



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**Ústav energetiky**

**Výroba vodíku z OZE pro využití v  
chemickém průmyslu**

**Hydrogen production from renewable  
energy for chemical industry**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2023**

**Robert NĚMEC**

**Studijní program:** (B2342) Teoretický základ strojního inženýrství

**Studijní obor:** 2301R000 bez oboru

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Krempaský

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Robert** Osobní číslo: **501501**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Výroba vodíku z OZE pro využití v chemickém průmyslu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Hydrogen production from renewable energy for chemical industry**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte systém výroby vodíku z elektřiny z OZE s následným využitím vodíku pro výrobu amoniaku.

Dílčí cíle:

1. Zpracujte rešerši k technologii výroby a skladování vodíku z elektrolýzy a alternativním způsobům ukládání elektrické energie
2. Zpracujte rešerši na téma výroby amoniaku a popište možnosti snížení emisí CO<sub>2</sub> při stávajícím způsobu výroby amoniaku
3. Navrhněte systém výroby vodíku z elektřiny z OZE (kombinace fotovoltaické a větrné elektrárny) s využitím vodíku pro stávající výrobu amoniaku
4. Vytvořte ekonomický model navrženého systému a proveďte ekonomické hodnocení návrhu

Seznam doporučené literatury:

Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review, Manuel Götz, 2016  
Vodíková strategie ČR, MPO ČR, 2021  
Technology brief - hydrogen, UNECE, 2021  
Ammonia Technology Roadmap, IRENA, 2021  
Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store, The Royal society, 2020  
A další dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jakub Krempaský ústav energetiky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Jakub Krempaský  
podpis vedoucí(ho) práce

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

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

<b>Autor:</b>	Robert Němec
<b>Název BP:</b>	Výroba vodíku z OZE pro využití v chemickém průmyslu
<b>Rok vyhotovení:</b>	2023
<b>Studijní program:</b>	(B2342) Teoretický základ strojního inženýrství
<b>Obor studia:</b>	2301R000 bez oboru
<b>Ústav:</b>	Ústav energetiky
<b>Vedoucí BP:</b>	Ing. Jakub Krempaský
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 82 Počet obrázků: 25 Počet grafů: 3 Počet tabulek: 19 Počet příloh: 2

**Klíčová slova:** Power to X, Power to gas, akumulace elektrické energie, amoniak, vodík

## **Anotace:**

Tato práce je zaměřena na vodíkové technologie. Tedy možnosti výroby a využití vodíku s důrazem na výrobu nízkoemisního amoniaku. První část práce se zabývá rešerší a porovnáním jednotlivých technologií výroby a využití vodíku. Další část práce je věnována koncepčnímu návrhu a ekonomickému hodnocení výroby amoniaku pomocí obnovitelné energie.

<b>Author:</b>	Robert Němec
<b>Subject of the bachelors thesis:</b>	Hydrogen production from renewable energy for chemical industry
<b>Year:</b>	2023
<b>Study programme:</b>	(B2342) Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering
<b>Specialization:</b>	No Special Fields of Study
<b>Department:</b>	Department of energy
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jakub Krempaský
<b>Bibliographic data:</b>	Number of pages: 82 Number of pictures: 25 Number of figures: 3 Number of tables: 19 Number of attachments: 2

**Key words:** Power to X, Power to gas, electric energy storage, ammonia, hydrogen

### **Annotation:**

This bachelors thesis deals with hydrogen technology. Thus ways how hydrogen can be produced and used, with focus on production of green ammonia. First part of the work is a review of hydrogen technology and ammonia production. The next part of the work is focused on conceptual design of a green ammonia production facility and its economic evaluation.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Jakubovi Krempaskému za vstřícný přístup a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za ekonomickou i morální podporu během studia. A v neposlední řadě mé díky patří všem kolegům z fakulty, kteří mi během studia byly ochotni poskytovat cenné rady a díky nimž bylo studium mnohem pestřejší.

# Obsah

Obsah.....	8
Seznam použitých zkratk.....	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam grafů.....	12
Seznam tabulek.....	12
1 Úvod.....	13
2 Akumulace elektrické energie.....	14
2.1 Záložní zdroje.....	15
2.2 Krátkodobá akumulace.....	15
2.3 Dlouhodobá akumulace.....	16
3 Akumulace elektrické energie do vodíku.....	17
3.1 Výroba elektrolýzou vody.....	17
3.2 Alkalická elektrolýza vody (AWE).....	17
3.3 Elektrolýza s polymerovou membránou (PEM).....	19
3.4 Vysokoteplotní elektrolýza vody (SOE).....	20
3.5 Srovnání investičních nákladu pro jednotlivé druhy elektrolýzy.....	21
3.6 Skladování vodíku.....	22
3.7 Zpětná výroba elektrické energie.....	25
4 Power to X.....	27
4.1 Zdroje vstupních komodit.....	27
4.2 Výstupní suroviny.....	28
4.3 Srovnání vodíku s ostatními palivy.....	31
5 Taxonomie.....	32
6 Amoniak.....	33
6.1 Amoniak ve světě.....	33
6.2 Amoniak v ČR.....	33
6.3 Parní reforming zemního plynu.....	34
7 Nízkoemisní výroba.....	37
7.1 Technologie CCS.....	37
7.2 Výroba pomocí zeleného vodíku.....	39
8 Návrh systému výroby amoniaku pomocí OZE.....	41
8.1 Úvod.....	41
8.2 Technologie pro výrobu vodíku.....	41
8.3 Technologie pro výrobu dusíku.....	42



8.4	Základní návrhové výpočty.....	44
8.5	Energetická bilance .....	46
9	Návrh obnovitelného zdroje .....	52
9.1	Nízkoemisní zdroje energie.....	52
9.2	Finální parametry zdroje .....	54
9.3	Návrh velikost akumulace.....	62
9.4	Schéma systému výroby amoniaku .....	63
10	Ekonomické zhodnocení.....	64
10.1	Investiční náklady .....	64
10.2	Provozní náklady .....	65
10.3	Výpočet diskontované návratnosti .....	67
10.4	Výsledky.....	68
11	Závěr .....	70
12	Bibliografie .....	71
13	Přílohy.....	82

## Seznam použitých zkratk

- CCS – carbon capture and storage – zachytávání a ukládání uhlíku
- OZE – obnovitelné zdroje energie
- FVE – fotovoltaická elektrárna
- VTE – větrná elektrárna
- VE – vodní elektrárna
- CAES – compressed air energy storage – uložště energie ve stlačeném vzduchu
- SSCAES – small scale compressed air energy storage – malá uložště energie ve stlačeném vzduchu
- AWE – alkaline water electrolysis – alkalická elektrolýza vody
- PEM – polymer exchange membrane – elektrolýza vody s polymerovou membránou
- SOE – solid oxide electrolysis – elektrolýza s pevnými oxidy též vysokoteplotní elektrolýza
- DAC – direct air capture – přímé zachycení ze vzduchu
- PSA – pressure swing adsorption – adsorpce změnou tlaku
- ASU – air separation unit – jednotka pro separaci vzduchu
- DF – diskontní faktor
- CF – cash flow – peněžní tok
- DCF – diskontovaný peněžní tok
- NPV – net present value – čistá současná hodnota
- PPM – parts per million – koncentrace složky – počet částic složky v milionu částic směsi
- CO<sub>2</sub>eq – CO<sub>2</sub> ekvivalent
- m<sup>3</sup> – objem – metr krychlový
- Nm<sup>3</sup> – Objem plynů – normální metr krychlový
- ms – čas – milisekunda
- M<sub>i</sub> – relativní molekulová hmotnost složky – [g/mol]
- N<sub>i</sub> – Látkové množství složky – [mol]
- m<sub>i</sub> – hmotnost složky – [g]
- P – výkon – [W]
- We – Elektrický výkon [W]
- Wp – watt peak – maximální dosažitelný výkon [W]
- h – výška – [m]
- v – rychlost – [m/s]
- m.n.m. – metrů nad mořem – nadmořská výška
- t – teplota – [°C]
- T – termodynamická teplota – [K]
- p – tlak – [Pa]
- $\dot{m}$  – hmotnostní tok – [g/s]
- $\dot{n}$  – tok látkového množství – [mol/s]
- R – univerzální plynová konstanta – [J K<sup>-1</sup> mol<sup>-1</sup>]
- $\eta$  – účinnost – [%]
- $\dot{V}$  – objemový tok – [m<sup>3</sup>/s]
- $\pi$  – kompresní poměr – [-]

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Diagram závislosti energetické kapacity jednotlivých úložišť a doby po kterou jsou schopny dodávat energii. [6] .....	14
Obrázek 2 - Dvoučlánkový konvenční elektrolyzátor [17] .....	18
Obrázek 3 - Schéma výroby vodíku za použití alkalického elektrolyzátoru [17] .....	18
Obrázek 4 - Schéma dějů na elektrodové sestavě [14].....	19
Obrázek 5 - Schéma PEM elektrolyzátoru [12] .....	19
Obrázek 6 - Grafické znázornění spotřeby energie při vysokoteplotní elektrolýze vody [11].....	20
Obrázek 7 - Schéma vysokoteplotního elektrolyzátoru [11] .....	20
Obrázek 8 - Vizualizace ztrát [26] .....	25
Obrázek 9 - Účinnosti jednotlivých palivových článků [29] .....	26
Obrázek 10 - Schéma propojení jednotlivých odvětví ekonomiky pomocí technologií P2X [35] .....	27
Obrázek 11 - Schéma sestavy pro syntézu methanolu [39].....	28
Obrázek 12 - Vliv teploty a tlaku na podíl amoniaku [40].....	29
Obrázek 13 - Vliv teploty a tlaku na rovnováhu reakce při výrobě methanu [43]..	30
Obrázek 14 - Kroky výroby amoniaku za použití zemního plynu [40].....	34
Obrázek 15 - Primární a sekundární reformer [40].....	35
Obrázek 16 - Schéma konceptu pilotního projektu v Japonsku [58] .....	37
Obrázek 17 - Schéma separace CO <sub>2</sub> ze spalin pomocí absorpce [60].....	39
Obrázek 18 - Blokové schéma výroby amoniaku ze zeleného vodíku .....	39
Obrázek 19 - Schéma membránového generátoru dusíku [69] .....	42
Obrázek 20 - Membránový modul GENERON pro výrobu dusíku [71] .....	42
Obrázek 21 - Schematické zobrazení procesu adsorpce [106].....	43
Obrázek 22 - Výroba dusíku pomocí destilace vzduchu [107] .....	44
Obrázek 23 - Produktivita v závislosti na požadované čistotě dusíku s energetickou náročností pro jednotlivé metody [59].....	48
Obrázek 24 - Schéma numerické integrace metodou obdélníků .....	58
Obrázek 25 - Schéma navrženého systému.....	63

## Seznam grafů

Graf 1- Poměrné investiční náklady jednotlivých druhů elektrolýzy [108] .....	21
Graf 2 - Hustota pravděpodobnosti rychlosti větru dle Weibullova rozdělení [97] .....	57
Graf 3 - Výkonová křivka větrné elektrárny Dongfang G2000-116/FD 116-2000 [97] .....	60

## Seznam tabulek

Tabulka 1- Jednotlivé možnosti ukládání vodíku [13] [15] [23] [24].....	24
Tabulka 2 - Porovnání vlastností jednotlivých paliv .....	31
Tabulka 3 - Parametry jednotlivých elektrolyzérů [63] [65] [66].....	41
Tabulka 4 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro akumulční kompresor .....	47
Tabulka 5 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro kompresor 1 .....	49
Tabulka 6 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro kompresor 2 .....	50
Tabulka 7 - Tabulka energetické náročnosti jednotlivých celků při kontinuálním provozu.....	51
Tabulka 8 - Parametry pro jednotlivé varianty zdroje [91].....	53
Tabulka 9 - Parametry pro zdroj obnovitelné energie .....	54
Tabulka 10 - Tabulka parametrů větru pro cílovou lokalitu Loučná [97].....	56
Tabulka 11- Tabulka exponentů pro přepočtení rychlosti větru [98] .....	57
Tabulka 12 - Vypočtené hodnoty četností pro jednotlivé rychlosti větru.....	59
Tabulka 13 - Tabulka výkonu větrné turbíny v závislosti na nadmořské výšce [98] .....	59
Tabulka 14 - Přepočtená data pro větrný zdroj za předpokladu koeficientu využití maxima výkonu 27 % .....	61
Tabulka 15 - Parametry navrhovaného zdroje.....	61
Tabulka 16 - Investiční náklady a náklady na údržbu .....	66
Tabulka 17 - Náklady na energii a vodu.....	66
Tabulka 18 - Výsledné ceny amoniaku pro jednotlivé varianty .....	69
Tabulka 19 - Nutná velikost dotace pro základní scénář při současné ceně amoniaku pro variantu akumulace 3 a 1 den .....	69

# 1 Úvod

Působením lidské činnosti, jako je využívání fosilních paliv, dochází ke znečištění ovzduší skleníkovými plyny jako je CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>. V důsledku toho dochází k navyšování průměrné teploty planety země. Na základě dlouhodobého měření je odhadováno, že jsou lidské činnosti odpovědné za nárůst teploty o 0,8 až 1,2 °C vůči průměrné teplotě před průmyslovou revolucí. Rychlost nárůstu teploty však dále stoupá. Toto navyšování teploty má neblahý vliv na ekosystém. Vědecká komunita tak považuje za nutné udržet oteplení planety pod 2 °C. Z těchto důvodů byly přijaty plány pro udržitelný postup. Evropská unie je třetím největším producentem skleníkových plynů na světě, hned za USA a Čínou. Proto lze předpokládat, že pokud se Evropě podaří zásadním způsobem snížit emise, bude to mít globální dopad. V roce 2008 se tak EU zavázala ke snížení emisí vůči roku 1990 o 20 %, tento cíl byl již překonán a na základě pařížské dohody z roku 2016 nahrazen ambicióznějším plánem, který počítá se snížením emisí o 40 % do roku 2030. Dále byl vytyčen cíl pro dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050. V červnu 2021 byl evropským parlamentem tento cíl schválen za právně závazný s dílčím cílem snížení emisí skleníkových plynů oproti roku 1990 o 55 %, a to do roku 2030. [1] [2]

Jedním z nástrojů, pro dosažení těchto cílů je podpora rozvoje obnovitelných zdrojů energie. Transformace energetického systému je žádoucí, jelikož se jedná o největší zdroj skleníkových plynů v EU. Podíl spotřebované energie vyrobené z OZE v EU dosahuje v současnosti 22,1 %. To je více než dvojnásobek oproti stavu v roce 2009. Současný cíl pro rok 2030 je podíl obnovitelné energie 32 %. Toto číslo však nejspíš bude vyšší, jelikož v roce 2022 evropský parlament žádal o navýšení na 45 %. Nárůst podílu obnovitelné energie sebou však nese problémy pojící se s nestabilitou obnovitelných zdrojů. Zejména pak u fotovoltaických a větrných elektráren, které se budou významně podílet na tomto růstu. V důsledku závislosti jejich produkce na aktuálních podmínkách je výroba z těchto zdrojů nestabilní, navíc obvyklá maxima produkce nekorespondují se špičkami poptávky. To má velice neblahé dopady na stabilitu sítě a klade nároky na její přenosovou kapacitu. Existuje několik možných řešení. Variabilní cena elektrické energie, zálohování obnovitelných zdrojů plynovými turbínami, vhodný poměr fotovoltaických a solárních systémů či akumulace a jiné využití energie v době jejího přebytku. [3] [4]

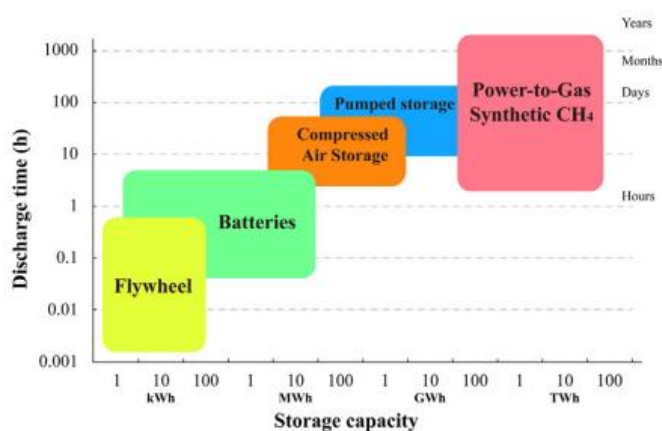
Cílem této práce je prozkoumat možnosti akumulace a využití nízkoemisní elektrické energie se zaměřením na vodíkové technologie. Vyjmenovat základní způsoby výroby a využití zeleného vodíku. Nastínit problematiku skladování a nakládání s vodíkem. Z dostupných možností následně podrobněji prozkoumat některou z variant. Představit konvenční řešení této problematiky a navrhnout možnosti snížení dopadů této činnosti na životní prostředí. Následně vypracovat koncepční návrh systému s využitím nízkoemisního vodíku. Tento návrh dále ekonomicky zhodnotit a stanovit podmínky pro zavedení této technologie.

## 2 Akumulace elektrické energie

V této sekci jsou představeny základní možnosti akumulace elektrické energie. Akumulaci elektrické energie můžeme dělit dle formy uložené energie:

- Tepelná
  - o Koncentrační solární elektrárny s akumulací zahřáté soli
  - o Ta je zahřáta na vysoké teploty řádově stovky °C, a přivedena do akumulací nádrže. Odtud je dle potřeby přiváděna do parogenerátoru a následně přivedena zpět k ohřevu. Pomocí vznikající páry je pak poháněna parní turbína roztáčející generátor.
- Mechanická
  - o Přečerpávací vodní elektrárny, úložiště stlačeného vzduchu a setrvačníky.
- Elektrochemická
  - o Bateriová úložiště
- Chemická
  - o Vodík, Amoniak, Biopaliva, Syntetický methan a methanol
- Ostatní
  - o Super kondenzátory, Supravodivé magnety

Důležitým faktorem je doba, na kterou je akumulace koncipována. Ta samozřejmě souvisí s energetickou kapacitou úložiště. Dle rychlosti náběhu a doby po kterou je systém schopen dodávat energii.



Obrázek 1 - Diagram závislosti energetické kapacity jednotlivých úložišť a doby po kterou jsou schopny dodávat energii. [6]

Zde rozlišujeme velmi krátkodobé systémy akumulace pro vyrovnání náhlých, avšak krátkodobých nárůstů spotřeby. Jde především o baterie kondenzátory či setrvačníky, jelikož mají velice krátké časy náběhu. Zpravidla se jedná o systémy nouzového napájení pro překlenutí doby nutné ke spuštění záložního zdroje. Další kategorií jsou systémy akumulace pro vyrovnání spotřeby v ekletické síti. Zde již není nutná extrémně krátká doba náběhu, jelikož jsou tyto výkyvy většinou předvídatelné. Naopak je nutná vyšší kapacita a doba provozu pro překlenutí odběrových špiček. Do této kategorie lze zahrnout bateriová úložiště vyšších kapacit a částečně také úložiště stlačeného vzduchu či přečerpávací elektrárny. Poslední kategorií jsou systémy dlouhodobé akumulace energie. Zde je

již nutné dosahovat velkých skladovacích kapacit, a tak jsou například bateriové technologie pro svou poměrně vysokou cenu nevhodné. Sem lze zařadit velké přečerpávací elektrárny, vysokokapacitní úložiště na bázi stlačeného vzduchu a dlouhodobé ukládání energie v podobě syntetických paliv či vodíku. [5] [6]

## 2.1 Záložní zdroje

### 2.1.1 Supravodivé magnetické úložiště

Tento koncept uvažuje ukládání elektrické energie do supravodivé cívky naindukováním proudu. Výhodou této technologie je vysoká účinnost 95 % rychlá odezva <100 ms. Díky tomu jsou vhodné pro vyrovnávání výkyvu v síti. Nevýhodou je nutnost kryogenního chlazení na teploty pod 70 K. [7]

### 2.1.2 Super kondenzátory

Jejich výhodou je vysoký počet cyklů. Nevýhodou je vysoká cena a samovybíjení 5 %/den. Tudiž se nehodí pro dlouhodobé ukládání. [7]

### 2.1.3 Setrvačníky

Zde je elektrická energie převedena na kinetickou roztočením setrvačníku. Ten následně pohání generátor a převádí tak kinetickou energii zpět na elektrickou. Výhodou tohoto řešení je vysoký počet cyklů a vysoké vybíjecí výkony. Celková účinnost se pohybuje okolo 90 %. Nevýhodou jsou časové ztráty v uložení setrvačníku. [8]

## 2.2 Krátkodobá akumulace

### 2.2.1 Bateriová úložiště

Bateriová úložiště jsou další možností, kterou je v dnešní době již možno vidět v praxi. Výhodou této technologie je, že je možné ji postavit takřka kdekoli, jelikož není závislá na zdroji vody či reliéfu krajiny ani příliš nepoškozuje krajinný ráz. Nevýhodou je zejména závislost na vzácných kovech a jiných chemických látkách a jejich tendence samovybíjení, tj. ztráta uložené energie v čase. Účinnosti se pohybují v závislosti na použitém typu baterie v rozmezí 50–99 % nejčastěji okolo 80 %. Samovybíjení potom od zanedbatelných hodnot až po 20 %/měsíc. [9]

### 2.2.2 Stlačený vzduch (SSCAES)

Další možností je stlačovat vzduch, který je v době přebytku uložen pod vysokým tlakem až 300 bar v tlakových nádobách. Odtud je následně v době nedostatku přiveden na turbínu, která pohání generátor. V ideálním případě je kompresor poté možno použít jako pneumatický motor a generátor. Účinnost takového cyklu se pohybuje okolo 50 %. Životnost systému je však omezena na několik desítek tisíc cyklů, kvůli namáhání tlakových nádob. [7]

## 2.3 Dlouhodobá akumulace

### 2.3.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Tradiční způsob ukládání energie, dosahuje vysokých vybíjecích a nabíjecích výkonů a kapacit. Účinnosti cyklu se pohybují v závislosti na konkrétním provedení v rozmezí 70-80 %. [10] Hlavní nevýhodou je zásadní zásah do krajiny, nutnost velkého množství vody a výškového rozdílu.

### 2.3.2 Vysokokapacitní úložiště stlačeného vzduchu (CAES)

Tato technologie je podobná již výše popsanému systému. Zásadní rozdíl však spočívá v použití stlačeného vzduchu v plynové turbíně. Není zde pro výrobu elektrické energie použita čistě mechanická energie v podobě jeho stlačení, ale je využito výhodnějšího kompresního poměru pro spalovací turbínu. Zbytkové teplo spalin je využito k přehřevu stlačeného vzduchu při expansi. Zde je ke skladování vzduchu použit podzemní rezervoár. Díky tomu odpadá problém s životností tlakových nádob. Uváděná účinnost tohoto systému je 70 %. [7]

### 2.3.3 Akumulace do vodíku a syntetických paliv

Do této skupiny patří celá řada technologií, v zásadě se jedná o výrobu vodíku pomocí elektrolýzy vody. Tento vodík je buď uskladněn a využit pro opětovné získání energie, či je použit jako základní složka pro výrobu syntetických chemikálií, které mohou být použity jako palivo či médium pro snazší uskladnění vodíku. Tyto technologie jsou dále podrobněji rozvedeny v sekci 3 a 4.

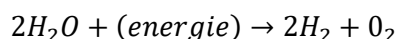


### 3 Akumulace elektrické energie do vodíku

Elektrickou energii je možné uložit v podobě chemické energie do vodíku. Ten je pro nás zajímavý zejména pro svou vysokou energetickou hustotu, tedy poměr mezi energií v něm uloženou a hmotností. V této oblasti totiž baterie za vodíkem zaostávají. Dále jeho širokou škálou využití. Dalším důležitým parametrem je poměr uložené energie ku objemu. Ten se může lišit v závislosti na způsobu jeho uložení. [11] Vodík tedy můžeme použít jako energetický nosič přímo v dopravě nebo jako vysokokapacitní úložiště elektrické energie.

#### 3.1 Výroba elektrolýzou vody

Výroba vodíku pomocí elektrické energie je realizována elektrolýzou vody. To je proces, kdy jsou pomocí elektrické energie rozštěpeny molekuly vody na plynný kyslík a vodík. Toto probíhá dle základní rovnice:



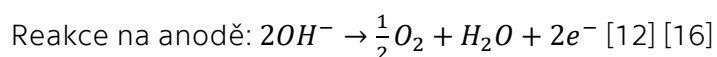
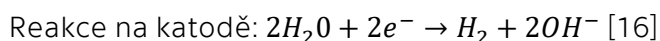
Pro funkci tohoto procesu je nutné, aby voda vedla elektrický proud. Z tohoto důvodu mohou být do vody přidávány zásady či kyseliny, které tuto vlastnost zajistí. Z hlediska principu rozlišujeme tyto hlavní metody. [12]

- Alkalická elektrolýza → zde je použit tekutý elektrolyt (AWE)
- Polymer electrolyte membrane → použití kyselého prostředí (PEM/SPE)
- Elektrolýza za použití tuhých oxidů → probíhá za vysokých teplot (HTE/SOE)

V současnosti je využíváno zejména technologií AWE a PEM. Ostatní způsoby zatím nejsou komerčně využívány. Nejblíže ke komerčnímu využití má právě technologie SOE a z tohoto důvodu je zařazena.

