální volbu.

7.2. Technologie chlazení vodíku

Chlazení horkého vodíku probíhá ve výměníku tepla, kde se přenáší teplo na chladicí médium. Ve vodíkovém průmyslu se využívají moderní výměníky tepla, známé jako *diffusion bonded microchannel heat exchangers* (MCHE) nebo *printed circuit heat exchangers* (PCHE) [49]. Tyto výměníky se skládají podobně jako deskové výměníky tepla, přičemž každá deska je leptána mikrokanály. Desky jsou spojeny difuzí za vysokého tlaku. Mikrokanály jsou navrženy tak, aby se proudy chlazené látky a chladicího média co nejvíc křížili. Jejich robustní konstrukce umožňuje provoz při velmi vysokých tlacích a teplotách [50].

Pro dimenzování výměníků tepla se vychází ze vztahu (22) [36].

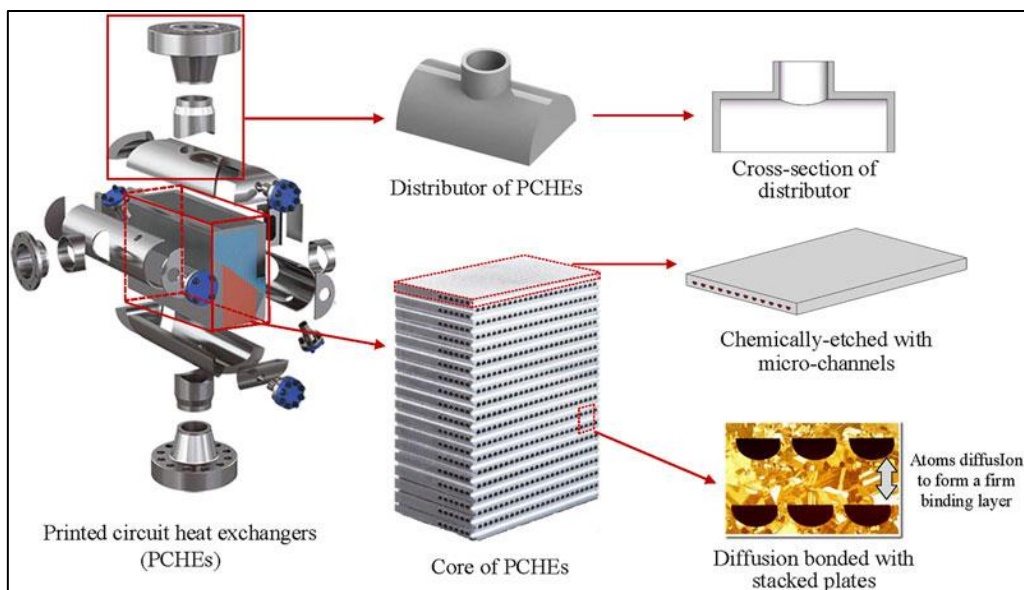
$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot \Delta T_{ln} \quad (22)$$

Kde ΔT_{ln} je logaritmický teplotní spád (23) [36].

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{h_{in}} - T_{ch_{out}}) - (T_{h_{out}} - T_{ch_{in}})}{\ln \left(\frac{T_{h_{in}} - T_{ch_{out}}}{T_{h_{out}} - T_{ch_{in}}} \right)} \quad (23)$$

Ze vztahu (22) je zřejmé, že tepelný výkon výměníku závisí na součinitele prostupu tepla a na celkové ploše. Součinitel prostupu tepla výměníku PCHE závisí na struktuře průtokových mikrokanálů. Tyto mikrokanály mohou být rovné, se vzorem zig-zag, nebo mít S-tvarová žebra. Součinitel K nabývá hodnoty v rozsahu od 4 000 do 10 000 W m⁻² K⁻¹ [51]. Proto tyto výměníky dosahují vysokých tepelných výkonů i při kompaktních plochách.

V případě vodíkových čerpacích stanic, kde je potřeba vodík chladit na teploty -33 °C až -40 °C, se používají chladicí média, která mají vlastní chladicí okruh. Obvykle se používají chemické látky jako je ethylenglykol, který je chlazen v kompresorovém chladicím okruhu [49]. Nicméně v případě zkoumaném v této práci není nutné chladit vodík na záporné teploty, a proto je jako chladicí médium dostačující použití vody nebo vzduchu. Vzhledem k potřebě zajistit vysokých tepelných výkonů, je rozumné integrovat chladicí věže do chladicího okruhu chladicí vody. První uzavřený chladicí okruh vody slouží k chlazení vodíku mezi první a druhou kompresí. Proto je v tomto okruhu dostačující použití chladicích věží k dosažení alespoň teplotu okolí. Při chlazení před vstupem do hlavního plynovodu je nutné, aby vodík dosáhl teploty 8 °C. Proto musí chlazení vody probíhat v kompresorovém chladicím okruhu. Jedním z možných způsobů snížení nároku na výkon kompresoru v tomto okruhu je předchlazení pomocí chladicí věže.



Obr. 14: Výměník tepla typu PCHE [51]

7.3. Regulační prvky

Instalace regulačních prvků je důležitá, pro zajištění bezpečného chodu soustavy i v případě poruchy nebo odstavení výroby vodíku.

7.3.1. Regulační nádoby

Regulační nádoby poskytují krátkou časovou mezeru pro reakci a zastavení toku vodíku v případě poruchy. V každé sadě kompresorů a výměníků tepla je žádoucí instalace regulační nádoby před vstupem do trubky vedoucí k hlavnímu plynovodu. Z výpočetního excelu (příloha 1), lze vypočítat objem těchto nádob, který vychází pouze 1 m³.

7.3.2. Ventily

Ventily jsou základními regulačními prvky v plynárenství. Instalace zpětných a uzavíracích ventilů lze shrnout následovně:

- Zpětný ventil: mezi nádobou, kde je vodík skladován a odvětvením toků vodíku.
- Uzavírací ventil: v každé větvi před vstupem do prvního kompresoru.
- Zpětný ventil: v každé větvi mezi prvním výměníkem tepla a druhým kompresorem.
- Zpětný ventil: v každé větvi mezi druhým výměníkem tepla a regulační nádobou.
- Uzavírací ventil: v každé větvi, za regulační nádobou.

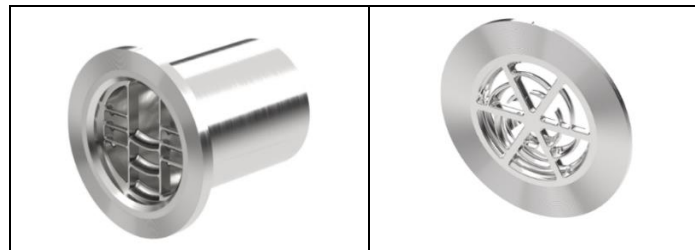
Všechny ventily musí podstoupit přísné zkoušky těsnosti, pevnosti materiálu, odolnosti proti korozi, tlaku a vibracím [52].

7.4. Dimenzování trubek

V každém úseku proudí vodík s jinými tlaky a teploty. Aby bylo dodrženo rychlostní omezení 25 m s⁻¹, je zapotřebí dimenzovat trubky v každém úseku individuálně. Velikosti těchto trubek lze stanovit pomocí výpočetního excelu (příloha 1). Nerezová ocel je nejvhodnějším materiálem pro tyto trubky. Navíc, jak zmíněno v kapitole 4, je vhodné nechat vnitřní povrch trubek drsný.

