

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Jana Mistrová



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## PŘÍPRAVA LABORATORNÍ ÚLOHY SE ZAMĚŘENÍM NA VODÍKOVÉ ÚLOŽIŠTĚ ENERGIE

PREPARATION OF A LABORATORY EXERCISE FOCUSING ON HYDROGEN ENERGY STORAGE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jana Mistrová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

BRNO 2024

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

**Studentka:** Bc. Jana Mistrová

**ID:** 211663

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Příprava laboratorní úlohy se zaměřením na vodíkové úložiště energie**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Provedte rešerši možností ukládání energie. Zaměřte se na vodíkové úložiště energie. Navrhněte ideové schéma laboratorní úlohy s rozpisem potřebných přístrojů a vybavení. Provedte sestavení a ověření funkčnosti laboratorní úlohy. Vypracujte kompletní podklady k laboratorní úloze včetně hotového laboratorního protokolu.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5.2.2024

**Termín odevzdání:** 22.5.2024

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce popisuje přípravu laboratorní úlohy se zaměřením na vodíkové úložiště energie. Laboratorní úloha se zabývá výrobou vodíku, palivovými články, hodnocením jejich účinnosti a spotřebou vodíku. První část práce se věnuje způsobům ukládání energie se zaměřením na chemické úložiště energie a metody výroby vodíku. Další kapitola popisuje princip palivových článků. Následující část se věnuje návrhu laboratorní úlohy, vybavení a aktivaci palivového článku. Poslední část práce obsahuje materiály pro laboratorní úlohu a vypracovaný protokol.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

laboratorní úloha, vodík, palivový článek, energie, účinnost

## **ABSTRACT**

This diploma thesis describes the preparation of a laboratory experiment focused on hydrogen storage capacity. The experiment deals with hydrogen production, fuel cells, the evaluation its efficiency and hydrogen consumption within a fuel cell. The first part of the thesis is devoted to the energy storage systems, particularly chemical energy storage and hydrogen production. The next part explores fuel cell technologies. Following this, the thesis describes the experiment's preparation, equipment, and fuel cell activation. The final part focuses on the laboratory materials and the report.

## **KEYWORDS**

laboratory experiment, hydrogen, fuel cell, energy, efficiency

MISTROVÁ, Jana. *Příprava laboratorní úlohy se zaměřením na vodíkové úložiště energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2023, 64 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Bc. Jana Mistrová
<b>VUT ID autora:</b>	211663
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2022/2023
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Příprava laboratorní úlohy se zaměřením na vodíkové úložiště energie

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autorky\*

---

\* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Bačovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Možnosti ukládání energie</b>	<b>12</b>
1.1 Mechanické systémy akumulace . . . . .	12
1.2 Elektrochemické systémy akumulace . . . . .	13
1.3 Elektrické systémy akumulace . . . . .	15
1.4 Systémy využívající ukládání tepelné energie . . . . .	15
<b>2 Chemická akumulace energie využívající vodík</b>	<b>16</b>
2.1 Vodík jako prvek . . . . .	16
2.2 Výroba vodíku . . . . .	16
2.3 Skladování vodíku . . . . .	19
<b>3 Palivové články</b>	<b>22</b>
3.1 Alkalické palivové články . . . . .	23
3.2 Metanolové palivové články . . . . .	23
3.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou . . . . .	23
3.4 Palivové články s tavenými uhlíčitany . . . . .	23
3.5 Palivové články s tuhými oxidy . . . . .	24
3.6 Palivové články s polymerní membránou . . . . .	24
3.6.1 Komponenty . . . . .	25
3.6.2 Voltampérová charakteristika . . . . .	27
3.6.3 Účinnost . . . . .	28
<b>4 Návrh pracoviště</b>	<b>31</b>
4.1 Výroba vodíku . . . . .	31
4.2 Měřicí zařízení . . . . .	33
4.3 Palivový článek . . . . .	34
<b>5 Návrh součástky pro vhození zinku do baňky</b>	<b>35</b>
<b>6 Aktivace palivového článku</b>	<b>41</b>
<b>7 Laboratorní úloha</b>	<b>44</b>
7.1 Měření charakteristik palivového článku PEM a výpočet jeho účinnosti . . . . .	44
7.1.1 Cíle úlohy . . . . .	44
7.1.2 Zadání . . . . .	44
7.1.3 Použité měřicí přístroje, komponenty a chemikálie . . . . .	44



7.1.4	Teoretický úvod . . . . .	44
7.1.5	Postup měření . . . . .	49
<b>8</b>	<b>Vypracovaný protokol</b>	<b>52</b>
8.1	Cíle úlohy . . . . .	53
8.2	Zadání . . . . .	53
8.3	Teoretický rozbor . . . . .	54
8.4	Naměřená data a výpočty . . . . .	57
8.5	Závěr . . . . .	58
8.6	Literatura . . . . .	59
	<b>Závěr</b>	<b>60</b>
	<b>Literatura</b>	<b>62</b>

# Seznam obrázků

1.1	Možnosti ukládání energie, převzato z: [2]	12
2.1	Procentuální zastoupení jednotlivých metod výroby vodíku, převzato z: [6]	17
3.1	Palivový článek, převzato z: [17]	24
3.2	Struktura palivového článku PEM, převzato z: [12]	26
3.3	Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [15]	27
4.1	Blokové schéma pracoviště	31
4.2	Zapojení pracoviště	32
4.3	Dřevěný podstavec	33
4.4	Palivový článek PEM	34
5.1	Model mechanismu	35
5.2	Model a výkres válcové části součástky	36
5.3	Model kloubového závěsu	37
5.4	Výkres kloubového závěsu	37
5.5	Model dvířek	37
5.6	Výkres dvířek	38
5.7	Gumová zátka se součástkou	38
5.8	Držák na magnet	39
5.9	Model a výkres držáku na magnet	39
5.10	Baňka s otevíracím mechanismem, v uzavřeném stavu (vlevo), v otevřeném stavu (vpravo)	40
6.1	Pracoviště při aktivaci palivového článku	41
6.2	VA a výkonová charakteristika palivového článku po první (modře) a opětovné (červeně) aktivaci, vodík je vyrobený elektrolýzou vody	42
6.3	VA a výkonová charakteristika palivového článku, vodík je vyrobený chemickou reakcí Zn a HCl, křivky označeny modře značí VA a výkonovou charakteristiku po aktivaci článku, červeně jsou označeny křivky po dvoudenní nečinnosti	43
7.1	Palivový článek, převzato z: [17]	46
7.2	Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [15]	47
7.3	Nastavení trojcestného kohoutu	50
8.1	Palivový článek, převzato z: [2]	55
8.2	Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [3]	56
8.3	Naměřená VA a výkonová charakteristika	57

# Úvod

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením laboratorní úlohy pro studenty bakalářských programů, která je zaměřena na vodíkové úložiště energie. Cílem laboratorní úlohy je seznámit studenty s technologií palivových článků a procesem výroby vodíku. Prvním krokem úlohy je výroba vodíku pomocí reakce kyseliny chlorovodíkové se zinkem, následovaná jeho využitím v palivovém článku. Cílem laboratorní úlohy je vypočítat množství vyrobeného vodíku, množství spotřebovaného vodíku v palivovém článku a zjistit účinnost pro optimální výkon.

První kapitola se zabývá různými metodami ukládání energie, včetně mechanických, elektrochemických, elektrických a systémů ukládajících energii ve formě tepla.

Druhá kapitola detailněji představuje chemickou akumulaci energie a metody výroby vodíku, jako je elektrolýza vody nebo parní reforming. Dále popisuje různé způsoby skladování vodíku.

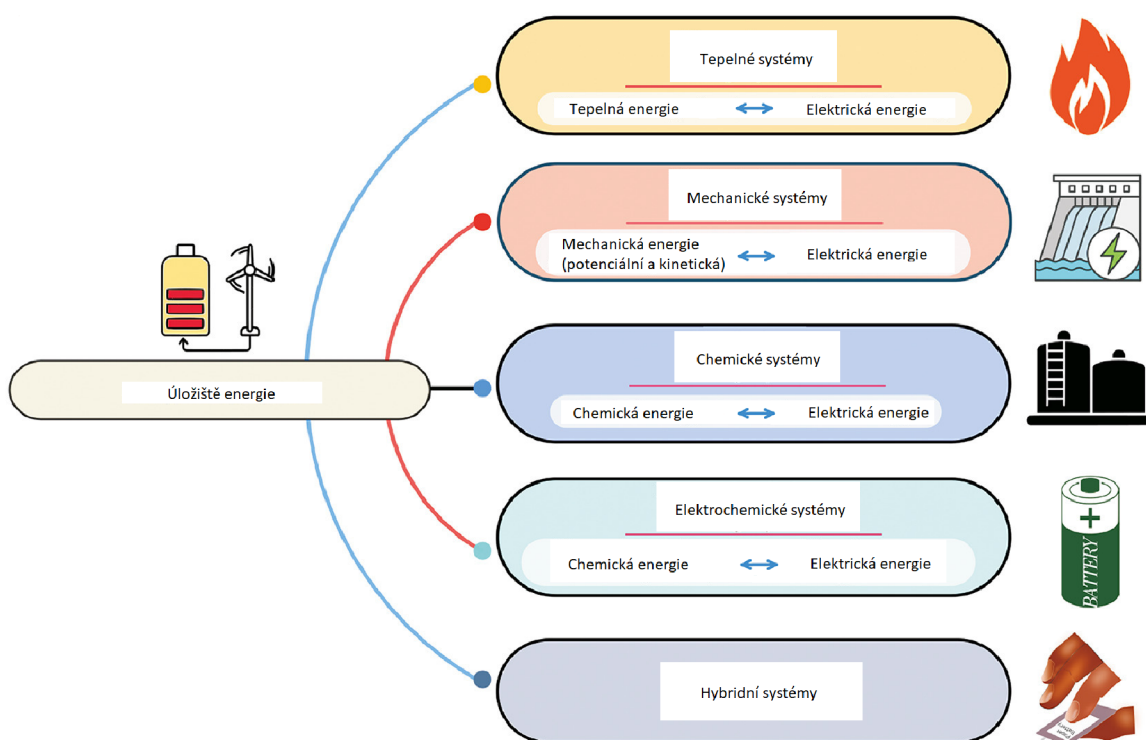
Třetí kapitola se věnuje palivovým článkům, představuje jejich typy, rozdělení, výhody, nevýhody a aplikace. Dále se tato kapitola zabývá podrobnějším popisem palivového článku s polymerní membránou, jeho voltampérovou charakteristikou a účinností článku.

Následující kapitola se zabývá návrhem pracoviště pro sestavení a zapojení úlohy, včetně aktivace palivového článku.

Poslední kapitola se věnuje samotné laboratorní úloze, včetně teoretického rozboru, postupu a vypracování protokolu.

# 1 Možnosti ukládání energie

Ukládání energie je důležitou součástí energetiky, které umožňuje vyrovnávat nerovnováhu mezi nabídkou a poptávkou elektřiny. Umožňuje uložení vyrobené energie v čase přebytku a její opětovné použití v síti v čase energetických špiček. Skladování probíhá přeměnou elektrické energie do jiné formy, kterou je možné po určitou dobu skladovat a následně opět přeměnit na energii elektrickou s přijatelnými ztrátami. Existují různé systémy pro ukládání energie, z nichž každá má své výhody a omezení. Jedná se o mechanické, chemické, elektrochemické, elektrické, systémy využívající ukládání tepelné energie nebo hybridní systémy, které jsou jejich kombinací. Přehled je uveden na obrázku (1.1) [2].



Obr. 1.1: Možnosti ukládání energie, převzato z: [2]

## 1.1 Mechanické systémy akumulace

Mechanické systémy akumulace energie využívají přeměnu elektrické energie na energii potenciální nebo kinetickou [1].

## **Přečerpávací vodní elektrárny**

Přečerpávací vodní elektrárny využívají výškový rozdíl mezi dvěma vodními nádržemi. Součástí je reverzní turbína, která se chová při přečerpávání jako čerpadlo a při generování jako turbína. V době, kdy je dostatek elektřiny, se voda čerpá ze spodní nádrže do horní nádrže pomocí čerpacích turbín. Tímto způsobem se voda ukládá v horní nádrži. Pokud je potřeba dodat elektřinu do sítě, voda je vypuštěna přes turbínu zpět z horní nádrže do spodní, tím se přeměňuje potenciální a kinetická energie vody na elektrickou jako u klasické vodní elektrárny. Turbíny rotují a tím pohání generátory elektřiny, které následně dodávají elektrickou energii do distribuční sítě. Cyklus se opakuje podle potřeby elektřiny. Přečerpávací vodní elektrárny jsou schopny poskytovat rychlou a účinnou reakci na změny v poptávce elektřiny a mohou přispět k vyrovnaní energetického systému [1].

## **Setrvačníky**

Jinou formou mechanické akumulace jsou setrvačníky, které akumulují energii ve formě kinetické energie. Používají se dva typy setrvačnickových akumulátorů. První z nich využívá setrvačníky velké hmotnosti, které jsou uspořádané tak, aby bylo dosaženo co největšího momentu setrvačnosti. Pracují při nižších otáčkách přibližně 8000 otáček/min. Druhý typ naopak používá lehčí setrvačníky, které pracují při vysokých otáčkách až 100 000 otáček/min. Při takto vysokých otáčkách je běžné použití vakua a magnetických ložisek ke snížení ztrát způsobených třením. Jejich výhodou je vysoká účinnost až 90 % a velmi rychlá odezva. Dokážou tedy dodávat velmi velký výkon, ale po krátkou dobu [1].

## **Akumulace energie se stlačeným vzduchem**

Jedná se o proces, kdy je stlačený vzduch akumulován v zásobnících. Při akumulaci energie kompresor poháněný elektromotorem stlačuje vzduch na tlak přibližně 6 MPa. Při generování energie se vzduch uvolňuje a používá se k pohonu turbín, které generují elektrickou energii. Při stlačování je nezbytné odebírat teplo ze vzduchu, aby nedošlo k přehřátí stěn nádrže. Následně při vypuštění ze zásobníku se vzduch musí ohřát před opětovným použitím [1].

## **1.2 Elektrochemické systémy akumulace**

Elektrochemické systémy akumulují energii ve formě chemické energie. Dodávaná elektrická energie se tedy mění na chemickou energii a při vybíjení naopak. Proud

procházející akumulátorem způsobí vratné chemické změny, které se projeví rozdílným potenciálem na elektrodách. Tyto procesy probíhají mezi dvěma elektrodami, které jsou uloženy v elektrolytu. Během nabíjení jsou produkty reakce zpětně převedeny na původní reaktanty průchodem elektrického proudu. Záporná elektroda je během vybíjení anodou, protože dochází k oxidaci a při nabíjení je katodou. Naopak kladná elektroda je během vybíjení katodou, a dochází zde k redukci, při nabíjení je anodou. Mezi nejpoužívanější sekundární články patří olovené, nikl-metal hydridové (Ni-MH) a lithium-iontové akumulátory (Li-ion) [2].

### **Olovené akumulátory**

Olovněné akumulátory jsou nejstarší dodnes používané akumulátory. Jejich výhodou je nízká cena, vyšší výkon a nízký vnitřní odpor. Jako materiály elektrod se používá olovo a oxid olovičitý. Jako elektrolyt se používá kyselina sírová. Jejich energetická hustota je kolem 40 Wh/kg. Každý článek nezatíženého akumulátoru poskytuje napětí 2,1 V [2].

### **Ni-MH akumulátory**

Ni-MH jsou akumulátory, které z části nahradily nikl-kadmiové (Ni-Cd) akumulátory, jejichž používání bylo na území České republiky omezeno pouze pro průmyslové aplikace. Ni-MH akumulátory mají energetickou hustotou okolo 120 Wh/kg, která je dvojnásobná oproti Ni-Cd akumulátorům. Napětí je 1,2 V, které může představovat určité omezení, stejně tak výrazně větší samovybíjení v porovnání s Li-ion akumulátory [2].

### **Li-ion akumulátory**

Existuje několik typů lithium-iontových akumulátorů, které se liší použitím anodových a katodových materiálů. Akumulátory fungují na principu interkalace, kdy jsou ionty lithia implementovány do struktury jiných materiálů. Jako elektrolyt se používá lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Mezi používané anodové materiály patří uhlíkové materiály, lithium titan oxid, křemíkové materiály a kovové lithium. Nejčastěji používané katodové materiály jsou oxidy kovů [2]:

- Lithium kobalt oxid (LCO)
- Lithium mangan oxid (LMO)
- Lithium železofosfát (LFP)
- Lithium nikl oxid (LNO)
- Lithium nikl mangan kobalt oxid (NMC)
- Lithium nikl kobalt hliník oxid (NCA)

Výhodou těchto akumulátorů je vysoká energetická hustota, jejich relativně vysoká kapacita, vysoké napětí 3,6 V, nízká hmotnost, dlouhá životnost, nízké samo-vybíjení, nezávadnost pro životní prostředí a fakt, že u nich neexistuje paměťový efekt. Mezi nevýhody patří jejich stále relativně vysoká cena, dále jejich náchylnost ke snížení stability a strukturální změny při stavech blízkých úplnému vybití nebo přebití, a dále provozní problémy související s nárůstem teploty [2].