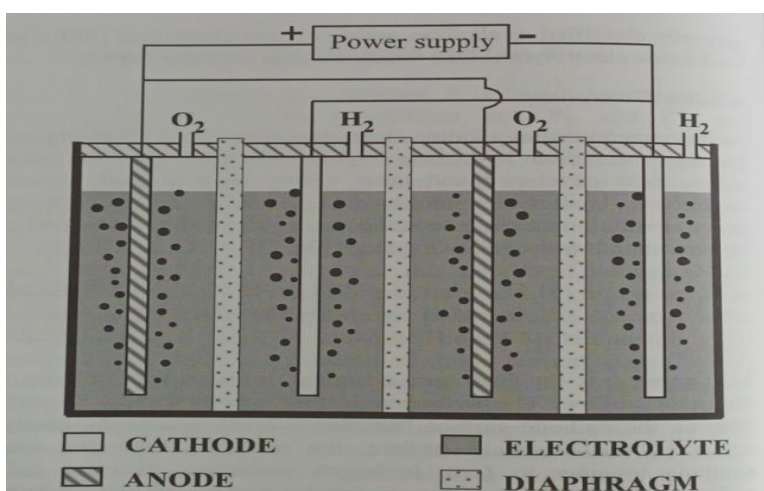
#### 3.2 Alkalická elektrolýza vody (AWE)

Jedná se o starý, avšak jednoduchý a osvědčený způsob výroby vodík z vody. Jde o nejlevnější variantu, ale i tak jsou náklady na výstavbu a údržbu poměrně vysoké. Při tomto procesu je voda na katodě rozložena na plynný vodík a hydroxidový iont. Ten následně projde membránou v elektrolýzáru a na anodě uvolní kyslík. Tento druh elektrolýzy probíhá při teplotách okolo 80 °C. Elektrolytem je zde roztok hydroxidu sodného, nebo hydroxidu draselného o koncentraci okolo 30 %<sub>hm</sub>. Nosičem elektrického náboje je zde hydroxidový iont. [12] [13] [14] [15]



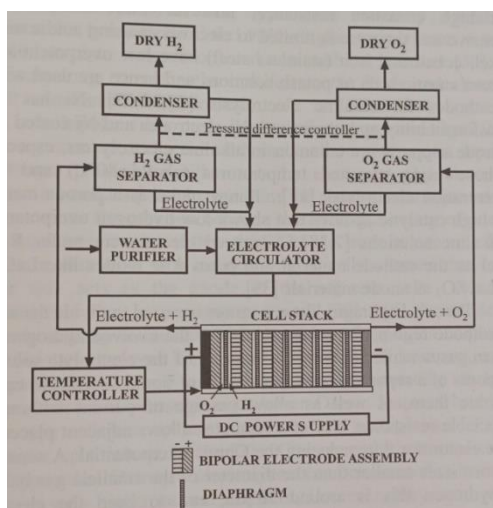
### 3.2.1 Konstrukce AWE elektrolyzáru

Tělo elektrolyzáru je tradičně konstruováno z korozivzdorné oceli. [17] Dále se zde nachází membrána, která slouží k oddělení prostoru katody a anody a zabraňuje smísení produkovaného kyslíku a vodíku. Dále se zde nacházejí samotné elektrody. Tyto komponenty musejí odolávat korozi způsobené zásaditým prostředím. [13] Pro konstrukci membrány se dříve používal asbest, ten je dnes z bezpečnostních důvodů nahrazen polymery (PES) či kompozit na bázi keramiky. Katody jsou vyráběny z mnoha různých kovů, záleží na konkrétním elektrolyzáru. Může být použito například olovo, měď, kobalt a další. Pro Anodu je nejčastěji volen nikl a jeho slitiny, avšak není to pravidlem. Účinnosti těchto článků se pohybují okolo 70 % vzhledem ke spalnému teplu vodíku. [12]



Obrázek 2 - Dvoučlánkový konvenční elektrolyzáru [17]

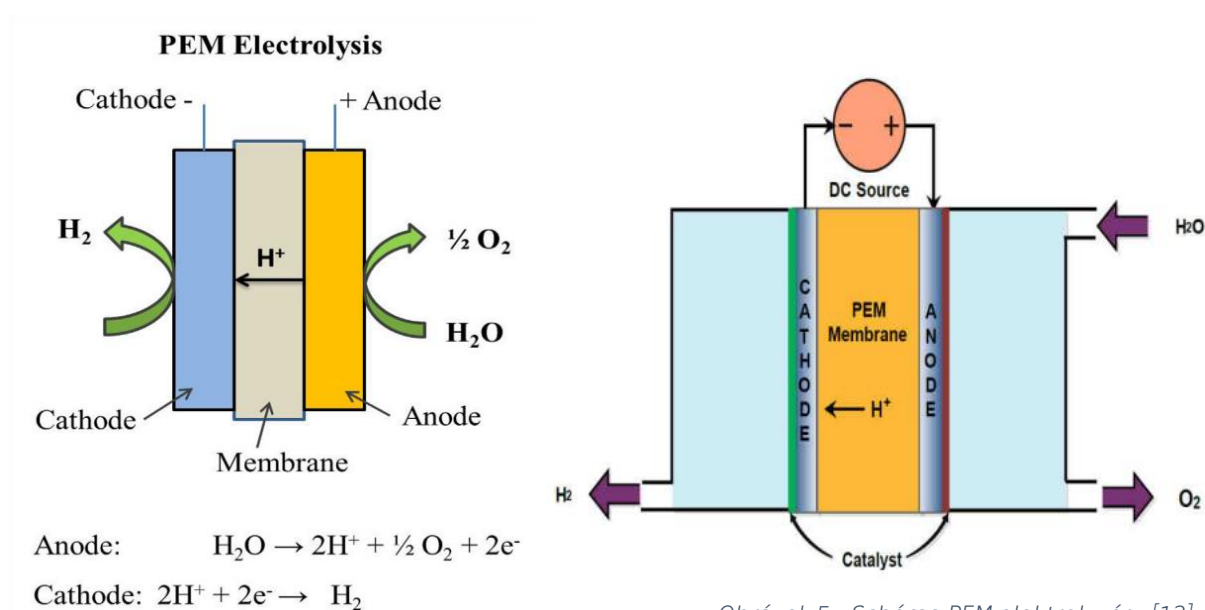
Dále je nutné si uvědomit, že ať už se jedná o jakýkoli způsob elektrolýzy je elektrolyzáru pouze jednou součástí aparatury nutné ke shromáždění a dalšímu zpracování vodíku. Celé zařízení je schématicky zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3 - Schéma výroby vodíku za použití alkalického elektrolyzáru [17]

### 3.3 Elektrolýza s polymerovou membránou (PEM)

Tento typ elektrolýzy byl vyvinut začátkem šedesátých let s cílem překonat nevýhody alkalické elektrolýzy. Oproti alkalické elektrolýze dosahuje vyšší účinnosti a čistoty vodíku. Velkou výhodou je dále také absence nutnosti přidání chemických látek do vody, jelikož zde je elektrolyt zastoupen samotnou membránou. Významnou nevýhodou je vyšší cena způsobena použitím vzácných kovů pro materiál elektrod. [12] [14] Dnes uváděné účinnosti vztažené ke spalnému teplu vodíku se pohybují okolo 80 %. [18] Voda je přivedena na anodu, kde dojde k rozštěpení vody na kyslík  $O_2$ , vodíkový kationt  $H^+$  a elektron  $e^-$ . Kationt vodíku projde membránou a na katodě je k němu přiveden elektron, který obešel membránu elektrickým obvodem. Při tom dojde k uvolnění plynného vodíku. [14] Toto je včetně elektrodových rovnic zobrazeno na obrázku 4.



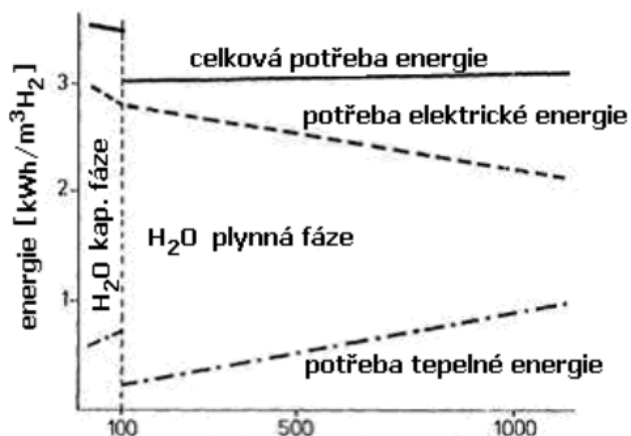
Obrázek 4 - Schéma dějů na elektrodové sestavě [14]

Obrázek 5 - Schéma PEM elektrolýzéry [12]

Jak je ze schémat patrné v tomto případě je hlavní součástí článku elektrodová sestava. Jelikož zde jsou na rozdíl od AWE elektrody přímo na membráně, která zastává funkci elektrolytu.

### 3.4 Vysokoteplotní elektrolýza vody (SOE)

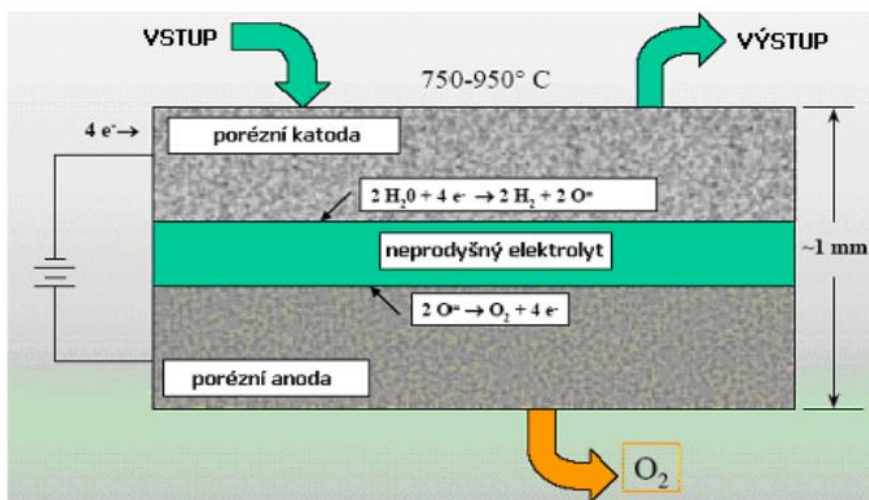
Tento typ elektrolýzy probíhá za vysokých teplot 400-800 °C. [14] [13] Díky tomu stačí k rozštěpení vody nižší napětí, jelikož je část energie nahrazena teplem. [12] V tomto ohledu je do budoucna atraktivní využití moderních reaktorů, které mají vysoké výstupní teploty chladiva. [11] Nedávno bylo dosaženo pomocí této metody rekordní účinnosti 84 % vztažené k výhřevnosti tedy přes 90 % k spalnému teplu. [19] Poměr elektrické a tepelné energie a množství celkové nutné energie ukazuje obrázek 6. Další výhodou této metody je stejně jako u metody PEM absence chemické úpravy vody a s tím spojené riziko koroze. Nevýhodou je poté degradace materiálů v důsledku vystavení vysokým teplotám a nároky na zdroj vysoko potenciálového tepla.



Obrázek 6 - Grafické znázornění spotřeby energie při vysokoteplotní elektrolýze vody [11]

#### 3.4.1 Konstrukce a princip SOE elektrolyzáru

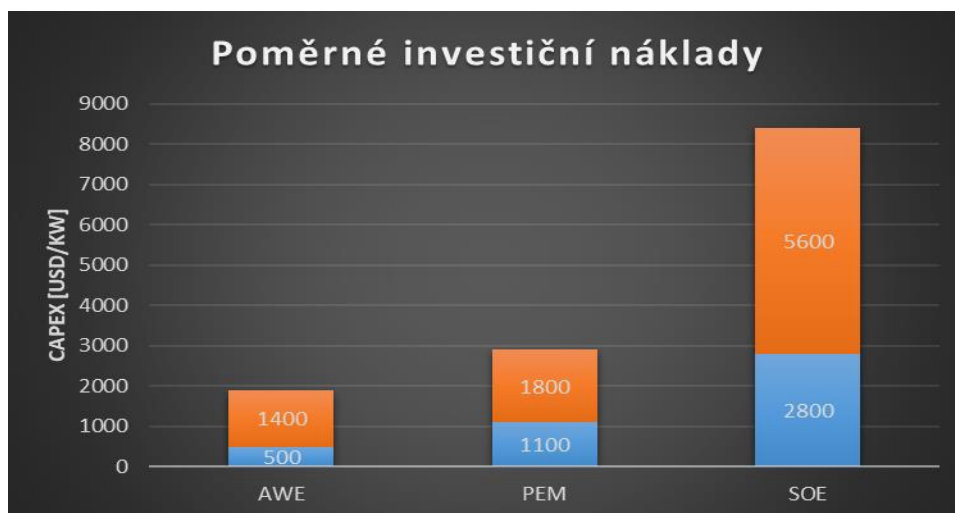
Na katodu je přivedena voda, respektive vodní pára, která je částečně rozložena na kyslíkové ionty a vodík. Kyslíkové ionty jsou poté přeneseny membránou, která je tvořena tuhými oxidy zirkonia, niklu nebo yttria. [13] [14] Z katody poté odchází směs obohacená o vodík a na anodě je získáván kyslík. Vodík je dále odělen v kondenzátoru. [11] Proces popisuje obrázek 7 včetně chemických rovnic.



Obrázek 7 - Schéma vysokoteplotního elektrolyzáru [11]

### 3.5 Srovnání investičních nákladu pro jednotlivé druhy elektrolýzy

Pro lepší představu o ceně jednotlivých způsobů elektrolýzy jsou investiční náklady vztahené k výkonu elektrolyzátoru vyneseny do grafu 1. Jelikož se ceny nabízených řešení liší v závislosti na výrobci je pro každou variantu vynesena nejnižší a nejvyšší udávaná cena.



Graf 1- Poměrné investiční náklady jednotlivých druhů elektrolýzy [108]

## 3.6 Skladování vodíku

### 3.6.1 Problematické vlastnosti vodíku

Se skladováním vodíku se pojí několik problémů a bezpečnostních rizik. Základní nevýhodou je jeho nízká hustota. Do relativně malé hmotnosti vodíku lze uložit velké množství energie to je jeho hlavní přednost. Problém však nastává s uskladněním většího množství hmotnosti. Díky jeho nízké hustotě  $0,0899 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  ( $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) [20] je nízká také jeho energetická hustota vztažená k objemu. Pro uložení větších množství energie do vodíku je za běžných podmínek potřeba velmi velkých objemů. Tento problém dále řeší jednotlivé způsoby jeho uskladnění. Energetické hustoty jednotlivých řešení jsou porovnány v tabulce 2. Toto však pouze komplikuje použití vodíku, avšak nepřináší na rozdíl od jeho dalších vlastností bezpečnostní rizika. Bezpečnostní rizika můžeme rozdělit do dvou kategorií na rizika spojená s nakládáním s vodíkem, jako s jinými palivy spočívající v jeho výbušnosti. Do této kategorie lze zahrnout vlastnosti které jej činí dobrým palivem, jako je například nízká energie pro vznícení  $0,017 \text{ [MJ]}$ , vysoká rychlost hoření, velké spalné teplo  $140 \text{ [MJ/kg]}$  a široké pásmo výbušnosti. Vodík je hořlavý v objemové koncentraci se vzduchem v rozsahu  $4\text{-}75 \text{ \%}$  a výbušný v koncentracích  $18\text{-}59 \text{ \%}$ . Mezi další rizika patří, jeho vysoká prostupnost materiálu a z toho vyplývající riziko úniků. K tomu se také pojí problematika jeho detekce jakožto bezbarvého plynu bez zápachu. Do druhé kategorie rizik patří rizika spojená s působením vodíku na mechanické vlastnosti materiálů. Sem patří zejména vodíková koroze a vodíková křehkost. Dále sem lze zařadit také změny vlastností materiálů způsobené extrémně nízkými teplotami při kryogenním uskladnění vodíku. Z hlediska bezpečnosti je v současné době nutné určit bezpečnostní standardy pro použití vodíku [20] Na problémy spojené s působením vodíku na materiály a problematiku jeho těsnění odpovídá výzkum chování materiálů v kontaktu s vodíkem a navrhované metody zmírnění dopadu jeho působení. K těsnění vodíku jsou používány polymery jako například teflon, viton, PFA a další. Pro výstelku nádob či potrubí jsou používány husté polymery jako je nylon, polyvinylfluoridy či polyfenylsulfidy. [21] Pro ochranu ocelí před působením vodíku existuje několik přístupů. Jednou z možností jsou příměsi prvků, které zamezí pohybu vodíku v krystalické mřížce oceli, a tak jeho prostupování do mikrotrhlin a jejich rozšiřování. Pro tento účel se osvědčil karbid vanadu či precipitáty mědi. Další možností je povrchová úprava. Zde je povrch materiálu opatřen ochranou pasívní vrstvou, která brání prostupu vodíku. Dobrých výsledků dosahují povlaky z kadmia to je však díky své toxicitě prakticky nepoužitelné. Další možností je použití povlaků niklu a zinku či povlaky na bázi keramiky. [22]

### **3.6.2 Skladování plynného vodíku**

Pro skladování plynného vodíku je zvolen podobný přístup jako pro skladování jiných plynů. Nevýhodou je zde nízká hustota vodíku a z toho vyplývající nutnost poměrně výrazného stlačení, aby bylo dosaženo uspokojivých poměrů mezi uloženou energií a objemem nádrže. K uskladnění se používají tlakové nádoby z nízkouhlíkové oceli pro tlaky 25-40 Mpa, nebo kompozitní nádoby z uhlíkových vláken pro tlaky až 70 Mpa. [13] [15] Pro větší objemy je možno využít podzemních úložišť ve vyčerpaných ložiscích zemního plynu, dutin v ložiskách soli či ve skalách. Tyto dutiny mohou být buď přírodní či uměle vytvořené vymýváním soli či explozí. Takováto podzemní úložiště nabízejí vysoké kapacity a poměrně nízké náklady. Nevýhodou je možnost úniku. Vhodnost úložiště je odhadována na základě geologického průzkumu a zkušebních vrtů, ale reálná povaha úložiště vyjde najevo až při jeho využití. Dále dochází ke ztrátám v důsledku rozpustnosti vodíku ve vodě, která je obsažena v zemině cca 0,2 % objemu. [13] [15]

### **3.6.3 Skladování kapalného vodíku**

Skladování kapalného vodíku má nesporné výhody v příznivém poměru uložené energie a objemu. Problematický je však fakt že pro zkapalnění je vodík nutné zchladit na teploty okolo 20 K. A odvést skupenské teplo. Z tohoto důvodu je minimální nutná energie pro zkapalnění jednoho kilogramu vodíku 15,1 MJ. Se započítáním účinnosti chlazení je však potřebná energie ještě několikrát vyšší. Ve výsledku to znamená, že ke zkapalnění je potřeba okolo 30 % energie ve vodíku uložené. [15] Dalším předpokladem je vysoká čistota vodíku, ten je nutné zbavit ostatních plynů kromě helia, především pak kyslík, aby bylo eliminováno nebezpečí exploze. [13] Další nepříjemností je odpar vlivem ohřívání vodíku od okolí. Z tohoto důvodu je nutné instalovat bezpečnostní ventily. Tímto způsobem ztráty dosahují 3-5 % / den. Z tohoto důvodu je nepravděpodobné využití kapalného vodíku pro osobní vozidla, kde by byly ztráty v době kdy vozidlo není používáno neúnosné. Jinak tomu může být v odvětví hromadné dopravy, kde se jedná o kontinuální provoz. Zkapalněný vodík je ukládán v ocelových nádobách, které jsou izolovány polyuretanem, polystyrenem, plynem nasyceným perlitem či vícevrstvé nádoby kde je blízko vakuum, aby bylo dosaženo co nejmenšího přestupu tepla. [13] [15]

### **3.6.4 Skladování vodíku ve formě hydridů**

Pro tento způsob skladování se využívají slitiny kovu, které jsou schopny absorbovat vodík a následně je možné jej zpětně získat desorpcí. Absorpce je exotermický proces, při kterém je uvolněno značné množství tepla. To může působit problémy, jelikož je nutné toto teplo odvést, aby nedošlo k poškození sorbentu. Naopak pro desorpci je nutné teplo přivádět což má negativní vliv na celkovou účinnost a užitečnou energetickou hodnotu systému. Podíl tepla nutného k desorpci může dosahovat hodnot okolo 30 % energie uložené v sorbentu v závislosti na jeho materiálu. Další nevýhodou jsou oproti konvenčním palivům malé hmotnostní energetické hustoty. Výhodou tohoto druhu skladování jsou nízké nároky na podmínky skladování. Není zde potřeba udržovat vysoké tlaky či nízké teploty. Dále je dosaženo vysokých objemových hustot energie až dvakrát větších než u kapalného vodíku. [11] [13] [15] Pro lepší přehled jsou jednotlivé technologie skladování utříděny v tabulce 1, společně s jejich specifikacemi.

Tabulka 1- Jednotlivé možnosti ukládání vodíku [13] [15] [23] [24]

Typ uložení	Charakteristika	Poznámka
Plynný H <sub>2</sub> Tlakové nádrže	Vysokotlaké nádoby 25-70 Mpa. Relativně jednoduchá konstrukce z antikorozi oceli, hliníkových slitin či kompozitu, aby bylo zabráněno vodíkové korozi. Tento typ uskladnění je používán jednotky litrů až desítky m <sup>3</sup> .	Jedná se o jednu z atraktivních variant, jelikož je levnější než zkapalňování a na rozdíl od podzemních úložišť je vhodná pro dynamické používání při výrobě syntetických paliv.
Plynný H <sub>2</sub> Podzemní úložiště	Jedná se o vyčerpaná ložiska zemního plynu, či kavity po těžbě soli. Z pravidla se jedná o vysokokapacitní úložiště tisíce m <sup>3</sup> . Jejich využití je poměrně snadné, jedná se o nejlevnější variantu.	Nevýhodou tohoto uložení jsou zejména ztráty. Hodí se především pro dlouhodobé skladování zásob vodíku.
Kapalný H <sub>2</sub>	Kapalný vodík je uložen v tepelně izolovaných nádobách při teplotách okolo -250 °C. Tyto nádoby jsou konstruovány z několika vrstev kovu, mezi kterými je vložen izolační materiál či vakuum. Objem takových nádrží se pohybuje od desítek litrů pro osobní vozidla až o tisíce m <sup>3</sup> na skladování paliva pro kosmický průmysl. Tento způsob vyžaduje poměrně složitou infrastrukturu pro zkapalnění vodíku a jeho vysokou čistotu. Dále je i konstrukce samotné nádrže poměrně složitá. To společně s vysokou energetickou náročností zvyšuje cenu.	Motivace pro skladování kapalného vodíku je stejná jako jeho stlačování – dosahujeme lepších objemových energetických hustot. Hlavní nevýhodou tohoto způsobu skladování je vysoká energetická náročnost pro zkapalnění (30-40 % u ložené energie) a ztráty způsobené odparem, ten se u dobře izolovaných nádrží pohybuje okolo 0,2-0,3 %/den, avšak u běžných nádrží okolo 3 %.
Další možnosti ukládání do sloučenin či hydridů kovu	Komplexnost a skladovací kapacita závisí na konkrétním způsobu uložení, například methan je možné ukládat jako zemní plyn. Jinak na tom jsou hydridy a zařízení pro jejich chlazení, respektive ohřev.  Přehled vlastností ukládání energie/vodíku ve formách sloučenin a hydridů viz. Tabulka 2.	Motivace pro výrobu sloučenin spočívá zejména v jejich snazším skladování, než je tomu u vysokotlakého či kapalného vodíku. Dále také vyšší objemová energetická hustota. Nevýhodou je energetická náročnost výroby sloučenin.