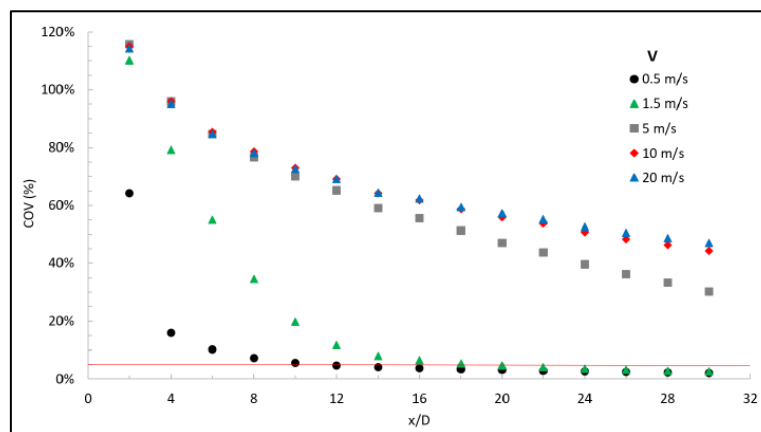
7.5. Statické směšovače

Pro rychlejší a snadnější homogenizaci směsi se doporučuje užití statických směšovačů, vložených za přípojky ve tvaru „T“ [26]. Existuje několik druhů statických směšovačů, a většina z nich se používá pro směšování kapalin nebo tuhé fáze. Pro plyny proudících v potrubí se používají především mřížové konstrukce, kde k míchání dochází pomocí vírům, které jsou generovány geometrií mřížek [53] [54]. Na obr. 15 jsou znázorněny dva statické směšovače určené pro přimíchávání vodíku s jinými plyny.



Obr. 15: Mřížkové statické směšovače pro plyny [54]

Fernandez [38] uvádí studii, kde byly zkoumány minimální vzdálenosti potřebné k dosažení homogenity směsi při různých rychlostech. To bez užití statických směšovačů (obr. 16).

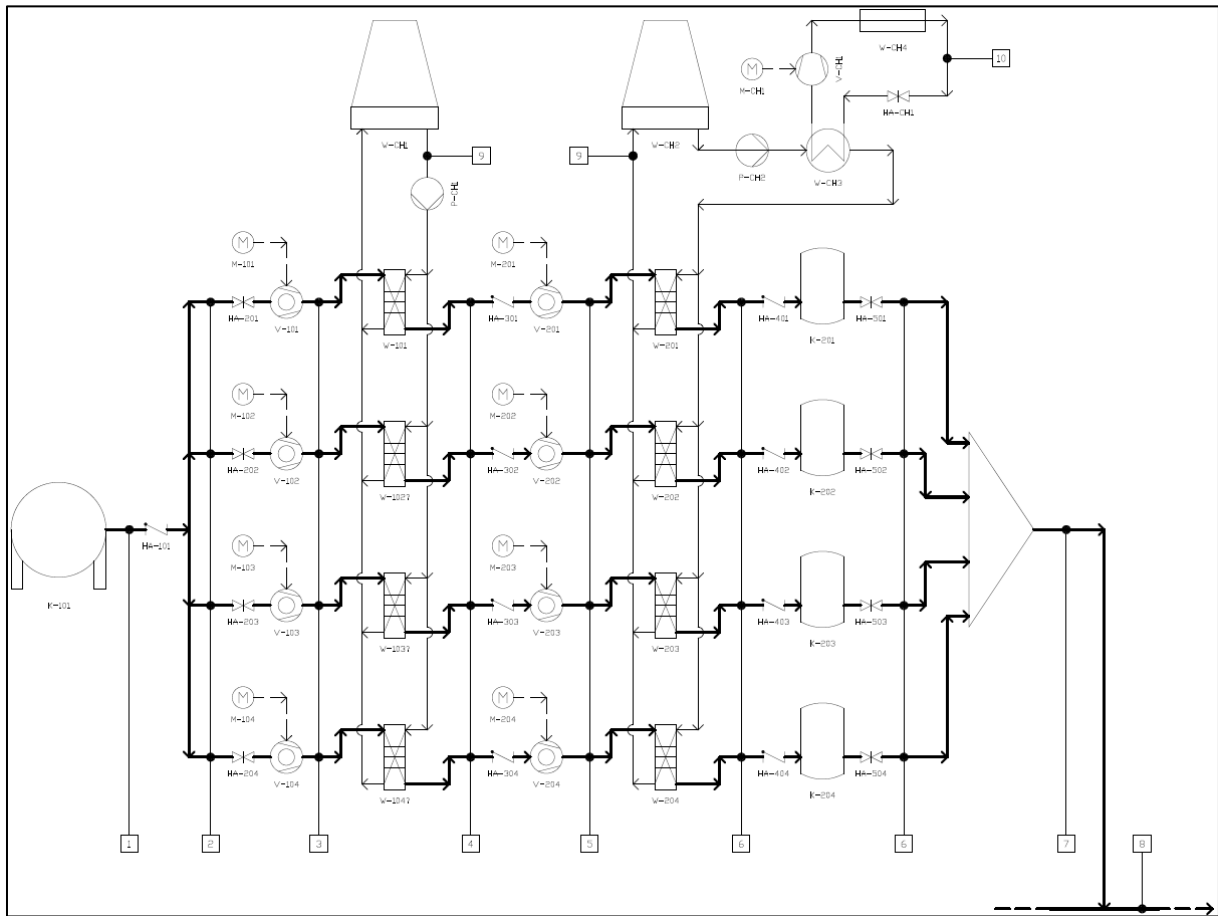


Obr. 16: Vývoj COV ve vzdálenosti od T přípojky pro různé rychlosti [38]

Variační koeficient (COV) je nejvhodnějším kritériem pro hodnocení míry mísení dvou látek. COV nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž nižší hodnoty signalizují lepší mísení látek. Mezní hodnota pro dosažení homogenity je 0,05. Z grafu uvedeného na obr. 16 je zjevné, že pro rychlosti proudění rovné nebo vyšší než 5 m/s není homogenita dosažena ani ve vzdálenosti 30 průměrů potrubí od T přípojky. V případech, kdy se vodík přimíchává do zemního plynu těsně před konečnou spotřebu, je tehdy nutná aplikace statických směšovačů. To může být například v případě továrny, kde současně probíhá výroba a spotřeba vodíku.

Účelem přimíchávání vodíku v distribuční síti je jeho přeprava na dlouhé vzdálenosti. Případné tlakové stanice, které dodržují tlak na úrovni 4 MPa v potrubí, jsou zpravidla umístěny ve vzájemné vzdálenosti 100 km [25]. Z těchto důvodů není nezbytné dosahovat homogenity směsi v krátkých vzdálenostech. Z tab. 4 je dále patrné, že směs vodíku a zemního plynu je hluboce v turbulentní oblasti proudění ($Re \gg 2\,300$). To znamená, že jsou dosaženy podmínky pro homogenní směs, a navíc nehrozí stratifikace látek. Aplikace statického směšovače není tedy potřebná. Navíc by způsobovala tlakové ztráty, což je nežádoucí.

7.6. P&ID schéma provozu



Obr. 17: P&ID schéma provozu (extract z výkresu v příloze 3)

Výchozím prvkem provozu je skladovací nádoba K-101, kde je skladován vyrobený vodík, připravený k přepravě. Zpětný ventil HA-101 zabrání návratu vodíku zpět do skladovací nádoby v případě havárie první sady kompresorů. Následně se hlavní potrubí větví do 4.