### 1.3 Elektrické systémy akumulace

Elektrický systém akumulace znamená ukládání energie bez její konverze na jinou. Zatím neexistuje způsob pro dlouhodobé skladování s minimálními ztrátami, ale přesto se některé systémy využívají. Mezi elektrické systémy akumulace energie patří superkondenzátory a supravodivý magnetický akumulací systém [2].

Superkondenzátory v sobě ukládají energii ve formě elektrického náboje na elektrodách pomocí elektrostatických sil. Jejich výhodou je rychlá doba nabíjení a jejich životnost. Mohou být použity pro rychlé dodávání vysokého výkonu energie po krátkou dobu [2].

Supravodivý magnetický akumulací systém ukládá elektrickou energii do supravodivých cívek pod supravodivými teplotami. Podmínkou je fungující kryogenní systém. Tento systém akumulace poskytuje rychlou odezvu s dodáním vysokého výstupního výkonu [2].

### 1.4 Systémy využívající ukládání tepelné energie

Tepelné systémy umožňují ukládání energie ve formě tepelné energie do určitých materiálů podle jejich tepelné kapacity, která charakterizuje jejich schopnost akumulace tepla. Základem principu akumulace tepelné energie je zvýšení teploty (citelného tepla) nebo změna fáze materiálu (latentního tepla). Při procesu ohřívání látky z pevného stavu dochází ke zvýšení citelného tepla pevné látky a následně změna fáze z pevného na kapalný stav, zvýšení citelného tepla kapaliny a změna fáze z kapalného na plynný stav. Při ochlazování se tento proces odehrává obráceně a energie je uvolňována do okolí [2].

Při akumulaci tepelné energie pomocí materiálů s proměnnou fází se využívá především teplo latentní, tedy teplo dodané při změně fáze, aniž by se změnila teplota. Tímto způsobem jsou materiály schopny uchovávat a uvolňovat energii. Při akumulaci latentního tepla se využívá změny látky během fázového přechodu, což zahrnuje uvolňování nebo absorpci latentního tepla [2].

## 2 Chemická akumulace energie využívající vodík

Vodík se stává klíčovým palivem v globálním energetickém průmyslu, kdy společnosti a země hledají inovativní způsoby, jak snížit závislost na fosilních palivech. Z energetického hlediska se jedná o nejčistší a nejlehčí palivo, které má obrovský potenciál pro mnoho využití v energetice [3].

Využití vodíku jako paliva pro vodíkové palivové články a jiné aplikace otevírá cestu k čistější a udržitelnější energetické budoucnosti, tyto technologie ale přináší i několik nevýhod. K nedostatkům tohoto paliva patří například jeho vysoká výrobní cena a vysoká spotřeba energie. Přestože se jedná o problematiku, která je objektivně stále spíše na začátku vývoje, mluví se už v současné době o vodíku jako o jednom z alternativních paliv, které by měly v budoucnu nahradit fosilní zdroje především v energetice, průmyslu a dopravě [3].

### 2.1 Vodík jako prvek

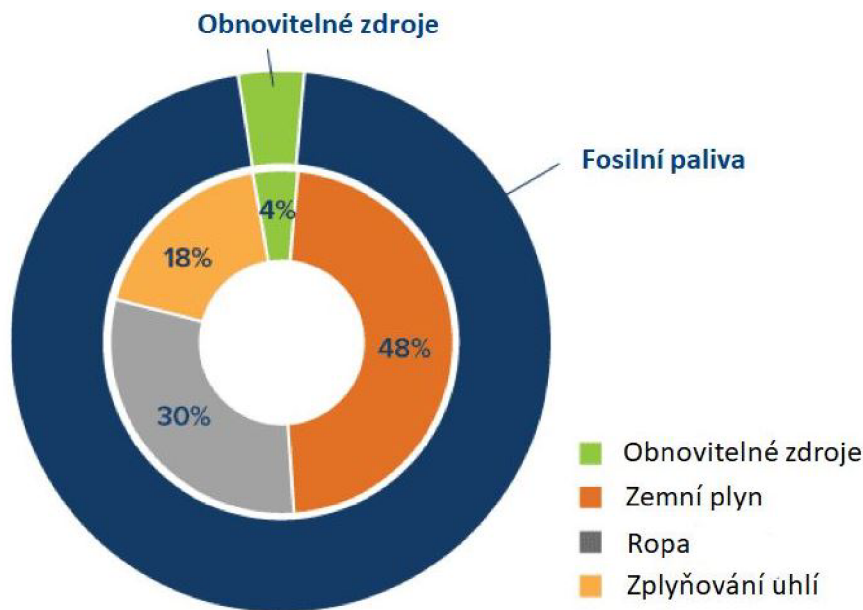
Vodík je nejjednodušší a nejlehčí chemický prvek. Je to plyn, lehčí než vzduch, bez barvy a bez zápachu. Vodík je ve směsi se vzduchem vysoce výbušný. Jeho atom má v jádře pouze jeden proton (v nejběžnější formě nazývané protium), a jeden elektron v obalu. Vodík má nejmenší molekuly ze všech ostatních plynů. Je hojně přítomen ve vesmíru a na zemi je součástí mnoha sloučenin, včetně vody a organických sloučenin jako jsou například uhlovodíky. Jednoatomový vodík je vysoce reaktivní a spojuje se do molekul, které obsahují dva atomy. Vodík má tři přírodní izotopy [4]:

1. Protium - nejběžnější izotop vodíku s nejčastějším výskytem v přírodě, jeho jádro se skládá pouze z protonu
2. Deuterium - jádro se skládá z jednoho protonu a jednoho neutronu
3. Tritium - jádro se skládá z jednoho protonu a dvou neutronů

### 2.2 Výroba vodíku

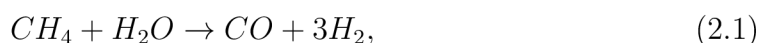
Vodík lze vyrábět několika způsoby, které se liší svými technologiemi, využitím a dopady na životní prostředí. Tyto metody zahrnují procesy jako je například elektrolýza vody, reforming zemního plynu nebo biologická výroba. V současné době se až 96 % vodíku vyrábí z fosilních paliv. Každá z těchto metod má své výhody a nevýhody, a rozhodující faktory pro volbu metody mohou zahrnovat ekonomickou efektivitu i environmentální dopady. V grafu (2.1) lze porovnat procentuální zastoupení jednotlivých metod výroby vodíku [3, 5].





Obr. 2.1: Procentuální zastoupení jednotlivých metod výroby vodíku, převzato z: [6]

Parní reforming zemního plynu lze rozdělit na dvě fáze. První fází je průběh reformní reakce, která probíhá za vysoké teploty okolo 750-800 °C a tlaku 3-5 MPa. Metan reaguje s vodní párou za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého. Následuje druhá fáze, ve které se množství vyprodukovaného vodíku zvětšuje prostřednictvím konverze oxidu uhelnatého s další přidanou párou. Produkty této reakce jsou vodík a oxid uhličitý [5],



Účinnost procesu se pohybuje okolo 75 %. Jedná se o neekonomičtější způsob výroby, nicméně během procesu vzniká významné množství oxidu uhličitého. Na každý kilogram vyrobeného vodíku se vytvoří 9-12 kilogramů oxidu uhličitého, což činí vodík získaný touto metodou šedým a nepovažuje se za ekologicky šetrný postup výroby. Stejným způsobem se vyrábí i takzvaný modrý vodík, ale uvolňovaný oxid uhličitý je v průběhu výroby zachytáván a je uložen obvykle pod zemí, aby se zabránilo jeho uvolnění do atmosféry. Hnědý vodík se vyrábí zplyňováním hnědého uhlí, zatímco černý vodík se získává zplyňováním černého uhlí. Tyrkysový vodík vzniká pyrolýzou metanu, který se v reaktoru štěpí na vodík a pevný uhlík jako vedlejší produkty. Přehled jednotlivých metod je uveden v tabulce (2.1) [5].

Zmíněnými postupy dochází k emisi CO<sub>2</sub>, proto se hledají jiné, ekologičtější postupy, jak vodík vyrobit. Takovým příkladem je zelený vodík, který se vyrábí elektro-

lýzou vody s využitím obnovitelných zdrojů energie. Jedná se o ekologickou metodu výroby, kdy průchodem elektrického proudu roztokem dochází k rozštěpení vazeb vody, a vzniká vodík a kyslík [5]:



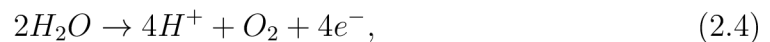
Rozlišují se tři typy elektrolýzy vody, které se liší druhem elektrolytu a teplotou, při které proces probíhá [7]:

- Alkalická elektrolýza vody
- Vysokoteplotní elektrolýza vody
- PEM elektrolýza vody (proton exchange membrane - protonově vodivá membrána)

Výhodou elektrolýzy vody je vysoká čistota vodíku a jako vedlejší produkt je vyráběn pouze kyslík, který lze následně využít. Nevýhodou je vysoká cena elektrické energie. Celková účinnost elektrolýzy se pohybuje v rozmezí 60-80 %. Elektrolýza pro výrobu vodíku může být prováděna s použitím elektřiny z elektrické sítě, z jaderných zdrojů nebo z obnovitelných zdrojů, jako je solární energie. Dalšími ekologickými postupy výroby vodíku jsou termolýza nebo fotolýza [7].

### **PEM elektrolýza vody**

PEM elektrolýza vody používá jako elektrolyt polymerní membránu, která je propustná pouze pro kladně nabitě ionty. Na anodě dochází k oxidačním jevům, vznikají vodíkové kationty, kyslík a elektrony. Vzniklé vodíkové kationty procházejí skrz membránu ke katodě, kde se redukují na vodík [7]:



Použití iridia a platiny jako katalyzátorů a perfluorované membrány se odvíjí na ceně a dostupnosti elektrolýzérů. PEM elektrolýzéry zatím nedosahují dostatečně vysoké účinnosti a konkurenceschopné ceny, aby mohly nahradit výrobu vodíku pomocí parního reformingu [7].

### **Alkalická elektrolýza vody**

Při alkalické elektrolýze vody se používá jako elektrolyt roztok hydroxidu sodného nebo hydroxidu draselného. Na katodě dochází redukci vody na vodík a hydroxidové ionty, které procházejí k anodě, kde oxidují za vzniku molekuly kyslíku a vody [7].

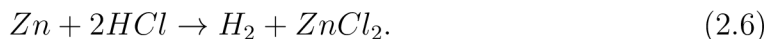
## Vysokoteplotní elektrolýza vody

Vysokoteplotní elektrolýza vody probíhá při pracovních teplotách okolo 800 °C. Část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Je používán pevný elektrolyt na bázi keramiky, který je schopný dlouhodobě snášet pracovní podmínky při vysokých teplotách [7].

Vodík	Zdroje	Výroba	Produkty
Zelený	obnovitelné zdroje energie	elektrolýza vody	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Růžový	jaderná energie	elektrolýza vody	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Vínový	jaderná energie	elektrochemická elektrolýza	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Žlutý	solární energie	elektrolýza	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Červený	jaderná energie	termolýza vody	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
Zlatý	rozklad ropy mikroby	enzymatické procesy	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> zachytáván
Tyrkysový	metan	pyrolýza	H <sub>2</sub> + C
Modrý	zemní plyn	parní reforming	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> zachytáván
Šedý	zemní plyn	parní reforming	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>
Černý	černé uhlí	zplyňování	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>
Hnědý	hnědé uhlí	zplyňování	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>

Tab. 2.1: Přehled metod používaných k výrobě vodíku a jeho barevné označení [3]

V laboratorních podmínkách je možné vyrobit vodík pomocí chemické reakce kyseliny s kovem, a právě tento postup se používá pro laboratorní úlohu. Vodík je vyroben reakcí (2.6), kdy reagují granule zinku s kyselinou chlorovodíkovou. Jako produkty chemické reakce vznikají plynný vodík a chlorid zinečnatý v kapalně formě. Pro reakci se používají granule zinku, aby bylo dosaženo pomalejší odezvy a reakce tak mohla být kontrolována. V případě práškového zinku by došlo k rychlejšímu nástupu reakce [9],



## 2.3 Skladování vodíku

Vodík lze skladovat jako plyn nebo jako kapalinu. Možnosti skladování vodíku souvisí s jeho nízkou hustotou, která je 0,0899 kg/m<sup>3</sup>. Z toho vyplývá, že 1 kg zaujímá za normálních podmínek objem 11 m<sup>3</sup>. Snížení jeho objemu lze dosáhnout několika

způsoby, jako je zvýšení tlaku vodíku, dosažení teploty pod jeho kritickou teplotu nebo interakce s jinými materiály [8].

### **Skladování vodíku v plynném skupenství**

Nejrozšířenějším způsobem skladování vodíku je ve formě stlačeného plynu. Vodík je stlačen pod vysokým tlakem v závislosti na použitém materiálu nádoby. Tato technologie umožňuje vysokou rychlost plnění a uvolňování vodíku, a zároveň při uvolňování vodíku není spotřebována žádná energie [8].

Vodík je skladován ve válcových nádobách, u kterých je vyžadován lehký materiál, který je odolný vůči vysokému tlaku a je finančně dostupný. Materiál zároveň musí odolat difúzi vodíku a mít vysokou pevnost [8].

Nejlevnější variantou jsou nádoby vyrobené z kovových materiálů, jako je ocel nebo slitiny hliníku. Tento materiál je schopný odolat tlaku až 30 barů. Kvůli vysokému tlaku musí být stěna nádoby relativně silná, a to podstatně zvyšuje hmotnost nádoby [8].

Další variantou je nádoba s kovovou stěnou, která je obalena pryskyřičným kompozitem. Ve srovnání s nádobami pouze z kovových materiálů mají přibližně o 30-40 % nižší hmotnost, ale na úkor nákladů, které jsou o polovinu vyšší [8].

Jinou možností jsou nádoby vyrobené z kompozitních materiálů, které jsou potaženy kovem, jako je hliník. Jejich výhodou je pevnost a lehkost. Tento typ nádob lze použít až do tlaku vodíku 700 barů [8].

### **Skladování vodíku v kapalném skupenství**

V kapalně formě má vodík mnohem vyšší hustotu, která dosahuje přibližně  $71 \text{ kg/m}^3$  při teplotě  $-253 \text{ °C}$ . Kritická teplota vodíku je  $-240 \text{ °C}$  (nad touto teplotou vodík nelze zkapalnit), proto je nutné pro zkapalnění vodík zchladit pod jeho kritickou teplotu. Vodík je zkapalněn při  $-253 \text{ °C}$ , což je normální teplota varu vodíku, pro skladování v kapalně formě. Vzhledem k tomu, že hustota kapalného vodíku je téměř 1,5-2krát větší než hustota stlačeného vodíku při vysokém tlaku, lze použít menší nádrže. Zároveň skladování při nízkém tlaku umožňuje použití tenkých a levných skladovacích nádrží, které jsou většinou z nerezové oceli a slitin hliníku s dostatečnou izolací. Příkladem je dvoustěnná nádrž, kdy je udržováno mezi stěnami vakuum [8].

Na druhou stranu, náklady na zkapalnění vodíku jsou příliš vysoké, stejně jako energie spotřebovaná při tomto procesu. Přibližně 30-40 % energie uložené v palivu se spotřebuje v procesu zkapalnění. Dalším problémem je 1,5-3% odpaření vodíku za den, které je způsobeno přenosem tepla z okolí, kdy se začne kapalný vodík postupně vypařovat. Minimalizaci vypařování lze dosáhnout použitím izolace nádrže nebo s pomocí kryochladičů. Alternativou je použití kapalného dusíku, který dokáže

ochlazovat nádrž a výrazně snížit přenos tepla. Jelikož odpařování vodíku zvyšuje tlak v nádobě a hrozí tak možnost její destrukce, je nezbytné, aby nádrž disponovala regulací tlaku a vypouštěla plyný vodík do okolí [8].

### **Skladování vodíku kryo-kompresí**

Skladování vodíku kryo-kompresí kombinuje jak stlačení vodíku, tak kapalného vodíku. Vodík je tedy skladován při kryogenních teplotách a pod minimálním tlakem vodíku přibližně 250-350 barů. Ve srovnání se zkapalněným vodíkem, kryo-stlačený vodík dosahuje vyšší hustoty přibližně  $80 \text{ kg/m}^3$  a má výrazně nižší ztráty způsobené vypařováním [8].

### **Metalhydridové materiály**

Vodík lze ukládat do metalhydridových materiálů tím, že se zabudovává do jejich struktury interkalací. Vodík chemicky reaguje s kovy a kovovými slitinami za vzniku hydridů kovů. Hydrid vzniká, když je molekula vodíku na povrchu štěpena na atomární vodík a poté difunduje do hmoty a dochází k chemisorpci ve struktuře kovu nebo slitiny. Tímto procesem může dojít k rozšíření mřížky o 20-30 % původního objemu. Když se vytvoří hydrid, uvolňuje se tepelná energie (chemisorpce), zatímco při zpětné reakci (desorpce) k uvolnění vodíku, musí být stejné množství energie poskytnuto z vnějšího zdroje [8].