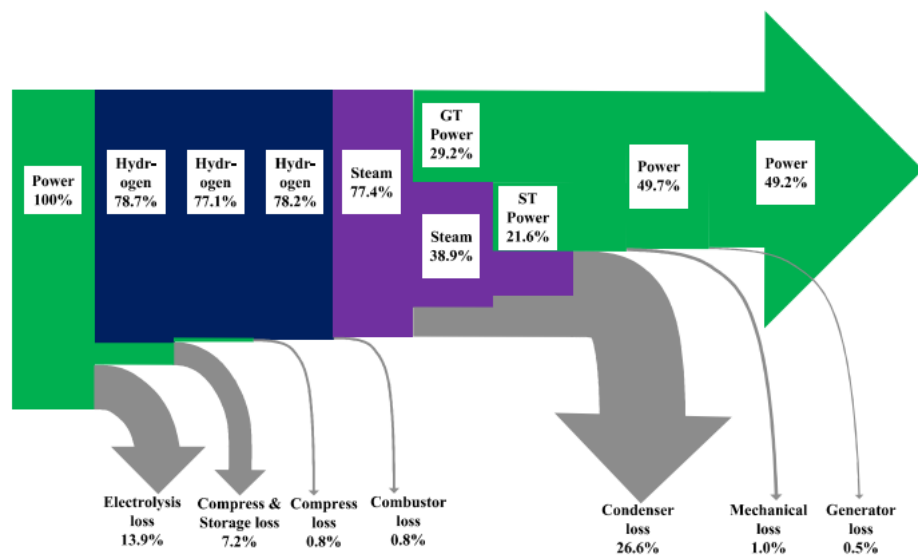


### 3.7 Zpětná výroba elektrické energie

Elektrickou energii můžeme z vodíku znovu získat buď jeho využitím v palivových článcích, či jeho spalováním v plynových turbínách a pístových motorech. [25] Ty následně dodávají mechanickou energii generátoru pro výrobu elektrické energie.

#### 3.7.1 Spalování H<sub>2</sub>

Tato metoda využívá vodík jako palivo pro plynovou turbínu. V době přebytku elektrické energie je vyráběn vodík pomocí jedné z výše uvedených metod. Ten je následně uskladněn do tlakových zásobníku, kde je k dispozici pro výrobu elektrické energie v případě nedostatku. V procesu výroby se jedná v zásadě o konvenční paroplynový cyklus. Takováto úložiště dosahují v závislosti na konfiguraci účinnosti okolo 50 %. [26] Nevýhodou je však tvorba oxidů dusíku v důsledku vysokých teplot hoření vodíku 2045 °C. [15] [27]



Obrázek 8 - Vizualizace ztrát [26]

### 3.7.2 Použití palivových článků

Konstrukčně jednodušším řešením je použití vodíku jako paliva pro palivové články, tedy pro jeho zpětnou elektrolýzu. V době přebytku by byla energie použita na výrobu vodíku, tak jako v předchozím scénáři. Avšak následně by byl proces pouze otočen. Nevýhodou je poměrně nízká účinnost palivových článků. [28]

FC type	Temperature (°C)	Reactions	Electrolyte	Efficiency (%)
PEMFC	60–140	Anode: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Polymer	55
DMFC	30–80	Anode: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ Cathode: $\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	Polymer	30
AFC	150–200	Anode: $H_2 + 2OH^- \rightarrow H_2O + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$	Potassium hydroxide	60
PAFC	150–200	Anode: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Phosphoric acid	>40
MCFC	600–700	Anode: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$	Li/K/Na carbonate	45
SOFC (+)	200–700	Anode: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	Barium cerate	40
Direct ammonia	400–700	Anode: $2NH_3 \rightarrow N_2 + 6H^+ + 6e^-$ Cathode: $\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$	Barium cerate	40
SOFC (-)	1000	Anode: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ Cathode: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	Yttria-stabilized zirconia	40

Obrázek 9 - Účinnosti jednotlivých palivových článků [29]

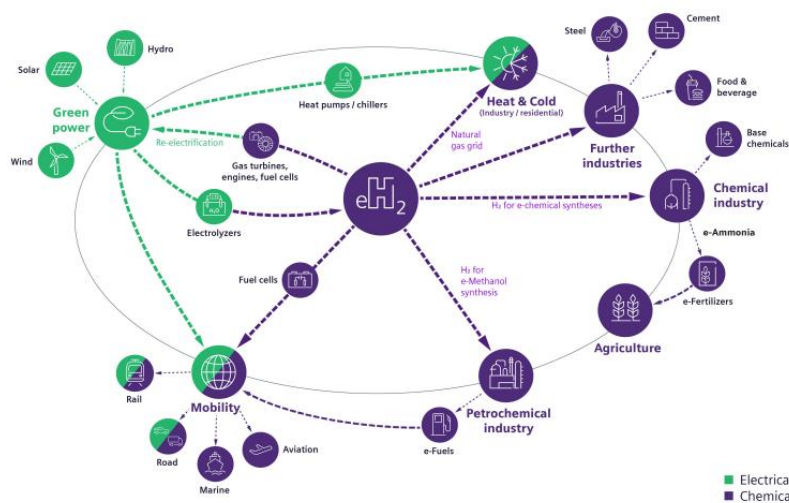
Pokud tedy vezmeme v potaz výrobu vodíku pomocí PEM elektrolýzy a jeho zpětné využití v PEM palivovém článku. Je ztráta při výrobě vodíku 20 %, [14] energetické nároky na stlačení a skladování převezmeme z výše uvedených příkladů, tedy 8 % [26] a účinnost palivového článku 55 % [28]. Celková účinnost se pohybuje okolo 40 %. Další nevýhodou je poměrně vysoká cena palivových článků 2000 [\$/kW]. [29] Z tohoto důvodu se v současnosti jako lepší varianta jeví využití vodíku jako paliva pro plynovou turbínu, a palivové články jsou nasazovány pro aplikace nižších výkonů, například ve vodíkových automobilech.

### 3.7.3 Úložiště na bázi amoniaku

Další zajímavou variantou je technologie využívající pro skladování vodíku amoniak. Syntéza amoniaku je exotermická reakce jejíž teplo je možné využít pro SOE elektrolýzu. Následná kondenzace páry při tvorbě vody v SOE palivovém článku posléze naopak slouží, jako zdroj tepla pro rozštěpení amoniaku na vodík a dusík. Zbylé teplo je použito v konvenčním parním oběhu pro pohon turbíny generátoru a dodávku tepla. Takové systémy slibují až 70 % účinnost právě díky využití odpadního tepla a snazšímu skladování. [30] [31]

## 4 Power to X

Power to X nebo také P2X je souhrnný název pro technologie power to gas, power to liquid a další. Díky těmto technologiím lze dekarbonizovat odvětví která není možné elektrifikovat, jako například lodní dopravu, letectví či průmyslové procesy, kde je využíváno vysoko potenciálové teplo nebo, kde fosilní zdroje slouží jako vstupní komodity. Například uhlí, jako redukční činidlo při výrobě oceli. Pro tyto aplikace je vhodné elektrickou energii využít k výrobě syntetických paliv a chemikálií, které jsou schopny v těchto procesech zastoupit fosilní zdroje. Díky tomu, že pro výrobu těchto paliv bude použito obnovitelných zdrojů energie a vstupních surovin. Jsou uhlíkově neutrální. [32] Další využití těchto paliv je sezónní akumulace či přeprava energie z oblastí které mají lepší podmínky pro výrobu obnovitelné energie. Tímto by bylo možné k přenosu energie použít stávající infrastrukturu plynovodů a tím tak snížit rostoucí nároky na elektrickou síť. Dále také zajistit, že v případě přebytků obnovitelné energie v síti bude tato energie využita a uložena, a tudíž nebude docházet k nuceným odstávkám obnovitelných zdrojů v případě nedostatečné poptávky či kapacity přenosových sítí. [33] Díky těmto technologiím je možné navzájem propojit energetický sektor s ostatními sektory jako je doprava či průmysl, a díky tomu snížit spotřebu fosilních paliv. Potenciálně až o 50 % do roku 2040. Vzájemné propojení jednotlivých odvětví díky technologii P2X je vidět na obrázku 10. [34]



Obrázek 10 - Schéma propojení jednotlivých odvětví ekonomiky pomocí technologií P2X [35]

### 4.1 Zdroje vstupních komodit

#### 4.1.1 Zdroje elektrické energie

Aby byl tento systém výroby paliv, respektive přeměna elektrické energie na chemickou smysluplná a přispěla uhlíkové neutralitě, je nutné, aby vstupní energie pro tyto procesy byla získána z obnovitelných či nízkoemisních zdrojů. To znamená jak tradiční OZE, tak například i jaderné dle současné taxonomie EU. [35]

### 4.1.2 Zdroje vody

Voda použitá pro elektrolýzu by měla být získávána v souladu s životním prostředím, tedy tak aby co nejméně ovlivnila vodní živočichy či rostliny v okolí produkce. V ideálním případě by se mohlo jednat o odsolenou či chladicí vodu.

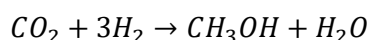
### 4.1.3 Zdroje CO<sub>2</sub> a N<sub>2</sub>

Zdrojem oxidu uhličitého, respektive uhlíku, nebo dusíku by měla být zejména atmosféra (DAC). Jedná se tedy přímo o separaci ze vzduchu. Další vhodnou alternativou je separace CO<sub>2</sub> ze spalin, či anaerobní fermentace biomasy. [35] Pokud se jedná o spaliny je v současné době možno použít CO<sub>2</sub> zachycené při výrobě elektrické energie z uhlí. Avšak konvenční uhelná elektrárna o výkonu 300 [Mwe] vyprodukuje množství CO<sub>2</sub> na jehož zpracování je nutné množství vodíku, k jehož výrobě pomocí elektrolýzy je potřeba cca 1,77 [GWe]. [36] Z toho je patrné, že dlouhodobě udržitelná vize počítá s pokrytím spotřeby elektrické energie z nízkoemisních zdrojů, a zachytávání CO<sub>2</sub> bude realizováno v odvětvích jako jsou cementárny a ocelárny. [37]

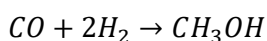
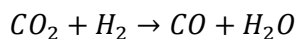
## 4.2 Výstupní suroviny

### 4.2.1 Methanol

Methanol vzniká dvěma způsoby, buď přímo reakcí oxidu uhličitého a vodíku, dle rovnice.

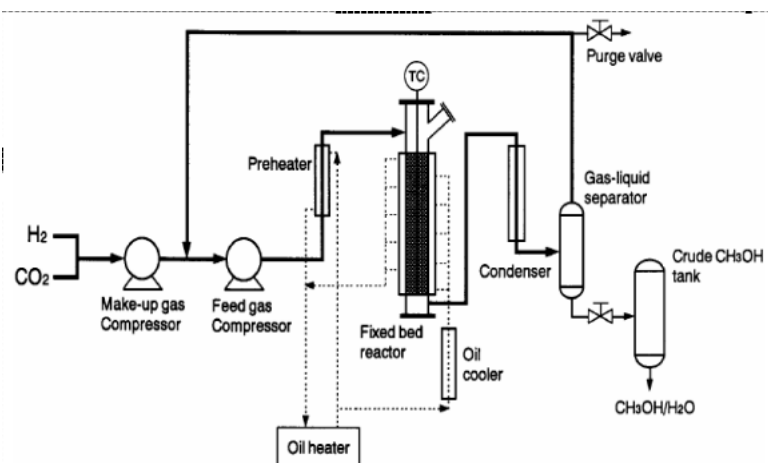


Nebo nepřímo, kdy je nejprve vyroben oxid uhelnatý a ten následně zareaguje s vodíkem.



[36] [37]

Tyto reakce jsou realizovány na katalyzátoru. Používané materiály jsou oxidy kovů Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu/ZnO/ZrO<sub>2</sub>. [38]

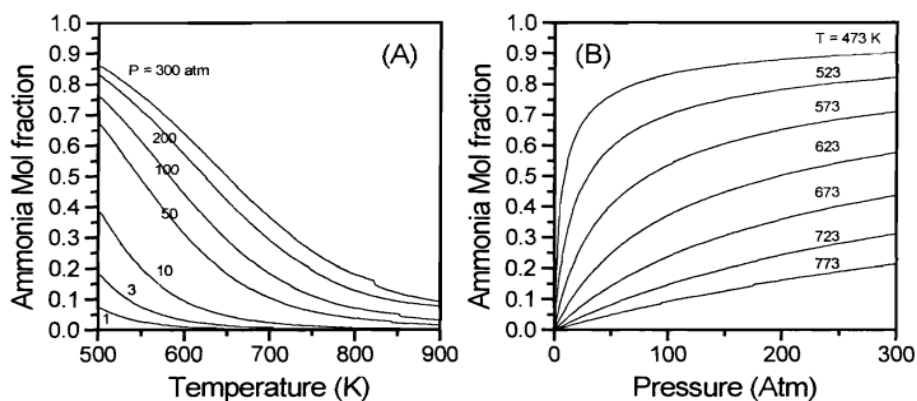


Obrázek 11 - Schéma sestavy pro syntézu methanolu [39]

Vodík je nejprve smísen s oxidem uhličitým, stlačen a ohřát. Následně je vpuštěn do reaktoru na katalyzátor, kde dojde k výše uvedeným reakcím. Současně vznikají také vedlejší produkty ve formě methanu, vody a vyšších alkoholů. Z výsledné směsi bohaté na methanol je následně oddělena plynná složka obsahující zejména  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2$ . Ta je následně přivedena zpět do reaktoru. Zbylá tekutina obsahující zejména methanol a vyšší alkoholy je ochlazena a v dalších procesech jsou odděleny nežádoucí složky. [37] V současné době již funguje výroba uhlíkově neutrálního methanolu na Islandu s kapacitou 3000 tun/rok. [37]

#### 4.2.2 Amoniak

Syntéza amoniaku začíná smísením dusíku a vodíku, tato směs je následně ohřata na optimální teplotu, stlačena a přivedena na železný katalyzátor, kde vzniká amoniak dle reakce  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$ . Jelikož je reakce reversibilní využívá se Le Chatelierova principu, a díky zvýšení tlaku se ekvilibrium posune ve prospěch amoniaku. [39]

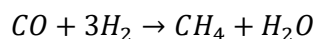
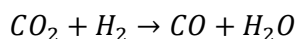
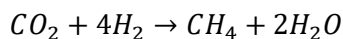


Obrázek 12 - Vliv teploty a tlaku na podíl amoniaku [40]

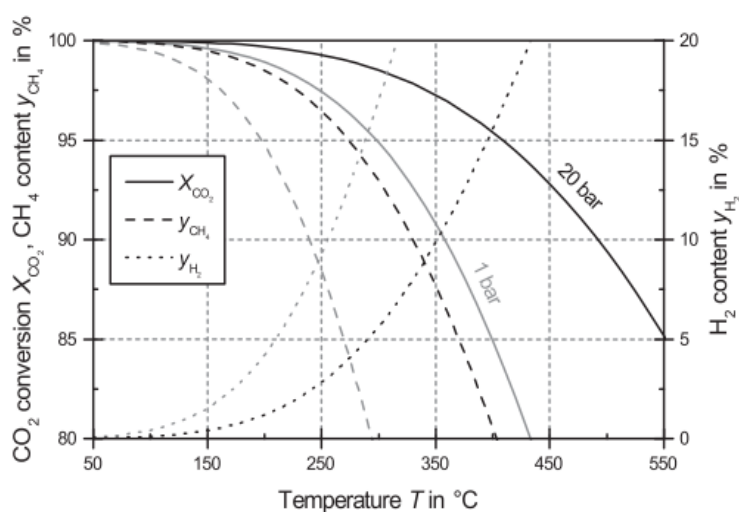
Jak je vidět z obrázku 12 pro výrobu amoniaku jsou vhodné nižší teploty, avšak za pokojové teploty reakce neprobíhá a pro teploty pod 500 °C je rychlost reakce příliš nízká dostatečného podílu amoniaku je tedy dosaženo zvýšením tlaku. Pro dostatečnou rychlost reakce a její ekonomickou udržitelnost jsou voleny teploty okolo 500 °C a tlaky 150-200 bar. [39] Dále je nutné z reaktoru odvádět teplo, aby byla rovnováha reakce vhodná pro produkci  $\text{NH}_3$  a nikoli jeho rozklad. Z důvodu nepříznivé reakční rovnováhy zreaguje na jeden průchod jen okolo 20-30 % vstupních surovin. Z tohoto důvodu je vzniklý amoniak separován a zbylý nezreagovaná plyn je po odebrání odpadního proudu recyklován. Odběr odpadu je nutný, aby nedocházelo ke hromadění zbytkového argonu, který je v této reakci inertním plynem. [40] [41] Jelikož je tato reakce reversibilní je možné amoniak použít nejen jako produkt a vstupní surovinu pro další odvětví, ale také jako palivo, respektive jako uskladňovací medium bohaté na vodík. Jak již bylo zmíněno (kapitola 3.7.3) na tomto principu lze postavit úložiště elektrické energie s uvažovanou účinností až 70 %. [30]

### 4.2.3 Methan

Methan je hlavní složkou zemního plynu, ten jej obsahuje přes 80 %. Z tohoto důvodu je možné methan používat tak, jak dnes používáme zemní pln. Tedy k vytápění, vaření, jako palivo pro automobilovou dopravu či jako vstupní surovinu pro chemický průmysl. [42] [43] Nespornou výhodou je možnost jeho distribuce v současné přenosové soustavě. Výroba probíhá podobě jako syntéza methanolu. Zde se uplatňuje několik reakcí:



K těmto reakcím dochází za teplot v rozmezí 200–500 °C a tlaku 1-100 bar. Stlačená a zahřátá směs plynů je přivedena na katalyzátor, nejčastěji tvořeným z niklu. Ten je volen pro vysokou reaktivitu, dobrou schopnost oddělit vzniklý methan a relativně nízkou cenu. Jedná se o exotermické reakce což způsobuje problémy, jelikož je nutné reaktor chladit, aby nedošlo k poškození katalyzátoru. Dalším problémem je, že se zvyšující se teplotou klesá podíl methanu a konverze CO a CO<sub>2</sub>. To je částečně potlačeno zvýšením tlaku, podobě jako u výroby amoniaku. [42]



Obrázek 13 - Vliv teploty a tlaku na rovnováhu reakce při výrobě methanu [43]

Některé modely pro zvýšení účinnosti pracují s odpadním teplem vznikajícím ať už ze syntézy methanu či amoniaku. A to v kombinaci s technologií SOE, kde je vstupní surovinou pro výrobu vodíku vodní pára. Tím je výrazně zvýšena celková účinnost cyklu. [30] [42]

### 4.3 Srovnání vodíku s ostatními palivy

Lepší představu o výhodách a nevýhodách jednotlivých paliv či způsobů uskladnění vodíku poskytuje následující tabulka.

Tabulka 2 - Porovnání vlastností jednotlivých paliv

Palivo	Teplota [C°]	Energetická hustota [Mj/Kg]	Objemová energetická hustota [Mj/l]	Hustota [Kg/m <sup>3</sup> ]	Hmotnostní ekvivalent benzínu	Objemový ekvivalent benzínu	Poznámka
Vodík 350 bar	20	119	2,64	22,2	2,674	0,085	Nároky na nádrž a energii pro stlačení.
Vodík 700 bar	20	119	4,6	39	2,674	0,148	Nároky na nádrž a energii pro stlačení.
Vodík kapalný	-253	119	8,46	71,08	2,674	0,272	Ztráty okolo 3 %/den vysoké energetické nároky na zkapalnění 30-40 % uložené energie
Vodík hydrid Mg <sub>2</sub> Ni-H <sub>2</sub>	20	3,13	11,9	3800	0,07	0,382	Vysoká hmotnost
Benzín	20	44,5	31,15	700	1	1	Jednoduché skladování
Methanol	20	22,36	17,64	790	0,502	0,566	Jednoduché skladování
Methan 100 bar	20	55	4,3	78,3	1,236	0,138	Nároky na nádrž a energii pro stlačení
Amoniak kapalný (8,8bar)	20	22,5	13,7	609	0,506	0,44	Relativně jednoduché skladování riziko otravy při úniku.

Pro methan, methanol a amoniak je nutné brát jako nevýhodu ztráty při jejich výrobě. Pokud předpokládáme jejich syntézu z vodíku a CO<sub>2</sub>, respektive N<sub>2</sub>. Dále je jasně patrný problém vodíku v jeho velkém objemu ten je řešen jednotlivými způsoby jeho uskladnění či výroby syntetických paliv, ale i tam konvenční paliva vedou. [11] [44] [45] [46] [47]

## 5 Taxonomie

Taxonomií v tomto slova smyslu se rozumí soubor pravidel, které definují ekologicky udržitelné činnosti napříč ekonomickými sektory. Jedná se tedy o definici udržitelných technologií, které budou podporovány v rámci rozvoje obnovitelné energetiky a snaze snížení závislosti evropské unie na importu fosilních paliv. Pro výrobu syntetických paliv je toto nutné, jelikož tyto technologie nejsou schopny ekonomicky konkurovat konvenční výrobě. Avšak pro zvýhodnění výroby těchto produktů za použití elektrické energie, například výroby vodíku elektrolýzou z vody pomocí dotací je nutné stanovit podmínky udržitelnosti. Tedy zajistit, aby pro tuto výrobu byla použita energie pocházející z obnovitelných zdrojů. Jelikož například zmíněná výroba vodíku pomocí elektrolýzy z vody přináší ještě větší množství emisí než konvenční výroba ze zemního plynu, pakliže je k napájení elektrolyzéry použita energie z konvenční fosilní elektrárny. Dále je podporována snaha o vybudování dalších zdrojů obnovitelné energie, proto je pro uznání výroby syntetických paliv jako zelené nutné od roku 2028 použít obnovitelný zdroj, který není starší než 36 měsíců. Výrobci syntetických paliv budou dále muset dokládat, že elektrická spotřeba pro výrobu odpovídá výrobě z obnovitelných zdrojů na měsíční bázi dále od roku 2030 bude muset výroba odpovídat bázi hodinové. Pokud výroba těchto paliv nebude napájena přímo z obnovitelného zdroje, ale ze sítě je možné tuto energii považovat za obnovitelnou, pokud je v oblasti připojení podíl obnovitelné energie vyšší než 90 % a pokud doba výroby nepřesáhne maximální počet provozních hodin stanovený v souladu se zastoupením obnovitelné energie v oblasti připojení. Elektrická energie ze sítě je považována za obnovitelnou, pokud průměrné emise na výrobu elektrické energie v oblasti připojení nepřesahují 18 g CO<sub>2</sub> ekvivalentu na MJ, tedy 64,8 g CO<sub>2</sub> ekvivalentu na vyrobenou kilowatt hodinu. Tímto se otevírá možnost použití energie vyrobené v jaderných elektrárnách. [48]



## 6 Amoniak

Amoniak neboli čpavek je jednou z nejprodukovanějších chemikálií na světě, jelikož se jedná o základní složku pro produkci hnojiv. Dále se využívá k výrobě výbušnin, léčiv, kosmetiky a pryskyřic, i močoviny pro dieselové motory, nebo je využíván jako chladivo. Jedná se anorganickou sloučeninu tvořenou jedním atomem dusíku a třemi atomy vodíku. Jde o bezbarvý plyn s výrazným zápachem. Kvůli jeho žíravosti je evidován, jako nebezpečný. [49] [50] [51] [52] Další možností využití amoniaku je skladování vodíku pro ukládání energie sekce (4.2.2), či jeho přímé využití jako paliva pro snížení emisí CO<sub>2</sub>. [53] Z těchto důvodů lze předpokládat, že produkce amoniaku v budoucnu poroste. Aby však jeho použití jako paliva či energetického nosiče dávalo smysl je nutné zredukovat emise spojené s jeho produkcí. Hlavní surovinou k výrobě amoniaku je vodík, který je v současné době získáván zejména z fosilních zdrojů (96 %). [54] V současné době je tak majorita amoniaku vyráběna parním reformingem zemního plynu. Z tohoto důvodu je jeho výroba významným zdrojem emisí CO<sub>2</sub> (450 Mt). [49]

### 6.1 Amoniak ve světě

K produkci hnojiv je využíváno přibližně 80 % vyráběného amoniaku. [49] [53] Roční světová produkce amoniaku je přibližně 182 milionů tun. Největším výrobcem je Čína, která obstarává cca 30 % světové produkce. V Evropě je vyrábělo cca 10 % Světové produkce. [49] Největší výrobce amoniaku v Evropě je Německo dále pak Polsko a Nizozemsko. [55]

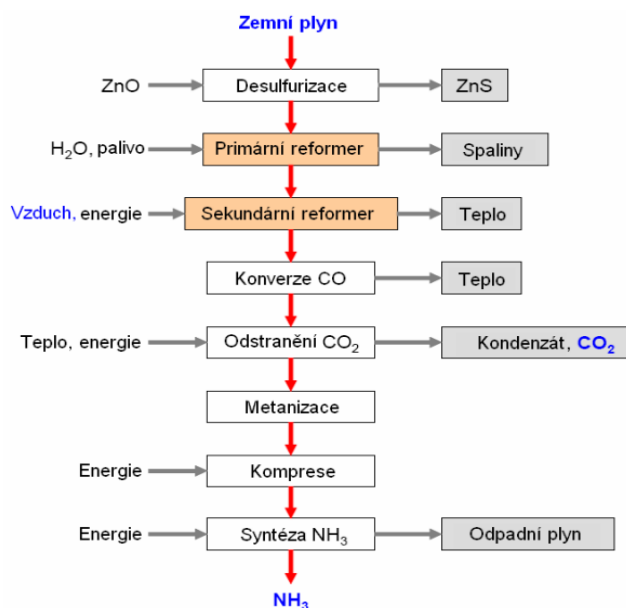
### 6.2 Amoniak v ČR

Na území České republiky se nachází pouze jediná výroba amoniaku. Tu obstarává společnost ORLEN Unipetrol RPA, sídlící v Litvínově. V roce 2016 jej bylo v závodě výrobně 188 tisíc tun. [56] To odpovídá denní výrobě 515 tun.