Na začátku každé větve je uzavírací ventil HA-20X, který umožňuje nebo zablokuje tok vodíku. První kompresor V-10X stlačuje vodík na 2,55 MPa. Následuje výměník tepla W-10X, který chladí vodík před vstupem do druhého kompresoru. Zpětný ventil HA-30X zabrání proudění vodíku v opačném směru v případě poruchy na druhé sadě kompresorů. Druhý kompresor V-20X stlačuje vodík na 4,02 MPa. Poté následuje výměník tepla W-20X, který chladí vodík před vstupem do regulační nádoby K-20X. Zpětný ventil HA-40X brání proudění vodíku v opačném směru v případě poruchy. Uzavírací ventil HA-50X umístěný za regulační nádobou umožňuje průchod vodíku do směšovací komory, ze které vychází trubka, vedoucí k hlavnímu plynovodu.

Do první sady výměníků tepla vstupuje voda, která za pomoci čerpadla proudí v uzavřeném chladicím okruhu. Po opuštění výměníku, voda se pak ochlazuje v chladicí věži. Do druhé sady výměníků tepla také vstupuje voda proudící v uzavřeném okruhu. Po výstupu z výměníku, se voda předchlazuje v chladicí věži, a následně předává teplo chladivu, chlazenému v kompresorovém chladicím oběhu.

8. Konečné využití blendu

Po přepravě lze směs využít různými způsoby. V této kapitole se zaměříme na spalování v turbíně pro výrobu elektřiny, spalování v kotli pro výrobu tepla a na zpětnou rekuperaci vodíku.

8.1. Spalování v turbíně

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3, směs zemního plynu a vodíku lze přímo spalovat v turbínách za účelem výroby elektřiny. Směs nevyžaduje další úpravy, tlak 4 MPa a teplota 281 K (8 °C) jsou přijatelné hodnoty pro správný chod turbín. Důležitá je regulace objemového průtoku směsi.

Turbína SGT-400 od společnosti Siemens je k dispozici ve variantách 11 MW, 13 MW a 15 MW a pracovní tlakový poměr je kolem 17:1 [16]. To znamená, že spaliny budou odcházet s tlakem přibližně 235 kPa (při vstupu směsi 4 MPa), což je o 135 kPa vyšší hodnota než tlak atmosférický. Vzhledem k nízké účinnosti (přibližně 35 %) je vhodnější turbínu používat pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla.

Turbína GT36 od společnosti Ansaldo Energia je schopná spalovat příměsi obsahující vodík až do 70 %, při sekvenčním spalování. Tato technologie zabraňuje riziku zpětného prošlehnutí plamene během spalování, i při vyšších průtocích směsi [18].

8.2. Spalování v kotli

Zemní plyn se především spaluje ve výtopnách, které slouží k centrálnímu zásobování tepla ve městech. Při spalování vodíku nebo jeho příměsí, je důležité kotle správně přizpůsobit. Například, při spalování vodíku se dosahují teploty plamene přes 2 200 °C, což je vyšší ve srovnání se samotného zemního plynu, kdy dosažené teploty nepřesahují 2 000 °C. Dále, lehkost vodíku může způsobit bezpečnostní problémy. Kromě hrozby materiálového opotřebení existuje také nebezpečí shromažďování nespáleného vodíku v kapsách v horní části kotle. Veškerý nespálený vodík je nutné odstranit, aby se eliminovalo riziko výbuchu. Posledním problémem je produkce vodní páry při spalování vodíku. Zvýšená vlhkost v okolí kotle není dobrá pro elektronické komponenty [55].

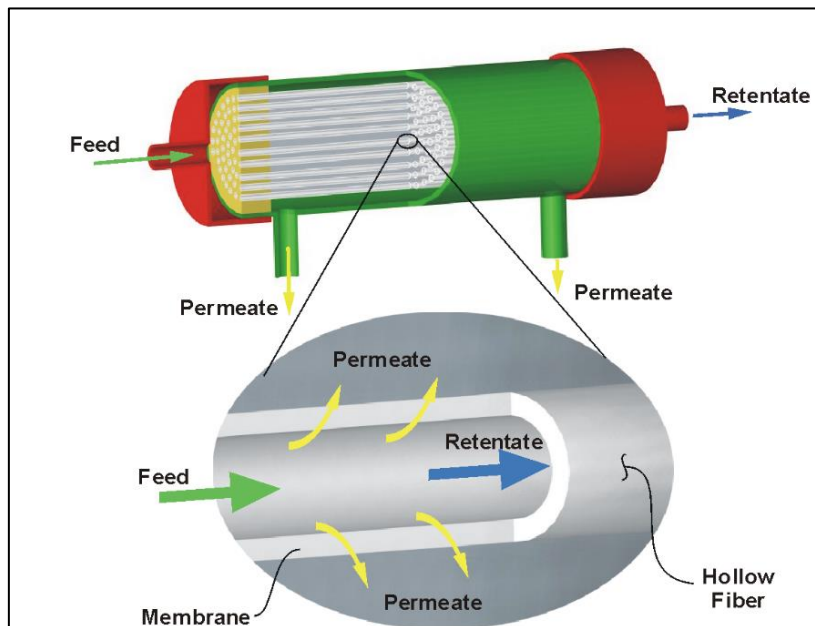
8.3. Zpětná separace vodíku ze zemního plynu

Při některých aplikacích se vyžaduje čistý vodík, jak například u palivových článků pro dopravu. Vodík by musel být oddělen v blízkosti konečného použití, a zemní plyn by sloužil pouze jako transportní médium v potrubí. V současnosti se vyvíjejí různé separační technologie pro lehké plyny, jako je vodík [3] [13]. Jsou to například membránová, kryogenická, elektrochemická a PSA (tlaková cyklická adsorpce). Membránová a PSA fungují na základě tlakových účinků směsi. Proto jsou pro směs proudící v potrubí pod tlakem nejpřespektivnější.

8.3.1. Membránová separace

Princip této metody je založen na rozdílu průchodnosti molekul skrz membránu. Metan má větší molekulu než vodík, proto má tendenci neprojit membránou, která může být porézní, neporézní nebo kompozitní. Směs plynu, která neprošla membránou jmenuje se retentát, a postupně se

stává bohatší na metan. Složka, která prošla membránou a je bohatší na vodík, se nazývá permeát.



Obr. 18: Průřez membránového modulu s dutými silikonovými vlákny [56]

Důležité parametry membránového modulu jsou permeance (24) a rekuperace (25) i složky ve směsi [57]. Permeance popisuje schopnost každé složky prostupovat modulem. Rekuperace udává procentuální množství získané složky ze směsi.

$$\frac{P_{sep}}{L_i} = \frac{n_i}{S \cdot \Delta p_i} \quad (24)$$

$$R_{sep_i} = \frac{n_{i,P}}{n_{i,P} + n_{i,R}} \quad (25)$$

Hnací silou, která zajišťuje průchod i složky membránou, je tlaková diference mezi její parciálním tlakem na vstupu a v permeátu [57].

$$\Delta p_i = p_{i_F} - p_{i_P} \quad (26)$$

Pro výpočet molárního množství jednotlivých složek (27) v toku permeátu a retentátu se vychází z molárních koncentrací (4) a z celkového molárního toku (28) [57].

$$n_i = y_i \cdot n \quad (27)$$

$$n = \frac{\dot{m}}{\sum y_i \cdot M_i} \quad (28)$$

Nakonec, pro výpočet parciálního tlaku složky i se vychází z rovnice (29) [36]:

$$p_i = y_i \cdot p \quad (29)$$

Retentát má na výstupu přibližně stejný tlak jako na vstupu, snížený pouze o tlakovou ztrátu při průchodu trubkami v membránovém modulu. Permeát má naopak výrazně nižší tlak. Struktury a materiály použité pro membrány jsou ve výzkumu, a v tab. 8 jsou uvedeny některé běžně používané membrány s příslušnou permeancí vodíku [58].