Tato metoda skladování nabízí výhodu vyšší objemové hustoty vodíku při nižších tlacích, avšak její nevýhody zahrnují hmotnost slitin, komplikace při uvolňování vodíku a vysoké náklady [8].

### 3 Palivové články

Palivové články jsou zařízení, které přeměňují chemickou energii na elektrickou pomocí elektrochemických reakcí. V palivovém článku probíhají reakce, ve kterých palivo a oxidační činidlo vhodné pro daný typ palivového článku reagují za vzniku elektřiny, vody a tepla. Existuje několik typů palivových článků, které se rozdělují podle provozní teploty nebo druhu elektrolytu. Jejich porovnání je uvedeno v tabulce (3.1) [10].

Rozdělení palivových článků podle druhu elektrolytu [11]:

- PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) - Palivové články s polymerní membránou
- AFC (Alkaline Fuel Cell) - Alkalické palivové články
- DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) - Přímé metanolové palivové články
- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) - Kyselé palivové články
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) - Palivové články s tavenými uhličitany
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) - Palivové články s tuhými oxidy

Rozdělení palivových článků podle provozní teploty [11]:

- nízkoteplotní (60-130 °C) - PEMFC, AFC, DMFC
- středněteplotní (160-220 °C) - PAFC
- vysokoteplotní (600-1050 °C) - MCFC, SOFC

Palivový článek	Elektrolyt	Teplota [°C]	Účinnost [%]	Aplikace
AFC	hydroxid draselný, hydroxid sodný	60-80	60-70	kosmické, vojenské, záložní zdroje, doprava
PEMFC	polymerní membrána	80	40-60	doprava, přenosné zdroje
DMFC	polymerní membrána	50-120	30-40	přenosná zařízení
PAFC	kyselina fosforečná	150-200	40-50	dopravní prostředky (autobusy)
MCFC	taveniny alkalických uhličitánů	650	50-60	vojenské, výroba energie
SOFC	oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidy yttria	1000	60-65	výroba energie

Tab. 3.1: Porovnání palivových článků

### 3.1 Alkalické palivové články

Alkalické palivové články se řadí mezi nízkoteplotní palivové články. Jejich pracovní teplota se pohybuje mezi 60-80 °C. Ke své funkci používají elektrolyt tvořený alkalickými kovy, například hydroxid draselný nebo hydroxid sodný. Používaným plynem na anodě je vodík. Jako oxidant se nejčastěji používá čistý kyslík nebo vzduch, který nesmí být kontaminován CO<sub>2</sub>, aby nedocházelo k reakci s elektrolytem, což by vedlo k jeho znehodnocení. Jedná se o nejúčinnější palivové články s účinností dosahující až 70 % [10].

Jednou z výhod těchto palivových článků je možnost využití levnějších katalyzátorů oproti platině, nízká provozní teplota, rychlé startovací časy a vysoká účinnost. Nevýhodou je jejich náchylnost ke kontaminaci elektrolytu oxidem uhličitým, a použití tekutého elektrolytu, který může být komplikací při manipulaci se článkem. Využití těchto palivových článků je nejen kosmonautice a dopravě, ale také jako záložní zdroje energie nebo pro vojenské účely [10].

### 3.2 Metanolové palivové články

Tento typ palivových článků používá jako palivo metanol a jako elektrolyt polymerní membránu. Jedná se o nízkoteplotní palivové články s provozní teplotou v rozmezí mezi 50-120 °C. Účinnost je relativně nízká mezi 30-40 %. Jejich využití je například pro přenosná zařízení [10].

### 3.3 Palivové články s kyselinou fosforečnou

Palivové články s kyselinou fosforečnou používají jako elektrolyt právě kyselinu fosforečnou, což umožňuje operační teplotu až do 200 °C. Jako palivo se využívá vodík a jako oxidant kyslík nebo vzduch. Jejich výhodou je tolerance ke kontaminaci CO<sub>2</sub>. Jejich využití je pro dopravní prostředky, jako jsou například autobusy [10].

### 3.4 Palivové články s tavenými uhličitany

Palivové články s tavenými uhličitany používají jako elektrolyt taveninu směsi alkalických (lithium, sodík, draslík) uhličitánů, což umožňuje operační teplotu kolem 650 °C, a tím se řadí mezi vysokoteplotní palivové články. Díky vysokým teplotám nemusí využívat katalyzátor ze vzácných kovů. V palivovém článku dochází k vnitřnímu reformingu a proto palivo nemusí být dokonale čisté. Pracuje s různými palivy jako například zemní nebo uhelný plyn. Jako oxidační činidlo se používá

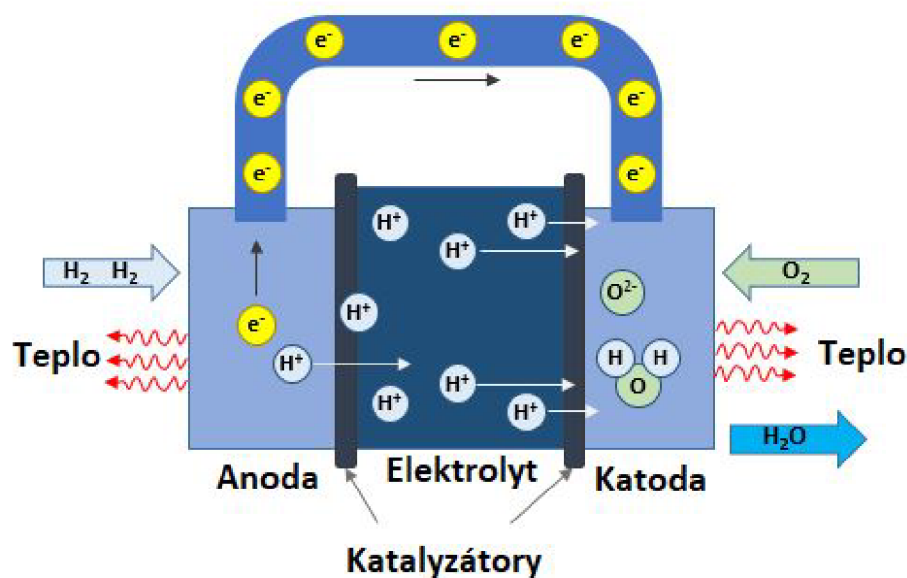
vzduch. Ohřev na operační teplotu může zabrat několik hodin, proto tyto články nejsou vhodné pro použití v dopravních prostředcích, ale jsou vhodné například pro použití v elektrárnách. Články dosahují účinnosti až 60 % [10].

### 3.5 Palivové články s tuhými oxidy

Palivové články s tuhými oxidy pracují při nejvyšší teplotě ze všech typů palivových článků, která se pohybuje okolo 1000 °C. Stejně jako u MCFC nepotřebují drahé katalyzátory a uvnitř článku dochází k vnitřnímu reformingu paliva. Jako elektrolyt je použit iontově vodivý keramický materiál, většinou se jedná o oxid zirkoničitý stabilizovaný oxidy yttria [10].

### 3.6 Palivové články s polymerní membránou

V této laboratorní úloze se využívá palivový článek PEM, který přeměňuje chemickou energii vodíku a kyslíku na energii elektrickou, jak je zobrazeno na obrázku (3.1). Skládá se ze dvou elektrod, které jsou oddělené membránou. K záporné elektrodě, anodě, je přiváděn vodík. Ke kladné elektrodě, katodě, je přiváděn kyslík. Po přivedení vodíku a kyslíku na elektrody probíhá reakce, kdy jako vedlejší produkt vzniká pouze H<sub>2</sub>O a teplo [11],



Obr. 3.1: Palivový článek, převzato z: [17]



Vodík přivedený na anodu je rozložen na kladně nabitě vodíkové ionty a elektrony. Na rozdíl od vodíkových kationtů, elektrony nemohou projít přes polopropustnou membránu, proto putují ke katodě vnějším prostředím a vytváří elektrický proud [11],



Na katodě je kyslík, který s elektrony vytváří anionty. Vodíkové kationty membránou projdou a jejich sloučením s kyslíkovými anionty na katodě vznikají molekuly vody. Probíhající reakce na katodě [11]:



### 3.6.1 Komponenty

Palivový článek PEM se skládá ze dvou koncových desek, dvou sběrných elektrod, dvou bipolárních desek, dvou těsnících vrstev a MEA (membrane electrode assembly). MEA je klíčový komponent a hraje důležitou roli ve výkonu a ceně článku. Nachází se uprostřed článku a její součástí jsou dvě plynově difúzní vrstvy, dvě vrstvy těsnění a polymerní membrána mezi dvěma katalytickými vrstvami (označováno jako CCM - catalyst coated membrane). Strukturu palivového článku PEM lze vidět na obrázku (3.2) [11].

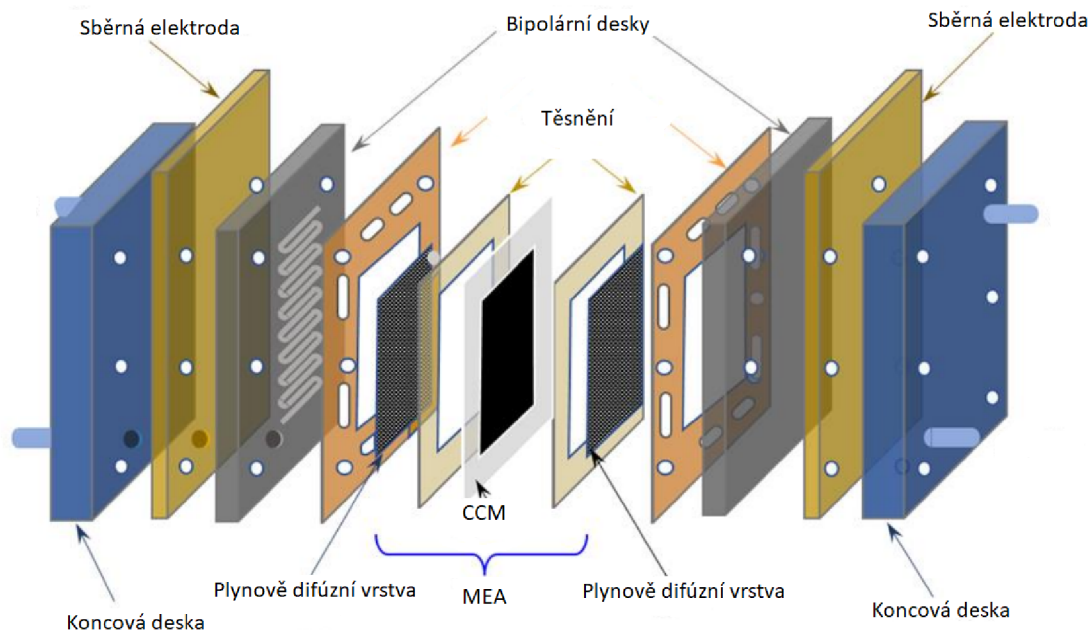
#### Polymerní membrána

Polymerní membrána palivového článku typu PEM je klíčovým prvkem, který slouží k oddělení anody a katody, a umožňuje přenos protonů. Zároveň zabraňuje přímému kontaktu vodíku a kyslíku, což minimalizuje možnost nežádoucích vedlejších reakcí a ztrát výkonu [11].

Tato membrána obvykle využívá perfluorované polymery, jako je Nafion, a je schopna selektivně propouštět protony, a zároveň blokovat průchod elektronů a plynů. Nafion má vysokou protonovou vodivost, tepelnou i mechanickou stabilitu. Protonová vodivost membrány závisí na její relativní vlhkosti. Kvalita a odolnost membrány jsou důležitými faktory pro stabilitu a dlouhodobou spolehlivost palivového článku. Proto se neustále pracuje na vylepšení materiálů membrány s cílem zvýšit účinnost, odolnost vůči degradaci a snížit náklady na výrobu [11].

#### Katalytické vrstvy

Katalytické vrstvy urychlují elektrochemické reakce na anodě a katodě. Na anodě probíhá oxidace vodíku, zatímco na katodě dochází k redukci kyslíku. Katalyzátory



Obr. 3.2: Struktura palivového článku PEM, převzato z: [12]

aktivně urychlují tyto reakce, což umožňuje efektivní produkci elektrického proudu. Obvykle se jako katalyzátory používají drahé kovy, jako je platina, nanesené na povrchu uhlíkového substrátu. Kvalita katalytických vrstev má zásadní vliv na účinnost palivového článku, a proto je snaha optimalizovat složení a strukturu těchto vrstev s cílem zvýšit výkon, snížit náklady a prodloužit životnost palivových článků PEM [11].

Inovace v oblasti katalytických vrstev se zaměřují na vývoj nových materiálů, které by mohly nahradit drahé kovy a přinést tak cenovou dostupnost palivových článků [11].

### **Plynově difúzní vrstvy**

Hlavní funkcí plynově difúzních vrstev je transport reakčních plynů ke katalyzátorům a odvodu vznikajících produktů, což zlepšuje elektrochemické reakce uvnitř článku. Vrstvy mají porézní strukturu, které umožňují snadný průchod plynů a zároveň poskytují dostatečnou plochu pro reakce na katalyzátorech. Vlastnosti vrstev, jako jsou elektrická, tepelná vodivost a mechanická pevnost, mají zásadní vliv na výkon palivového článku [11].

## Bipolární desky

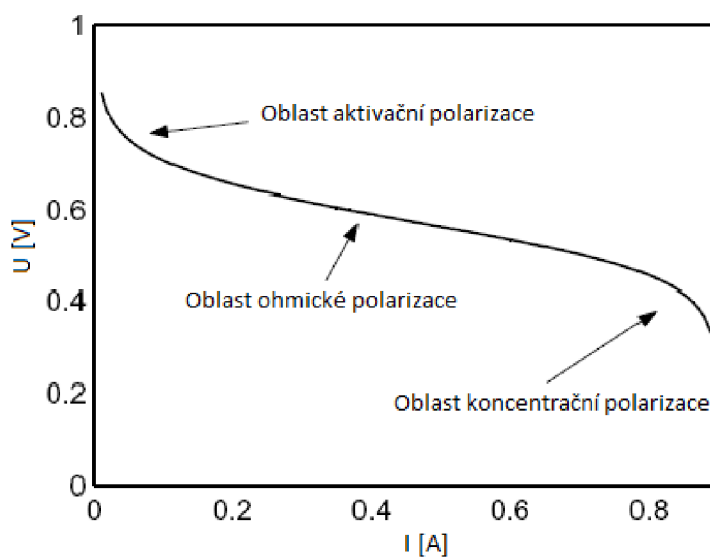
Bipolární desky slouží ke spojení jednotlivých článků a vytvoření celkového elektrochemického systému. Tyto desky mají za úkol vést elektrický proud mezi jednotlivými články, zajišťující tak efektivní propojení a fungování palivového článku [11].

## Sběrné elektrody

Sběrné elektrody slouží k efektivnímu shromažďování elektrického proudu z elektrod a přenášejí ho z článku ven. Jejich hlavní funkcí je minimalizovat odpor a zajišťovat rovnoměrný přenos elektrického proudu z elektrod na externí obvod [11].

### 3.6.2 Voltampérová charakteristika

Závislost mezi elektrickým napětím a proudem palivového článku znázorňuje voltampérová (VA) charakteristika na obrázku (3.3). Při změně velikosti elektrické zátěže dochází ke změně procházejícího proudu i napětí na svorkách článku [15].



Obr. 3.3: Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [15]

Z této křivky lze vyčíst velikost skutečného napětí při zatížení článku určitým proudem. Křivka je rozdělena do tří částí. První část se nazývá aktivní polarizace, a dochází zde k elektrochemické reakci na povrchu elektrod. Na křivce lze vidět strmý pokles napětí. Následuje ohmická polarizace, kdy dochází ke ztrátám napětí kvůli vlastnímu odporu článku. Lze pozorovat postupný, prakticky lineární pokles napětí.

Třetí částí křivky je koncentrační polarizace a nastává, když jsou reaktanty spotřebovávány rychleji, než mohou být do reakčního místa dodávány, proto v důsledku těchto efektů dochází ke zpomalení reakce a napětí klesá k nule [15].

### 3.6.3 Účinnost

Obecně je účinnost palivového článku  $\eta$  [%] vyjádřena jako podíl získané a dodané energie [14],

$$\eta = \frac{E_{získaná}}{E_{dodaná}} \cdot 100\%. \quad (3.5)$$

#### Ideální účinnost

Energie chemických vazeb vodíku je označována jako změna entalpie  $\Delta H$  [kJ/mol] a udává teplo uvolněné reakcí v palivovém článku při konstantním tlaku,

$$\Delta H = zF \cdot U_{tn,HHV}, \quad (3.6)$$

kde  $U_{tn,HHV}$  je termoneutrální napětí a je rovno hodnotě 1,481 V, znovu  $z$  je počet přesunutých elektronů roven 2 a  $F$  je Faradayova konstanta [96 485 C/mol] [14, 18].