Významná spotřeba amoniaku je tvořena výrobou kyseliny dusičné, která je využívána k výrobě dusíkatých hnojiv. [40] Výrobou kyseliny dusičné se zabývá společnost SYNTHESIA. Kyselina je vyráběna v několika koncentracích. Základní koncentrace je 52 % vyšší koncentrace jsou následně vyráběny separací vody ze základní kyseliny. Roční produkce kyseliny dusičné o koncentraci 52 % se pohybuje okolo 75 000 tun. [56]

## 6.3 Parní reforming zemního plynu

Parní reforming zemního plynu je v současné době nejrozšířenější technologie pro výrobu vodíku, a tedy také amoniaku. Pomocí této metody je v současnosti vyráběno okolo 70 % veškerého amoniaku. Při tomto procesu se využívá několika katalytických reakcí, při kterých je ze zemního plynu (methanu) a vody oddělen vodík. Výroba je složena z několika kroků, které jsou nutné k odstranění nežádoucích sloučenin a postupnému získání směsi vodíku a dusíku pro samotnou syntézu amoniaku. Pořadí a jednotlivé kroky procesu jsou zobrazené na obrázku 14. [40]



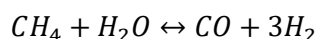
Obrázek 14 - Kroky výroby amoniaku za použití zemního plynu [40]

### 6.3.1 Desulfurizace

Nejprve je nutné zemní plyn zbavit síry, která se v něm nachází jako nečistota. Ta by totiž poškodila katalyzátor parního reformingu. K tomuto účelu je použito katalytické reakce vodíku a síry. K zemnímu plynu je tedy přiveden vodík vznikající dále v procesu a směs je zahřáta a přivedena na katalyzátor. Vodík následně zreaguje se sírou na sulfan, který je poté zachycen na peletách oxidu zinečnatého. [40]

### 6.3.2 Reforming

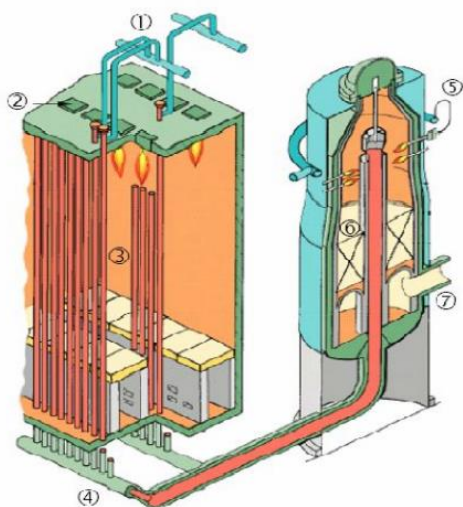
Reforming probíhá postupně, nejdříve v primárním reformeru, kde zreaguje okolo 60 % vstupního plynu. Odsířený plyn je nejprve smísen s vodní párou a předeřhát na teploty okolo 500°C. Následně vstupuje do reformeru a na katalyzátoru dochází k rozpadu na vodík a oxid uhelnatý.



Tato reakce je silně endotermní a je tedy nutné dodávat teplo spalováním topného plynu v reformeru.

Následně je syntézní směs přivedena do sekundárního reformeru, kde je dodán spalovací vzduch. Pro další dodávku tepla je tak spálena část samotného

syntézního plynu ještě před vstupem na katalyzátor. V tomto kroku se do syntézního plynu dostává dusík, který bude na konci procesu použit k syntéze amoniaku. [40]

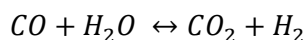


- 1 – přívod syntézního plynu
- 2 – hořáky
- 3 – reakční trubky
- 4 – odvod výstupní směsi
- 5 – přívod spalovacího vzduchu
- 6 – katalyzátor
- 7 – výstup syntézního plynu

Obrázek 15 - Primární a sekundární reformer [40]

### 6.3.3 Konverze CO

Syntézní plyn po reformingu obsahuje 12-15 % oxidu uhelnatého. Ten na katalyzátoru reaguje s vodou za vzniku plynného vodíku dle reakce:



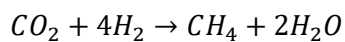
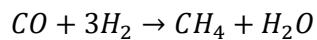
Po reakci je směs schlazena, aby došlo ke kondenzaci vody, která je tak z velké části odstraněna. To je nutné, aby nedošlo k narušení následujícího procesu odstraňování CO<sub>2</sub>. [40]

### 6.3.4 Separace CO<sub>2</sub>

Množství CO<sub>2</sub> v syntézním plynu odpovídá množství uhlíku ve vstupujícím zemním plynu. V tomto kroku je zbytkový obsah CO<sub>2</sub> snížen na 50-1000 PPM v závislosti na použité metodě. Toto je nutné z důvodu citlivosti katalyzátoru pro syntézu amoniaku na kyslík a jeho sloučeniny. CO<sub>2</sub> je zachycován buď chemickou adsorpcí nejčastěji za použití roztoků aminů, či fyzikálně pomocí rozpouštědel. Zachycený oxid uhličitý může být dále využit pro výrobu dalších produktů jako je například methanol či močovina, nebo použit samostatně například do sycených nápojů, jako chladicí nebo hnací médium. Zpravidla jej však vzniká přebytek, který je vypouštěn do atmosféry. [40]

### 6.3.5 Metanizace

Zbytková množství, CO a CO<sub>2</sub> je nutné snížit na hodnoty pod 10 PPM, aby se předešlo otravě katalyzátoru při syntéze čpavku. Toho je docíleno metanizací, kdy jsou, CO a CO<sub>2</sub> za přítomnosti vodíku zreagovány na methan, který se chová jako inertní plyn. K tomu dochází dle reakcí:



Vzniklá voda je následně odseparována. [40] Samotná syntéza byla rozebrána v sekci 4.2.2 – Amoniak. Zde je jediným rozdílem při konvenčním způsobu výroby větší množství inertních plynů, jelikož se zde nachází methan a argon. Odpadní proud z recyklačního okruhu je zde přiveden k separaci amoniaku a následně použit v reformeru jako palivo. [40]

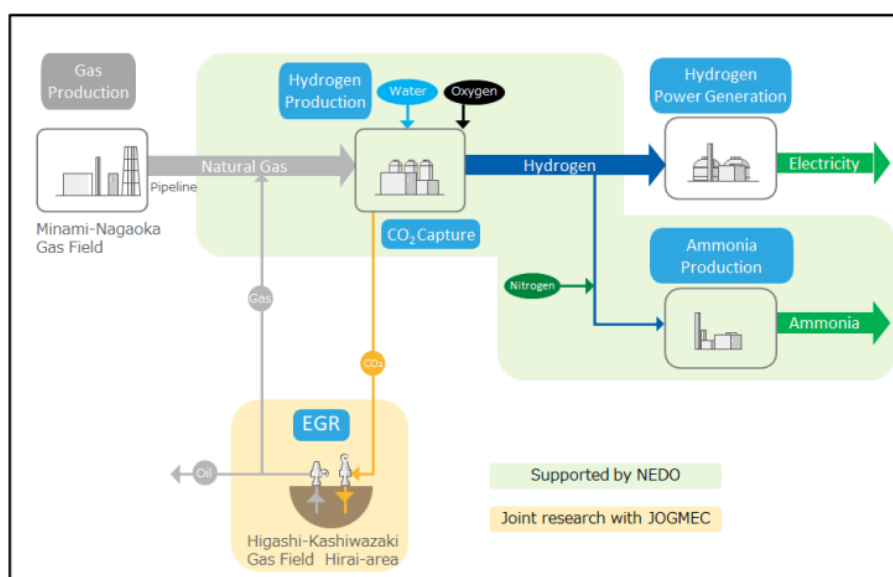
## 7 Nízkoemisní výroba

Pro snížení emisí při výrobě amoniaku existují dvě základní varianty. První předpokládá současnou výrobu, kde však bude navíc produkovaný oxid uhličitý zachycen a uložen, a tak nebude vypuštěn do atmosféry. Výhoda tohoto řešení spočívá ve využití současných technologií a provozních zařízení. Druhou možností je produkce amoniaku bez použití zemního plynu či jiného fosilního paliva. Díky tomu nebude produkován žádný oxid uhličitý. Podmínkou pro smysluplnost takového řešení je však obnovitelný zdroj energie.

### 7.1 Technologie CCS

Jednou z možností, jak omezit emise plynoucí z konvenční výroby amoniaku, respektive vodíku jsou technologie Carbon Capture Storage – zachycení a ukládání CO<sub>2</sub>. Pokud je tato technologie implementována k výrobě je CO<sub>2</sub> do značné míry zachyceno nedochází tak k jeho vypouštění do atmosféry, ale je uloženo do vyčerpaných zásobníků zemního plynu. Jelikož je odstraňování CO<sub>2</sub> již součástí běžného výrobního procesu z důvodu ochrany katalyzátoru, je rozdíl pouze v nakládání s již zachyceným plynem, a dalším zachytávání CO<sub>2</sub> produkovaného spalováním plynu pro výrobu energie. V Konvenčním případě je část plynu použita pro výrobu dalších chemických látek, avšak přebytek je vypouštěn do atmosféry.

V běžné praxi je syntézni plyn zbaven CO<sub>2</sub> na zbytkové obsahy 1000-50 PPM. Je tedy zachyceno 99,9 % CO<sub>2</sub>. Zbylý obsah je přeměněn na metan a následně spálen pro výrobu tepla. [40] Nevýhodou jsou však zvýšené nároky na energii a investiční náklady. [57] dále je nutné si uvědomit, že energetické náklady na stlačení a přepravu CO<sub>2</sub> budou zdrojem dalších emisí. V současné době jsou již zpracovávány pilotní projekty pro výrobu amoniaku a vodíku ze zemního plynu využívajícího této technologie. V tomto konkrétním případě je uvažována dokonce



Obrázek 16 - Schéma konceptu pilotního projektu v Japonsku [58]

možnost získání jinak nevytěžitelných zbytků zemního plynu vlivem vtlačování odpadního CO<sub>2</sub> do již vytěženého ložiska. [58]

Pro porovnání celkové účinnosti zachycení emisí je vypracována následující bilance. Hodnoty emisí CO<sub>2</sub> jsou získány pro výrobu vodíku pomocí parního reformingu zemního plynu. V zásadě se tedy jedná o stejný proces, jaký je využit při konvenční výrobě amoniaku. Rozdílem je procento zachycení CO<sub>2</sub> to je vzhledem k citlivosti katalyzátoru syntézy čpavku na kyslík přísnější než při samotné výrobě vodíku. Hodnoty znečištění jsou vztaženy na MJ výhřevnosti vzniklého vodíku.

### 7.1.1 Úspora emisí

Proces parního reformingu

Vzniklé CO<sub>2</sub> – 38,5 g → separace 99,9 % → emise 0,039 g

Energie nutná pro proces reformingu

Vzniklé CO<sub>2</sub> – 31,8 g → emise 31,8 g

s technologií CCS i pro spaliny → emise 11,1 g

Energie nutná pro technologii CCS

Vzniklé CO<sub>2</sub> – 8,2 g se separací pro spaliny → emise 16 g

Suma

Celkové emise CO<sub>2</sub> pro variantu bez CCS: 38,5+31,8 = 70,3 g

Celkové emise CO<sub>2</sub> pro variantu s CCS: 0,039+31,8+8,2 = 40,04 g

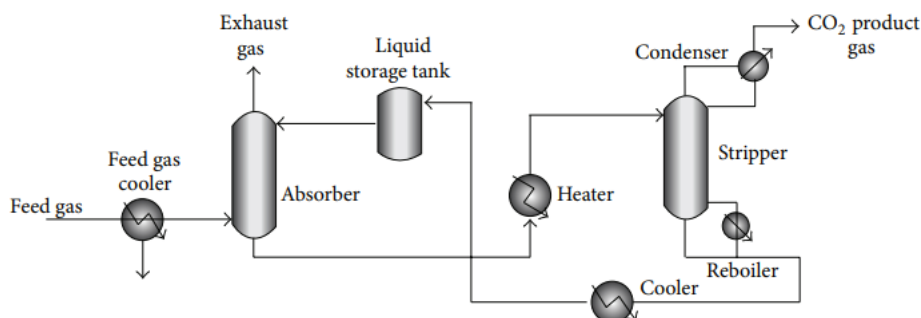
Celkové emise CO<sub>2</sub> pro variantu s CCS i pro spaliny: 0,039+11,1+16=27,14 g

Celkové účinnosti snížení emisí CO<sub>2</sub> jsou tedy  $100 - \frac{40,04}{70,3} \cdot 100 = 43$  [%] pro variantu se zachycením CO<sub>2</sub> v procesu reformingu, a  $100 - \frac{27,14}{70,3} \cdot 100 = 61,4$  [%] pro variantu se zachycením v procesu a spalinách. [59]

Jak je vidět i při použití technologie CCS je výroba amoniaku významným zdrojem CO<sub>2</sub>. Navíc se do ovzduší dostává i zbytkové množství methanu, jehož skleníkový efekt je 86 x silnější než CO<sub>2</sub>. [59]

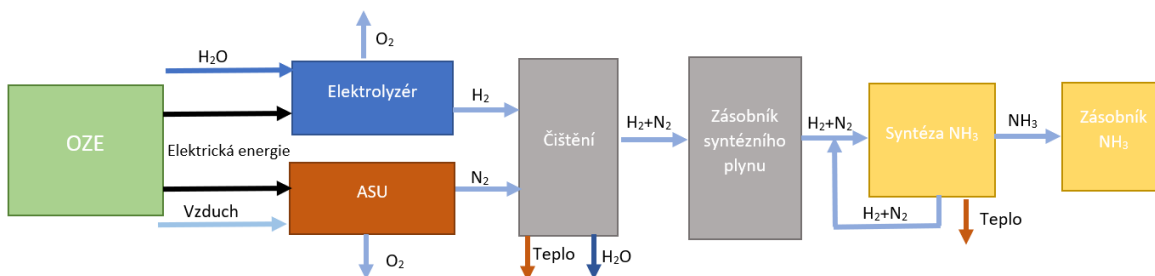
### 7.1.2 Princip separace

Separace  $\text{CO}_2$  jak ze spalin, tak ze syntézního plynu probíhá zpravidla pomocí absorpce, kde je směs plynů ochlazena na vhodnou teplotu a následně zkrápěna absorbentem, z absorbéru následně vystupují spaliny zbavené  $\text{CO}_2$ . Ten je poté odveden do kotle, kde je regenerován. Uvolněný oxid uhličitý je následně stlačen a připraven k uskladnění. Schéma tohoto procesu je zobrazeno na obrázku 17. [40] [60] V některých případech je použita metoda PSA, princip této metody je vysvětlen v sekci 8.3.2. [40]



Obrázek 17 - Schéma separace  $\text{CO}_2$  ze spalin pomocí absorpce [60]

## 7.2 Výroba pomocí zeleného vodíku



Obrázek 18 - Blokové schéma výroby amoniaku ze zeleného vodíku

Základní složky pro produkci amoniaku jsou vodík a dusík. Oba tyto plyny lze získat pomocí elektrické energie, a to elektrolýzou vody a separací vzduchu. Nahrazením zemního plynu, který slouží jako zdroj vodíku při konvenční výrobě je tak eliminován zdroj uhlíku, respektive oxidu uhličitého. Veškeré emise  $\text{CO}_2$  jsou pak spojeny pouze s produkcí energie pro a výrobou samotných zařízení. Jak již bylo uvedeno výše v kapitole (5.Taxonomie) je nutné zajistit, aby energie použitá pro takovou výrobu pocházela z nízkoemisních zdrojů tedy zdrojů, kde emisní ekvivalent  $\text{CO}_2$  pro výrobu nepřesahuje  $18 \text{ [gCO}_2\text{eq/MJ]}$ . Tím by měla být zajištěna uhlíková stopa na vyprodukovaný vodík  $36,4 \text{ [gCO}_2\text{eq/MJ]}$ . Takový vodík je uznatelný jako obnovitelný. Pro výrobu je tedy možné použít nízkoemisní zdroje jako FVE, VTE, VE, či jádro. [61] Potenciál využití energie vody je však již na území České republiky vyčerpán, významný nárůst kapacit tak lze očekávat zejména u fotovoltaických a větrných zdrojů. [62] Tyto zdroje se tak jeví jako vhodné pro technologie výroby nízkoemisního vodíku a dalších látek které jej využívají jako základní složku.

Při použití vodíku vzniklého elektrolýzou vody odpadá celý proces reformingu. [40] Na rozdíl od výroby ze zemního plynu, kde je dusík dodáván v podobě spalného vzduchu do reformeru, je zde nutné dusík vyrábět externě ze vzduchu pomocí ASU. V současné době jsou již elektrolýzery schopny produkovat vodík o vysoké čistotě 99,9 %, avšak katalyzátor pro syntézu amoniaku je extrémně citlivý na přítomnost kyslíku, ten je tedy nutné ze směsi odstranit. [63] [40] Z vodíku produkovaného elektrolýzou je pomocí katalytického spalování odstraněn zbytkový kyslík. Po odstranění vody vzniklé spálením vodíku se zbytkovým kyslíkem je smísen s dusíkem a směs je přivedena do zásobníku, který slouží k utlumení nerovnoměrnosti procesu a vyrovnání tlaku. Samotný proces syntézy amoniaku je již totožný s konvenčním řešením. [40] Konkrétní uspořádání komponent se může lišit v závislosti na použité technologii. Schéma výroby jako takové bude stejné pro všechny typy výroby amoniaku využívajících vodík vyrobený elektrolýzou z vody a konvenční syntézu pomocí Harber-Boschova principu.



## 8 Návrh systému výroby amoniaku pomocí OZE

### 8.1 Úvod

Další část mé práce se bude věnována návrhu výroby vodíku a dusíku pro syntézu amoniaku. Za využití obnovitelných zdrojů energie a vstupních surovin v podmínkách České republiky. Pro pokrytí spotřeby amoniaku na výrobu 52 % kyseliny dusičné v závodě SHYTESIA, a.s. V této kapitole je provedena volba vhodných technologií pro výrobu vodíku a dusíku. Dále jsou stanoveny potřebné objemy jednotlivých surovin a energetické náročnosti pro jejich získání a zpracování.

### 8.2 Technologie pro výrobu vodíku

#### 8.2.1 Výroba vodíku

Pro výrobu vodíku přichází v úvahu technologie PEM a AWE, jelikož pro technologii SOE je nutný poměrně velký zdroj tepla, který v této aplikaci k dispozici není. SOE je tedy vhodná například v kombinaci s jadernými či tepelnými elektrárnami. [12] V tabulce číslo 3 jsou vypsány jednotlivé parametry elektrolyzérů včetně výrobce. Zajímavá je především spotřeba energie vztažená na množství vyrobeného vodíku. Ta je u obou technologií takřka totožná. Do tabulky však není zahrnuta cena jednotlivých řešení, jelikož je závislá na konkrétní nabídce od výrobce. Z tohoto důvodu budu předpokládat investiční náklady dle grafu 1. Z pohledu investičních nákladů vychází lépe alkalická metoda, avšak vzhledem ke změnám výkonu v důsledku použití energie ze slunce a větru je vhodnější technologie PEM. Ta je lépe regulovatelná a lépe snáší změny výkonu. [64]

Tabulka 3 - Parametry jednotlivých elektrolyzérů [63] [65] [66]

AWE			
značka	Elektrická spotřeba [Kwh/Kg H <sub>2</sub> ]	Výstupní tlak vodíku [bar]	Spotřeba vody [l/Kg H <sub>2</sub> ]
NEL	49,44	1-200	11,236
Mc lyzer	50,56	30	-
PEM			
značka	Elektrická spotřeba [Kwh/Kg H <sub>2</sub> ]	Výstupní tlak vodíku [bar]	Spotřeba vody [l/Kg H <sub>2</sub> ]
NEL	50,6	30	10,1
ITM Power	55,5	30	-

Z porovnávaných variant vychází lépe řešení nabízené společností NEL, tento výrobce také udává informace o spotřebě vody a čistotě vodíku. Z těchto důvodů bude návrh proveden pro parametry tohoto produktu.

#### 8.2.2 Úprava vody

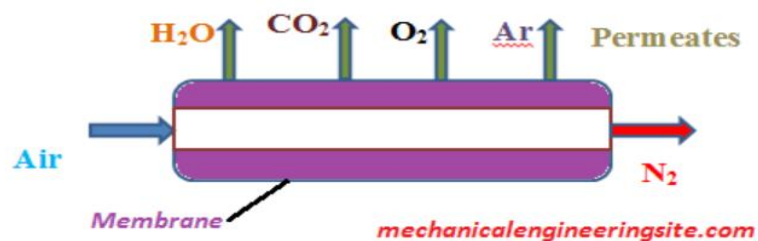
Pro správnou funkci elektrolyzérů je nutné vodu zbavit nečistot a minerálních látek. Minimální požadovaná čistota je ASTM typ 2, avšak doporučená čistota je ASTM typ 1. [65] Jedná se tedy o deionizovanou vodu. Voda je tedy nejprve filtrována a následně deionizována.

## 8.3 Technologie pro výrobu dusíku

Zdrojem dusíku pro průmyslové aplikace je atmosféra. Ta je totiž tvořena dusíkem ze 78 %. [66] Pro separaci dusíku ze vzduchu existuje několik technologií. Nejvýznamnější jsou zejména: Membránová separace, adsorpce a frakční destilace vzduchu. [67] [68]

### 8.3.1 Membránová separace

Prachu zbavený stlačený vzduch prochází membránou. Ta pracuje na principu rozdílu propustnosti jednotlivých složek vzduchu membránou. To má za následek, že nechtěné složky jako kyslík,  $\text{CO}_2$  a argon prostoupí membránou rychleji, a tak uvnitř membrány vzniká atmosféra s vyšší koncentrací dusíku. [69]



Obrázek 19 - Schéma membránového generátoru dusíku [69]

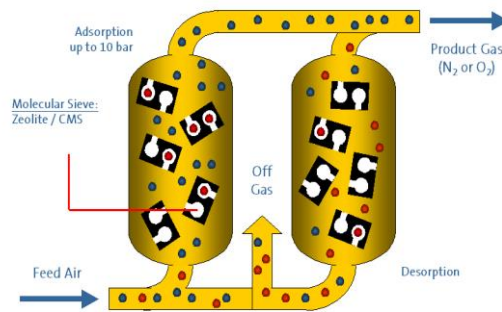


Obrázek 20 - Membránový modul  
GENERON pro výrobu dusíku [71]

Tato technologie je jednoduchá, avšak nedosahuje takové čistoty jako adsorbční metoda či frakční destilace. [66] [70] Dosahované koncentrace dusíku pomocí této metody se pohybují okolo 95 – 99,5 %. [66] [71]

### 8.3.2 Adsorpce (PSA)

Pressure swing adsorption je metoda separace dusíku ze vzduchu pomocí adsorbentu na bázi uhlíku. Jak již název napovídá je zde využito změny tlaku pro desorpci (vyčištění adsorbentu). Systém je konstruován ze dvou nádrží, ve kterých se nachází sorbent. Do těchto nádrží je střídavě přiveden stlačený vzduch, který byl zbaven vlhkosti a nečistot, které by mohli vést k poškození sorbentu. Nežádoucí plyny, zejména kyslík jsou zachyceny a dále prochází dusík.

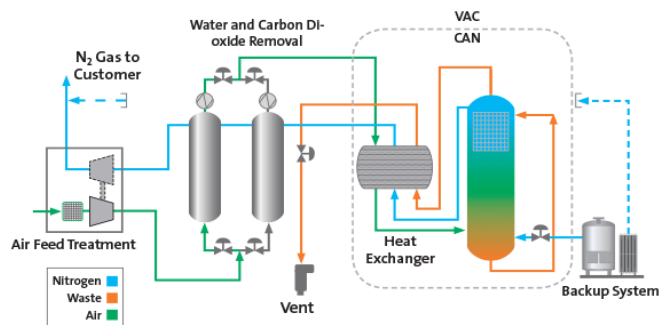


Obrázek 21 - Schematické zobrazení procesu adsorpce [106]

Většina je odvedena na výstup separátoru, avšak část je přivedena do druhé nádrže, která je odtlakována a proudem dusíku je vynášen sorbentem zachycený kyslík. Následně je proces otočen a druhá nádrž je použita pro čištění zatím co v první dochází k desorpci. [72] [68] [73] Pomocí této technologie lze dosahovat čistot dusíku 99,999 % [68] [74] [75] Tato technologie nabízí nižší náklady než frakční destilace, která je energeticky náročná a vyplatí se tak až pro velké objemy výroby. PSA je tedy ideální volbou tam kde je nutné dosahovat vysokých čistot při relativně malých objemech.