Materiál	Zeolit	Křemen	Uhlík	Polymery
Permeance H ₂ [nmol m ⁻³ s ⁻¹ Pa ⁻¹]	24 až 800	3,4 až 500	0,3 až 340	1 až 300

Tab. 8: Souhrn permeancí vodíku u některých běžných membránových materiálů

Po výpočtu pomocí rovnic (4), (27) a (28) byl výslední celkový molární tok směsi $n = 1\,079$ mol s⁻¹ a molární tok vodíku $n = 718$ mol s⁻¹.

Pomocí výpočtového Excelu (příloha 1) lze vypočítat charakteristiky membránového modulu pro rekuperace vodíku. To jsou potřebnou celkovou plochu vláken a potřební tlakový rozdíl. Nastavitelné parametry jsou permeance membrány a procentuální rekuperace vodíku ze směsi. Permeance se nastavovala na 60 nmol m⁻³ s⁻¹ Pa⁻¹, jelikož je to často opakující se hodnota, která byla změřená také Seghmanem a spol. [57].

R [%]	S [m ²]	Δp [MPa]	p_{H_2P} [MPa]
100	5 000	2,39	0,27
	6 000	1,99	0,67
	7 000	1,71	0,95
50	2 500	2,39	0,27
	3 000	1,99	0,67
	3 500	1,71	0,95
10	500	2,39	0,27
	1 000	1,20	1,47
	1 500	0,79	1,86

Tab. 9: Výsledky separací vodíku ze směsi membránou (permeance 60 nmol m⁻³ s⁻¹ Pa⁻¹)

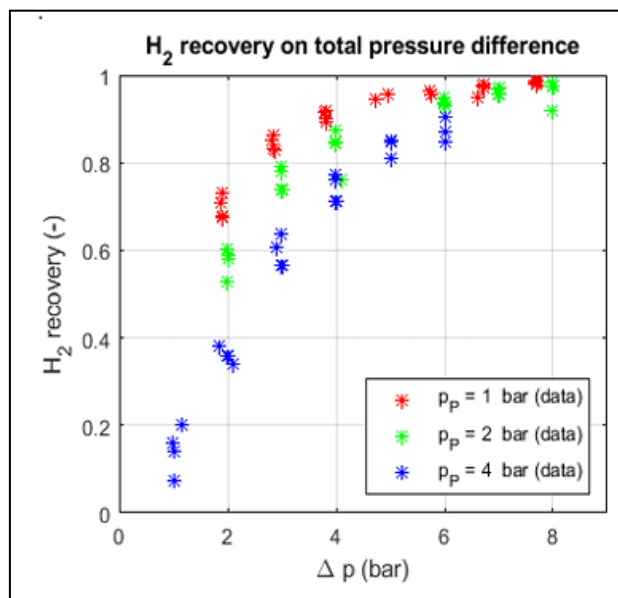
Z výsledků uvedených v tab. 9 lze vyvodit následující závěry:

- Pro získání co největší části vodíku ze směsi je zapotřebí mít rozsáhlou plochu vláken. V důsledku toho se zvětšují celkové rozměry modulu.
- Čistý vodík na výstupu má výrazně nižší tlak než směs vstupu. Aby byl proces separace účinný, je nutný velký tlakový rozdíl mezi vstupem a výstupem.

Rekuperace 100 % vodíku ze směsi odpovídá zisku 1,45 kg s⁻¹ vodíku. Toto množství je významné, protože i nejvýkonnější elektrolyzátor dokáže vyrobit pouze 4 320 kg vodíku za den (0,05 kg s⁻¹). Nejmodernější membránové moduly s dutými vlákny poskytují velmi vysokou plochu membrány na jednotku objemu, přibližně 1 200 m² m⁻³ [59]. Proto, aby byla například

zajištěna celková plocha vláken 7 000 m², je zapotřebí instalace membránového modulu o velikosti přibližně 6 m³.

Tyto výsledky jsou však pouze teoretické. Podle Seghmana a spol. [57] je rekuperace vodíku ze směsi logaritmicky závislá na celkovou tlakovou diferencí. Tato vlastnost je evidentní v grafech, které vznikly z jejich experimentů (obr. 19).



Obr. 19: Rekuperace vodíku pro směsi při různých tlacích [57]

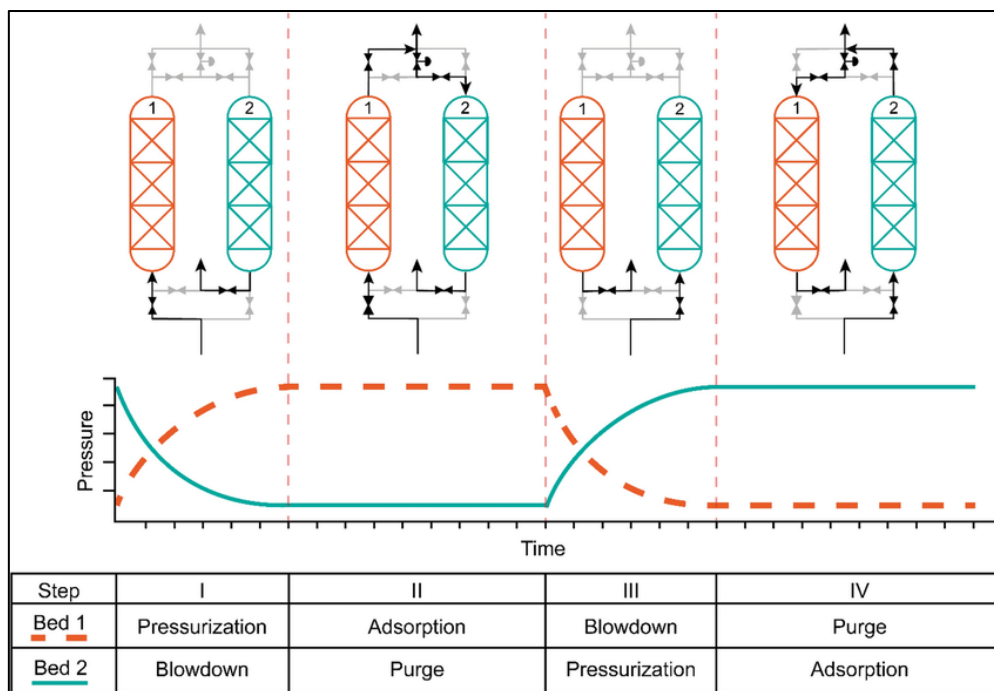
V literatuře nebyli nalezeny podobné grafy pro provozní podmínky, které jsou zkoumané v této práci. Každopádně lze předpokládat, že v reálné aplikaci lze získat menší množství vodíku než to, které je vypočítané.

Dalším problémem membránové separaci je čistota výsledného vodíku, která se pohybuje v rozmezí 95 % až 98 % [60]. To je pro použití vodíku jako chemické látky v dalším zpracování příliš nízko. Jak zmíněno v kapitole 3, minimální čistota vodíku pro využití v průmyslu je 98 %. Pro využití v palivových článcích je 99,97 %.