Entalpie reakce  $\Delta_r H$  probíhající v palivovém článku je rovna entalpii vody v plynném nebo kapalném stavu  $\Delta H_{H_2O}$ . Uvolněné teplo může být vyjádřeno buď jako spalné teplo (anglicky higher heating value, HHV) nebo výhřevnost (anglicky lower heating value, LHV). HHV je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství vodíku s kyslíkem, a vodní pára obsažená ve spalinách bude kondenzovat. V případě LHV vodní pára nebude kondenzovat a produkt zůstane plynné formě. Protože hodnoty HHV a LHV vodíku jsou rovny absolutní hodnotě reakční entalpie a voda jako produkt reakce je buď v kapalném nebo plynném stavu, hodnoty  $\Delta H$  pro vodík jsou následující:

$$-\Delta H_{H_2O(p)} = \Delta H_{LHV} = 241,82 \text{ kJ/mol},$$

$$-\Delta H_{H_2O(k)} = \Delta H_{HHV} = 285,83 \text{ kJ/mol},$$

při výpočtu účinnosti musí být uvedeno, jaká veličina byla použita, protože vypočtená účinnost se bude lišit. U palivových článků s polymerní membránou je voda většinou v kapalném stavu, proto se preferuje použití proměnné HHV [14, 18].

Pokud veškerá chemická energie obsažená ve vodíku (spalné teplo) by byla přeměněna do elektrické energie, což není možné, úpravou vzorce (3.6) bychom dosáhli výše uvedené ideální hodnoty termoneutrálního napětí  $U_{tn,HHV}$  [14],

$$U_{tn,HHV} = \frac{\Delta H_{HHV}}{2F} = 1,481 \text{ V}. \quad (3.7)$$

Dosažitelná elektrická energie je spojena s Gibbsovou volnou energií  $\Delta G$  [kJ/mol] a odpovídá maximální využitelné elektrické energii dosažitelné při reakci vodíku s kyslíkem za normálních podmínek, tedy pro přeměnu na elektrickou energii lze využít jen část celkové energie vazeb vodíku,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (3.8)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota [K] a  $\Delta S$  je změna entropie [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ],

$$\Delta G = zF \cdot U_{e,k}, \quad (3.9)$$

hodnota  $\Delta G$  odpovídá Gibbsově volné energii vody v kapalném stavu  $\Delta G_{H_2O(k)}$  rovné  $-237,13$  kJ/mol. Elektromotorické napětí palivového článku  $U_{e,k}$  je ideální napětí, kterého by mohlo být teoreticky dosaženo při elektrochemické reakci vodíku s kyslíkem. Jeho vyjádřením ze vztahu získáme [11, 14, 18]:

$$U_{e,k} = \frac{-\Delta G_{H_2O(k)}}{zF} = 1,229 \text{ V}. \quad (3.10)$$

Za předpokladu, že veškerá volná Gibbsova energie může být přeměněna do elektrické energie, ideální účinnost palivového článku je za normálních podmínek [14]:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-\Delta G_{H_2O(k)}}{\Delta H_{HHV}} = \frac{237,13}{285,83} \cdot 100\% = 83\%. \quad (3.11)$$

### Výkonová účinnost

Průběhem elektrochemické reakce dochází ke spotřebování vodíku v palivovém článku. Na základě Faradayova zákona může být molární průtok vodíku  $\dot{n}_{H_2}$  [mol/s] definován jako [14]:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{I}{2F}. \quad (3.12)$$

Po dosazení vztahů (3.7 a 3.12) do vztahu (3.13) je vyjádřena výkonová účinnost palivového článku,

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{H_2,spotřebovaný}} = \frac{U \cdot I}{\dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_{HHV}} = \frac{U}{1,481}, \quad (3.13)$$

kde  $P_{el}$  je elektrický výkon palivového článku [W] a  $P_{H_2,spotřebovaný}$  je výkon spotřebovaného vodíku [W] [14],

$$P_{H_2,spotřebovaný} = U_{tn,HHV} \cdot I. \quad (3.14)$$

## Napěťová účinnost

Napěťová účinnost daného palivového článku může být vypočítána jako poměr naměřeného a ideálního napětí. Naměřené napětí bude mít vždy nižší hodnotu, než je ideální kvůli ztrátám v palivovém článku [14, 18],

$$\eta_{\text{napětí}} = \frac{U}{U_{e,k}} \cdot 100\%, \quad (3.15)$$

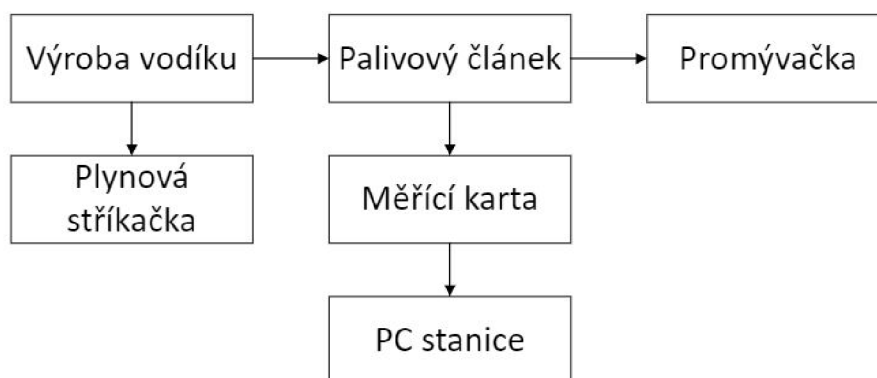
$$\eta_{\text{napětí}} = \eta_{el} \cdot \eta_{id} = \frac{U}{1,481} \cdot 83\%. \quad (3.16)$$

## 4 Návrh pracoviště

Během přípravy diplomové práce byly vybrány nezbytné komponenty pro realizaci laboratorní úlohy. Následně bylo provedeno sestavení, zapojení a ověření funkčnosti těchto komponentů, zahrnující zařízení, chemikálie a další potřebné pomůcky. Blokové schéma navrhovaného pracoviště je zobrazeno na obrázku (4.1) a zapojení pracoviště na obrázku (4.2).

Chemická reakce na výrobu vodíku probíhá v Erlenmeyerově baňce, z té je nejprve vzduch odstraněn pomocí plynotěsné stříkačky pro vytvoření bezkyslíkového prostředí. Z baňky vodík proudí do palivového článku a ke článku je připojena promývačka. Palivový článek je připojen k měřicí kartě a jsou sledovány jeho charakteristiky.

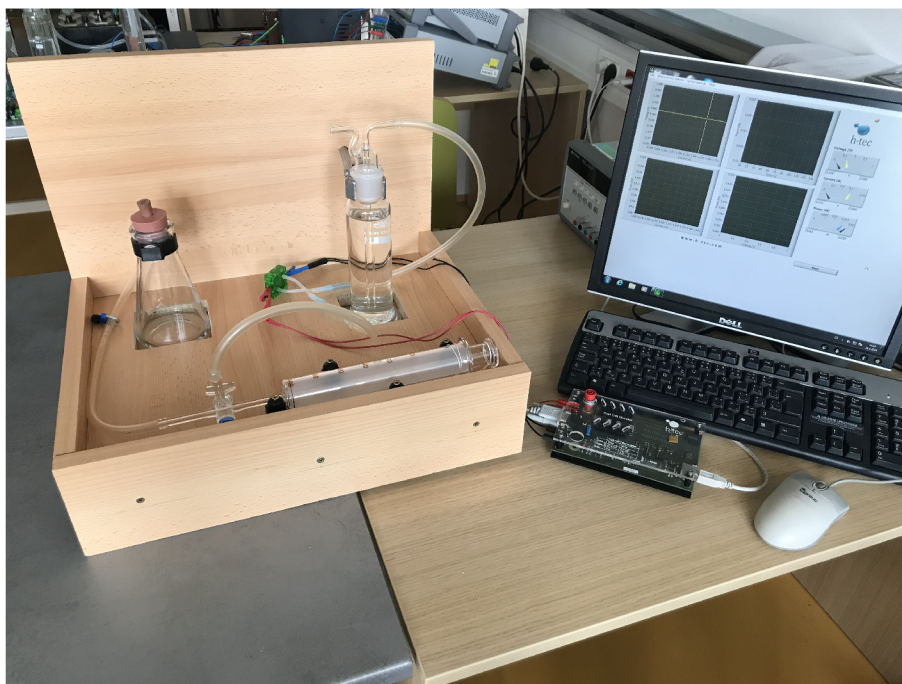
Pro účely manipulace s úlohou byl vyroben dřevěný podstavec z dřevotřísky, jak je detailněji uvedeno na obrázku (4.3). Slouží k umístění a zafixování komponent na jednom místě pro jednodušší a bezpečnější manipulaci. Promývačka je upevněna držákem na zadní stěně a umístěna v části podstavce. Zatímco Erlenmeyerova baňka je pouze vsunuta do podstavce, protože je potřeba, aby byla její horní část přístupná. Plynová stříkačka je usazena mezi plastové zarážky, aby zůstala na svém místě během manipulace s podstavcem. Během používání je vyjmuta a umístěna na stole vedle podstavce. Hlavním účelem dřevěného podstavce je usnadnění manipulace s celkovou úlohou, protože jsou všechny komponenty propojeny hadičkami.



Obr. 4.1: Blokové schéma pracoviště

### 4.1 Výroba vodíku

Pro správný průběh chemických reakcí v palivovém článku je nezbytné používat co nejčistší vodík s co nejvyšší koncentrací. Během prováděného experimentu bylo



Obr. 4.2: Zapojení pracoviště

vyzkoušeno, že když v baňce nebylo vytvořeno bezkyslíkové prostředí, vytvořený vodík se v baňce naředil zbytkovým vzduchem a palivový článek nefungoval.

Pro dosažení vyšší čistoty vodíku je před započítím reakce postupně odstraněn vzduch z baňky pomocí plynotěsné stříkačky. Baňka je spojena s plynovou stříkačkou, na které je umístěn trojcestný kohout. Kohout je nastaven tak, aby byla baňka propojena pouze se stříkačkou a vzduch je nasáván do stříkačky. Poté se kohout otočí, aby se stříkačka propojila s volným vývodem. Stlačením pístu je vzduch uvolněn. Tento proces se opakuje dvakrát. Po posledním odstranění vzduchu se uzavře škrťátko na hadičce vedoucí z baňky.

Chemická reakce probíhá v Erlenmeyerově baňce o objemu 250 ml, která je vybavena natavenou trubicí a uzávěrem, aby se zamezilo úniku vodíku. Tento vodík je poté soustředován hadičkou do palivového článku.

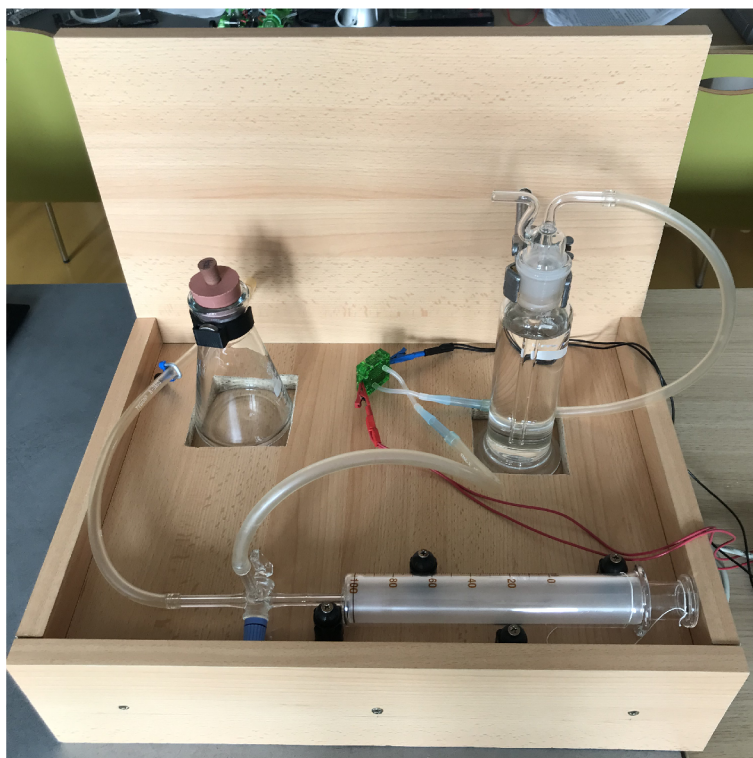
Reakcí je potřeba vyrobit alespoň 200 ml vodíku, aby byla zajištěna stabilní dodávka vodíku pro požadovanou dobu. Hustota vodíku je  $8,993 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ . Požadovaný počet gramů vodíku je [16]:

$$m = V \cdot \rho = 200 \cdot 8,993 \cdot 10^{-5} = 0,018 \text{ g}, \quad (4.1)$$

počet molů vodíku je,

$$n = \frac{m}{M} = \frac{0,018}{2,016} = 8,92 \cdot 10^{-3} \text{ mol}, \quad (4.2)$$





Obr. 4.3: Dřevěný podstavec

počet gramů Zn se vypočte následovně,

$$m = n \cdot M = 8,92 \cdot 10^{-3} \cdot 65,38 = 0,58 \text{ g}, \quad (4.3)$$

výpočet množství 35% HCl se vypočítá podle následujících vzorců,

$$m = n \cdot M = 2 \cdot 8,92 \cdot 10^{-3} \cdot 36,46 = 0,65 \text{ g}, \quad (4.4)$$

$$m = \frac{100\%}{35\%} \cdot 0,65 = 1,86 \text{ g (35\% HCl)}, \quad (4.5)$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,86}{1,18} = 1,6 \text{ ml (35\% HCl)}. \quad (4.6)$$

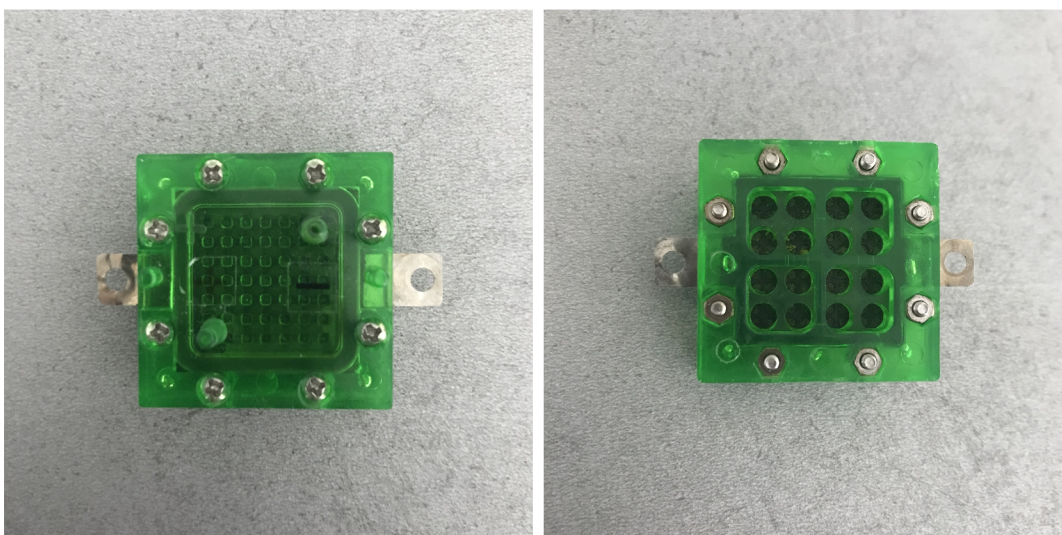
Vypočítané množství HCl pro reakci je 1,6 ml 35% HCl. V tomto experimentu reaguje přibližně 0,6 g Zn a 4 ml 35% HCl, s ohledem na to, aby bylo dno baňky zcela pokryté.

## 4.2 Měřící zařízení

Další nezbytnou součástí je měřící zařízení pro zaznamenávání dat během experimentu. Charakteristiky palivového článku jsou měřeny pomocí měřící karty H-TEC a jsou zobrazeny pomocí programu Fuel Cell Monitor 3.0, který je určený k měření charakteristik palivového článku.

### 4.3 Palivový článek

V úloze se používá palivový článek ze sady H-Racer 2.0 od značky Horizon Educational z vybavení univerzity. Jedná se o PEM palivový článek, který bude využit ke generování elektrické energie z vodíku a kyslíku. Oxidantem je tedy vzduch. Bližší informace a další technické parametry k tomuto palivovému článku od výrobce nejsou uvedeny. Výkon tohoto článku se však ukázal jako dostačující pro danou aplikaci.