### 8.3.3 Frakční destilace vzduchu

Stejně jako v předchozích případech je vzduch nejprve zbaven mechanických nečistot a stlačen. Následně je zbaven oxidu uhličitého, vody a stopových uhlovodíků, které by po jeho zchlazení zamrzly a mohly tak způsobit poškození systému. Vzduch je následně ochlazen na  $-172\text{ °C}$ , a přiveden na destilační kolonu. Zde je využito rozdílných teplot varu jednotlivých složek vzduchu, které jsou tak odděleny. [66] [76]



Obrázek 22 - Výroba dusíku pomocí destilace vzduchu [107]

### 8.3.4 Volba technologie ASU

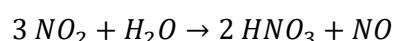
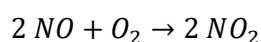
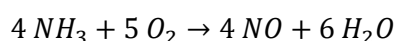
Pro využití dusíku k výrobě amoniaku je nutné, aby byla dodržena jeho vysoká čistota. Zejména pak nízký obsah kyslíku, který by způsobil poškození katalyzátoru. Ten je nutné dodržet v koncentracích v řádu jednotek PPM. Takových čistot komerční membránové separátory nedosahují. Pomocí technologie PSA lze dosáhnout dostatečné čistoty, avšak s nároky na čistou se snižuje produktivita a zvyšuje energetická náročnost této metody. [68] Jako vhodná se tedy jeví metoda frakční destilace vzduchu. Závislost čistoty a produktivity s odhadovanou energetickou náročností je zobrazena na obrázku 23 (kapitola 8.5.4).

## 8.4 Základní návrhové výpočty

Návrh vychází ze spotřeby amoniaku. Ze spotřeby amoniaku přímo vychází spotřeba vodíku a dusíku, ta bude dopočtená na základě stechiometrického poměru pro syntézu. Dle použité technologie pro výrobu  $H_2$  a  $N_2$  bude určena energetická náročnost pro jejich získání. Dále je nutné stanovit poměr, ve kterém bude vyráběn dusík a vodík, tak aby odpovídal stechiometrickému poměru pro syntézu. Po získání těchto hodnot je možné dopočítat energetickou náročnost pro výrobu odpovídajících objemů vodíku a dusíku. Následně bude dopočtena energetická náročnost procesu samotného (výkony čerpadel a kompresorů). Tyto tři složky budou dohromady tvořit celkovou poptávku po energii, pro kterou bude následně dopočtena odpovídající velikost obnovitelného zdroje.

### 8.4.1 Spotřeba amoniaku

Výroba kyseliny dusičné probíhá dle rovnic:



[40] [56]

Jak je vidět dusík je jak v amoniaku, tak v kyselině dusičné pouze jeden, a dostává se do reakce pouze prostřednictvím amoniaku. Pokud uvažujeme dokonalou recyklaci oxidu dusnatého a zanedbáme ztráty způsobené vznikáním molekulárního dusíku a oxidu dusného vlivem nedokonalosti reakce. Odpovídá jednomu molu kyseliny dusičné jeden mol amoniaku. Pro výpočet je tedy stanoven počet molekul v jednom kilogramu kyseliny dusičné.

$$M_{2HNO_3} = 2 \cdot 1,0079 + 14,01 + 3 \cdot 16 = 64,026 \text{ [g/mol]}$$

$$n = \frac{m_{2HNO_3}}{M_{2HNO_3}} = \frac{1000}{64,026} = 15,619 \text{ [mol]}$$

Nyní je vypočtena odpovídající hmotnost amoniaku.

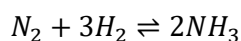
$$M_{NH_3} = 14,01 + 3 \cdot 1,0079 = 17,034 \text{ [g/mol]}$$

$$m_{NH_3} = n \cdot M_{NH_3} = 15,619 \cdot 17,034 = 266,054 \text{ [g]}$$

Pro produkci jednoho kilogramu kyseliny dusičné je tedy zapotřebí přibližně 0,266 [Kg] amoniaku. Kyselina dusičná má však v tomto případě hmotnostní koncentraci 52 %. Pro výrobu jednoho kilogramu kyseliny dusičné 52 % je tedy zapotřebí pouze 0,138 [kg] amoniaku. Celková roční spotřeba amoniaku tedy činí 10350 tun, to odpovídá denní produkci 28,36 tuny. Projektovaná produkce tak bude 29 tun amoniaku denně. [77] [56]

#### 8.4.2 Poměr dusíku a vodíku

Jak již bylo zmíněno (kapitola 4.2.2) syntéza amoniaku probíhá dle reakce



na dva moly amoniaku připadají tři moly vodíku a jeden mol dusíku. Nejprve je nutné určit molární hmotnosti reaktantů a produktu.

$$M_{N_2} = 2 \cdot 14,01 = 28,02 \text{ [g/mol]}$$

$$M_{H_2} = 2 \cdot 1,0079 = 2,0158 \text{ [g/mol]}$$

$$M_{NH_3} = 14,01 + 3 \cdot 1,0079 = 17,0337 \text{ [g/mol]}$$

Nyní je vypočteno množství molekul amoniaku v jednom kilogramu.

$$n_{NH_3} = \frac{m_{NH_3}}{M_{NH_3}} = \frac{1000}{17,0337} \approx 58,7072 \text{ [mol]}$$

Z toho plyne že je nutné dodat 29,3536 mol dusíku a 88,0608 mol vodíku.

Hmotnosti reaktantů jsou tedy následující:

$$m_{N_2} = n_{N_2} \cdot M_{N_2} = 29,3536 \cdot 28,02 = 822,488 \text{ [g]}$$

$$m_{H_2} = n_{H_2} \cdot M_{H_2} = 88,0608 \cdot 2,0158 = 177,512 \text{ [g]}$$

Pro výrobu jednoho kilogramu amoniaku je nutné získat 822,5 g dusíku a 177,5 g vodíku. Hmotnostní podíl dusíku je tedy 82,2 % a hmotnostní podíl vodíku 17,8 %. Denně je nutné vyrobit 5148 kg vodíku a 23853 kg dusíku. [77] [40]

Produkce kyslíku separací vzduchu bude uvažována v závislosti na produkci dusíku a procentuálním složení atmosféry. Jelikož je vzduch tvořen ze 75,5 %hm. dusíkem a 23,17 %hm. kyslíkem. [78]

Celková hmotnost zpracovaného vzduchu dána jako:

$$m_{\text{vzduchu}} = \frac{m_{N_2}}{0,755} = \frac{23853}{0,755} = 31593,38 \text{ [kg/den]}$$

Množství kyslíku je tedy dáno:

$$m_{\text{vzduchu}} \cdot 0,2317 = 31593,38 \cdot 0,2317 = 7320,19 \text{ [kg/den]}$$

### 8.4.3 Voda

Spotřeba vody je vypočtena jako součin produkce vodíku a spotřeby vody na jeden kilogram vodíku, tedy:  $5148 \cdot 10,113 = 52062 \text{ [l/den]}$  [63]

Toto je spotřeba čisté deionizované vody, spotřeba surové vody bude vyšší z důvodu nutnosti odplavení zachycených minerálních látek a nečistot pro regeneraci filtračních zařízení. Pro tyto denní produkce se pohybuje poměr čisté a oplachové vody 75 % / 25 %. [79] Spotřeba surové vody bude tedy 69416 [l/den].

## 8.5 Energetická bilance

### 8.5.1 Úprava vody

Energetická náročnost pro úpravu vody je vypočtena jako součin spotřeby deionizované vody a energetické náročnosti na její výrobu. Ta se pohybuje v rozmezí [3-10 kWh/m<sup>3</sup>]. [80] Uvažovaná energetická náročnost je tedy dána jako:

$$52,062 \cdot 5 = 260,31 \text{ [kWh/den]} \approx 0,26 \text{ [Mwh/den]}$$

Je však nutné si uvědomit, že výroba vodíku nebude konstantní v čase vzhledem k povaze zdroje energie, a tyto příkony jsou vypočteny pro celkovou energetickou bilanci. Celkový výkon elektrolyzáru tedy bude záviset na časové charakteristice zdroje, tak aby byla výroba pokryta přes den, kdy bude příkon vyšší v důsledku fotovoltaiky. Tuto nerovnoměrnost bude vyrovnána pomocí skladování..

### 8.5.2 Výroba vodíku

Celkový denní příkon pro výrobu vodíku je dán součinem denní produkce a spotřebou energie pro jeho výrobu udávané výrobcem, a energetické náročnosti dodatečného dočištění vodíku. Toto dočištění je nutné z důvodu citlivosti katalyzátoru na kyslík při syntéze čpavku. Energetická náročnost čištění je uvažována 0,5 [kwh/kg]. [81]

$$\text{Energie pro elektrolýzu} = 50,56 \cdot 5148 = 260282,88 \text{ [kWh/den]} \approx 260,2 \text{ [MWh/den]}$$

$$\text{Energie pro čištění} = 0,5 \cdot 5148 = 2574 \text{ [kWh/den]} \approx 2,6 \text{ [Mwh/den]}$$

$$\text{energie pro } H_2 = 260,2 + 2,6 = 262,8 \text{ [Mwh/den]}$$

### 8.5.3 Skladování vodíku

Pro skladování vodíku je uvažován tlak 40 bar. Jelikož výstupní tlak z procesu elektrolýzy zahrnující i čištění je 30 bar je nutné vodík stlačit. Pro výpočet energetické náročnosti komprese je uvažován vodík jako ideální plyn, a komprese jako adiabatická. Chyba vzniklá tímto předpokladem je považována za zanedbatelnou vzhledem k zanedbání reálné konstrukce kompresoru a volbě jeho účinnosti. Dále také vzhledem k velikosti energetické náročnosti komprese vůči energetické náročnosti elektrolýzy.

Nejprve byl vypočten objemový tok ze znalosti hmotnostního toku. Dále byl stanoven tok látkového množství pomocí molární hmotnosti vodíku. Z toho byl pomocí stavové rovnice určen objemový tok. Ten byl následně dosazen do vztahu pro adiabatický výkon. Kompresní poměr je stanoven jako podíl výstupního a vstupního tlaku. Celkový výkon pro pohon kompresoru je stanoven jako podíl adiabatického výkonu a účinnosti.

Tabulka 4 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro akumulaci kompresor

Komprese vodíku pro akumulaci			
t	Teplota	[°C]	20
T	Teplota	[K]	293,15
p1	Vstupní tlak	[bar]	30
p2	Výstupní tlak	[bar]	40
M	Hmotnostní tok	[Kg/den]	5148
κ	Poissonova konstanta	[-]	1,4
m H2	Molární hmotnost vodíku	[g/mol]	2,0158
R	Univerzální plynová konstanta	[J/K* $\text{mol}$ ]	8,314
η	Účinnost kompresoru	[%]	65
<b>m</b>	<b>Hmotnostní tok</b>	<b>[Kg/s]</b>	<b>0,059583</b>
<b>n</b>	<b>Tok látkového množství</b>	<b>[mol/s]</b>	<b>29,55816</b>
<b>V</b>	<b>Objemový tok</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>0,024014</b>
<b>π</b>	<b>kompresní poměr</b>	<b>[-]</b>	<b>1,333333</b>
<b>Pad</b>	<b>Adiabatický příkon kompresoru</b>	<b>[W]</b>	<b>21600,35</b>
<b>P</b>	<b>celkový výkon kompresoru</b>	<b>[kW]</b>	<b>33,2313</b>
<b>EE</b>	<b>Denní spotřeba kompresoru</b>	<b>[MWh]</b>	<b>0,798</b>
<b>m max</b>	<b>Maximální hmotnostní tok</b>	<b>[Kg/s]</b>	<b>0,152179</b>
<b>n max</b>	<b>Maximální tok látkového množství</b>	<b>[mol/s]</b>	<b>75,49311</b>
<b>V max</b>	<b>Maximální objemový tok</b>	<b>[m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>0,061332</b>
<b>Pad max</b>	<b>Adiabatický příkon kompresoru při maximální výrobě</b>	<b>[W]</b>	<b>55168,44</b>
<b>P</b>	<b>instalovaný výkon kompresoru</b>	<b>[kW]</b>	<b>84,87452</b>

Použité vztahy:

$$\frac{\dot{m} [g \cdot s^{-1}]}{M [g \cdot mol^{-1}]} = \dot{n} [mol \cdot s^{-1}]; \dot{V} = \frac{\dot{n}RT}{p}$$

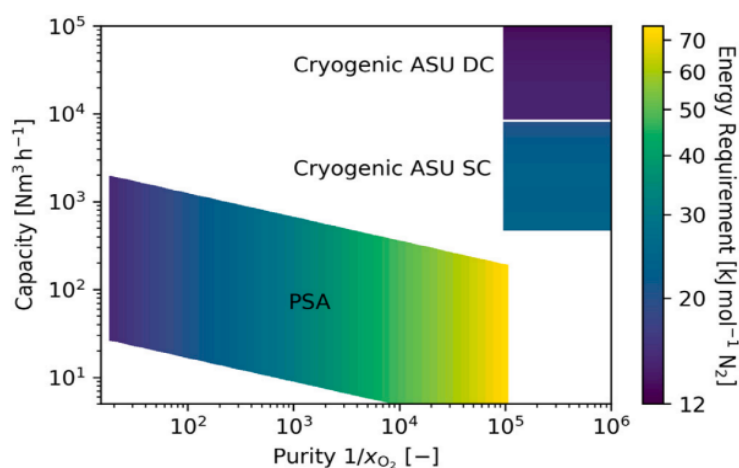
$$\pi = \frac{p_2}{p_1} [-]; P_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot \dot{V} \cdot \left( \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

[77] [82] [83] [84]

Veškeré výpočty jsou provedeny v programu Excel (příloha 1).

### 8.5.4 Výroba dusíku

Jelikož bude dusík získáván pomocí destilace vzduchu spadá energetická náročnost pro jeho získání do kategorie konstantních odběrů. Tento proces je totiž stejně jako samotná syntéza čpavku regulovatelný jen do jisté míry z důvodů tepelných kapacit zařízení a dlouhodobého najíždění procesu. Proto bude proces syntézy čpavku a k němu přidružené procesy jako je separace dusíku považovány za konstantní.



Obrázek 23 - Produktivita v závislosti na požadované čistotě dusíku s energetickou náročností pro jednotlivé metody [59]

Z dat vynesných v obrázku 23 je energetická náročnost výroby dusíku kryogenní metodou pro produkci okolo 800 [Nm³h] 25 [KJ/mol], a tedy:

$$n_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{M_{N_2}} = \frac{1000}{28,02} = 35,689 [mol]$$

$$35,689 \cdot 25 = 892.225 [KJ/Kg] \approx 0,248 [Kwh/kg]$$

Tomu tedy odpovídá energetická náročnost 248 [kWh/tuna]. Evropská asociace pro průmyslové plyny uvádí energetickou náročnost pro výrobu tuny dusíku kryogenní metodou při taku 40 bar. Jako 243 [kWh/tuna]. [85] Lze tedy tuto hodnotu považovat za vhodnou pro další výpočet.

Pro denní produkci 23853 kg je tedy energetická náročnost:

$$23,853 \cdot 248 = 5915,6 [Kwh/den] \approx 5,92 [Mwh/den]$$



### 8.5.5 Proces syntézy

Uvažovaný proces syntézy je autotermní, tedy teplo pro zahřátí syntézní směsi je dodáno kompresí a samotnou reakcí. [52] Z tohoto důvodu bude jedinou energetickou zátěž představovat stlačování směsi. Jak již bylo výše zmíněno syntéza čpavku je vratná reakce, a na jeden průchod zreaguje pouze okolo 20 % plynu. [40] Zbylý plyn je po odstranění čpavku recyklován. Celkový průtok reaktorem je tedy pětinasobný oproti přívodu nových surovin. Tento vratný proud má tlak snížený o tlakovou ztrátu v reaktoru, ta se pohybuje okolo 5-20 bar. [86] Dále je uvažováno, že vratný proud je při separaci čpavku ochlazen na teplotu vstupních surovin po průchodu prvním kompresorem. Odhad spotřeby energie pro komprese je vypočten, jako práce pro adiabatickou kompresi ideálního plynu se zahrnutím účinnosti kompresoru. Vzhledem k malému vlivu komprese na celkovou energetickou spotřebu a volbu parametrů (účinnost kompresoru, odhad tlakových ztrát, zanedbání reálné konstrukce kompresoru) je práce pro kompresi ideálního plynu dostatečně kvalitním údajem pro další výpočty. Nejprve byla vypočtena energetická náročnost kompresoru 1 pro stlačování čerstvé směsi, zde bylo vypočteno ohřátí směsi. To je následně vstupním údajem pro příkon kompresoru 2. Výpočet je proveden obdobně jako v případě komprese pro stlačení v sekci 7.5.3 Skladování vodíku.

Tabulka 5 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro kompresor 1

Komprese směsi vodíku a dusíku pro syntezu stupeň 1 (kompresor 1)			
t	Teplota	[°C]	20
T	Teplota	[K]	293,15
p1	Vstupní tlak	[bar]	40
p2	Výstupní tlak	[bar]	185
M H2	Hmotnostní tok vodíku	[Kg/S]	0,059583
M N2	Hmotnostní tok dusíku	[Kg/S]	0,276083
κ	Poissonova konstanta	[-]	1,4
m H2	Molární hmotnost vodíku	[g/mol]	2,0158
m N2	Molární hmotnost dusíku	[g/mol]	28,02
R	Univerzální plynová konstanta	[J/K*mol]	8,314
η	Účinnost kompresoru	[%]	65
n H2	Tok látkového množství vodíku	[mol/s]	29,55816
n N2	Tok látkového množství dusíku	[mol/s]	9,853081
V H2	Objemový tok vodíku	[m <sup>3</sup> /s]	0,01801
V N2	Objemový tok dusíku	[m <sup>3</sup> /s]	0,006004
V celk	Objemový tok směsi	[m <sup>3</sup> /s]	0,024014
π	kompresní poměr	[-]	4,625
T2	Teplota směsi na výstupu	[K]	454,069
Pad	Adiabatický příkon kompresoru	[W]	184546,3
P	Celkový příkon kompresoru	[kW]	283,9174
EE	Denní spotřeba kompresoru	[MWh]	6,814

Následně byla stejným způsobem stanovena náročnost komprese v kompresoru 2.

Tabulka 6 - Tabulka vstupních a vypočtených hodnot pro kompresor 2

Komprese směsi vodíku a dusíku pro syntezu stupeň 2 (kompresor 2)			
t	Teplota	[°C]	180,9
T	Teplota	[K]	454,1
p1	Vstupní tlak	[bar]	185
p2	Výstupní tlak	[bar]	200
M H2	Hmotnostní tok vodíku	[Kg/S]	0,297917
M N2	Hmotnostní tok dusíku	[Kg/S]	1,380417
κ	Poissonova konstanta	[-]	1,4
m H2	Molární hmotnost vodíku	[g/mol]	2,0158
m N2	Molární hmotnost dusíku	[-]	28,02
R	Univerzální plynová konstanta	[J/K*mol]	8,314
η	Účinnost kompresoru	[%]	65
n H2	Tok látkového množství vodíku	[mol/s]	147,7908
n N2	Tok látkového množství dusíku	[mol/s]	49,26541
V H2	Objemový tok vodíku	[m <sup>3</sup> /s]	0,030158
V N2	Objemový tok dusíku	[m <sup>3</sup> /s]	0,010053
V celk	Objemový tok směsi	[m <sup>3</sup> /s]	0,040211
π	kompresní poměr	[-]	1,081081
T2	Teplota směsi na výstupu	[K]	464,2967
Pad	Adiabatický příkon kompresoru	[W]	58647,33
P	Celkový příkon kompresoru	[kW]	90,22666
EE	Denní spotřeba kompresoru	[MWh]	2,165

Použité vztahy:

$$1) \frac{\dot{m}[g \cdot s^{-1}]}{M [g \cdot mol^{-1}]} = \dot{n}[mol \cdot s^{-1}]$$

$$2) \dot{V} = \frac{\dot{n}RT}{p}$$

$$3) \pi = \frac{p_2}{p_1} [-]$$

$$4) P_{ad} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot p_1 \cdot \dot{V} \cdot \left( \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)$$

$$5) T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

[77] [82] [83] [84]

Celková spotřeba komprese pro syntézu tedy činí [8,98 MWh/den] Při celkovém výkonu kompresoru 374,14 [kW]. Veškeré výpočty jsou provedeny v programu Excel (příloha 1).

### 8.5.6 Celková spotřeba

Zde je nutné si uvědomit, že část energetické náročnosti procesu bude konstantní v čase – kompresor směsi pro syntézu amoniaku a separace dusíku. Zatím co čerpadla pro dodávku vody do elektrolyzéry a čištění vodíku bude odpovídat produkci vodíku.

*Tabulka 7 - Tabulka energetické náročnosti jednotlivých celků při kontinuálním provozu*

Spotřeba elektrické energie pro	[MW]	[MWh/den]
Úprava vody	0,011	0,26
Elektrolýzu vody + čištění H <sub>2</sub>	10,953	262,87
Komprese H <sub>2</sub> pro skladování	0,033	0,80
Syntézu čpavku	0,374	8,98
Produkcy N <sub>2</sub>	0,246	5,92
Stálá spotřeba	0,621	14,90
Variabilní spotřeba	10,997	263,92
<b>Celková spotřeba</b>	<b>11,617</b>	<b>278,82</b>

## 9 Návrh obnovitelného zdroje

Zdroj elektrické energie musí být obnovitelný v souladu s taxonomií. Z tohoto důvodu je provedeno jednoduché porovnání variant, které přicházejí v úvahu. Následující porovnání jednotlivých variant nízkoemisních zdrojů elektrické energie vychází z roční bilance pro variabilní část spotřeby. Tedy pro akumulaci vodíku a s tím spojené procesy. Roční spotřeba je vynásobena koeficientem využití výkonu pro jednotlivé zdroje a pro tuto bilanci je navržen instalovaný výkon. Následně je v souladu s charakteristikou zdroje pro podmínky v České republice navržena velikost elektrolyzéro. Z energetické bilance je odečtena spotřeba pro úpravu vody a kompresy před uskladněním. Z tohoto je vypočten koeficient využití elektrolyzéro.

### 9.1 Nízkoemisní zdroje energie

#### 9.1.1 SMR

(Small Modular Reactor) je koncept, který má za cíl sériovou výrobu malých reaktorů, které je možné sdružovat ve větší a výkonnější celek. Hlavní benefity této technologie spočívají v drasticky nižším časem výstavby elektrárny, a jejich dlouhodobém a jednoduchém provozu. [87] Pro aplikaci výroby nízkoemisního amoniaku jsou vhodné především díky konstantnímu výkonu. Tudíž není výroba přerušována a je dosaženo vysokého počtu pracovních hodin. Tato vlastnost značně zjednodušuje návrh systému, jelikož není nutné dále rozlišovat spotřebu stálou a variabilní. Společnost NUSCALE nabízí modulární řešení, kde palivový cyklus trvá 18 měsíců, a doba odstávky je 10 dnů. [88] Je tedy dosaženo koeficientu využití výkonu 98 %. Jelikož je výkon z reaktorů konstantní je možné koncipovat výrobu vodíku na nominální výkon reaktoru. Pro tento případ zdroje by byla tedy výroba i spotřeba konstantní. Dle energetické náročnosti vypočtené výše při zohlednění koeficientu využití tedy 269,31 [MWh/den] to odpovídá příkonu 11,3 [Mw]. Samotný výkon elektrolyzéro je v případě stabilního zdroje koncipován totožný s instalovaným výkonem zdroje, tedy 11,3 [MW]. V tomto případě by také odpadá nutnost akumulace vodíku a s ní spojené náklady. Nevýhodou tohoto řešení jsou vysoké investiční náklady spojené s výstavbou a složitá legislativa. [89]

#### 9.1.2 Fotovoltaika

Fotovoltaika je významným adeptem, jelikož se jedná o již dobře zvládnutou technologii, která je komerčně využívána a na rozdíl od větru je lépe akceptována veřejností. Dalším důvodem je předpoklad významného navýšení výkonu instalovaného ve fotovoltaických systémech na území ČR, který bude nutný pro dosažení emisní neutrality v roce 2050. [62] Díky tomu lze předpokládat, že energeticky náročné procesy jako je například výroba vodíku budou využívat právě energii z fotovoltaiky. Další motivací pro využití fotovoltaiky je její příznivá cena. Investice na výstavbu fotovoltaické elektrárny se pohybuje okolo 628 [€/kWp]. [90] Významným rozdílem oproti SMR je však nestabilita výkonu, kterou fotovoltaika přináší. Výkon je závislý na intenzitě slunečního svitu, a tudíž se mění v závislosti na denní a roční době či v závislosti na počasí. Dále je samozřejmé, že v noci bude výroba nulová. Z tohoto důvodu je již nutné pro kontinuální výrobu navrhnout dostatečně velkou kapacitu akumulace vodíku, která pokryje nestabilitu výkonu. V případě napájení systému výroby amoniaku pouze fotovoltaikou by bylo nutné

veškeré energetické nároky na kontinuální provoz při nedostatečné výrobě pokrývat ze sítě či jiného zdroje, například plynovou turbínou. Alternativně by mohl být instalován systém akumulace elektrické energie, avšak vzhledem k nevyspělosti technického řešení takových systémů a jejich v současnosti problematické ekonomice nejsou uvažovány. Fotovoltaické systémy na území České republiky dosahují koeficientu využití okolo 12 %, a [62] Pro pokrytí roční spotřeby elektrické energie tak odpovídá fotovoltaický systém o instalovaném výkonu 91,7 [MWp]. Pro akumulaci vodíku je fotovoltaický zdroj dimenzován 180 %. Tomu odpovídá výkon elektrolyzérů 50,9 5[MW].