8.3.2. PSA

Tato metoda je založená na principu, podle kterého při vysokých tlacích, mají některé plyny tendenci být přitahovány k povrchu vysoce porézních materiálů, jako jsou zeolity. Proces spočívá v tom, že směs projde tlakovou nádobou naplněnou porézním materiálem. Po průchodu vodíku se tlak v nádobě sníží a oddělené složky zemního plynu se opět uvolní. Jeden cyklus PSA představuje 4 kroky: natlakování, adsorpce, odtlakování a desorpce [61].

Tlakové nádoby obvykle fungují ve dvojicích. První nádoba je natlakována a naplněna směsí. Během natlakování je metan zachycen zeolitovou náplní. Jakmile je nádoba plná, čistý vodík je uvolněn z horní části kolony. Následně se první nádoba začne odtlakovávat, zatímco druhá je natlakována a naplněna směsí. Jakmile je druhá nádoba plná, čistý vodík je uvolněn z horní části kolony. Mezitím je odpadní metan z první nádoby vypuštěn přes výfukový systém. Tímto způsobem se cyklus opakuje.



Obr. 20: PSA cyklus pro dvě nádoby [62]

Tato metoda pro separaci vodíku je momentálně nejvíce ve vývoji, protože její účinnost roste s rostoucím tlakem, což je výhodou vzhledem k tomu, že směs zemního plynu a vodíku proudí v potrubí již poměrně vysokým tlakem. Nevýhodou však je, že kvůli vysoké koncentraci metanu ve směsi jsou zapotřebí větší zařízení a více adsorpčních cyklů k dosažení co nejvyšší rekuperace a čistoty vodíku. K zajištění nepřetržitého toku čistého vodíku, je rovněž zapotřebí instalace většího počtu plněných nádob (obvykle 4 a více) [60] [61].

Po průchodu cykly, je vodík získáván přibližně o stejném tlaku jako na vstupu, snížený pouze o tlakovou ztrátu. Zemní plyn je získáván při nízkém tlaku, obvykle atmosférickém. Pro jeho další využití je proto nutné ho nejprve stlačit.

8.3.3. Kombinovaná separace membránový modul – PSA

V této práci, vzhledem k vysokým průtokům a k velkému množství zemního plynu ve směsi, výhradní použití membránového modulu nebo PSA není vhodné. Membránovým modulem lze dosáhnout pouze nízké čistoty vodíku. Dále samotný PSA vyžaduje rozsáhlé plochy pro umístění adsorpčních jednotek a časté regenerační cykly [58]. Proto je dobré zvážit zpětné získání čistého vodíku z hybridního využití membránových modulů a cyklů PSA. Tímto způsobem lze dočistit vodík získaný jako permeát z membrány, a PSA by byl použit jako dočišťovací prostředek, čímž by se snížily jeho nároky.

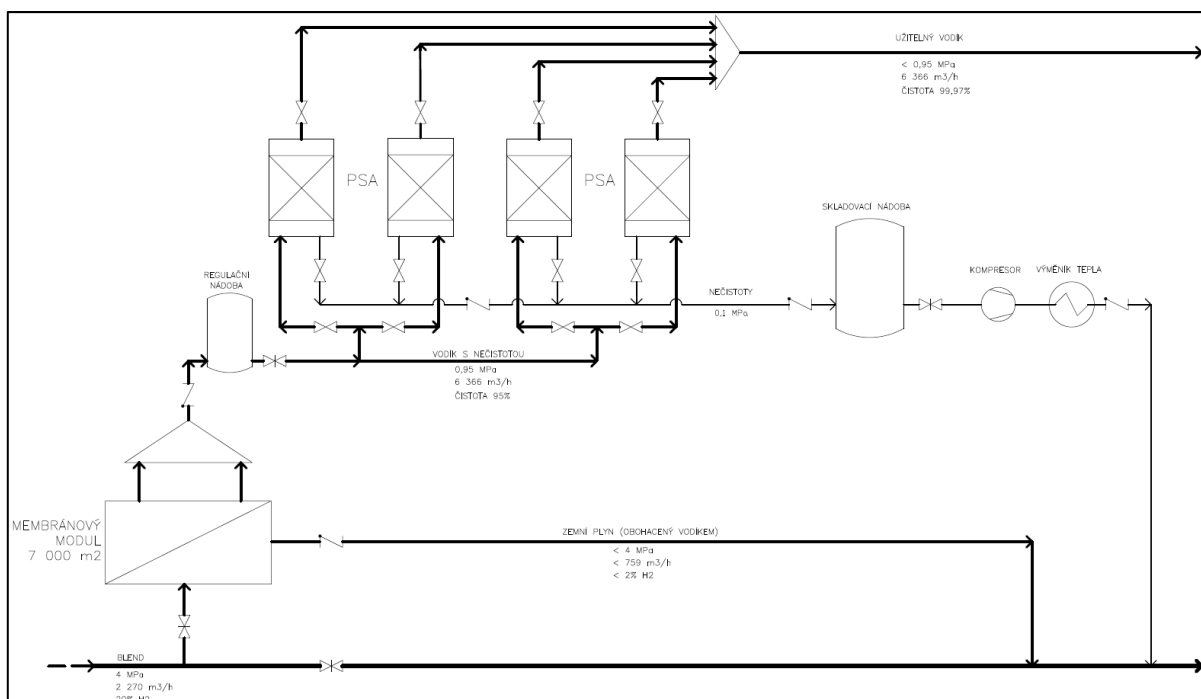
Při zvažování této možnosti je tlak vodíku na vstupu do PSA je totožný s tlakem v permeátu z membránové separace. Pokud je tento tlak nízký, znamená to, že tlakový rozdíl v membránovém modulem je vysoký. To má za následek, že vstupní směs do PSA obsahuje více vodíku, ale provoz PSA nemusí být optimální. Naopak, pokud je tlak vysoký, membránový modul není plně využit, ale současně se tím zvyšuje kapacita PSA.

Liemberger a spol. [61] uvádějí hybridní proces, při kterém lze získat alespoň 60 % H₂ o čistotě 98,0 % – 99,3 % ze směsi zemního plynu obsahujících 1 % – 10 % vodíku. Vstupní parametry směsi jsou tlak v rozmezí od 21 do 51 barů (2,1 až 5,1 MPa) a okolní teplota. Tyto podmínky jsou velmi podobné těm, které jsou uvedeny v této práci ($p_1 = 4 \text{ MPa}$, $T_1 = 8 \text{ °C}$). V jejich práci, se ukázalo, že ideální vstupní tlak vodíku do PSA by měl být v rozmezí 5 až 6 barů (0,5 až 0,6 MPa).

Z výsledků uvedených v tab. 9 lze vidět, že při využití větších membránových ploch, se parciální tlak vodíku v permeátu pohybuje od 0,67 do 0,95 MPa. Kombinace membránové separace a PSA je tedy dobrým řešením pro tuto aplikaci. Směs vycházející v retentátu z membránové separace je pod dostatečně vysokým tlakem, aby mohla být znovu vložena do distribuční sítě. Po dokončení PSA cyklů lze získat čistý vodík při tlaku kolem 0,95 MPa, který lze odeslat do chemických závodů pro výrobu syntetických paliv. Jediným problémem zůstává zbytkový zemní plyn získaný při atmosférickém tlaku na konci procesu PSA. Možností je jej uchovávat v nádobě a při potřebě ho zkomprimovat a vložit do distribuční sítě.

8.4. Technické provedení navržené zpětné separace

Níže je uvedeno strojně technologický schéma představující provedení separace vodíku kombinací membránového modulu a PSA (příloha 4).