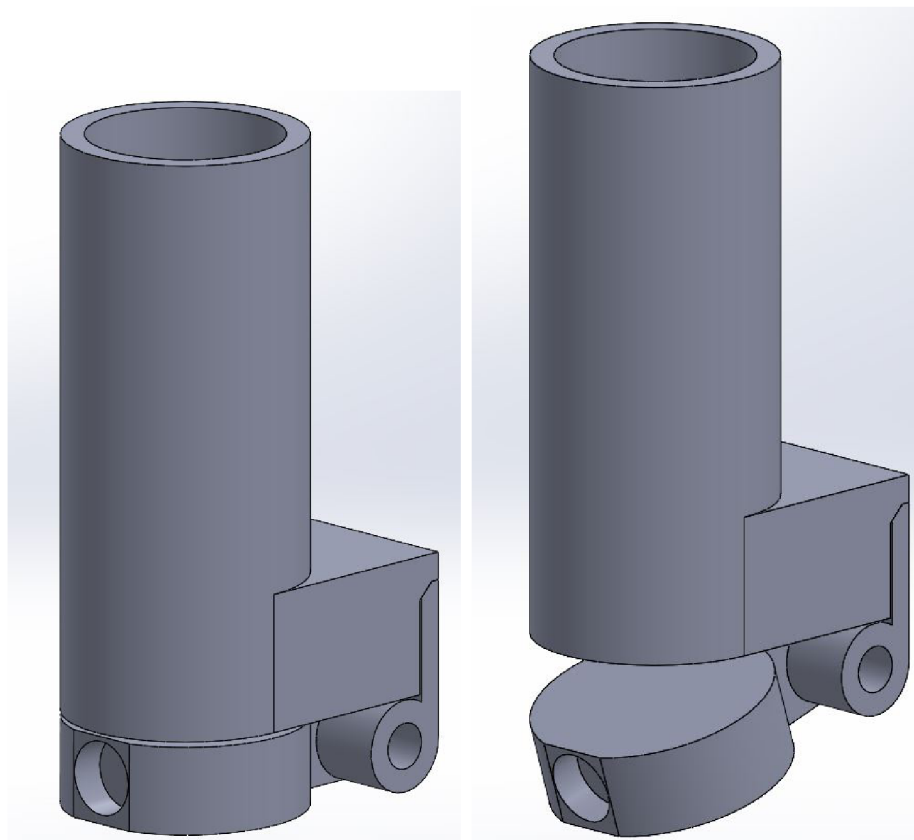


Obr. 4.4: Palivový článek PEM

## 5 Návrh součástky pro vhození zinku do baňky

Vzhledem k tomu, že se pracuje s koncentrovanou kyselinou, je žádoucí, aby studenti s kyselinou nepřišli do kontaktu. Z toho důvodu bylo navrženo řešení pro utěsnění baňky a zároveň bezpečné proběhnutí reakce pomocí navržené součástky.

Navržená součástka slouží k umístění granulí zinku, které jsou následně vpuštěny do baňky s kyselinou. Model byl navržen v programu Solidworks určený pro tisk na 3D tiskárně, který lze vidět na obrázku (5.1). Součástka se skládá ze tří částí, přičemž ke každé z částí součástky jsou uvedeny modely a výkresy, rozměry jsou uvedené v milimetrech. První z nich je válcová část a je uvedena na obrázku (5.2), druhou částí je kloubový závěs, který je zobrazen na obrázcích (5.3 a 5.4), tyto dvě části jsou k sobě přilepeny lepidlem na plasty. Třetí částí jsou dvířka, uvedena na obrázcích (5.5 a 5.6). Vyklápění dvířek je možné pomocí šroubku z nerezové oceli, který je vložen do kloubového závěsu. Kvůli malým rozměrům, které šroubek má (délka 10 mm, průměr 2 mm), bylo zvoleno použití šroubku namísto tisku této části v 3D tiskárně. Do otvoru ve vyklápěcích dvířkách je umístěn magnet o průměru 3 mm a stejné výšce.

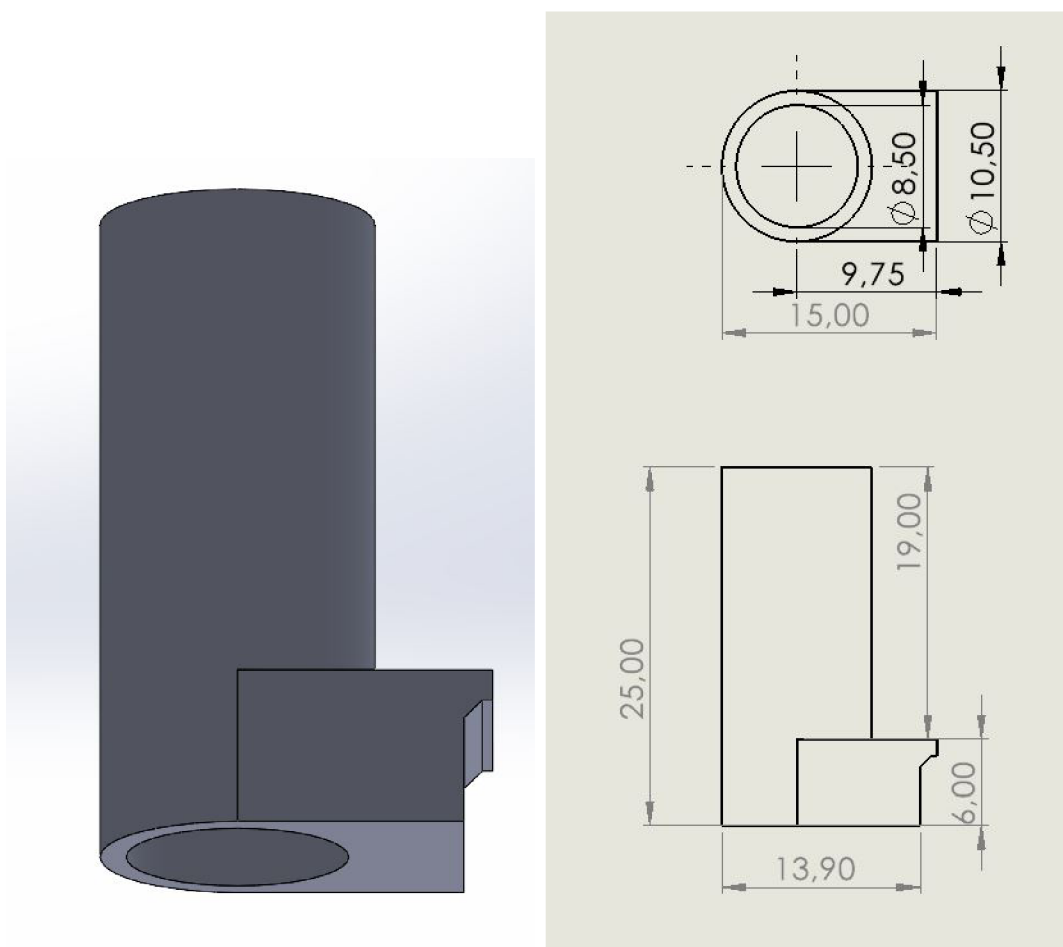


Obr. 5.1: Model mechanismu

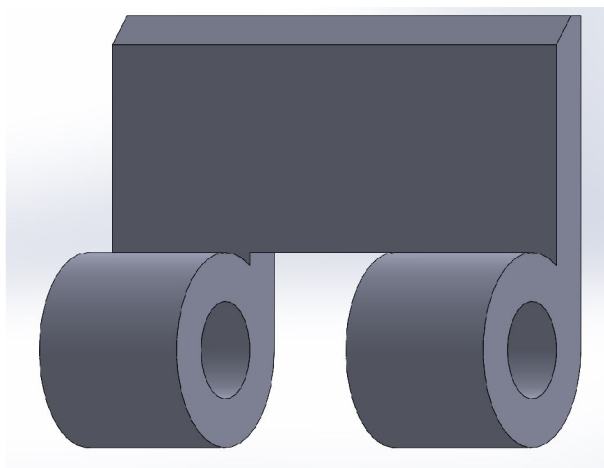
Takto připravená součástka byla vložena do gumové zátky, ve které byl vyvrtán

otvor, jak je uvedeno na obrázku (5.7). Součástka uvnitř špuntu nevyplňuje celý otvor, ale je umístěna přibližně do poloviny výšky zátky. Otvor v zátce je utěsněn další gumovou zátkou o menším rozměru.

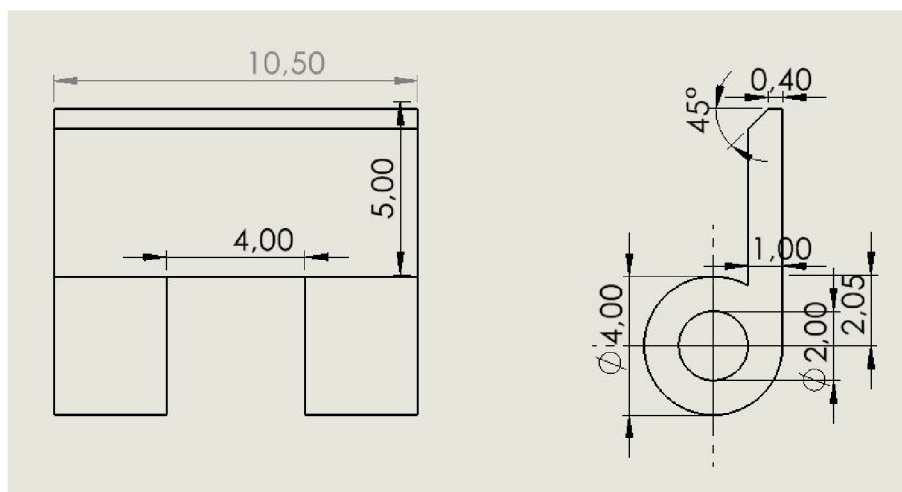
Následně byl navržen držák na magnet, který je nasazen na ústí baňky, uvedeno na obrázku (5.8 a 5.9). Kompletní mechanismus lze vidět na obrázku (5.10). Pokud je držák s magnetem nasazen na ústí baňky, dvířka jsou zavřená (ve vodorovné poloze) díky přitažlivé síle mezi dvěma magnety. Uvnitř se nacházejí granule zinku. Po odstranění držáku s magnetem se dvířka otevřou a granule zinku se uvolní do baňky obsahující kyselinu, čímž se spustí okamžitá reakce.



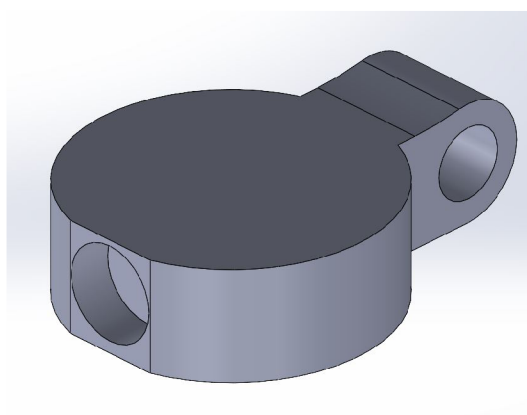
Obr. 5.2: Model a výkres válcové části součástky