### 9.1.3 Větrná elektrárna

Další alternativou je větrná energie. Ta má na oproti fotovoltaice vyšší investiční náklady okolo 1325 [€/kW]. [90] Opět se však jedná technologicky i ekonomicky zvládnuté řešení. Dále dosahují lepšího koeficientu využití okolo 20 % [62]. Toto číslo však zahrnuje průměr všech větrných elektráren v České republice. Díky započtení starších a nevhodně navržených elektráren je toto číslo poněkud pesimistické. Správně navržené moderní větrné elektrárny v podmínkách České republiky dosahují koeficientu využití okolo 27 %. (dle konzultace s vedoucím) Toho je dosaženo tím, že je jejich výroba rovnoměrněji rozložena v čase, jelikož nejsou závislé na denní době. Toto je významnou výhodou, jelikož lze předpokládat, že do značné části pokryjí také spotřebu kontinuálního provozu. I zde je však výkon závislý na počasí a je tak nutné uvažovat akumulaci, která tento problém řeší. Pro pokrytí energetické bilance je odpovídající velikost větrného zdroje 40,8 [MWp]. Pro akumulaci vodíku pomocí větrného zdroje je uvažován výkon elektrolyzérů 50 %. Tomu odpovídá výkon elektrolyzérů 20,4 [MW].

Tabulka 8 - Parametry pro jednotlivé varianty zdroje [91]

Zdroj	Koeficient využití elektrolyzérů [%]	Instalovaný výkon zdroje [MW]	Výkon elektrolyzérů [MW]	Cena zdroje [mil.€]
SMR	97,90	11,3	11,3	61,02
FVE	21,58	91,7	50,9	57,5876
VTE	53,95	40,8	20,4	39,8412

Pro lepší přehled jsou varianty a jejich základní parametry vyneseny do tabulky. Jak je na první pohled patrné vychází jako ekonomicky nejvýhodnější varianta VTE. Ta také nabízí stálejší příkon než fotovoltaika. Nejlépe z hlediska návrhu vychází modulární reaktor, avšak investice a následná údržba je vyšší než u ostatních variant. Další významnou nevýhodou je současná velice složitá legislativa, která významně komplikuje použití této technologie. [91] [92]

## 9.2 Finální parametry zdroje

Jako finální řešení zdroje byla zvolena kombinace fotovoltaické a větrné elektrárny. Tato volba byla učiněna na základě předpokládaného rozvoje fotovoltaické energie v České republice. Samotná fotovoltaika má však nepříznivé rozložení výroby, a to jak z důvodu nulové výroby v noci, tak i poměrně zásadních rozdílů v měsíční výrobě v průběhu roku. Z tohoto důvodu je kombinována s větrnou energií, která do jisté míry vyrovnává nestabilitu solárního zdroje, a je schopná dodávat energii i v noci. To je důležité, jelikož je tak možné napájet i kontinuální provoz obnovitelnou energií. Modulární reaktory sice nabízejí stabilní výkon a velmi dobrý koeficient využití maxima výkonu, avšak vzhledem k současným problémům s komerčním využitím této technologie a legislativní problematice je nelze uvažovat.

Při správné kombinaci těchto zdrojů lze předpokládat využití elektrolyzáru přibližně 60 %. [93] Pro podmínky České republiky vychází vhodný poměr instalovaného výkonu kombinace FVE a VTE vzhledem k velikosti elektrolyzáru dvojnásobný. Při poměru 6:4 pro VTE. [93] (upraveno dle konzultace s vedoucím) Zdroj je navržen z celkové energetické bilance provozu. Ta je poté překontrolována pomocí dat pro solární a větrný zdroj v cílové lokalitě, město Litvínov. Celková energetická spotřeba byla již stanovena v sekci 8.5.6, a koeficienty využití výkonu jsou uvažovány stejně, jaké byly uvažovány pro porovnání variant nízkoemisních zdrojů v sekci 9.1. Pro přehlednost jsou vstupní data pro návrh zdroje vynesena do tabulky.

Tabulka 9 - Parametry pro zdroj obnovitelné energie

Stálá spotřeba [MW]	0,6206
Variabilní spotřeba [MW]	10,997
Celková spotřeba [MW]	11,617
Poměr FVE [%]	40
poměr VTE [%]	60
Poměr velikosti elektrolyzáru H <sub>2</sub> [%]	50
Koeficient využití FVE [%]	12
Koeficient využití VTE [%]	27

Pro stanovení celkové velikosti obnovitelného zdroje je nejprve nutné stanovit koeficient využití maxima výkonu kombinovaného zdroje. Ten je závislý na koeficientech využití maxima výkonu jednotlivých zdrojů (FVE VTE) a jejich poměru.

Poměrný koeficient využití maxima výkonu:

$$k_{zdroje} = \frac{FVE \cdot k_{FVE} + VTE \cdot k_{VTE}}{FVE + VTE} = \frac{40 \cdot 12 + 60 \cdot 27}{40 + 60} = 21 \text{ [%]}$$

Kde: FVE a VTE jsou zastoupení instalovaného výkonu v [%] a  $k_{FVE}$  a  $k_{VTE}$  jsou uvažované koeficienty využití maxima výkonu v [%].

Celkový instalovaný výkon zdroje je dán jako celková spotřeba upravená o koeficient zdroje.

$$Velikost_{OZE} = \frac{celková\ spotřeba}{k_{zdroje}} = \frac{11,617}{0,21} = 55,319 \approx 55,3 [MW]$$

Z celkové velikosti zdroje jsou přes poměry určeny dílčí velikosti fotovoltaického a větrného zdroje.

$$Velikost_{FVE} = Velikost_{OZE} \cdot FVE = 55,3 \cdot 0,4 = 22,12 [MW]$$

$$Velikost_{VTE} = Velikost_{OZE} \cdot VTE = 55,3 \cdot 0,6 = 33,18 [MW]$$

Velikost elektrolyzáru je dána poměrem velikosti elektrolyzáru a celkovou velikostí zdroje.

$$Velikost_{elektrolyzér} = Velikost_{OZE} \cdot H_2 = 55,3 \cdot 0,5 = 27,65 [MW]$$

Nyní je provedena kontrola těchto zdrojů pro cílovou lokalitu. Tedy město Litvínov, kde se nachází továrna společnosti ORLEN Unipetrol, kde je vyráběn amoniak. [56]

### 9.2.1 Kontrola FVE pro konkrétní lokalitu

Kontrola výroby z fotovoltaického zdroje byla provedena na základě dat získaných z informačního systému pro fotovoltaiku (PVGIS). [94] Z tohoto systému byla získána data pro výrobu ze solárního zdroje o velikosti 100 [kWp]. Za předpokladu panelů z krystalického křemíku s uvažovanou ztrátou systému 14 % pro fixní systém s optimální polohou. Sklon 40°, azimut -12°. Data pro výpočet jsou na hodinové bázi pro rok 2020 z databáze PVGIS SARAH2, pro polohu jižně od města Litvínov v Záluží tedy v absolutní blízkosti závodu ORLEN Unipetrol. Z těchto dat je následně vypočten výkon systému v % na hodinové bázi. Z něhož je následně vypočtena výroba pro navrhovaný systém o výkonu 22,1 [MWp]. Předpoklad roční výroby pro fotovoltaický systém je dán, jako součin počtu hodin v roce, instalovaného výkonu zdroje a koeficientu využití.

$$Výroba_{FVE\ teor.} = Velikost\ FVE \cdot k_{FVE} \cdot 8760 = 22,1 \cdot 0,12 \cdot 8760 = 23231,52 [MWh]$$

Reálná výroba uvažovaná ze získaných dat je dána jako součet všech hodinových výrob.

$$Výroba_{FVE} = 22993 [MWh]$$

$$\frac{Výroba_{FVE}}{Výroba_{FVE\ teor.}} \cdot 100 = \frac{22993}{23231,52} \cdot 100 = 98,97 [\%]$$

Bilance pro fotovoltaiku je tedy splněna z 98,97 [%]

Reálný koeficient využití je dán jako podíl reálné výroby k výrobě při využití maxima výkonu.

$$k_{FVE\ real} = \frac{22993}{22,1 \cdot 8760} \cdot 100 = 11,877 [\%]$$

Veškeré výpočty jsou provedeny v programu Excel viz přílohy (příloha 1). Je možné, že vzhledem k zaokrouhlení se budou výsledky v příloze mírně lišit.

## 9.2.2 Kontrola VTE pro konkrétní lokalitu

Kontrola větrného zdroje byla provedena pro teoretickou výrobu ve zvolené lokalitě v okolí města Litvínov. Vzhledem k povaze potenciálu větru se cílová lokalita nachází na vrcholu Loučná přibližně 8 [km] severně od města Litvínov. Tato lokalita byla zvolena na základě vyššího potenciálu větrné energie dle větrné mapy ústavu fyziky atmosféry akademie věd ČR. [95] Pro tuto lokalitu byla také získána data pro rychlosti a směry větru ve výšce 10 [m] nad povrchem.

Tabulka 10 - Tabulka parametrů větru pro cílovou lokalitu Loučná [97]

směr větru [°]	relativní četnost				prům. rychlost [m/s]	parametry Weibull		výroba energie	
	vše	0-4 m/s	4-8 m/s	> 8 m/s		A [m/s]	k	roční [kWh]	relativně
0	6.8%	2.69%	2.77%	1.34%	5.36	6.00	1.69	858.8	11.60%
30	3.4%	1.05%	2.16%	0.19%	4.99	5.59	2.97	97.3	1.31%
60	4.1%	2.13%	1.73%	0.24%	4.16	4.69	1.95	170.1	2.30%
90	6.1%	1.74%	4.31%	0.05%	4.80	5.31	3.85	143.8	1.94%
120	12.1%	3.68%	7.39%	1.03%	5.14	5.77	2.77	410.7	5.55%
150	11.3%	4.33%	6.49%	0.49%	4.66	5.24	2.70	317.3	4.29%
180	7.1%	3.29%	3.80%	0.01%	4.12	4.58	3.49	126.7	1.71%
210	6.0%	2.75%	2.90%	0.35%	4.42	4.99	2.21	219.0	2.96%
240	4.8%	1.28%	2.72%	0.80%	5.64	6.35	2.53	239.9	3.24%
270	8.6%	2.54%	3.26%	2.80%	6.67	7.47	1.68	1818.3	24.56%
300	13.8%	2.08%	5.27%	6.45%	8.02	9.05	2.22	1872.3	25.29%
330	16.1%	2.40%	7.86%	5.85%	7.08	7.96	2.65	1129.2	15.25%
<b>celkem</b>	<b>100%</b>	<b>29.96%</b>	<b>50.66%</b>	<b>19.58%</b>	<b>5.78</b>	<b>6.51</b>	<b>1.91</b>	<b>7403.4</b>	<b>100%</b>

Dle koeficientů z tabulky byla stanovena křivka Weibullova rozdělení pravděpodobností rychlostí větru. [96]

$$f(x) = \frac{k \cdot x^{k-1}}{A^k} \cdot e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k}$$

$$f(v) = \frac{1,91 \cdot v^{1,91-1}}{6,51^{1,91}} \cdot e^{-\left(\frac{v}{6,51}\right)^{1,91}}$$





Graf 2 - Hustota pravděpodobnosti rychlosti větru dle Weibullova rozdělení [97]

Následně byla zvolena referenční větrná turbína Dongfang G2000-116/FD 116-2000. Z parametrů turbíny je pro výpočet výroby nutné znát výšku rotoru, pracovní rozsah rychlostí a výkonovou křivku. Tato konkrétní turbína pracuje v rychlostech větru od 3 do 20 [m/s] s dosažením nominálního výkonu pro 9 [m/s]. Střed rotoru se nachází ve výšce 80 [m]. [98] Toto je důležité, jelikož rychlost větru je závislá na výšce od povrchu, jelikož u povrchu je snížena v důsledku terénních překážek. Z tohoto důvodu je stanoven opravný koeficient pro rychlost větru ve výšce rotoru.

$$\frac{v_h}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \rightarrow v_h = v_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n$$

Z letecké mapy lokality je vidět že se na vrcholu nachází nízké dřeviny, na základě geografických překážek v lokalitě je volen koeficient n pro přepočítání rychlosti větru. [96] [99]

Druh povrchu	n
a - hladký povrch - vodní hladina, písek	0,14
b - louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice	0,16
c - vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
d - porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesní	0,21
e - lesy s mnoha stromy	0,28
f - vesnice a malá města	0,48

Tabulka 11- Tabulka exponentů pro přepočítání rychlosti větru [98]

$$v_h = v_0 \cdot \left(\frac{80}{10}\right)^{0,21}$$

Po úpravě do tvaru  $v_h = v_0 \cdot k \rightarrow k = \left(\frac{80}{10}\right)^{0,21} \approx 1,548$

Dále byly zjištěny pravděpodobnosti pro jednotlivé rychlosti větru v pracovní oblasti větrné turbíny. Celkové procento času, který v dané lokalitě fouká vítr o dané rychlosti je dán plochou pod křivkou Weibullova rozdělení. To znamená určitý integrál funkce rozdělení rychlostí větru. Z tohoto důvodu je nutné stanovit pásmo rychlostí, které jsou považovány za určitou rychlost. Byla zvolena šířka pásma 1 [m/s] s počátkem ve 2,5 [m/s] tedy všechny rychlosti větru od 2,5 do 3,5 [m/s] jsou považovány za vítr o rychlosti 3 [m/s]. Takto jsou vytvořena pásma pro rychlosti od 3 do 20 [m/s]. Jelikož je však rozdělení pravděpodobností rychlostí větru pro rychlosti větru ve výšce 10 [m] je nutné pracovní rychlosti podělit koeficientem přepočtu rychlosti větru. Tak jsou určeny meze integrace Weibullovi funkce rozdělení rychlosti větru. Pro ujasnění je uveden příklad prvního integrálu.

Rychlost větru ve výšce rotoru 3 [m/s] → všechny rychlosti od 2,5 do 3,5 [m/s]

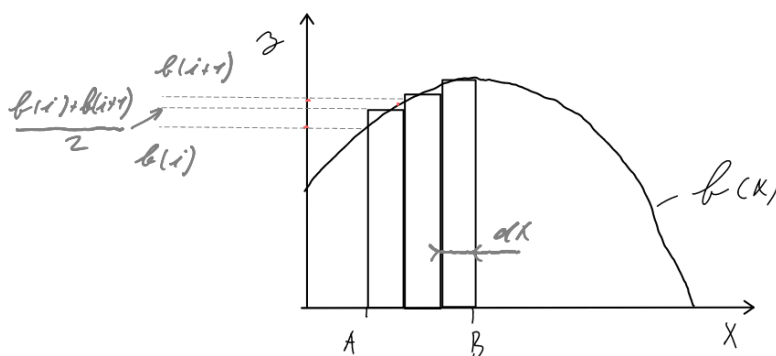
$$\rightarrow \frac{2,5}{k} = \frac{2,5}{1,548} = 1,615; \frac{3,5}{k} = \frac{3,5}{1,548} = 2,26 \rightarrow \text{plocha pod křivkou}$$

od 1,615 do 2,26 [m/s].

Četnost rychlosti pro rychlost větru 3 [m/s] v dané lokalitě:

$$\text{četnost} = \int_{1,615}^{2,26} \frac{1,91 \cdot v^{1,91-1}}{6,51^{1,91}} \cdot e^{-\left(\frac{v}{6,51}\right)^{1,91}} dv$$

Vzhledem k náročnosti integrace je provedena numericky v programu MATLAB (příloha 2) obdélníkovou metodou s krokem 0,01. Integrál je tedy součet ploch obdélníků o šířce 0,01 jejichž výška odpovídá průměru funkčních hodnot v bodě  $i$  a  $i+1$ .



Obrázek 24 - Schéma numerické integrace metodou obdélníků

$$\int_A^B f(x) dx \approx \sum_{i=1}^n \frac{f(i)+f(i+1)}{2} \cdot dx \text{ kde } n = \frac{B-A}{dx}$$

Tímto způsobem byly tedy stanoveny podíly pro rychlosti větru ve výšce rotoru. Skript pro integraci je k dispozici jako příloha. Hodinové četnosti pro jednotlivé rychlosti větru jsou následně vypočteny součinem počtu hodin v roce a četnosti pro danou rychlost.

$$\text{Četnost} = \text{Podíl} \cdot \text{počet hodin v roce} = 0,0563 \cdot 8760 = 493,188 \text{ [h/rok]}$$

Předpokládá se výroba pro všechny směry větru z důvodu natáčení gondoly větrné turbíny dle potřeby. Jelikož natáčení gondoly není okamžité je uvažována ztráta 10 % z celkové četnosti pro výrobu.

$$\text{Četnost}_{\text{výroba}} = \text{četnost} \cdot 0,9 = 493,188 \cdot 0,9 = 443,87 \text{ [h/rok]}$$

Tabulka 12 - Vypočtené hodnoty četností pro jednotlivé rychlosti větru

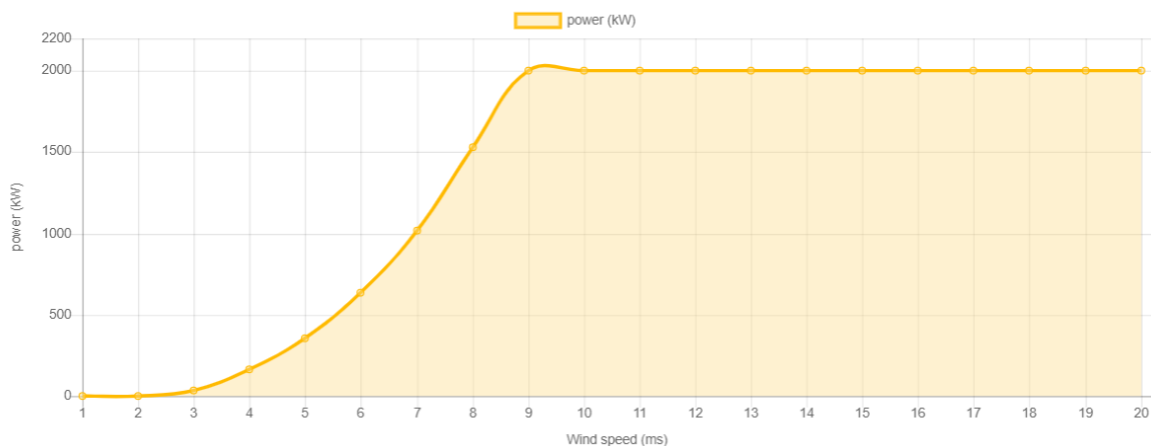
Rychlost větru ve výšce rotoru [m/s]	3	4	5	6	7	8	9	10	...
Podíl [%]	5,63	6,81	7,62	8,06	8,17	7,99	7,56	6,96	...
Četnost [h/rok]	493,19	596,56	667,51	706,06	715,69	699,92	662,26	609,70	...
Četnost pro výrobu [h/rok]	443,87	536,90	600,76	635,45	644,12	629,93	596,03	548,73	...

Výroba jedné turbíny pro danou rychlost je dána součinem výkonu pro danou rychlost a četností pro výrobu. Výkon pro danou rychlost je odečten z výkonové křivky dané turbíny. Ta však nepočítá se ztrátou výkonu vlivem změny hustoty vzduchu s nadmořskou výškou. Z tohoto důvodu je nominálního výkonu dosaženo až při vyšší rychlosti větru. Výkon odečtený z výkonové křivky je ponížen o ztrátu způsobenou nadmořskou výškou. Ta je volena z tabulky.

Tabulka 13 - Tabulka výkonu větrné turbíny v závislosti na nadmořské výšce [98]

Nadmořská výška (m)	Výkon v %
0	100
300	97
400	96
500	95
600	94
700	93
800	93
900	92
1000	91

Pro výšku 956 m.n.m. je tedy uvažována ztráta 9 % a nominálního výkonu bude dosaženo až při rychlosti větru 10 [m/s].



Graf 3 - Výkonová křivka větrné elektrárny Dongfang G2000-116/FD 116-2000 [97]

Celková roční výroba jedné turbíny je dána jako součet všech dílčích výrob pro rychlosti větru od 3 do 20 [m/s]. Celková výroba větrného zdroje je pak dána jako součin počtu turbín a roční výroby jedné turbíny. Počet turbín je dán podílem návrhové velikosti zdroje a nominálního výkonu turbíny.

$$\text{Počet turbín} = \frac{\text{Velikost}_{VTE}}{\text{výkon turbíny}} = \frac{33,18}{2} = 16,59 \rightarrow 17$$

Koeficient využití maxima výkonu je dán jako poměr reálné výroby ku teoretické.

$$k_{VTE \text{ real}} = \frac{\text{Výroba}_{VTE \text{ real}}}{2 \cdot 8760} \cdot 100 = \frac{9287,6}{2 \cdot 8760} \cdot 100 = 50,01 \text{ [%]}$$

Takto vysoký koeficient využití není reálný. Důvodem může být špatně zvolená ztráta výkonu vlivem natáčení gondoly či chyba v předpokladu závislosti rychlosti větru na výšce. Největší vliv má však Weibullovo rozdělení rychlostí větru, které nejspíše neodpovídá reálné situaci. Vzhledem k výrazně příznivějšímu výsledku výroby bude tedy předpokládán původní koeficient využití maxima výkonu, tedy 27 %.

Splnění bilance výroby je dáno poměrem vyrobené energie ku předpokladu.

$$\text{Výroba}_{VTE \text{ teor.}} = \text{Velikost VTE} \cdot k_{VTE} \cdot 8760 = 33,2 \cdot 0,27 \cdot 8760 = 78525 \text{ [MWh]}$$

$$\text{Výroba}_{VTE \text{ real.}} = \text{vyrobená ee} \cdot \text{počet turbín} = 4730,4 \cdot 17 = 80416,8 \text{ [MWh]}$$

$$\frac{\text{Výroba}_{VTE \text{ real.}}}{\text{Výroba}_{VTE \text{ teor.}}} \cdot 100 = \frac{80416,8}{78525} \cdot 100 = 102,41 \text{ [%]}$$

Bilance výroba z větru je tedy splněna z 102,41 [%], to je způsobeno tím, že reálný instalovaný výkon ve větru je větší než vypočtený potřebný instalovaný výkon, dále pak vzhledem k předpokladu splnění původního koeficientu využití maxima výkonu nedochází ke snížení výroby.

Pro přehled jsou výsledky uvedeny do tabulky. Výpočty jsou provedeny v programu Excel (příloha 1). Možné rozdíly výsledků jsou způsobeny zaokrouhlováním.

Tabulka 14 - Přepočtená data pro větrný zdroj za předpokladu koeficientu využití maxima výkonu 27 %

<b>Opravený zdroj dle předpokladu koeficientu využití 27 [%]</b>	
Vyrobená elektrická energie [MWh/rok]	<b>4730,4</b>
Koeficient využití maxima výkonu [%]	<b>27,0</b>
Celková výroba [MWh/rok]	<b>80416,8</b>

### 9.2.3 Úprava návrhu pro konkrétní lokalitu

Fotovoltaická elektrárna sice dle dat nedosahuje 100 % předpokladu výroby, avšak reálná výroba se může lehce lišit v závislosti na reálných ztrátách v systému, které byly voleny, a trendy počasí v daném roce. Ztráta je však pokryta výrobou z větru, jehož instalovaný výkon je lehce předdimenzován z důvodu zaokrouhlení na násobky dvou megawatt v důsledku nominálního výkonu jedné turbíny. Celková roční spotřeba je tedy pokryta. Dále je vypočten koeficient využití elektrolyzáru, ten by se měl pohybovat okolo 40 %.

$$k_{\text{elektrolyzáru}} = \frac{\text{Spotřeba}_{\text{real.}}}{\text{Spotřeba}_{\text{teor}}} = \frac{262,87 \cdot 365}{27,7 \cdot 8760} \cdot 100 = 39,54 \text{ [%]}$$

Veškeré výpočty jsou provedeny v programu Excel (příloha 1). Nejdůležitější parametry zdroje jsou pro přehlednost vyneseny do tabulky.