Obr. 21: P&ID schéma výstupu (extrakt z výkresu v příloze 4)

Tok směsi zemního plynu a vodíku lze pomocí uzavíracích ventilů nasměřovat ke konečným spotřebitelům, nebo k membránovému modulu. Membránový modul má dva výstupy. První je směs, která má přibližně stejný tlak jako při vstupu. Tuto směs lze pak připojit do distribuční sítě. Zpětný ventil zabrání návratu směsi do membránového modulu.

Druhým výstupem je vodík obsahující nečistoty, včetně metanu. Zpětný ventil zabrání návratu vodíku do membránového modulu. Regulační nádoba zajišťuje reakce a správný chod soustavy i v případě poruchy nebo ostavení. Uzavírací ventil umožňuje vstup vodíku do plněných nádob určených pro dočištění. Sada regulačních ventilů zajišťuje správný chod cyklů PSA.

Z PSA cyklů vycházejí dva výstupy. Prvním výstupem je čistý vodík s tlakem přibližně 0,95 MPa. Druhým výstupem je malé množství nečistot, včetně metanu, které lze skladovat v nádobě. V případě potřeby, po otevření uzavíracího ventilu, lze tuto směs stlačit, ochladit a následně připojit do distribuční sítě.

9. Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumání stávající technologie výroby, přepravy a zpracování vodíku. V rámci řešeršní části bylo zjištěno, že technologií pro výrobu vodíku je mnoho a jsou již prošlé značným vývojem, stejně jako technologie pro jeho zpracování. Vodík má mnoho možností využití, například v automobilovém průmyslu, chemických odvětvích a existují nové turbíny a kotle, které jsou schopné spalovat směsi zemního plynu a vodíku. Na základě této řešerše pak byla navrhována linka s potřebnými zařízeními pro přepravu vodíku v příměsi se zemním plynem ve stávajících plynovodech.

Přeprava vodíku v plynovodním potrubí má své výhody i nevýhody. Hlavní výhodou je snížení závislosti na zemním plynu při splnění stejných energetických požadavků. Navíc, pro spalování v turbínách nebo kotlích, není potřeba upravit směs a lze ji přímo spotřebovat. Hlavní nevýhodou je, že vodík se takto znečišťuje. Proto je nutné ho oddělit ze směsi před jeho použitím jako čistého prvku v průmyslu.

Ve výpočtové části byly na základě skutečných dat společností GasNet navrženy dva modely přepravy vodíku. V prvním modelu byl celkový přenos energie směsi stejný jako u samotného zemního plynu, zatímco ve druhém modelu byl zachován hmotnostní tok. Z výsledků bylo zjištěno, že první model je výhodnější než druhý. Poptávka po energii je splněná, a spotřebovává se méně zemního plynu i vodíku. Úspora zemního plynu činí až 41 %.

Přeprava vodíku, může být energeticky velmi náročná. Omezení týkající se přepravy ve stávajících plynovodech, kromě volby použitých materiálů, zahrnují i omezení v proudících rychlostech. Ty nesmí přesáhnout 15 m/s, resp. 25 m/s v přípojkách. Dalším limitem jsou teploty dosažené při kompresi vodíku, které nesmí přesáhnout 200 °C. Při srovnání jednostupňové a dvoustupňové komprese vodíku se ukázalo, že dvoustupňová je výhodnější. Z energetického hlediska je méně náročná, úspory na mechanickém příkonu a tepelném výkonu činí 6 %. Dále dosažené teploty nepřekročí 100 °C.

Z této práce lze odvodit že nejnáročnější část přepravy vodíku je jeho komprese a následné chlazení, ať už jde o přepravu ve vysokotlakých nádobách nebo plynovodech. V rámci vstupní části přepravy vodíku se také zvažovalo možné rozdělení toku vodíku do více větví. Tímto způsobem došlo ke snížení nároků na kompresi a chlazení v jednotlivých větvích. Navíc se zlepšila schopnost regulace soustavy.

V poslední části této práce byli porovnány možnosti spalování vodíku jak v turbíně, tak v kotli. V rámci možnosti zpětné rekuperace vodíku ze směsi byly srovnány membránová separace a PSA. Použité samostatně, tyto technologie nejsou příliš účinné. Membránovým modulem lze dosáhnout pouze nízké čistoty vodíku, kolem 95 %. Pro využití v průmyslu je minimální čistota 98 %. Pro využití v palivových člancích je 99,97 %. Samotný PSA vyžaduje větší zařízení a více adsorpčních cyklů k dosažení co nejvyšší rekuperace a čistoty vodíku. To je způsobeno vysokou koncentrací metanu ve směsi. Optimálního výsledku je tedy dosaženo kombinací obou metod, jak membránové separace, tak PSA. Separace nevyžaduje žádnou další technickou práci, jelikož směs již má vysoký tlak. Po ukončení separace mají jak vodík, tak zemní plyn dostatečně vysoké tlaky pro další využití.

Přeprava v plynovodech představuje reálnou možností pro budoucnost vodíkové ekonomiky.

Seznam symbolů

A	celková plocha výměníku tepla	$[\text{m}^2]$
C	koncentrace	$[-]$
c	rychlost	$[\text{m s}^{-1}]$
\bar{c}	střední objemová rychlost	$[\text{m s}^{-1}]$
D	průměr plynovodu	$[\text{m}]$
\mathcal{D}	objemový zředovací faktor	$[-]$
d	průměr napájecí trubky	$[\text{m}]$
E	energetický obsah	$[\text{kWh kg}^{-1}]$
h	měrná entalpie	$[\text{J kg}^{-1}]$
K	součinitel prostupu tepla výměníku	$[\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$
k	relativní drsnost	$[-]$
$k_{stř}$	střední absolutní drsnost vnitřního povrchu potrubí	$[\text{m}]$
L	tloušťka vláken	$[\text{m}]$
l	délka	$[\text{m}]$
M	molární hmotnost	$[\text{kg mol}^{-1}]$
M_r	poměr hybností	$[-]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
\dot{m}	hmotnostní tok	$[\text{kg s}^{-1}]$
n	látkové množství	$[\text{mol}]$
P	příkon	$[\text{W}]$
P_{sep}	permeabilita	$[\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
\dot{Q}	tepelný výkon	$[\text{W}]$
R	univerzální plynová konstanta	$[\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}]$
R_{sep}	rekuperace	$[-]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	celková plocha vláken	$[\text{m}^2]$
T	teplota	$[\text{K}]$
V	objem	$[\text{m}^3]$
\dot{V}	objemový tok	$[\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$
\bar{w}	střední hustota hmotnostního toku	$[\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$
y	molární koncentrace plynné složky	$[-]$
η	účinnost	$[-]$

κ	Poissonovo číslo	[-]
λ	součinitel hydraulického tření	[-]
μ	dynamická viskozita	[Pa s]
ρ	hustota	[kg m ⁻³]

Dolní indexy:

<i>ad</i>	adiabatický
<i>ch</i>	vztaženo k chladicímu médiu
<i>D</i>	vztaženo k látce v trubce
<i>d</i>	vztaženo k látce v plynovodu
<i>F</i>	vztaženo ke vstupu (feed)
<i>h</i>	vztaženo ke chlazené látce
<i>i</i>	vztaženo k složce i
<i>id</i>	ideální
<i>in</i>	na vstupu
<i>j</i>	vztaženo k složce j
<i>m</i>	vztaženo k motoru
<i>N</i>	vztaženo k normálních podmínkách
<i>out</i>	na výstupu
<i>P</i>	vztaženo k permeátu
<i>s</i>	vztaženo ke směsi
<i>t</i>	termický
<i>tot</i>	celkový
<i>1</i>	počáteční hodnota
<i>1</i>	první
<i>2</i>	koneční hodnota
<i>2</i>	druhý