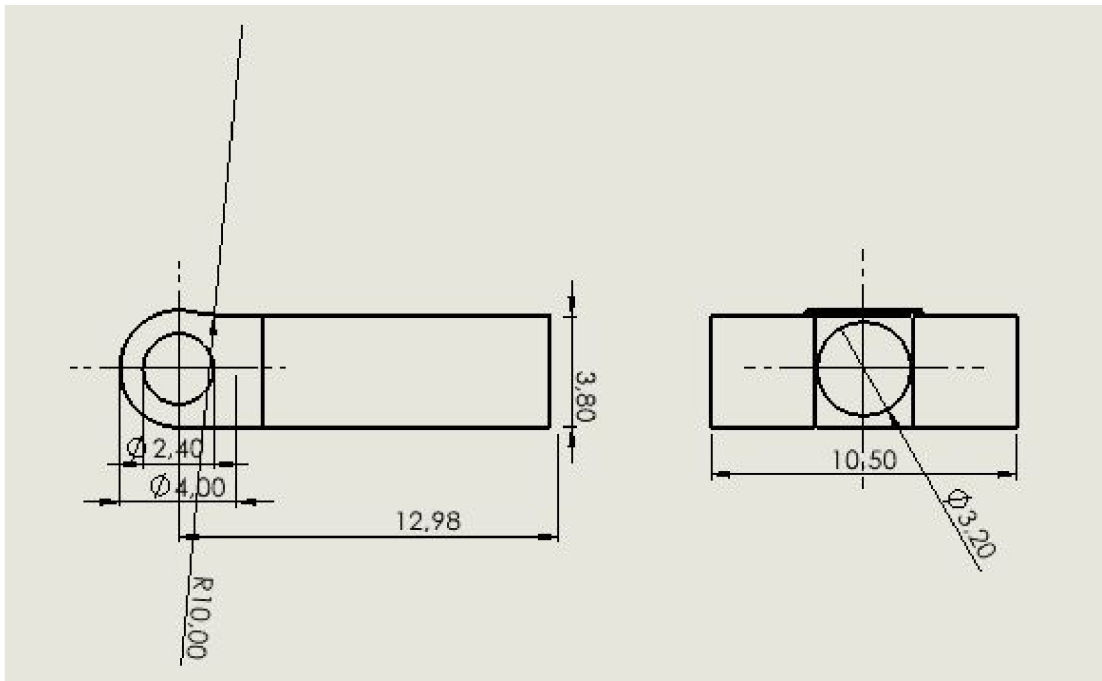
Obr. 5.3: Model kloubového závěsu



Obr. 5.4: Výkres kloubového závěsu



Obr. 5.5: Model dvířek



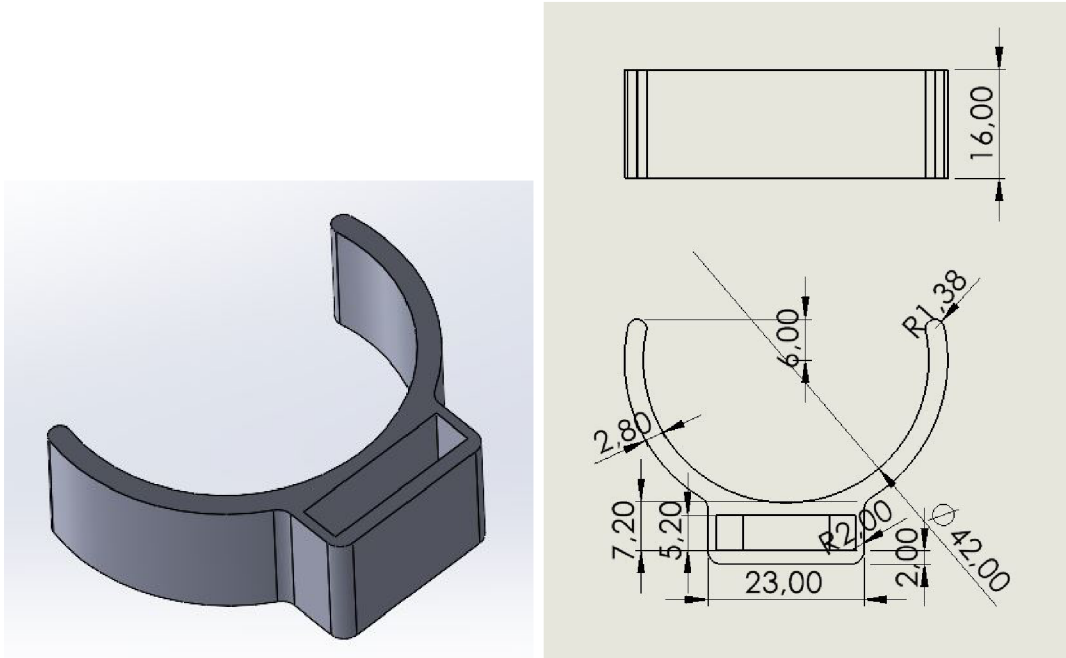
Obr. 5.6: Výkres dvířek



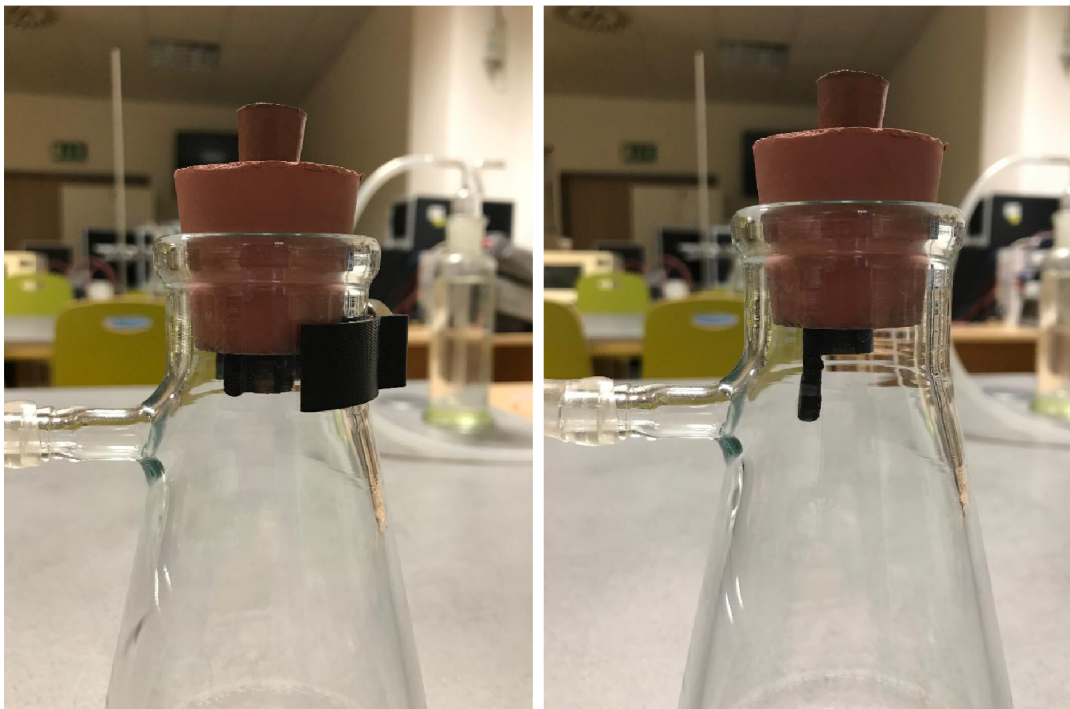
Obr. 5.7: Gumová zátka se součástkou



Obr. 5.8: Držák na magnet



Obr. 5.9: Model a výkres držáku na magnet



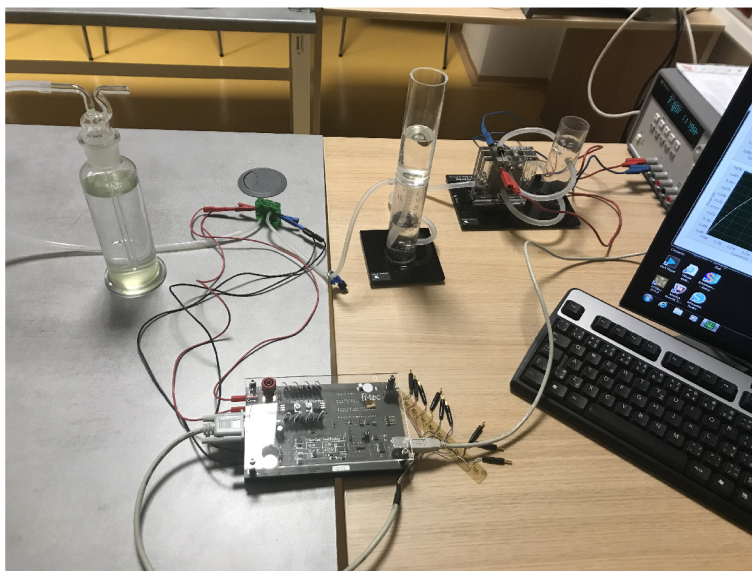
Obr. 5.10: Baňka s otevíracím mechanismem, v uzavřeném stavu (vlevo), v otevřeném stavu (vpravo)



## 6 Aktivace palivového článku

Palivový článek nebyl dlouhou dobu používán, a proto bylo nezbytné jej aktivovat, aby se znovu navlhčila jeho membrána a dosáhly se vyšší výkonové hodnoty. Při prvním měření byly totiž zaznamenány nulové výsledky. Rozložení pracoviště pro aktivaci palivového článku je uvedeno na obrázku (6.1). Součástí pracoviště jsou zdroj stejnosměrného napětí, elektrolyzátor, zásobník vodíku, palivový článek, promývačka, měřicí karta a počítač s programem pro měření charakteristik palivového článku. Horní část zásobníku vodíku byla naplněna destilovanou vodou a přepuštěna do spodní části zásobníku. Na zdroji stejnosměrného napětí bylo nastaveno napětí 3,5 V a protékající proud 1,3 A, což odpovídá pracovnímu rozsahu elektrolyzátoru. Elektrolyzátor začne rozkládat vodu na vodík a kyslík. Zatímco kyslík uniká z elektrolyzátoru do vzduchu, vodík je přiváděn do spodní části zásobníku a vytlačuje vodu do horní části zásobníku. Elektrolyzátor bylo vyrobeno 50  $cm^3$  vodíku za 151 sekund. Poté byl vodík přiveden do palivového článku ze spodní části zásobníku.

Palivový článek byl v nepřetržitém provozu po několik dní a sledovaly se jeho charakteristiky, dokud se hodnoty neustálily. Na obrázku (6.2) jsou zobrazeny VA a výkonové křivky palivového článku po aktivaci. Nejprve byl článek aktivován po dobu přibližně 72 hodin a bylo dosaženo maximálního výkonu 155 mW při napětí 380 mV a proudu 400 mA.

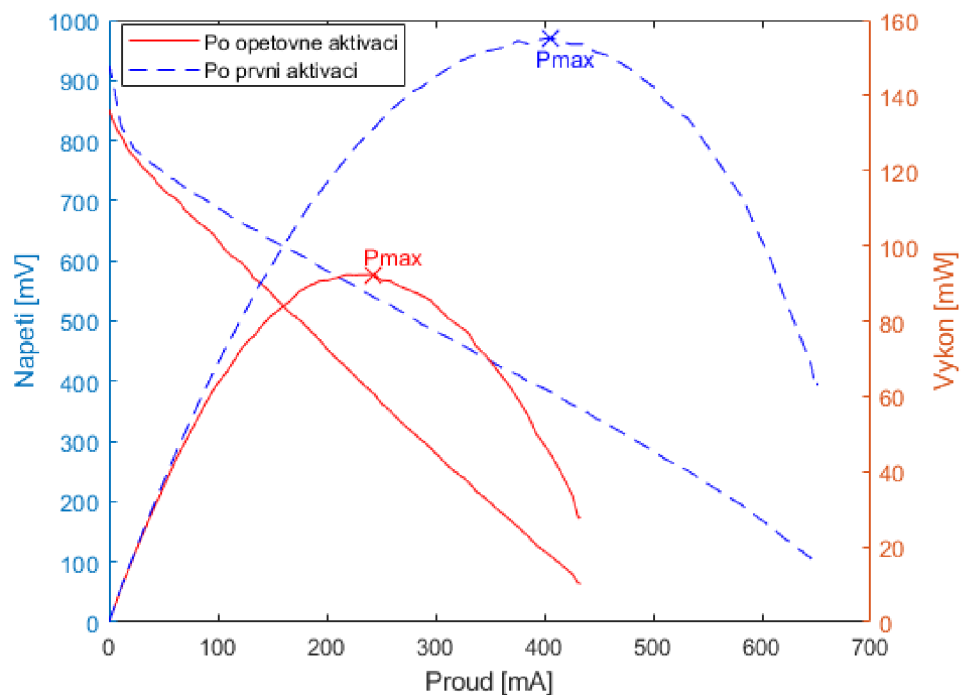


Obr. 6.1: Pracoviště při aktivaci palivového článku

I když je palivový článek nečinný po relativně krátkou dobu, například několik dní, jeho výkon po opětovném spuštění klesne. Pokud by však byl článek mimo provoz po dobu přibližně jednoho týdne, při následujícím měření lze očekávat nu-

lový výkon. Opětovnou aktivací (výroba vodíku elektrolyzou vody) lze během krátké doby dosáhnout vyšších výkonů až do 100 mW, přičemž délka aktivčního procesu ovlivňuje dosažené hodnoty. Palivový článek byl nečinný přibližně dva dny od posledního měření a před dalším měřením byl aktivován po dobu tří hodin. Na obrázku (6.2) je uvedena VA a výkonová charakteristika palivového článku po opětovné aktivaci, a lze pozorovat, že hodnoty výkonu dosahovaly nižších hodnot než při první několikadenní aktivaci. Maximální výkon článku byl naměřen na 92 mW, při napětí 380 mV a proudu 234 mA.

Palivový článek potřebuje čas na stabilizaci a optimalizaci svého výkonu, což může vést k nižšímu výkonu na začátku měření, než je jeho maximální hodnota. Stabilní dodávka vodíku je dalším klíčovým faktorem pro správný provoz článku, která může ovlivnit jeho výkon, pokud nedojde k dostatečnému zásobení vodíkem při opětovném spuštění.

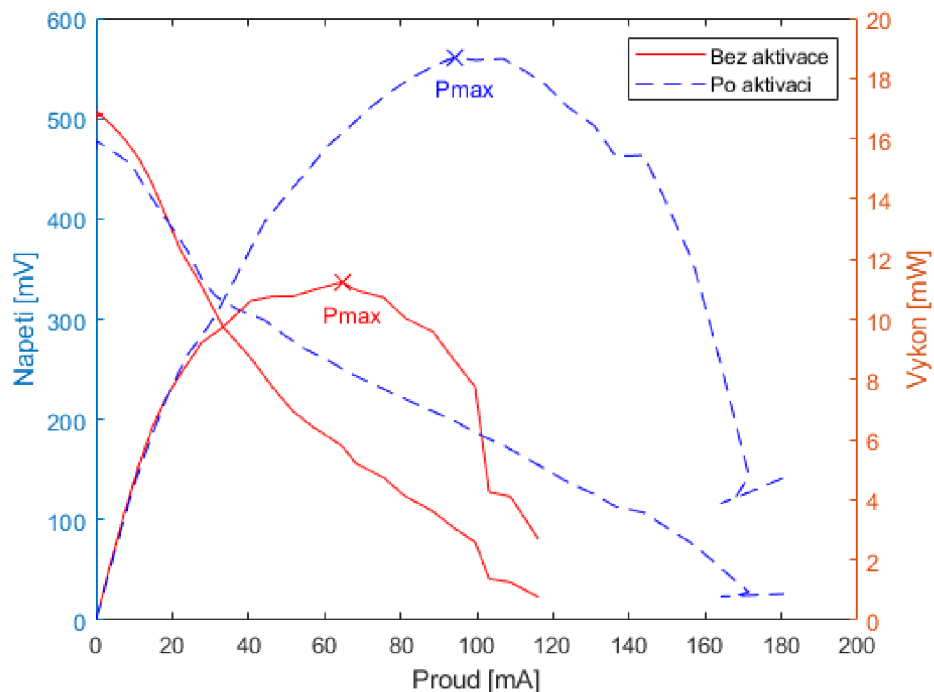


Obr. 6.2: VA a výkonová charakteristika palivového článku po první (modře) a opětovné (červeně) aktivaci, vodík je vyrobený elektrolyzou vody

Po aktivaci byl palivový článek připojen k Erlenmeyerově baňce na výrobu vodíku, aby se mohly sledovat jeho charakteristiky v porovnání s výrobou vodíku pomocí elektrolyzáru. Maximální naměřený výkon byl 18,7 mW při napětí 199 mV a proudu 94 mA, jak uvádí charakteristiky na obrázku (6.3). Jak již bylo zmíněno, palivový článek v nečinnosti ztrácí výkon. Po dvoudenní nečinnosti palivového článku bez předchozí aktivace byl naměřen výkon 11,2 mW při napětí 174 mV a proudu

65 mA. Ve srovnání s charakteristikami uvedenými v (6.2) je zřejmé nejen snížení výkonu, ale také nestabilní průběh křivek, což je důsledkem časově nestálé výroby vodíku chemickou reakcí a jeho čistoty. Naopak, při výrobě vodíku elektrolyzérem je dosaženo vysoké čistoty a stabilní dodávky vodíku do palivového článku, což zajišťuje lepší výkon a stabilitu.

Při sledování vlastností palivového článku při výrobě vodíku chemickou reakcí byly zaznamenány nižší výkonové hodnoty než při použití elektrolyzéru. Z tohoto důvodu není nutné aktivovat článek po dlouhou dobu před každým měřením, jak bylo předtím praktikováno s úsilím dosáhnout maximálního výkonu při několikadenní aktivaci. Stačí provést krátkou aktivaci několik hodin před začátkem měření, aby se obnovila funkčnost článku pro potřeby laboratorní úlohy.



Obr. 6.3: VA a výkonová charakteristika palivového článku, vodík je vyrobený chemickou reakcí Zn a HCl, křivky označeny modře značí VA a výkonovou charakteristiku po aktivaci článku, červeně jsou označeny křivky po dvoudenní nečinnosti

## 7 Laboratorní úloha

### 7.1 Měření charakteristik palivového článku PEM a výpočet jeho účinnosti

#### 7.1.1 Cíle úlohy

Cílem úlohy je seznámení s palivovým článkem a procesy, které v něm probíhají. Dále je cílem změřit voltampérovou (VA) charakteristiku palivového článku PEM (proton exchange membrane) pomocí vyrobeného vodíku reakcí kyseliny chlorovodíkové se zinkem a následně vypočítat jeho účinnost a množství vyrobeného a spotřebovaného vodíku.

#### 7.1.2 Zadání

1. Spočítejte množství vyrobeného vodíku. Využijte naváženou hmotnost zinku.
2. Změřte VA charakteristiku palivového článku pomocí měřicí karty H-TEC. Ze změřených dat vynesete do jednoho grafu VA a výkonovou charakteristiku.
3. Stanovte místo maximálního výkonu, tedy při jakém napětí má palivový článek největší výkon, a bod označte v grafu. Sledujte, jak se mění jeho výkon při změnách odebíraného proudu.
4. Spočítejte napěťovou účinnost palivového článku.
5. Spočítejte, kolik vodíku bylo spotřebováno během měření, kdy palivový článek udržoval stabilní výkon, než začal postupně klesat, až dosáhl nuly.

#### 7.1.3 Použité měřicí přístroje, komponenty a chemikálie

- Palivový článek
- Měřicí karta H-TEC
- Počítačový program Fuel Cell Monitor 3.0
- Plynová stříkačka
- Promývačka
- Stopky
- Kyselina chlorovodíková
- Zinek

#### 7.1.4 Teoretický úvod

Vodík, jako nejlehčí a zároveň nejhojněji se vyskytující chemický prvek ve vesmíru, má v poslední době stále rostoucí význam v oblasti energetiky a udržitelnosti. Jeho

využití jako čistého paliva se stává stále populárnější, zejména v kontextu snah o snižování emisí a přechodu na obnovitelné zdroje energie [3].

Vodík se jako samostatný prvek v přírodě volně nevyskytuje, proto musí být vyráběn pro jeho využití v energetice. Existuje několik metod výroby vodíku, z nichž každá má své výhody a nevýhody. Nejčastěji používanou metodou je výroba z fosilních paliv, jako je například zemní plyn, což vede k emisím  $\text{CO}_2$ . Tento proces produkuje vodík, který se nazývá šedý. Další metodou je výroba pomocí elektrolýzy vody, při níž se využívá elektrický proud k rozložení vody na vodík a kyslík. Pokud je elektrický proud získáván z obnovitelných zdrojů energie, vyrobený vodík se nazývá zelený, což je ekologicky šetrnější alternativa [3].

Skladování vodíku je klíčovým faktorem pro jeho široké využití. Vodík je vysoce hořlavý plyn, který se musí skladovat bezpečně a efektivně. Nejběžnější metodou skladování vodíku je komprese do tlakových nádrží nebo chlazení na velmi nízké teploty, kdy se vodík skladuje v kapalném stavu. Existují však i další technologie, jako metalhydridové materiály nebo nanomateriály, které nabízejí potenciál pro efektivnější a bezpečnější skladování vodíku [2].

## Základy chemie

Látkové množství  $n$  lze vyjádřit jako podíl skutečného počtu částic  $N$  a počtu částic v 1 molu. Jednotkou látkového množství je mol. 1 mol je množství látky, které obsahuje  $6,022 \cdot 10^{23}$  částic, tato hodnota je nazývána Avogadrovou konstantou, a je označována  $N_A$ . Platí tedy vztah [16]:

$$n = \frac{N}{N_A}. \quad (7.1)$$

Molární hmotnost vyjadřuje hmotnost určitého látkového množství dané látky (hmotnost jednoho molu), označuje se  $M$ , jednotka je  $g/mol$ . Molární hmotnost lze vypočítat na základě relativních atomových hmotností  $A_r$  (uvedených v periodické tabulce prvků). Lze určit ze vztahu:

$$M = \frac{m}{n}, \quad (7.2)$$

kde  $m$  je hmotnost látky a její látkové množství  $n$ . Molární hmotnosti prvků a sloučenin jsou:

$$M(\text{Zn}) = 65,38 \text{ g/mol}$$

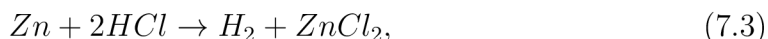
$$M(\text{HCl}) = 1,0079 + 35,45 = 36,4579 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{H}_2) = 2 \cdot 1,0079 = 2,0158 \text{ g/mol}$$

$$M(\text{ZnCl}_2) = 65,38 + 2 \cdot 35,45 = 136,28 \text{ g/mol}$$

jeden mol zinku tedy odpovídá přibližně 65 g Zn [16].