Tabulka 15 - Parametry navrhovaného zdroje

<b>Celková velikost OZE [MW]</b>	<b>56,1</b>
<b>Velikost FVE [MWp]</b>	<b>22,1</b>
<b>Velikost VTE [MWp]</b>	<b>34,0</b>
<b>Velikost elektrolyzáru [MW]</b>	<b>27,7</b>
<b>Splnění předpokladu výroby celkem [%]</b>	<b>101,6</b>
<b>Koeficient využití elektrolyzáru [%]</b>	<b>39,5</b>

### 9.3 Návrh velikost akumulace

Pro výpočet velikosti akumulace je nutné nejprve určit, které procesy budou regulovány v závislosti na příkonu zdroje a které vzhledem ke své povaze bude nutné provozovat nepřetržitě. Do nepřetržité spotřeby patří separace dusíku ze vzduchu a samotná syntéza amoniaku, tedy energetická náročnost pro kompresy syntézního plynu. Tyto procesy není možné vypínat a zapínat z důvodu poměrně obtížného a zdlouhavého procesu najíždění výroby. To je způsobeno zejména tepelnou kapacitou zařízení a nutností dosažení určité teploty pro jejich funkci. [52] Z tohoto důvodu je nutné zajistit konstantní přísun vodíku pro syntézu. Jelikož bude produkce vodíku klesat a stoupat v závislosti na velikosti výkonu dodávaném obnovitelným zdrojem je nutné jej akumulovat. Díky tomu bude zajištěno, že i v době nepříznivých povětrnostních podmínek bude vodíku pro výrobu dostatek. Zároveň také, že naopak v případě příznivé situace pro obnovitelné zdroje bude vodík produkován do zásoby a nebude nutné přebytečnou energii prodávat do sítě. Pro návrh optimální velikosti akumulace je nutné znát výkony zdrojů na hodinové či alespoň denní bázi. Z těchto dat je následně možné zjistit maximální předpokládanou dobu, kdy bude výroba nedostatečná a stanovit tak optimální velikost akumulace a také přebytek výroby v době, kdy je naopak výroba natolik velká že i při maximálním využití elektrolyzáru není výkon spotřebován. Tato data však nejsou k dispozici pro větrnou výrobu na území České republiky. Tudíž je akumulace koncipována na třídní maximální výrobu elektrolyzáru.

$$kapacita_{kg} = 3 \cdot 24 \cdot 547,84 = 39444,5 [kg]$$

Takové množství vodíku pokryje spotřebu na 7,66 dní. Dále je vypočten objem pro uskladnění této hmotnosti vodíku při teplotě 20 °C a tlaku 40 bar. Vodík je pro tento výpočet uvažován jako ideální plyn. Nejprve je určeno látkové množství, jako poměr celkové a molární hmotnosti vodíku.

$$n = \frac{m}{M} = \frac{39444,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 1,0079} = 19567665 [mol]$$

Nyní je ze stavové rovnice ideálního plynu vypočten objem.

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{19567665 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{40 \cdot 10^5} = 11922,82 [m^3]$$

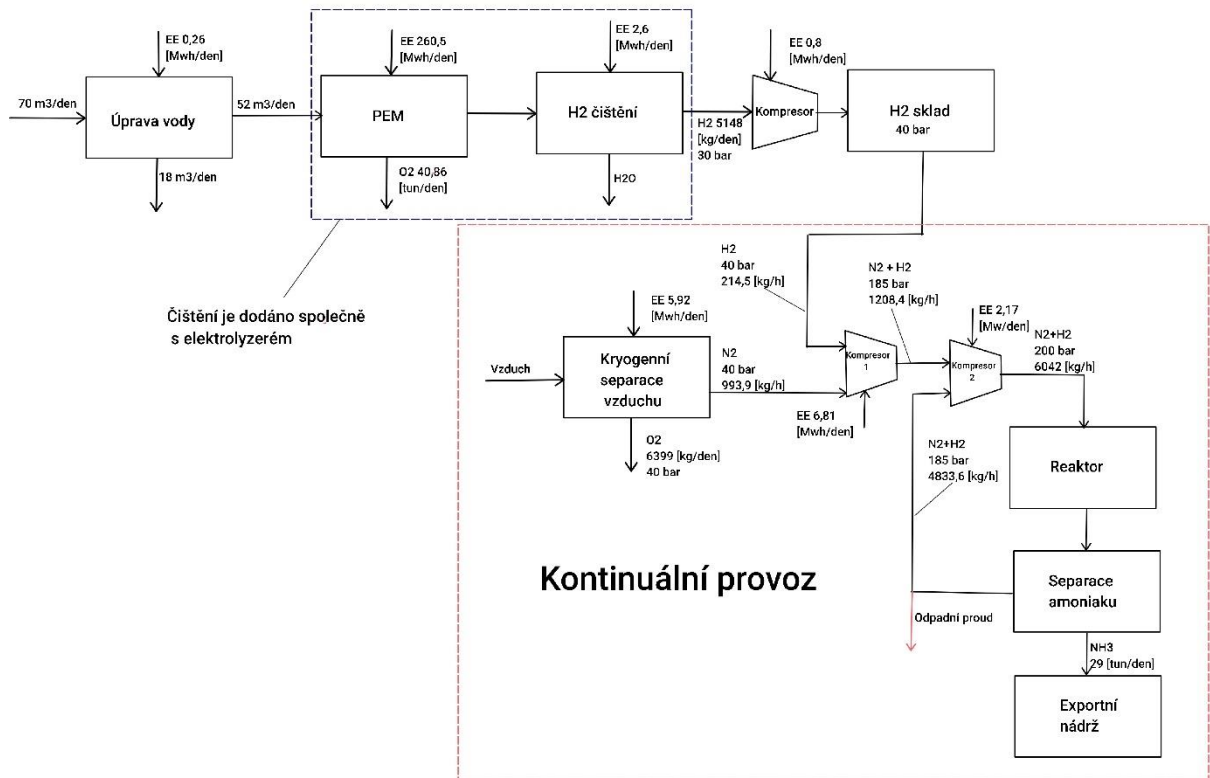
Takto velká akumulace je značně problematická jednak z důvodu poměrně vysoké ceny ale také z důvodu své velikosti. Pro lepší představu, tento objem by zabral krychli o hraně 22,84 [m]. Pro skladování větších množství vodíku se tedy často volí vyšších tlaků. Pro porovnání je stejným způsobem vypočteno, jaký objem by zabralo stejné množství vodíku při tlaku 200 [bar].

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{19567665 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{200 \cdot 10^5} = 2384,56 [m^3]$$

Jak je vidět rozdíl v objemu je zásadní, avšak stále se jedná o poměrně velkou stavbu. Hrana teoretické krychle 13,36 [m].

## 9.4 Schéma systému výroby amoniaku

Pro přehled je na obrázku schéma navrženého systému pro výrobu amoniaku včetně dat o spotřebě elektrické energie a množstvích. Spotřeby a množství jsou vypočteny pro kontinuální provoz. Pro proces syntézy a získání dusíku tak budou odpovídat skutečnosti. Data v regulovatelné části se budou měnit v závislosti na aktuálních podmínkách výroby elektrické energie v obnovitelném zdroji.



Obrázek 25 - Schéma navrženého systému

## 10 Ekonomické zhodnocení

V této sekci je provedena analýza nákladů pro investici a provoz zařízení pro výrobu amoniaku z vodíku vyrobeného pomocí elektrické energie z obnovitelných zdrojů v lokalitě města Litvínov. Na základě této bilance je vypočtena celková cena amoniaku. Pro zařízení se předpokládá již vybudovaná výroba amoniaku a nákup elektrické energie ze separátně postavených obnovitelných zdrojů. Pro návrh zařízení jsou vypracovány varianty pro různé scénáře vývoje ceny elektrické energie a velikosti akumulace. Dále je určena tržní cena amoniaku, a velikost investiční podpory, která by pokryla ekonomické ztráty vzniklé v důsledku dražší metody výroby.

### 10.1 Investiční náklady

Do této kategorie jsou zahrnuty investiční náklady pro zařízení nutné k produkci dusíku a vodíku. Zařízení samotné syntézy je již součástí stávající konvenční výroby amoniaku, která je tímto nahrazena, tudíž zde není uvažováno.

#### 10.1.1 Úprava vody

Systém je nutné osadit úpravnou vody odpovídající velikosti elektrolyzéro. Výkonu elektrolyzéro 27,7 [MW]. Tomu odpovídá maximální výroba vodíku 547,84 [kg/h]. Této produkci odpovídá spotřeba vody 5,6 [m<sup>3</sup>/h]. Výpočty viz Excel (příloha 1). Měrné investiční náklady na systém reverzní osmózy vody jsou 48 970 [€/m<sup>3</sup>/h]. [100] Celková cena systému je tedy 274232 €.

#### 10.1.2 Elektrolyzér

Dle návrhu je stanovena velikost elektrolyzéro na 27,7 [MW] výkonu. Uvažované měrné investiční náklady jsou 1000 [€/kWe] [101] tato hodnota byla uvažována vzhledem k poklesu ceny technologie PEM elektrolýzy po konzultaci s vedoucím. Celková cena elektrolyzéro je tedy 27,7 mil.€.

#### 10.1.3 Kompresor pro skladování

Výše již byl stanoven výkon kompresoru pro ukládání vodíku tento výkon byl však vypočten pro kontinuální provoz, z něž byla vypočtena celková bilance spotřeby energie. Stejně jako je tomu u úpravy vody je tedy zapotřebí stanovit reálný instalovaný výkon kompresoru, který bude schopen pojmout maximální výrobu vodíku. Pro maximální produkci je výkon kompresoru pro akumulaci 85 [kW]. Tento výpočet je proveden v programu Excel (příloha 1). Dle měrných nákladů na kompresor 950 [€/kW] [101] vychází celková investice pro kompresor 80 750 €.

#### 10.1.4 Skladovací kapacity

Měrné náklady pro skladovací kapacitu se poměrně významně liší v závislosti na tlaku, který je použit pro skladování. Zdroje uvádějí měrné náklady pro uskladnění vodíku v poměrně širokém pásmu hodnot pro tento příklad je volena hodnota 400 [€/kg]. [101] Pro skladovací kapacitu 39444,8 [kg] činí investice 15 779 920 €.



### **10.1.5 Jednotka pro separaci dusíku**

Jednotka pro produkci dusíku je konstruována na nominální produkci 23,9 [t/den]. Investiční náklady pro systém o této produkci lze dle výrobce těchto zařízení uvažovat okolo 600 000 \$ tedy 557 766 €. [102]

## **10.2 Provozní náklady**

Do této skupiny jsou zařazeny náklady na údržbu zařízení, náklady na energii a vodu.

### **10.2.1 Voda a její úprava**

Cena surové sladké vody je stanovena na 0,13 [€/m<sup>3</sup>]. [103]

Uvažovaná životnost zařízení pro úpravu vody je 20 let, a náklady na údržbu zařízení 2238 [€/m<sup>3</sup>]. [100] Roční náklady na údržbu tedy činí 12 533 €.

### **10.2.2 Elektrolyzér**

Roční náklady na údržbu elektrolyzéro jsou uvažovány jako 3 % z jeho pořizovací ceny. Životnost PEM elektrolyzéro se uvažuje 7 let. [101] Roční náklady na údržbu elektrolyzéro tedy činí 1 108 000 €. Po uplynutí doby životnosti je předpokládána jeho generální oprava s poměrnou cenou 300 [€/kW].

### **10.2.3 Kompresor pro skladování**

Náklady pro údržbu kompresoru jsou uvažovány jako 3 % z pořizovací ceny. Tedy 2423 €. Životnost kompresoru se odhaduje na 10 let. [101] Po uplynutí doby životnosti je pořízen kompresor nový.

### **10.2.4 Skladovací kapacity**

Náklady pro údržbu skladovacích kapacit jsou poměrně nízké vzhledem k její jednoduchosti. Uvažované roční náklady na údržbu činí 0,5 % z pořizovací ceny tedy 78 900 €. Dále také dosahují dlouhé životnosti více než 20 let. [101]

### **10.2.5 Jednotka pro separaci dusíku**

Provozní náklady pro separační jednotku jsou uvažovány 4 % z investice jako u elektrolyzéro. Uvažovaná životnost systému je 20 let. Roční náklady tak činí 22 311 €.

### 10.2.6 Cena elektrické energie

Uvažovaná cena elektrické energie se mění v čase. Proto je cena elektrické energie pro první dva roky provoz u stanovená dle burzy na 124,81 a 110,28 [€/MWh] pro roky 2025 a 2026. [104] Pro další roky provozu se předpokládají různé scénáře, pozitivní počítá s poklesem ceny energie na 50 [€/MWh], progresivní scénář počítá s pokračujícím poklesem ceny a jejím ustálení na hodnotě 80 [€/MWh] a konzervativní scénář počítá s opětovným zvýšením ceny na 120 [€/MWh].

### 10.2.7 Cena amoniaku

Cena amoniaku v Evropě se během poslední doby několikanásobně zvýšila v důsledku rekordních cen zemního plynu, které byly způsobeny Ruskou invazí na Ukrajinu. V prvním čtvrtletí roku 2022 byla zaznamenána rekordní cena amoniaku 1625 [\$t] tedy 1485 €. Ve druhém čtvrtletí již klesla na 960 [\$t] – 877,5 €. Obě tyto ceny jsou však extrémně vysoké v porovnání s cenami pro rok 2020 kdy se cena pohybovala nízko okolo 190 [\$t] – 173,6 €. [105] Pro porovnání ceny amoniaku bude použita poslední hodnota tedy 877,5 [€/t].

### 10.2.8 Shrnutí

Pro lepší přehled jsou náklady pro základní variantu vyobrazeny v tabulce.

Tabulka 16 - Investiční náklady a náklady na údržbu

Zařízení	Pořizovací náklady [€]	Náklady na údržbu [€]
Úprava vody	303614	13876
Elektrolyzér	27700000	831000
Kompresor	80750	2423
Akumulace	15777920	78890
ASU	557766	22311
Celkové náklady	44420050	948498
Elektrolyzér oprava	8310000	

Tabulka 17 - Náklady na energii a vodu

	Roční náklady 1. rok [€]	Roční náklady 2.rok [€]	Roční náklady další [€]
Voda [m3]	3420	3420	3420
Elektrická energie 1. [MWh]	12701780	11223077	10176893

### 10.3 Výpočet diskontované návratnosti

Cena amoniaku vyrobeného pomocí výše popsaného návrhu je vypočtena tak, aby byla čistá současná hodnota investice po době životnosti nulová. Respektive nebyla ztrátová – cena amoniaku je zaokrouhlena na jednotky € a NPV v době životnosti bude kladné. Pro určené podmínky tedy vyprodukuje zisk, který je však zanedbatelný. Pro výpočet je uvažovaná doba životnosti 20 let, a diskontní sazba 8 %. Dále není uvažována žádná zbytková hodnota projektu. Projekt je odepisován dle 4. odpisové skupiny na dvacet let s uvažovanou daní z příjmů 19 %.

#### 10.3.1 Tržby

Tržby jsou určeny jako součin roční produkce amoniaku v tunách a prodejní ceny amoniaku, která je v tuto chvíli neznámá, a bude dosazena taková cena, aby bylo dosaženo  $NVP \approx 0$  pro dvacátý rok provozu.

$$Tržby = 29 \cdot 365 \cdot cena_{NH_3}$$

#### 10.3.2 Náklady

Investiční i operační náklady jsou určeny dle měrných nákladů a nákladů pro vstupy v předchozí kapitole. Dále je však nutné pamatovat na životnosti jednotlivých komponent systému, a tedy počítat s generální opravou elektrolyzéro v osmém a patnáctém roce provozu a pořízením nového kompresoru pro akumulaci v jedenáctém roce provozu.

#### 10.3.3 Odpisy

Odpisy snižují hrubý zisk, a tak základ ze kterého je vypočtena daň. Dle 4. odpisové skupiny je první rok odepsáno 2,15 % z investice a další roky 5,15 %. Dále jsou v příslušných letech odepsány výdaje pro opravu elektrolyzéro a pořízení nového kompresoru.

$$Odpisy = celková\ cena\ investice \cdot příslušná\ sazba + investice_{opravy}$$

#### 10.3.4 Hrubý zisk

Hrubý zisk je dán jako rozdíl tržeb a nákladů na provoz, dále je ponížen o odpisy díky čemuž dochází ke snížení daně.

$$Hrubý\ zisk = tržby - náklady - odpisy$$

#### 10.3.5 Čistý zisk

Čistý zisk je hodnota, kterou projekt ročně generuje, jelikož však nezahrnuje investiční výdaje není tato hodnota příliš zajímavá z hlediska návratnosti investice či pro výpočet minimální prodejné ceny takto vyrobeného amoniaku.

$$Čistý\ zisk = tržby - náklady - daň$$

#### 10.3.6 Cash flow

Cash flow je suma peněžních toků v investici tato hodnota v sobě již zahrnuje investiční náklady. Jedná se tedy o celkovou hodnotu vyprodukovanou projektem v daném roce.

$$CF = tržby - náklady - investice - daň$$

Suma všech CF za dobu životnosti nám tedy dává celkovou hodnotu projektu. Aby však toto číslo bylo relevantní je nutné uvažovat, že peníze ztrácejí hodnotu v čase ať už vlivem inflace či úrokové sazby. Proto je vypočten diskontovaný cash flow. Nejprve je určen diskontní faktor, tedy koeficient, kterým jsou násobeny zisky i výdaje předpokládané v budoucích letech, tak aby byla jejich hodnota vyjádřena pro současnou hodnotu peněz.

$$DF = \frac{1}{(1+r)^n}$$

Kde  $r$  je diskontní sazba a  $n$  je rok provozu projektu.

Diskontovaný cash flow je dán jako součin příslušného diskontního faktoru a cash flow.

$$DCF = CF \cdot DF$$

### 10.3.7 Čistá současná hodnota

NPV je ukazatel celkového zisku projektu v čase. Je dán jako suma všech diskontovaných cash flow.

$$NPV = \sum_1^n DCF$$

Pro určení minimální nutné prodejní ceny amoniaku je tak nutné, aby byla tato hodnota  $\geq 0$ . [106] Cena amoniaku použitá k výpočtu tržeb tak byla zvyšována do doby kdy se čistá současná hodnota pro dvacátý rok provozu pro danou variantu dostala do kladných hodnot.

## 10.4 Výsledky

Cílem ekonomického hodnocení je určit podmínky pro které, bude takováto výroba amoniaku konkurence schopná, respektive nebude ztrátová. Pro výpočet bylo uvažováno uvedení do provozu v roce 2025. Dále byla určena produkční cena amoniaku pro předpokládanou dobu životnosti 20 let, a to pro různé scénáře vývoje ceny elektrické energie. A velikosti akumulace, která je závislá na reálné charakteristice zdroje elektrické energie. Ceny elektrické energie pro roky 2025 a 2026 jsou pro všechny scénáře totožné, jelikož za tyto ceny lze již energii na toto období koupit. Pro další roky se cena vyvíjí v závislosti na uvažované variantě. Pro všechny varianty ceny elektrické energie je uvažovaná velikost akumulace 3 dny maxima výroby elektrolyzátoru. Pro varianty s velikostí akumulace na 1 a 5 dní je uvažováno ustálení cen elektrické energie dle základní varianty na hodnotě 80 [€/MWh].

### 10.4.1 Základní varianta

Základní varianta uvažuje cenu elektrické energie pro roky 2027-2044 80 [€/MWh]. Pro tyto podmínky je výsledná cena vyprodukovaného amoniaku 1482 [€/t].

### 10.4.2 Optimistická varianta

Pro optimistickou variantu je uvažováno ustálení cen elektrické energie na roky 2027-2044 na hodnotě 50 [€/MWh]. Pro tento scénář dosahuje výsledná cena amoniaku hodnoty 1250 [€/t].

### 10.4.3 Konzervativní varianta

Tato varianta předpokládá cenu elektrické energie pro roky 2027-2044 120 [€/MWh]. Pro tyto podmínky dosahuje cena amoniaku hodnoty 1798 [€/t].

### 10.4.4 Akumulace 5 dní

Tato varianta předpokládá, že navrhovaná kombinace větrné a fotovoltaické výroby nebude schopna dostatečně kompenzovat nerovnoměrnost výroby v čase, a tak bude nutné zvýšit kapacitu akumulace vodíku, aby byla zajištěna kontinuální výroba. Pro tento scénář je výsledná cena amoniaku 1599 [€/t].

### 10.4.5 Akumulace 1 den

Tato varianta naopak předpokládá, že navržená kombinace fotovoltaické a větrné elektrárny bude schopna kompenzovat nerovnoměrnost jednotlivých zdrojů velice dobře, a tak bude možné velikost akumulace vodíku snížit. Tím dojde ke snížení investičních a provozních nákladů. Cena amoniaku pro tuto variantu je 1365 [€/t].

Tabulka 18 - Výsledné ceny amoniaku pro jednotlivé varianty

Scénář	Cena amoniaku [€/t]	Násobek současné ceny [%]
Základní	1482	168,9
Optimistický	1250	142,5
Konzervativní	1798	204,9
Akumulace 5 dní	1599	182,2
Akumulace 1 den	1365	155,6

V současné době se cena zeleného amoniaku pohybuje v rozmezí 653 až 1307 € v závislosti na konkrétním výrobcí. [107] Vzhledem k příznivějším podmínkám pro obnovitelné zdroje v některých částech světa vůči České republice je tedy možné tyto výsledky považovat za realistické.

### 10.4.6 Velikost dotace

Jako poslední je určena nutná velikost dotace pro optimistický scénář vývoje ceny elektrické energie při současné ceně amoniaku 877,5 [€/t]. A to pro variantu velikosti akumulace 3 a 1 den. Velikost dotace je vztažena k celkové nediskontované velikosti investice tedy počáteční investice + investice pro opravu elektrolyzéry a nový kompresor.

Tabulka 19 - Nutná velikost dotace pro základní scénář při současné ceně amoniaku pro variantu akumulace 3 a 1 den

Cena amoniaku 877,5 [€/t]		
	mil. €	Velikost dotace vůči celkové investici [%]
Dotace pro 3/80	56,52	92,5
Dotace pro 1/80	45,48	89,9

## 11 Závěr

Tato práce se zabývala možnostmi produkce a využití nízkoemisního vodíku. Nejprve byla provedena krátká rešerše na téma obnovitelných zdrojů a nutnosti akumulace energie. Další část práce byla věnována možnostem výroby a uskladnění vodíku. Zde byly vysvětleny problémy pojící se s jeho vlastnostmi a možnostmi jeho uskladnění. Využití takto vyrobeného vodíku bylo dále nastíněno v kapitole zabývající se technologiemi Power to X a spojování sektorů pro snížení uhlíkové stopy napříč ekonomickými sektory. Z technologií Power to X byla blíže zkoumána možnost výroby syntetických chemikálií pomocí nízkoemisního vodíku se zaměřením na amoniak.

Druhá polovina práce se tak zabývá využitím a produkcí amoniaku. Zde byl podrobně popsán konvenční proces výroby amoniaku pomocí parního reformingu zemního plynu. Dále byly zkoumány možnosti snížení množství emisí při jeho výrobě pomocí technologií CCS a jejich reálný účinek. Následně byl vypracován koncepční návrh výroby amoniaku pomocí obnovitelného vodíku pro pokrytí spotřeby amoniaku na výrobu kyseliny dusičné v závodu Synthesia. Nejprve byly vybrány vhodné technologie pro získání vstupních surovin, a posléze bylo určeno jejich množství a energetické náročnosti pro jeho získání. Dále byly stanoveny energetické náročnosti dalších procesů, zejména komprese pro syntézu a skladování. Pro navržený proces výroby byly posouzeny jednotlivé zdroje elektrické energie, které splňují kritéria pro uznatelnost vodíku jako obnovitelného. Na základě charakteristik jednotlivých zdrojů byl navržen kombinovaný zdroj fotovoltaiky a větru v příslušném poměru.

Poslední část práce byla věnována ekonomickému zhodnocení projektu a stanovení podmínek, pro které je možné uvažovat výrobu amoniaku pomocí navrženého systému. Nejprve byly stanoveny investiční a provozní náklady systému. Samotné ekonomické zhodnocení bylo provedeno pomocí diskontované návratnosti investice. Cena amoniaku byla vypočtena pro různé scénáře vývoje ceny elektrické energie a finální podoby projektu, aby byl patrný vliv cen energie či velikost počáteční investice na výslednou cenu produktu. Z výsledků je patrné, že i pro optimistické scénáře je, i vzhledem současným vysokým cenám amoniaku výsledná cena výrazně vyšší. Z tohoto důvodu je v současné době nasazení těchto technologií nepravděpodobné. Pro jejich konkurenceschopnost bude muset dojít k dalšímu snížení ceny výroby a skladování vodíku. Další možností, snížení investičních nákladů, a tak i výsledné ceny amoniaku je použití stabilního zdroje energie. Tím by bylo možné ušetřit za skladovací kapacitu vodíku a také použití výrazně menšího elektrolyzátoru. Veškeré výpočty byly provedeny v programu Excel a Matlab. Příslušné soubory jsou součástí příloh.

Vypočtené výsledky řádově odpovídají současným pilotním projektům, a tak považují práci za úspěšnou. Práce tak může sloužit jako materiál pro získání základního přehledu v problematice zeleného amoniaku.