Horní indexy:

<i>m</i>	hmotnostní
*	bezrozměrná veličina

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma elektrolýzy vody [5]	10
Obr. 2: Řez turbíny SGT-400 [16].....	13
Obr. 3: Sekvenční spalování v turbíně GT36 [18].....	14
Obr. 4: Srovnání míchací schopností vodík – zemní plyn při různých rychlostech [26]	17
Obr. 5: Předběžný schéma vstupu vodíku do hlavního plynovodu	23
Obr. 6: T-s diagram dvojstupňové komprese [36]	25
Obr. 7: Sada turbokompresorů na vodík společností Mitsubishi.....	27
Obr. 8: Mechanický a hydraulický pístový kompresor [20].....	28
Obr. 9: Schéma membránového kompresoru [47]	29
Obr. 10: Šroubový kompresor [48]	29
Obr. 11: Schéma šroubového kompresoru [37].....	30
Obr. 12: Radiální turbokompresor na vodík společností Mitsubishi [42]	30
Obr. 13: Lopatky používané v radiálních turbokompresorů [42].....	30
Obr. 14: Výměník tepla typu PCHE [51]	32
Obr. 15: Mřížkové statické směšovače pro plyny [54].....	33
Obr. 16: Vývoj COV ve vzdálenosti od T přípojky pro různé rychlosti [38].....	33
Obr. 17: P&ID schéma provozu (extrakt z výkresu v příloze 3).....	34
Obr. 18: Průřez membránového modulu s dutými silikonovými vlákny [56].....	36
Obr. 19: Rekuperace vodíku pro směsi při různých tlacích [57].....	38
Obr. 20: PSA cyklus pro dvě nádoby [62].....	39
Obr. 21: P&ID schéma výstupu (extrakt z výkresu v příloze 4)	40

Seznam tabulek

Tab. 1: Výchozí parametry proudícího zemního plynu [29]	18
Tab. 2: Vlastností plynů při daných pracovních podmínkách	19
Tab. 3: Hmotnostní tok a přenášená energie zemním plynem	20
Tab. 4: Srovnání výpočtových modelů 1 a 2	21
Tab. 5: Třecí tlakové ztráty vodíku	24
Tab. 6: Energetická náročnost komprese vodíku před vstupu do plynovodní soustavy.....	26
Tab. 7: Přehled příkonů a výkonů jednotlivých zařízení.....	27
Tab. 8: Souhrn permeancí vodíku u některých běžných membránových materiálů	37
Tab. 9: Výsledky separací vodíku ze směsi membránou (permeance $60 \text{ nmol m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)....	37

Přílohy

Příloha 1: Výpočtový excel.....	Program Excel na CD
Příloha 2: Metoda půlení intervalů.....	Program MatLab na CD
Příloha 3: P&ID schéma vstupu vodíku do distribuční sítě.....	1xA0
Příloha 4: P&ID schéma výstupu vodíku z distribuční sítě.....	1xA1

Bibliografie

- [1] *COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS*. Verze 301. European Commission, 2020.
- [2] ERBACH, Gregor a Sara SVENNSON. *EU rules for renewable hydrogen: Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin*. PE 747.085, 2023.
- [3] MINISTERSTVO OBCHODU A PRŮMYSLU. *Vodíková strategie České Republiky*. Verze 30.
- [4] The hydrogen colour spectrum. In: *National Grid* [online]. [cit. 2023-12-07]. Dostupné z: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>
- [5] Combined hydrogen and power production. In: *Nebb.com* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://info.nebb.com/combined-hydrogen-and-power-production>
- [6] Vodík je pro moderní energetiku klíčový. Vyrobité ho ale dost bez jádra?. In: *Energiebezemisi.cz* [online]. [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: <https://energiebezemisi.cz/novinky-v-oboru/jadro-vodik-evropa/>
- [7] GARDONĚ, Lukáš. *Využití ethanolu při alternativní výrobě vodíku*. Pardubice, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [8] BLÁŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. 2. Praha: VŠCHT Praha, 2006. ISBN 80-7080-619-2.
- [9] *Enapter* [online]. In: . [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.enapter.com/>
- [10] ŽIŽKA, Jan. Vladimír Matolín: Náš start-up se zrodil díky aktivitám na fakultě. In: *Vědavýzkum.cz* [online]. [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://vedavyzkum.cz/rozhovory/rozhovory/vladimir-matolin-nas-start-up-se-zrodil-diky-aktivitam-na-fakulte>
- [11] AIELLO, Valeria. Cos'è l'idrogeno bianco e perché il giacimento scoperto in Francia può servire a salvare il pianeta. In: *Fanpage.it* [online]. [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://www.fanpage.it/innovazione/scienze/cose-lidrogeno-bianco-e-perche-il-giacimento-scoperto-in-francia-puo-servire-a-salvare-il-pianeta/>
- [12] MACEK, Jan. Vodík v energetice a dopravě. In: *Časopis stavebnictví* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-vodik-v-energetice-a-doprave.html>
- [13] TOPOLSKI, Kevin a Evan REZNICEK. *Hydrogen Blending into Natural Gas Pipeline Infrastructure: Review of the State of Technology*. NREL/TP-5400-81704, 2022.

- [14] DBI GAS- UND UMWELTTECHNIK GMBH, FRONTIER ECONOMICS LIMITED. *H₂ purity: H₂ short study: Hydrogen quality in an overall German hydrogen network*. 2022.
- [15] GIACOMAZZI, Eugenio a Giuseppe MESSINA. Hydrogen and the fuel-flexibility dilemma in gas turbines. In: *Pianeta idrogeno*. Dostupné z: doi:10.12910/EAI2021-024
- [16] SGT-400 gas turbine. In: *Siemens Energy* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgt-400.html#/>
- [17] Turbine a idrogeno con il progetto FLEX4H2. In: *Hydronews.it* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://hydronews.it/turbine-a-idrogeno-con-il-progetto-flex4h2-guidato-da-ansaldo-energia-e-finanziato-da-unione-europea-e-svizzera/>
- [18] *HYDROGEN TECHNOLOGY: Ansaldo Energia solutions for Hydrogen combustion: fast-forward to a Hydrogen Fueled Future*. 2023. Dostupné také z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/Review_2023/AnsaldoEnergia-HydrogenTechnology-20230927.pdf
- [19] I pericoli dell'idrogeno. In: *Crowcon* [online]. [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.crowcon.com/it/blog/the-dangers-of-hydrogen/>
- [20] KNOP, Vincent. Hydrogen compression. In: *Awoe.net* [online]. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.awoe.net/Hydrogen-Compression-General.html>
- [21] Material selection. In: *H2tools* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/material-selection>
- [22] Idrogeno come combustibile: i pro e i contro. In: *Pirelli.com* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.pirelli.com/global/it-it/road/auto/idrogeno-come-combustibile-i-pro-e-i-contro-49365/>
- [23] Hydrogen Storage Tanks: The Types, The Pitfalls, and the Solutions. In: *DIDION'S MECHANICAL* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: <https://didionvessel.com/hydrogen-storage-tanks/>
- [24] OSTATNICKÝ, Michal, Ph.D. *Přednáška: Ovlivni budoucnost plynu*. CVUT CIIRC A, 19.04.2023.
- [25] Převravní soustava. In: *NET4GAS* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.net4gas.cz/cz/prepravni-soustava/>
- [26] EAMES, I., M. AUSTIN a A. WOJCIK. Injection of gaseous hydrogen into a natural gas pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022, **47**(61), 25745-25754. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.05.300
- [27] *Pipe-Within-A-Pipe*. Rinaldo S. Brutoco, James M. Ewan, Robert H. Shelton. US. 11,236,864. Přihlášeno 27.10.2020. Uděleno 01.02.2022. Dostupné také z: <https://uspto.report/patent/grant/11,236,864>