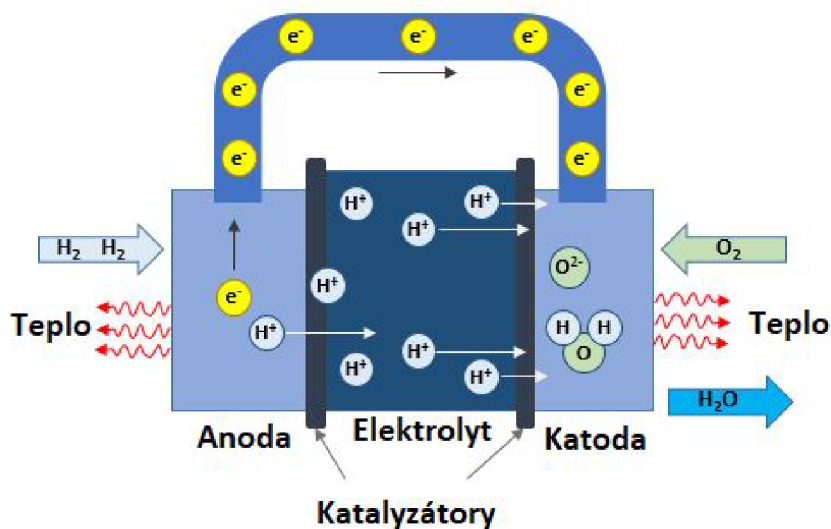
V této laboratorní úloze se vyrábí vodík pomocí chemické reakce kyseliny s kovem. Vodík je vyroben reakcí (7.3), kdy reaguje přibližně X g zinku (Zn) s Y ml 35% kyseliny chlorovodíkové (HCl). Jako produkty chemické reakce vznikají plynný vodík (H<sub>2</sub>) a chlorid zinečnatý (ZnCl<sub>2</sub>) v kapalné formě [9],



z reakce se dá vyčíst, kolik látky reaguje a kolik produktu vzniká. Jeden mol Zn reaguje s dvěma moly HCl za vzniku jednoho molu ZnCl<sub>2</sub> a jednoho molu H<sub>2</sub>. Tyto látky mohou mít odpovídající látkové množství, ale budou se lišit svou hmotností, jak vychází ze vzorce (7.2) pro výpočet hmotnosti [16].

### Palivové články

Palivové články jsou zařízení, které přeměňují chemickou energii na elektrickou pomocí elektrochemických reakcí. V palivovém článku probíhají reakce, ve kterých palivo a oxidační činidlo vhodné pro daný typ palivového článku reagují za vzniku elektřiny, vody a tepla. Existuje několik typů palivových článků, které se rozdělují podle provozní teploty na nízkoteplotní, středněteplotní a vysokoteplotní. Podle druhu elektrolytu se palivové články dělí na alkalické, přímé metanolové, kyselé, dále na palivové články s tavenými uhlíčitany, s tuhými oxidy a palivové články s polymerní membránou [10].



Obr. 7.1: Palivový článek, převzato z: [17]

Palivový článek PEM přeměňuje chemickou energii vodíku a kyslíku na elektrickou a jako produkt vzniká voda [11]:



Popis palivového článku PEM je zobrazen na obrázku (7.1). Na anodu je přiváděn vodík a na katodu vzduch. Elektrolytem je polymerní membrána. Základní princip fungování palivového článku spočívá v elektrochemické reakci vodíku a kyslíku za přítomnosti katalyzátorů a polymerní membrány. Vodíkové atomy jsou oxidovány na protony a elektrony na anodě, zatímco na katodě protony s kyslíkem a elektrony, které prošly obvodem, tvoří vodu. Polymerní membrána slouží k oddělení elektrod a umožňuje protonům přecházet z anody na katodu, zatímco elektrony procházejí vnějším obvodem, což vytváří elektrický proud [11],

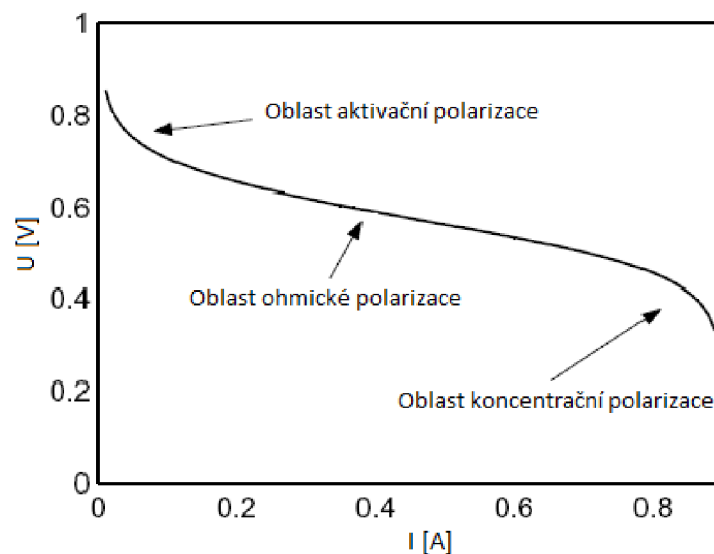
Probíhající reakce na anodě [11]:



Probíhající reakce na katodě [11]:



Voltampérová charakteristika palivového článku, na obrázku (7.2), je grafickým vyjádřením vztahu mezi napětím a proudem, který prochází článkem při různých pracovních podmínkách. Při změně velikosti elektrické zátěže dochází ke změně procházejícího proudu i napětí na svorkách článku [15].



Obr. 7.2: Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [15]

Z této křivky lze vyčíst velikost skutečného napětí při zatížení článku určitým proudem. Křivka je rozdělena do tří částí. První část se nazývá aktivační polarizace,

a dochází zde k elektrochemické reakci na povrchu elektrod, redukci kyslíku a oxidaci vodíku, což způsobí strmý pokles napětí. Následuje ohmická polarizace, kdy dochází ke ztrátám napětí kvůli vlastnímu odporu článku. Lze pozorovat postupný, prakticky lineární pokles napětí. Třetí částí křivky je koncentrační polarizace a nastává, když jsou reaktanty spotřebovávány rychleji, než mohou být do reakčního místa dodávány, proto v důsledku těchto efektů dochází ke zpomalení reakce a napětí klesá k nule [15].

Palivový článek je zatížen připojením k elektrickému obvodu. Pokud je zatížení příliš vysoké, může dojít ke snížení účinnosti palivového článku, zvyšuje se jeho teplota a rychlost elektrochemických reakcí je omezena difúzními ději limitujícími přísun reaktantů do reakčních míst na elektrodách. Naopak při příliš nízkém zatížení, nemusí být dosaženo maximální účinnosti. Velikost zátěže by měla být zvolena tak, aby byla maximalizována účinnost palivového článku - článek pracoval v bodě maximálního výkonu [13].

### Spotřebované množství vodíku a vzduchu

1. Faradayův zákon říká, že hmotnost  $m$  [g] látky vyloučené na elektrodě je přímo úměrná součinu proudu  $I$  [A] a doby  $t$  [s], tedy náboji  $Q$  [C], který prošel elektrolytem,

$$m = A \cdot Q = A \cdot I \cdot t, \quad (7.8)$$

kde  $A$  je elektrochemický ekvivalent [kg/C] [14].

2. Faradayův zákon vyjadřuje, že elektrochemický ekvivalent závisí přímo úměrně na molární hmotnosti látky  $M$  [g/mol], podle vzorce:

$$A = \frac{M}{z \cdot F}, \quad (7.9)$$

kde  $z$  je počet přesunutých elektronů a  $F$  je Faradayova konstanta [96 485 C/mol] [14].

Sloučením obou vzorců dostaneme vzorec pro výpočet množství spotřebované látky v gramech [9, 14]:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F}. \quad (7.10)$$

### Účinnost

Změna entalpie  $\Delta H$  [kJ/mol] vyjadřuje množství tepla uvolněného během reakce v palivovém článku za konstantního tlaku. Existují dva hlavní parametry, které se používají k charakterizaci tohoto procesu: spalné teplo (higher heating value, HHV) a výhřevnost (lower heating value, LHV). Hodnota HHV se uplatňuje při výpočtech účinnosti, kdy je voda jako produkt přítomna v kapalném formě, zatímco LHV se



používá, pokud je voda ve formě vodní páry. Tyto hodnoty  $\Delta H$  jsou specifikovány pro vodík [14]:

$$\Delta H_{HHV} = 285,83 \text{ kJ/mol},$$

$$\Delta H_{LHV} = 241,82 \text{ kJ/mol}.$$

Gibbsova volná energie  $\Delta G$  [kJ/mol] odpovídá maximální energii, která může být získána při reakci vodíku s kyslíkem za standardních podmínek, což je Gibbsova volná energie vody v kapalném stavu [14]:

$$\Delta G_{H_2O(k)} = -237,13 \text{ kJ/mol},$$

$$\Delta G = zF \cdot U_{e,k}, \quad (7.11)$$

$z$  je počet přesunutých elektronů roven 2 a  $F$  je Faradayova konstanta [96 485 C/mol]. Elektromotorické napětí palivového článku  $U_{e,k}$  představuje teoretické maximální napětí, které by mohlo být dosaženo při elektrochemické reakci vodíku s kyslíkem. Jeho výpočet lze provést následovně [11, 14, 18]:

$$U_{e,k} = \frac{-\Delta G_{H_2O(k)}}{zF} = 1,229 \text{ V}. \quad (7.12)$$

Pokud uvažujeme, že veškerá volná Gibbsova energie může být převedena na elektrickou energii, ideální účinnost palivového článku za normálních podmínek je [14]:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-\Delta G_{H_2O(k)}}{\Delta H_{HHV}} = \frac{237,13}{285,83} \cdot 100\% = 83\%. \quad (7.13)$$

Napěťová účinnost daného palivového článku je definována jako poměr mezi naměřeným a ideálním napětím. Naměřené napětí je vždy nižší než ideální hodnota, a to kvůli ztrátám v palivovém článku [14, 18],

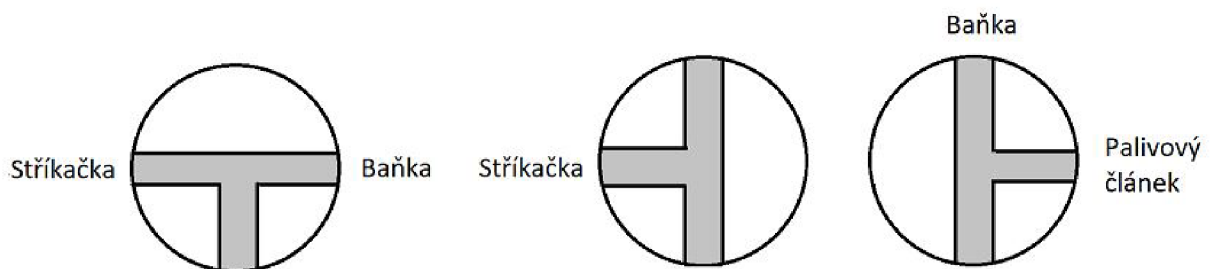
$$\eta_{napětí} = \frac{U}{U_{e,k}} \cdot 100\%. \quad (7.14)$$

### 7.1.5 Postup měření

1. Spusťte program Fuel Cell Monitor, který je určený k měření VA charakteristik palivového článku.
2. Navažte množství zinku v rozmezí 0,6-0,7 g.
3. Zkontrolujte, že držák s magnetem je umístěný na baňce a mechanismus uvnitř baňky je uzavřený. Vyjměte vnitřní špunt a vložte navážené množství zinku v ochranných rukavicích. Opět uzavřete.

### Vysátí vzduchu z baňky a výroba vodíku

4. Zkontrolujte, že je správné nastavení na trojcestném kohoutu, že je propojena pouze plynová stříkačka s baňkou, jako na obrázku (7.3) vlevo.
5. Natáhněte vzduch do plynové stříkačky. NEDOTÝKEJTE SE PÍSTU PLYNOVÉ STŘÍKAČKY. Otočením kohoutu propojíte stříkačku s volným vývodem, obrázek (7.3) uprostřed. Stlačením pístu vypustíte vzduch ven.
6. Vraťte trojcestný kohout do původní polohy a proces opakujte dvakrát.
7. Po ukončení vysávání vzduchu uzavřete škrtítko na hadičce připojené k baňce. Nastavte kohout do polohy, kdy bude propojená pouze baňka a palivový článek, obrázek (7.3) vpravo.
8. Pracoviště si nechte zkontrolovat.



Obr. 7.3: Nastavení trojcestného kohoutu

9. Odstraňte držák s magnetem. Když granule zinku spadnou do kyseliny, reakce začne probíhat. Uvolněte škrtítko, aby mohl vodík proudit do palivového článku.
10. Začněte měřit čas na stopkách.

### Měření charakteristik

11. Zvolte „Measurement options“ a následně „Manual“. Klikněte na tlačítko „Start“, nejprve bude změřena VA charakteristika, poté klikněte znovu na tlačítko „Start“ a sledujte výkon palivového článku v závislosti na čase.
12. V levém okně nahoře je označeno žlutě napětí a proud, při kterém má článek největší výkon. Posunutím tohoto bodu na VA charakteristice, lze pozorovat, jak se mění výkon článku.
13. Pro změření VA charakteristiky zvolte „Measurement options“ a poté „Automatic“. Pro uložení zvolte „File“ a následně „Save measurement data“. Data lze v programu uložit pouze v případě, že se provádí měření VA charakteristiky tímto postupem.

## **Závěr**

V závěru protokolu vyhodnoťte výsledky měření, zda odpovídají teoretickým předpokladům a případné odchylky odůvodněte. Dále do protokolu vypracujte všechny body ze zadání.

## 8 Vypracovaný protokol

### Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektrotechnologií

#### Měření charakteristik palivového článku PEM a výpočet jeho účinnosti

Název předmětu

Jméno a příjmení	Naměřeno dne	Odevzdáno dne	Teplota 21,3 °C
ID	Ročník, skupina	Hodnocení	Vlhkost 26 %
Spolupracovali			Tlak 974 hPa

## 8.1 Cíle úlohy

Cílem úlohy je seznámení s palivovým článkem a procesy, které v něm probíhají. Dále je cílem změřit voltampérovou (VA) charakteristiku palivového článku PEM (proton exchange membrane) pomocí vyrobeného vodíku reakcí kyseliny chlorovodíkové se zinkem a následně vypočítat jeho účinnost a množství vyrobeného a spotřebovaného vodíku.

## 8.2 Zadání

1. Spočítejte množství vyrobeného vodíku. Využijte naváženou hmotnost zinku.
2. Změřte VA charakteristiku palivového článku pomocí měřicí karty H-TEC. Ze změřených dat vynesete do jednoho grafu VA a výkonovou charakteristiku.
3. Stanovte místo maximálního výkonu, tedy při jakém napětí má palivový článek největší výkon, a bod označte v grafu. Sledujte, jak se mění jeho výkon při změnách odebíraného proudu.
4. Spočítejte napětovou účinnost palivového článku.
5. Spočítejte, kolik vodíku bylo spotřebováno během měření, kdy palivový článek udržoval stabilní výkon, než začal postupně klesat, až dosáhl nuly.

## 8.3 Teoretický rozbor

Palivový článek je zařízení, které přeměňuje chemickou energii na elektrickou pomocí elektrochemických reakcí, které probíhají ve článku. Jedná se tedy o chemickou akumulaci energie [1].

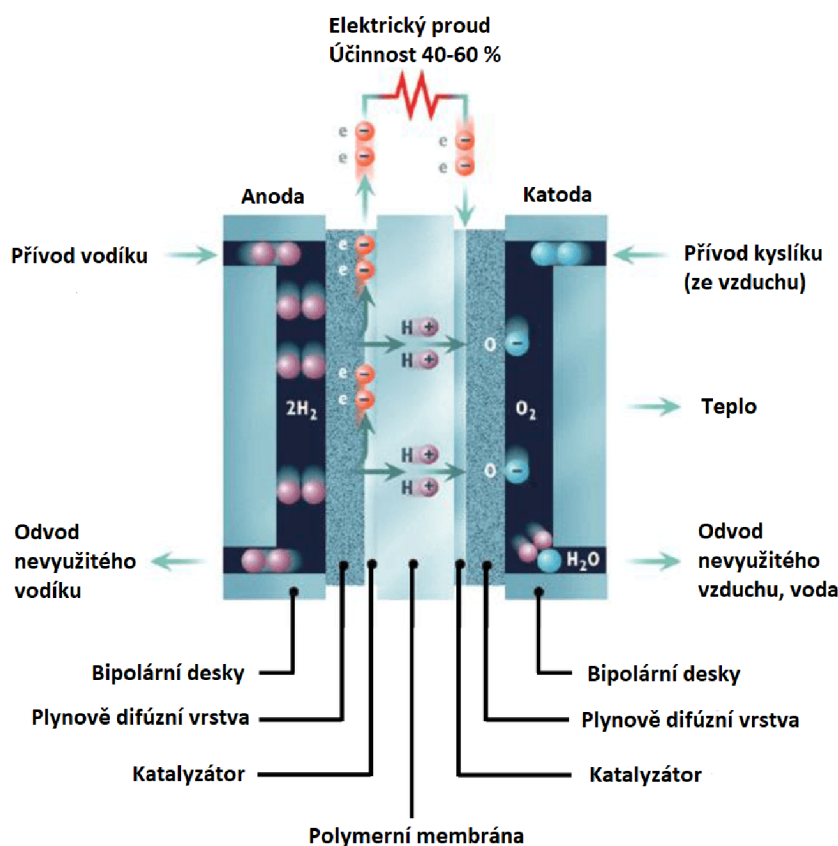
Součástí palivového článku jsou dvě elektrody, anoda a katoda, které jsou oddělené elektrolytem. Základní princip přeměny energie je pro různé druhy palivových článků stejný, ale mohou se lišit materiálem elektrod, použitým elektrolytem, pracovní teplotou a chemickými reakcemi, které probíhají na katodě a anodě. U palivového článku PEM je elektrolytem polymerní membrána. Používaným palivem je vodík a okysličovadlem kyslík ze vzduchu. Na anodu je přiveden vodík a je rozložen na kladně nabitě vodíkové ionty a elektrony. Uvolněné elektrony jsou z anody vedeny na katodu vnějším prostředím. Na katodu je přiváděn kyslík, který je redukován na kyslíkové anionty, které spolu s vodíkovými kationty a elektrony tvoří molekuly vody [1],



Palivový článek je složen z několika klíčových částí, které lze vidět na obrázku (8.1). Centrální součástí je MEA (membrane electrode assembly), která se skládá z dvou plynově difúzních vrstev, dvou těsnících vrstev a polymerní membrány umístěné mezi dvěma katalytickými vrstvami. Polymerní membrána má hlavní úlohu v přenosu vodíkových kationtů a oddělení anody a katody. Katalytické vrstvy zvyšují rychlost probíhajících reakcí na elektrodách, a často se pro jejich výrobu používají materiály jako jsou drahé kovy. Tyto materiály společně s polymerní membránou tvoří nejdražší části palivového článku. Další důležitou součástí jsou sběrné elektrody, které přenášejí elektrický proud z elektrod do vnějšího obvodu [1].