## 12 Bibliografie

- [1] Jak zmírnit změny klimatu: řešení EU. In: *Zpravodajství: Evropský parlament* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: [https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20180703ST007129/jak-zmirnit-zmeny-klimatu-reseni-eu?at\\_campaign=20234-Green&at\\_medium=Google\\_Ads&at\\_platform=Search&at\\_creation=DSA&at\\_goal=TR\\_G&at\\_audience=&at\\_topic=Climate\\_Change&gclid=CjwKCAjwxr2iBhBJEiwAdXECw5MbvjDmLDd65N35bJzk37E\\_-31VcRSuXyG8mm0s5sX5cbDEbx0srBoCrtIQAvD\\_BwE](https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20180703ST007129/jak-zmirnit-zmeny-klimatu-reseni-eu?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Climate_Change&gclid=CjwKCAjwxr2iBhBJEiwAdXECw5MbvjDmLDd65N35bJzk37E_-31VcRSuXyG8mm0s5sX5cbDEbx0srBoCrtIQAvD_BwE)
- [2] Global warming. In: *Britannica* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/global-warming>
- [3] Čistá energie: EU podporuje obnovitelné zdroje a energetickou účinnost. In: *Zpravodajství Evropský parlament* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/economy/20180109STO91387/zmirnit-zmeny-klimatu-eu-proto-podporuje-cistou-energii>
- [4] Addressing Intermittency. In: *VCT GROUP* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://vctgroup.com/addressing-intermittency/>
- [5] GÜR, Turgut M. Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science* [online]. 2018, 11(10), 2696-2767 [cit. 2023-05-03]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C8EE01419A
- [6] MA, Jianli, Qi LI, Michael KÜHN a Natalie NAKATEN. Power-to-gas based subsurface energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2018, 97, 478-496 [cit. 2023-05-03]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.08.056
- [7] IBRAHIM, H, A ILINCA a J PERRON. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2008, 12(5), 1221-1250 [cit. 2022-12-05]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2007.01.023
- [8] AMIRYAR, Mustafa a Keith PULLEN. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences* [online]. 2017, 7(3) [cit. 2022-12-05]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7030286
- [9] DIVYA, K.C. a Jacob ØSTERGAARD. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research* [online]. 2009, 79(4), 511-520 [cit. 2022-12-05]. ISSN 03787796. Dostupné z: doi:10.1016/j.epsr.2008.09.017

- [10] REHMAN, Shafiqur, Luai AL-HADHRAMI a Md. ALAM. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 44, 586-598 [cit. 2022-12-05]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.12.040
- [11] JANÍK, Ing., Ing. DOUCEK a Ing. DLOUHÝ. ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA V PROGRAMU OPPI. *Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství v ČR*. Husinec-Řež č.p. 130 250 68: ÚJV Řež a.s., 2010. Dostupné také z: [https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA\\_HYTEP.pdf](https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/SVA_HYTEP.pdf)
- [12] RASHID, Md, Mohammed K. AL MESFER, Hamid NASEEM a Mohd DANISH. Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology: IJEAT*. Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication Pvt. Ltd., 2015, 4(3), 80-90. ISSN 2249 – 8958.
- [13] KAMEŠ, Josef. *VODÍK alternativní palivo*. První. Zíkova 4, 166 36 Praha 6: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.
- [14] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. 2019, 2(3), 442-454 [cit. 2022-11-25]. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [15] SØRENSEN, Bent. *HYDROGEN AND FUEL CELLS*. První. DK-4000 Roskilde, Denmark: Roskilde University energy and Environment Group, institute 2, 2005. ISBN 0-12-655281-9.
- [16] TRINKE, P., P. HAUG, J. BRAUNS, B. BENSMANN, R. HANKE-RAUSCHENBACH a T. TUREK. Hydrogen Crossover in PEM and Alkaline Water Electrolysis: Mechanisms, Direct Comparison and Mitigation Strategies. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2018, 165(7), 502-513 [cit. 2023-02-13]. ISSN 0013-4651. Dostupné z: doi:10.1149/2.0541807jes
- [17] GRIMES, Craig, Oomman VARGHESE a Sudhir RANJAN. *Light, Water, Hydrogen: The Solar Generation of Hydrogen by Water Photoelectrolysis*. První. 233 spring Street, New York, NY 10013, USA: Springer Science+Business Media, LCC, 2008. ISBN 978-0-387-33198-0.
- [18] CARMO, Marcelo, David FRITZ, Jürgen MERGEL a Detlef STOLTEN. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, 38(12), 4901-4934 [cit. 2022-11-26]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151
- [19] WORLD'S LARGEST HIGH-TEMPERATURE ELECTROLYZER ACHIEVES RECORD EFFICIENCY. In: *Sunfire* [online]. [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.sunfire.de/en/news/detail/worlds-largest-high-temperature-electrolyzer-achieves-record-efficiency>



- [20] ABOHAMZEH, Elham, Fatemeh SALEHI, Mohsen SHEIKHOLESLAMI, Rouzbeh ABBASSI a Faisal KHAN. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [online]. 2021, 72 [cit. 2023-04-25]. ISSN 09504230. Dostupné z: doi:10.1016/j.jlp.2021.104569
- [21] ANTELAVA, Ana. Thermoplastic Materials Compatibility for Hydrogen Service. In: *TWI* [online]. [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/research-programmes/core-research-programme/technical-literature-reviews/34250-2022-thermoplastic-materials-compatibility-for-hydrogen-service>
- [22] LI, Hanyu, Ranming NIU, Wei LI, Hongzhou LU, Julie CAIRNEY a Yi-Sheng CHEN. Hydrogen in pipeline steels: Recent advances in characterization and embrittlement mitigation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* [online]. 2022, 105 [cit. 2023-04-27]. ISSN 18755100. Dostupné z: doi:10.1016/j.jngse.2022.104709
- [23] WIJAYANTA, Agung, Takuya ODA, Chandra PURNOMO, Takao KASHIWAGI a Muhammad AZIZ. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, 44(29), 15026-15044 [cit. 2023-01-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.04.112
- [24] ZHENG, Jinyang, Xianxin LIU, Ping XU, Pengfei LIU, Yongzhi ZHAO a Jian YANG. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2012, 37(1), 1048-1057 [cit. 2023-01-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2011.02.125
- [25] BREEZE, Paul. Hydrogen Energy Storage. In: *Power System Energy Storage Technologies* [online]. Elsevier, 2018, s. 69-77 [cit. 2023-01-11]. ISBN 9780128129029. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812902-9.00008-0
- [26] GAO, Dan, Dongfang JIANG, Pei LIU, Zheng LI, Sangao HU a Hong XU. An integrated energy storage system based on hydrogen storage: Process configuration and case studies with wind power. *Energy* [online]. 2014, 66, 332-341 [cit. 2023-01-12]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2014.01.095
- [27] ZHAO, Pan, Wenpan XU, Aijie LIU, Wenze WU, Jiangfeng WANG a Xiaopo WANG. Assessment the hydrogen-electric coupled energy storage system based on hydrogen-fueled CAES and power-to-gas-to-power device considering multiple time-scale effect and actual operation constraints. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2022 [cit. 2023-01-12]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.12.097
- [28] ZHANG, Fan, Pengcheng ZHAO, Meng NIU a Jon MADDY. The survey of key technologies in hydrogen energy storage. *International Journal of*

- Hydrogen Energy* [online]. 2016, 41(33), 14535-14552 [cit. 2023-01-12]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.05.293
- [29] JANSEN, Gerard, Zahir DEHOUCHE a Harry CORRIGAN. Cost-effective sizing of a hybrid Regenerative Hydrogen Fuel Cell energy storage system for remote & off-grid telecom towers. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2021, 46(35), 18153-18166 [cit. 2023-05-09]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.02.205
- [30] BURRE, Jannik, Dominik BONGARTZ, Luisa BRÉE, Kosan ROH a Alexander MITSOS. Power-to-X: Between Electricity Storage, e-Production, and Demand Side Management. *Chemie Ingenieur Technik* [online]. 2020, 92(1-2), 74-84 [cit. 2022-12-04]. ISSN 0009-286X. Dostupné z: doi:10.1002/cite.201900102
- [31] WANG, Ganzhou, Alexander MITSOS a Wolfgang MARQUARDT. Conceptual design of ammonia-based energy storage system: System design and time-invariant performance. *AIChE Journal* [online]. 2017, 63(5), 1620-1637 [cit. 2023-02-08]. ISSN 00011541. Dostupné z: doi:10.1002/aic.15660
- [32] SKOV, Iva, Noémi SCHNEIDER, Gerald SCHWEIGER, Josef-Peter SCHÖGGL a Alfred POSCH. Power-to-X in Denmark: An Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats. *Energies* [online]. 2021, 14(4) [cit. 2022-11-26]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14040913
- [33] *Sector coupling: how can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise?*. 2018. Dostupné také z: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL\\_STU\(2018\)626091\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU(2018)626091_EN.pdf)
- [34] SIEMENS. *Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world*. 2021. Dostupné také z: [https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:98ea3da0-6e9a-4df3-ae86-2a167ce970ef/20211012-power-to-x-white-paper.pdf?ste\\_sid=cfcfb2a2e6a262b99c0686fee7cef794](https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:98ea3da0-6e9a-4df3-ae86-2a167ce970ef/20211012-power-to-x-white-paper.pdf?ste_sid=cfcfb2a2e6a262b99c0686fee7cef794)
- [35] DRÜNERT, Sebastian, Ulf NEULING, Tjerk ZITSCHER a Martin KALTSCHMITT. Power-to-Liquid fuels for aviation – Processes, resources and supply potential under German conditions. *Applied Energy* [online]. 2020, 277 [cit. 2022-12-03]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.115578
- [36] ATSONIOS, Konstantinos, Kyriakos PANOPOULOS a Emmanuel KAKARAS. Investigation of technical and economic aspects for methanol production through CO<sub>2</sub> hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2016, 41(4), 2202-2214 [cit. 2022-12-04]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2015.12.074
- [37] VAN-DAL, Éverton a Chakib BOUALLOU. Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Journal of Cleaner*

- Production* [online]. 2013, 57, 38-45 [cit. 2022-12-04]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2013.06.008
- [38] TOYIR, J., R. MILOUA, N.E. ELKADRI, M. NAWDALI, H. TOUFIK, F. MILOUA a M. SAITO. Sustainable process for the production of methanol from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> using Cu/ZnO-based multicomponent catalyst. *Physics Procedia* [online]. 2009, 2(3), 1075-1079 [cit. 2023-01-03]. ISSN 18753892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2009.11.065
- [39] M MODAK, Jayant. *Haber Process for Ammonia Synthesis* [online]. In: . [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/007/09/0069-0077>
- [40] *Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC): Velkoobjemové anorganické chemikálie – amoniak, kyseliny a průmyslová hnojiva* [online]. C/Inca Garliso s/n, E-41092 Sevilla – Španělsko, 2007 [cit. 27.2.2023]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/Bref\\_LVIC\\_kapalne.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2017/1/Bref_LVIC_kapalne.pdf)
- [41] SÁNCHEZ, Antonio a Mariano MARTÍN. Optimal renewable production of ammonia from water and air. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, 178, 325-342 [cit. 2023-01-03]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.279
- [42] GÖTZ, Manuel, Jonathan LEFEBVRE, Friedemann MÖRS, Amy MCDANIEL KOCH, Frank GRAF, Siegfried BAJOHR, Rainer REIMERT a Thomas KOLB. Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy* [online]. 2016, 85, 1371-1390 [cit. 2022-12-05]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2015.07.066
- [43] BAUER, C. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S.I. engine performance. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2001, 26(1), 55-70 [cit. 2022-12-05]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-3199(00)00067-7
- [44] *E-methanol — a possible solution for difficult to defossilize transportation* [online]. 1-11 [cit. 2022-12-03]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/pulse/e-methanol-possible-solution-difficult-defossilize-jaroslav-kme%C5%A5?trk=portfolio\\_\\_article-card\\_\\_title](https://www.linkedin.com/pulse/e-methanol-possible-solution-difficult-defossilize-jaroslav-kme%C5%A5?trk=portfolio__article-card__title)
- [45] *The Engineering ToolBox: methane density* [online]. 2018 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/methane-density-specific-weight-temperature-pressure-d\\_2020.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2020.html)
- [46] BIMBO, Nuno, Andrew PHYSICK, Antonio NOGUERA-DÍAZ, Adam PUGSLEY, Leighton HOLYFIELD, Valeska TING a Timothy MAYS. High volumetric and energy densities of methane stored in nanoporous materials at ambient temperatures and moderate pressures. *Chemical Engineering Journal*

- [online]. 2015, 272, 38-47 [cit. 2023-01-03]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2015.02.088
- [47] VALERA-MEDINA, A, H XIAO, M OWEN-JONES, W.I.F. DAVID a P.J. BOWEN. Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2018, 69, 63-102 [cit. 2023-01-03]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2018.07.001
- [48] LEAK: France wins recognition for nuclear in EU's green hydrogen rules. In: *EUROACTIV* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/leak-france-wins-recognition-for-nuclear-in-eus-green-hydrogen-rules/?fbclid=IwAR1NdjWHg2CY6wGMZDZ10wHJK7wr-1R-E0qGSMAtmKleEHWPoK10Vgkbt1w>
- [49] Ammonia Technology Roadmap. In: *IEA* [online]. Paris: IEA [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>
- [50] Ammonia. In: *Pub Chem* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Ammonia>
- [51] ČPAVEK. In: *ORLEN U: nipetrol* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.unipetrol.cz/cs/NabidkaProduktu/PetrochemickeProdukty/Agrochemikalie/Stranky/cpavek.aspx>
- [52] Operating envelope of Haber–Bosch process design for power-to-ammonia. In: *The Royal Society of Chemistry* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ra/c8ra06821f>
- [53] HANSSON, Julia, Selma BRYNOLF, Erik FRIDELL a Mariliis LEHTVEER. The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability* [online]. 2020, 12(8) [cit. 2023-02-08]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12083265
- [54] Hydrogen. In: *IRENA* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- [55] Who Produces the Most Ammonia in Europe?. In: *EuroCheddar* [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.eurocheddar.com/news-in-europe/who-produces-the-most-ammonia-in-europe/>
- [56] KUČERA, Jakub. *Vybrané oblasti českého anorganického průmyslu*. Pardubice, 2018. Dostupné také z: [https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71677/KuceraJ\\_Vybrane\\_oblasti\\_PH\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/71677/KuceraJ_Vybrane_oblasti_PH_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavla Honcová, Ph.D.

- [57] SINGH, Bhawna, Anders STRØMMAN a Edgar HERTWICH. Comparative life cycle environmental assessment of CCS technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control* [online]. 2011, 5(4), 911-921 [cit. 2023-02-28]. ISSN 17505836. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijggc.2011.03.012
- [58] JOGMEC and INPEX commence a demonstration project for the production of clean hydrogen and ammonia combined with CO<sub>2</sub> storage and utilization in Kashiwazaki-city, Niigata Prefecture, Japan. In: *JOGMEC: Japan Organization for Metals and Energy Security* [online]. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.jogmec.go.jp/english/news/release/content/300380879.pdf>
- [59] HOWARTH, Robert a Mark JACOBSON. How green is blue hydrogen?. *Energy Science & Engineering* [online]. 2021, 9(10), 1676-1687 [cit. 2023-03-14]. ISSN 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.956
- [60] SONGOLZADEH, Mohammad, Mansooreh SOLEIMANI, Maryam TAKHT RAVANCHI a Reza SONGOLZADEH. Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *The Scientific World Journal* [online]. 2014, 2014, 1-34 [cit. 2023-03-14]. ISSN 2356-6140. Dostupné z: doi:10.1155/2014/828131
- [61] *Vodíková strategie České republiky*. 2021. Dostupné také z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/VODIK-A4-BOOK-final.pdf>
- [62] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040: (MAF CZ 2022). In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/jaderna-energetika-a-nove-jaderne-zdroje/zapojeni-ceskeho-prumyslu/2023/3/87772\\_\\_ceps-maf-2022.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/jaderna-energetika-a-nove-jaderne-zdroje/zapojeni-ceskeho-prumyslu/2023/3/87772__ceps-maf-2022.pdf)
- [63] NEL. *Nel Hydrogen Electrolysers: The World's Most Efficient and Reliable Electrolysers*. 2021, 9 s. Dostupné také z: <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf>
- [64] SUN, Xinwei, Kaiqi XU, Christian FLEISCHER et al. Earth-Abundant Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Electrolyzers. *Catalysts* [online]. 2018, 8(12) [cit. 2023-03-28]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal8120657
- [65] FAQ Nel Hydrogen: What water quality do I need?. In: *Nel Hydrogen* [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://nelhydrogen.com/faq/>
- [66] BULFIN, B., L. BUTTSWORTH, A. LIDOR a A. STEINFELD. High-purity nitrogen production from air by pressure swing adsorption combined with SrFeO<sub>3</sub> redox chemical looping. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2021, 421 [cit. 2023-02-13]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2020.127734

- [67] How Is Nitrogen Produced for Industrial Applications ?. In: *Generon* [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.generon.com/how-is-nitrogen-produced-for-industrial-applications/>
- [68] CAPSTICK, S., B. BULFIN, J.M. NAIK, M. GIGANTINO a A. STEINFELD. Oxygen separation via chemical looping of the perovskite oxide  $\text{Sr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{FeO}_3$  in packed bed reactors for the production of nitrogen from air. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2023, 452 [cit. 2023-02-13]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2022.139289
- [69] Membrane Type Nitrogen Generation System Working Principle. In: *Mechanical Engineering Site* [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://mechanicalengineeringsite.com/membrane-type-nitrogen-generation-system-working-principle/>
- [70] BOZORG, M., B. ADDIS, V. PICCIALI, Álvaro RAMÍREZ-SANTOS, C. CASTEL, I. PINNAU a E. FAVRE. Polymeric membrane materials for nitrogen production from air: A process synthesis study. *Chemical Engineering Science* [online]. 2019, 207, 1196-1213 [cit. 2023-02-13]. ISSN 00092509. Dostupné z: doi:10.1016/j.ces.2019.07.029
- [71] Nitrogen Membrane Modules - Nitrogen Separation Membranes. In: *GENERON* [online]. [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.generon.com/product/nitrogen-membrane-separators-nitrogen-separation-membranes/>
- [72] SYAKDANI, Adi, Yohandri BOW, RUSDIANASARI a Muhammad TAUFİK. Analysis of Cooler Performance in Air Supply Feed for Nitrogen Production Process Using Pressure Swing Adsorption (PSA) Method. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, 1167 [cit. 2023-02-14]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1167/1/012055
- [73] Nitrogen Technology: What is PSA nitrogen?. In: *OXYMAT* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://oxymat.com/nitrogen-technology/>
- [74] Nitrogen: OXYMAT X-series frame-mounted solutions. In: *OXYMAT* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://oxymat.com/nitrogen/>
- [75] Prémiový generátor  $\text{N}_2$  NGP+ s technologií PSA. In: *Atlas Copco* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: [https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/gas-generators/ngp-160-360/NGP+160-360\\_EN.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/industrial-air/documents/leaflets/gas-generators/ngp-160-360/NGP+160-360_EN.pdf)
- [76] CORNELISSEN, R.L. a G.G. HIRS. Exergy analysis of cryogenic air separation. *Energy Conversion and Management* [online]. 1998, 39(16-18), 1821-1826 [cit. 2023-02-14]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(98)00062-4

- [77] Periodická soustava prvků dle IUPAC. In: *Osobní webové stránky Ladislava Nádherného na VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/psp.html>
- [78] Složení atmosférického vzduchu. In: *Tzb-info* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/74-slozeni-atmosferickeho-vzduchu>
- [79] Průmyslová reverzní osmóza. In: *AQUAL* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://aqual.cz/uprava-vody-pro-prumysl/prumyslova-reverzni-osmoza>
- [80] How much electricity is consumed by RO systems. In: *NetSlo Water* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.netsolwater.com/how-much-electricity-is-consumed-by-ro-systems.php?blog=250>
- [81] ALLEN, Jessica, Sebastien PANQUET a Adrian BASTIANI. Electrochemical Ammonia: Power to Ammonia Ratio and Balance of Plant Requirements for Two Different Electrolysis Approaches. *Frontiers in Chemical Engineering* [online]. 2021, 3 [cit. 2023-04-03]. ISSN 2673-2718. Dostupné z: doi:10.3389/fceng.2021.765457
- [82] Látkové množství. In: *Chemické výpočty* [online]. [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://chemicke-vypocty.cz/Latkove-mnozstvi.html>
- [83] NOŽIČKA, Jiří. *Termomechanika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01836-9.
- [84] CHLUMSKÝ, V. a A. LIŠKA. *Kompresory*. Druhé. Praha: SNTL, 1982.
- [85] *EIGA POSITION PAPER: Indirect CO2 emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants* [online]. In: . [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://puritygas.ca/wp-content/uploads/2021/12/EIGA-PP33.pdf>
- [86] APPL, Max. *Ammonia* [online]. Wiley, 1999 [cit. 2023-04-04]. ISBN 9783527295937. Dostupné z: doi:10.1002/9783527613885
- [87] Small Nuclear Power Reactors. In: *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [88] *NUSCALE Small Modular Reactor* [online]. 2022 [cit. 23.3.2023]. 1. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/fact-sheets/smr-fact-sheet.pdf>
- [89] Malé modulární reaktory: Jak je vidí SÚJB?. In: *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb>

- [90] SENS, Lucas, Ulf NEULING a Martin KALTSCHMITT. Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines – Development by 2050. *Renewable Energy* [online]. 2022, 185, 525-537 [cit. 2023-03-24]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2021.12.042
- [91] ČEZ chystá první modulární reaktor: levnou variantu energie z jádra [online]. [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://echo24.cz/a/S3ydy/cez-chysta-prvni-modularni-reaktor-levnou-variantu-energie-z-jadra>
- [92] Small Modular Reactors in a decarbonized world. In: *Nuclear Business* [online]. [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.nuclearbusiness-platform.com/wp-content/uploads/2019/10/S8.-Julian-Gadano.pdf>
- [93] Shades of green (hydrogen) – part 2: in pursuit of 2 EUR/kg. In: *Aurora Energy Research* [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: [https://auroraer.com/wp-content/uploads/2022/02/Aurora\\_Jan22\\_EU\\_hydrogen\\_ShadesOfGreen-part2\\_publicReport.pdf?fbclid=IwAR3sUbajNjdBLmyAUNWQQhodgldsIUYoTmZQxd6II56OU-R\\_hWSSCxfDezs](https://auroraer.com/wp-content/uploads/2022/02/Aurora_Jan22_EU_hydrogen_ShadesOfGreen-part2_publicReport.pdf?fbclid=IwAR3sUbajNjdBLmyAUNWQQhodgldsIUYoTmZQxd6II56OU-R_hWSSCxfDezs)
- [94] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM [online]. In: . [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)
- [95] Větrná mapa. In: *ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY AV ČR* [online]. [cit. 2023-04-30].
- [96] Obnovitelné zdroje energie - Cvičení 5: Návrh větrné elektrárny. 2022.
- [97] *Ústav fyziky atmosféry* [online]. [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>
- [98] Dongfang G2000-116 / FD116-2000 geared. In: *Wind-turbine-models.com* [online]. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/2229-dongfang-g2000-116-fd116-2000-geared>
- [99] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [100] JONSSON, ARVID a HAMPUS MÄSSGÅRD. *An Industrial Perspective on Ultrapure Water Production for Electrolysis: A techno-economic assessment of membrane distillation for electrolysis - synergies, performance, costs, and value propositions*. STOCKHOLM, SVERIGE, 2021, 50 s. Dostupné také z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1575929/FULLTEXT01.pdf>. Projekt. EXAMENSARBETE INOM TEKNIK.
- [101] VAN LEEUWEN, Charlotte a Andreas ZAUNER. *Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimisation: Report on the costs involved with PtG technologies and their potentials across the EU*. 2018. Dostupné také z:



<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ba3ba6a8&appld=PPGMS>

- [102] *AVIC INTERNATIONAL HANGZHOU COMPANY LTD: Informace poskytnuté výrobcem* [online]. [cit. 24.5.2023].
- [103] *Zákon č. 254/2001 Sb.: vodní zákon.* Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254#cast1>
- [104] *Elektřina: Obchodní data.* In: *PXE* [online]. [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://pxe.cz/cs/derivatovy-trh/elektrina>
- [105] *Ammonia Price Trend and Forecast.* In: *Procurment Resource* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.procurementresource.com/resource-center/ammonia-price-trends>
- [106] ZRALÝ, CSC., DOC. Ing. Martin. *Management a ekonomika podniku: sbírka úloh pro cvičení. 2., přeprac. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05460-4.
- [107] *Green Ammonia – An Alternative Fuel.* In: *FutureBridge* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/green-ammonia-an-alternative-fuel/>

## 13 Přílohy

Příloha 1 - Excel výpočty.xlsx

Příloha 2 - Matlab – Weibull.m