- [28] Přimíchávání vodíku k zemnímu plynu funguje. In: *OENERGETICE.cz* [online]. [cit. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/vodik/primichavani-vodiku-k-zemnimu-plynu-funguje>
- [29] GASNET, s.r.o. *Prezentace: Expansion technologies in PRS*. EuroTeQ Collider, Praha, 2022.
- [30] GASNET S.R.O. *Zásady pro projektování, výstavbu, rekonstrukce a opravy VTL plynovodů a přípojek do 40 bar*. 2. 2022.
- [31] KOLÁŘOVÁ, Helena, Vít ŠEDIVÝ a Radek ŠULC. *Základy fyzikální chemie*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03903-8.
- [32] Periodic Table of Elements. In: *National Library of Medicine* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>
- [33] Dynamická viskozita plynů. In: *Converter.cz* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.converter.cz/tabulky/dynamicka-viskozita-plynu.htm>
- [34] Viskozita zemních plynů v závislosti na teplotě. In: *Tzb-info* [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/93-viskozita-zemnich-plynu-v-zavislosti-na-teplote>
- [35] WILKE, C. R. A Viscosity Equation for Gas Mixtures. In: *The Journal of Chemical Physics*. Vol. 18. 1950, , s. 517-519. ISSN 0021-9606. Dostupné z: doi:10.1063/1.1747673
- [36] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. 2. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 80-010-1836-9.
- [37] RIEGER, František, Václav NOVÁK a Tomáš JIROUT. *Hydromechanické procesy I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3286-8.
- [38] FERNANDEZ, Leonardo Azevedo. *Simulation of flow conditions for natural gas and hydrogen blends for different points of the distribution natural gas network*. Porto, 2023. Diplomová práce. Universidade de Porto.
- [39] MILLER, Michael, Derrick BAUER, John MACHA, Eugene BROERMAN, Elizabeth TRILLO a Fassett HICKEY. Materials for the hydrogen economy. In: *Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy*. Elsevier, 2022, s. 477-520. ISBN 9780323903943. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-90394-3.00017-5
- [40] Coolprogit. In: *Web2py* [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://ibell.pythonanywhere.com/>
- [41] ŠAPOŠNIKOV, Vsevolod, Ivo POSSELT a František POMAJZL. *Atmosférické chladiče a chladicí věže*. 1. Praha: SNTL, 1977. Řada strojír. literatury.
- [42] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP. *Mistubishi hydrogen compressor*. Dostupné také z: chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://solutions.mhi.com/sites/default/files/assets/pdf/et-en/compressor_ENG.pdf

- [43] Centrifugal & axial compressors. In: *Baker Hughes* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.bakerhughes.com/centrifugal-axial-compressors>
- [44] Hydrogen compressors. In: *Direct Industry* [online]. [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/industrial-manufacturer/hydrogen-compressor-149209.html>
- [45] VYBO ELECTRIC. *Electric motors: H17R Series*. Technical catalogue. Dostupné také z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://vyboelectric.com/wp-content/uploads/2023/06/catalogue-H17R.pdf
- [46] GONZÁLEZ DÍEZ, Néstor, Simone VAN DER MEER a Jorge BONETTO. NORTH SEA ENERGY. *Technical assessment of Hydrogen transport, compression, processing offshore: As part of Topsector Energy: TKI Offshore Wind & TKI New Gas*. 2020. NSE3-D3.1.
- [47] What is a Hydrogen Compressor?. In: *Sundyne* [online]. [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.sundyne.com/what-is-a-hydrogen-compressor/>
- [48] AERZEN. *Hydrogen compression with screw compressors*. Dostupné také z: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.aerzen.com/fileadmin/user_upload/02_documents/02-02_applications/02-02-06_process_gas_technology/White_Paper_Hydrogen_Compression-EN.pdf
- [49] Hydrogen Cooling System. In: *Hyfindr* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/en/hydrogen-knowledge/hydrogen-cooling-system>
- [50] Difuzně svařované výměníky tepla (PCHE). In: *Alfalaval* [online]. [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.alfalaval.cz/produkty/prenos-tepla/deskove-vymeniky-tepla/difuzne-svarovane-vymeniky-tepla-pche/difuzne-svarovane-vymeniky-tepla-pche/>
- [51] XIE, Liyi, Dawei ZHUANG, Zhiqiang LI a Guoliang DING. Technical Characteristics and Development Trend of Printed Circuit Heat Exchanger Applied in Floating Liquefied Natural Gas. In: *Frontiers in Energy Research*. 2022, . ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2022.885607
- [52] *REGULATION (EC) No 79/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 January 2009 on type approval of hydrogen powered motor vehicles, and amending Directive 2007/46/EC*. Official Journal of the European Union, 2009. EC 79/2009.
- [53] In: PAUL, Edward, Victor ATIEMO-OBENG a Suzanne KRESTA. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. John Wiley and Sons, 2004, s. 422 - 441. ISBN 978-0-471-26919-9.
- [54] CANADA PIPELINE ACCESSORIES. *Static mixers* [online]. In: . [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://flowconditioner.com/static-mixers/>

- [55] LARA, Gerardo. Boilers running on hydrogen: What you need to know. In: *Power Engineering* [online]. [cit. 2024-05-02]. Dostupné z: <https://www.power-eng.com/hydrogen/boilers-running-on-hydrogen-what-you-need-to-know/#gref>
- [56] Membrane Basics - Liquid Contacting and Gas Separation. In: *PermSelect* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.permselect.com/membranes>
- [57] SEGHMAN, Petr, Lukáš KRÁTKÝ a Tomáš JIROUT. Syngas Components Recovery during Membrane Gas Separation. In: *Chemical Engineering Transactions*. 2021, s. 763 - 768. Dostupné z: doi:10.3303/CET2188127
- [58] LU, Hiep, Wen LI, Ehsan MIANDOAB, Shinji KANEHASHI a Guoping HU. The opportunity of membrane technology for hydrogen purification in the power to hydrogen (P2H) roadmap: a review. In: *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2021, , s. 464-482. ISSN 2095-0179. Dostupné z: doi:10.1007/s11705-020-1983-0
- [59] DORAN, Pauline M. Unit Operations. In: *Bioprocess Engineering Principles*. Elsevier, 2013, s. 445-595. ISBN 9780122208515. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-220851-5.00011-3
- [60] GUOPING, Hu a Chen CHAO. *A Review of Technical Advances, Barriers, and Solutions in the Power to Hydrogen (P2H) Roadmap*. 2020.
- [61] LIEMBERGER, Werner, Markus GROß, Martin MILTNER a Michael HARASEK. Experimental analysis of membrane and pressure swing adsorption (PSA) for the hydrogen separation from natural gas. In: *Journal of Cleaner Production*. 2017, , s. 896-907. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.08.012
- [62] QUARANTA, Isabella, Larissa PINHEIRO, Daniel GONÇALVES, Hugo PEIXOTO a Sebastião LUCENA. Multiscale design of a pressure swing adsorption process for natural gas purification. In: *Adsorption*. 2021, , s. 1055-1066. ISSN 0929-5607. Dostupné z: doi:10.1007/s10450-021-00330-y