Palivové články dosahují nejvyššího výstupního napětí ve stavu naprázdno, tedy bez zátěže. S rostoucím proudem procházejícím článkem, napětí článku klesá. Hodnota proudu je závislá na hodnotě elektrické zátěže, která je k článku připojena. Křivka zobrazující závislost mezi napětím a proudem se nazývá voltampérová charakteristika. Na křivce lze rozlišovat tři části. Jedná se o aktivační polarizaci, ohmické ztráty a koncentrační polarizaci, jak lze vidět na obrázku (8.2). U palivového článku dochází k ztrátám v důsledku nárůstu ohmického odporu, tedy poklesu iontové vodivosti elektrolytu. Ke koncentrační polarizaci dochází při vyšších hodnotách proudu, protože se snižuje schopnost reaktantů difundovat k místu reakce, a to vede k prudkému poklesu výkonu kvůli nedostatku reaktantů v místě reakce. Odchylka napětí článku od jeho ideálního napětí je výsledkem součtu těchto faktorů [1].

Pro výpočet účinnosti palivového článku lze zvolit buď hodnotu spalného tepla (HHV) nebo výhřevnosti (LHV). Pro stanovení účinnosti je běžným postupem vy-



Obr. 8.1: Palivový článek, převzato z: [2]

počítat podíl vyrobené elektřiny a HHV použitého paliva. Maximální teoreticky dosažitelná elektrická účinnost pro palivový článek může být stanovena podílem Gibbsovy volné energie a spalného tepla paliva v jednotkách kJ/mol. Gibbsova volná energie vody v kapalném stavu  $\Delta G_{H_2O(k)}$  je 237,13 kJ/mol [4]:

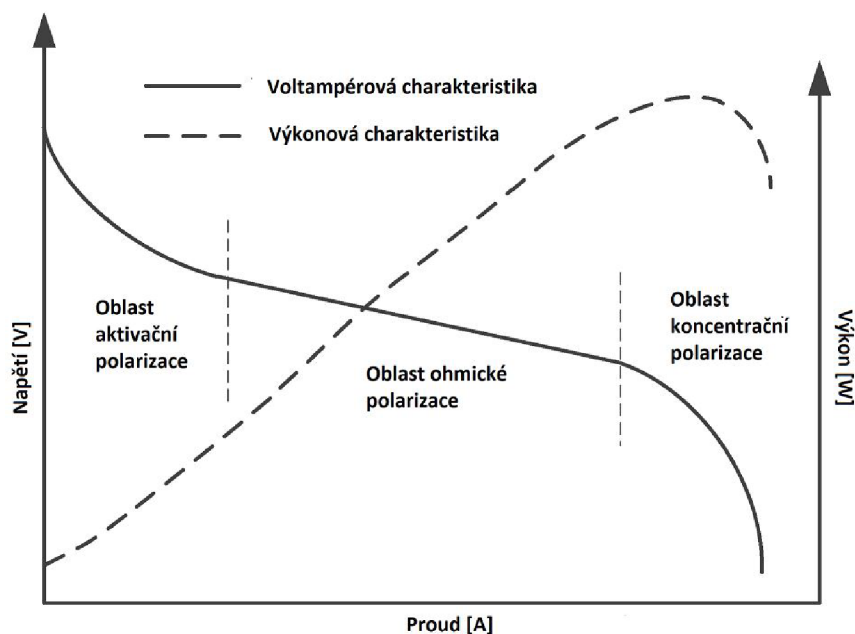
$$\eta_{id} = \frac{\Delta G_{H_2O(k)}}{HHV(H_2)} = \frac{237,13}{285,83} \cdot 100\% = 83\%. \quad (8.2)$$

Vodní pára z vodíku a kyslíku má Gibbsovu volnou energii  $\Delta G_{H_2O(p)}$  228,6 kJ/mol. Na základě toho je maximální teoretická účinnost využívající výhřevnost (LHV) vodíku vypočítána jako [4]:

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G_{H_2O(p)}}{LHV(H_2)} = \frac{228,6}{241,82} \cdot 100\% = 94,5\%. \quad (8.3)$$

Při výpočtu elektrické účinnosti je nezbytné specifikovat metodu výpočtu (HHV nebo LHV) [4].

Kvůli ztrátám vnitřního odporu nemohou palivové články dosáhnout maximální elektrické účinnosti. Například i při provozu blízko svého maximálního výkonu může palivový článek vyprodukovat pouze 154 kJ elektřiny na mol spotřebovaného vodíku,



Obr. 8.2: Voltampérová charakteristika palivového článku, převzato z: [3]

přičemž zbytek výhřevnosti se jeví jako teplo produkované palivovým článkem. Proto je účinnost takového palivového článku 54 % [4],

$$\eta = \frac{154}{285,83} \cdot 100 \% = 54 \% \quad (8.4)$$

Napěťová účinnost se počítá, pokud chceme vypočítat účinnost pouze palivového článku, a ne celého systému. Určuje se podílem skutečného napětí na článku a elektromotorického napětí  $U_{e,k}$ ,

$$\eta_{\text{napětí}} = \frac{U}{U_{e,k}}, \quad (8.5)$$

elektromotorické napětí palivového článku je vypočítáno pomocí Gibbsovy volné energie a Nerstovy rovnice,

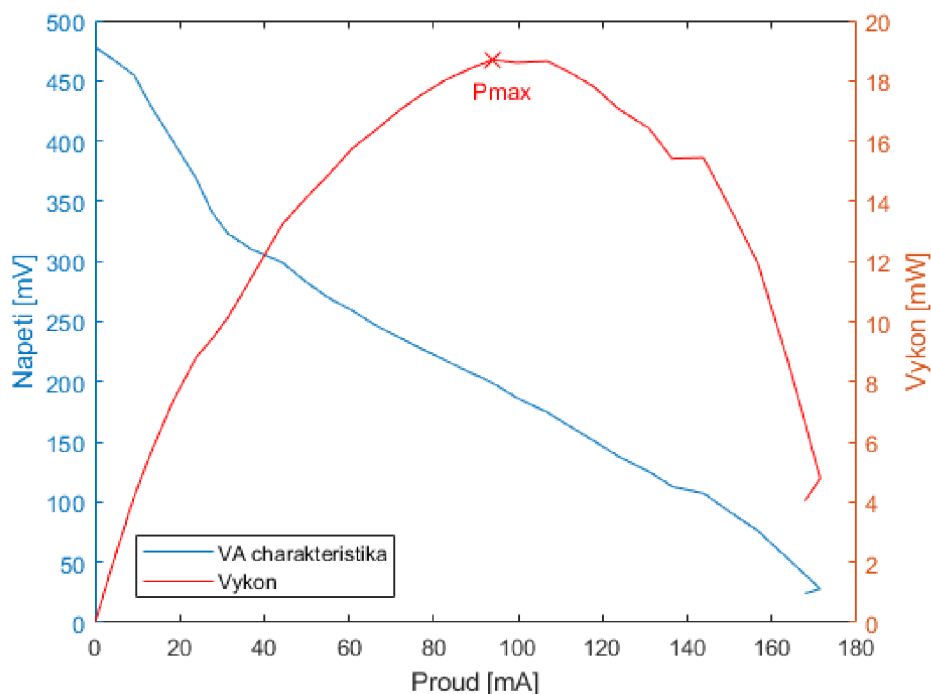
$$U_{e,k} = \frac{\Delta G_{H_2O(k)}}{z \cdot F} = \frac{237,13}{2 \cdot 96485} = 1,229 \text{ V}, \quad (8.6)$$

kde za normálních podmínek  $z$  je počet přesunutých elektronů je 2 a  $F$  je Faradayova konstanta rovna 96 485 C/mol [4].



## 8.4 Naměřená data a výpočty

### Voltampérová a výkonová charakteristika



Obr. 8.3: Naměřená VA a výkonová charakteristika

$$P_{max} = 18,7 \text{ mW}$$

$$I = 94 \text{ mA}$$

$$U = 199 \text{ mV}$$

### Výpočet napěťové účinnosti

$$\eta_{\text{napětí}} = \frac{U}{U_{e,k}} = \frac{0,4696}{1,229} \cdot 100\% = 38\% \quad (8.7)$$

### Výpočet množství vyrobeného vodíku

V chemické reakci reaguje 0,6524 g Zn se 35% HCl. Nejprve se spočítá, kolik molů je 0,6524 g zinku,

$$n = \frac{m}{M} = \frac{0,6524}{65,38} = 9,98 \cdot 10^{-3} \text{ mol}. \quad (8.8)$$

Z chemické reakce vyplývá, že zinek a vodík mají stejné látkové množství, počet molů Zn a H<sub>2</sub> bude tedy stejný. Hustota vodíku je  $8,993 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ . Následně se může vypočítat hmotnost a objem vodíku podle následujících rovnic:

$$m = n \cdot M = 9,98 \cdot 10^{-3} \cdot 2,016 = 0,02 \text{ g}, \quad (8.9)$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,02}{8,993 \cdot 10^{-5}} = 223,7 \text{ cm}^3. \quad (8.10)$$

### Výpočet množství spotřebovaného vodíku

$$m = \frac{M_{H_2} \cdot I \cdot t}{z \cdot F} = \frac{2,0158 \cdot 0,094 \cdot 594}{2 \cdot 96485} = 5,83 \cdot 10^{-4} \text{ g}, \quad (8.11)$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5,83 \cdot 10^{-4}}{8,993 \cdot 10^{-5}} = 6,5 \text{ cm}^3. \quad (8.12)$$

## 8.5 Závěr

V této laboratorní úloze bylo cílem změřit a vyhodnotit VA a výkonovou charakteristiku palivového článku PEM pomocí měřicí karty a počítačového programu. Naměřené hodnoty palivového článku byly vyneseny do jednoho grafu a byl odečten bod maximálního výkonu, který je 18,7 mW při odebíraném proudu 94 mA a napětí 119 mV. Maximální napětí dosažené naprázdno, když nebyl odebírán žádný proud, je rovno 470 mV. Maximální napětí dosažené naprázdno, když nebyl odebírán žádný proud, je rovno 470 mV. Pokles od ideálního napětí, které je 1,229 V, je očekávaný podle vlastností palivového článku. Naměřené napětí naprázdno, je ale relativně nízké. Existuje několik faktorů, které vyšší pokles napětí mohou způsobovat, například nečistoty v palivu nebo degradace komponent. Na voltampérové křivce lze rozlišit tři polarizační oblasti: aktivační, polarizační a koncentrační. Napěťová účinnost palivového článku byla vypočítána na 38 %, obvykle se účinnost tohoto typu palivového článku pohybuje mezi 40 a 60 %.

Následně posunutím kurzoru na VA charakteristice v počítačovém programu bylo možné sledovat závislost výkonu na čase při rozdílných hodnotách odebíraného proudu. Jak při nižších hodnotách proudu, než je 107 mA, tak i vyšších, došlo ke snížení výkonu přibližně na 12 mW, což potvrzuje, že příliš nízká, ale i zároveň vysoká zátěž snižuje výkon palivového článku.

V chemické reakci reagovalo přibližně 0,6 g zinku a 4 ml 35% HCl. Teoretické množství vyrobeného vodíku bylo 223,7 cm<sup>3</sup>. Měřil se čas, dokud má palivový článek stabilní výkon, po 10ti minutách jeho výkon začal postupně klesat a měření času bylo ukončeno. Při odebíraném proudu 107 mA palivový článek za necelých 10 minut spotřeboval 6,5 cm<sup>3</sup> vodíku. Při této spotřebě by měl palivový článek teoreticky pracovat po dobu pěti hodin.

## 8.6 Literatura

- [1] TELLEZ-CRUZ, Miriam M.; ESCORIHUELA, Jorge; SOLORZA-FERIA, Omar a COMPAÑ, Vicente. *Proton exchange membrane fuel cells (Pemfcs): Advances and challenges*. Online. Polymers. 2021, roč. 13, č. 18, s. 3064. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym13183064>. [cit. 2024-04-28].
- [2] SPIEGEL, C. *Fuel Cell Characterization*. 2021. Dostupné z: [https://www.fuel\\_cellstore.com/blog-section/fuel-cell-characterization](https://www.fuel_cellstore.com/blog-section/fuel-cell-characterization). [cit. 2024-04-22].
- [3] Zhou J, Zhang Q, Li J. *Topology and Control of Fuel Cell Generation Converters*. Energies. 2023; 16(11):4525. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en16114525>. [cit. 2024-04-22].
- [4] HARRISON, K.W., REMICK, R., a MARTIN, G.D. *Hydrogen Production: Fundamentals and Cas Study Summaries*. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>. [cit. 2024-04-22].

# Závěr

Diplomová práce popisuje přípravu laboratorní úlohy zaměřené na seznámení s palivovými články a vodíkovým hospodářstvím. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat laboratorní úlohu pro studenty bakalářských programů, která zahrnuje jak teoretickou část o palivových článcích obecně, s důrazem na palivové články typu PEM, tak i praktickou část s měřením jejich charakteristik, výpočty účinnosti a seznámení s chemickými pojmy a procesy spojenými s jejich fungováním.

Pro sestavení laboratorní úlohy byly vybrány vhodné komponenty a zařízení, aby byla zajištěna funkčnost a bezpečnost při provádění úlohy. Laboratorní úloha byla úspěšně ověřena prostřednictvím opakovaných měření, která potvrdila správnost postupů a funkčnost navrženého zařízení.

První část diplomové práce se věnuje teoretickému úvodu, který se zaměřuje na různé způsoby akumulace energie s důrazem na chemickou akumulaci, zejména v kontextu vodíkového hospodářství. Jsou zde popsány způsoby výroby vodíku, jeho uskladnění a typy palivových článků, s hlavním zaměřením na články s polymerní membránou.

Další částí diplomové práce je detailní popis přípravy laboratorní úlohy a jednotlivých komponent. Pro úlohu je vytvářen vodík pomocí chemické reakce mezi kyselinou chlorovodíkovou a zinkem. Pro zajištění bezpečnosti byla navržena a vytištěna součástka na 3D tiskárně, která umožňuje bezpečné vhození granulí zinku do baňky. Dále je provedeno vysání vzduchu z baňky pomocí plynotěsné stříkačky, aby bylo vytvořeno bezkyslíkové prostředí a předešlo se tak ředění vodíku vzduchem. Následně je vyrobený vodík směřován do palivového článku a jsou měřeny jeho charakteristiky. Před provedením experimentu je nezbytné aktivovat palivový článek, aby byla obnovena vlhkost membrány, která postupně klesá v důsledku nečinnosti článku, a aby byla stabilizována jeho výkonnost.

Poslední částí diplomové práce jsou teoretické podklady pro provedení laboratorní úlohy, zahrnující zadání úlohy, teoretický úvod, postup, vypracovaný protokol s vyhodnocenými výsledky.

První aktivace palivového článku probíhala nepřetržitě po dobu 72 hodin (výroba vodíku elektrolýzou vody), během které dosáhl maximálního výkonu 155 mW, při odebíraném proudu 400 mA a napětí 380 mV. Palivový článek však postupem času ztrácí svůj výkon v době nečinnosti, a proto je nezbytné provést aktivaci před každým měřením. V následujícím měření byl na palivovém článku zaznamenán maximální výkon 92 mW, při odebíraném proudu 234 mA a napětí 380 mV. Lze pozorovat nejen pokles výkonu, ale také snížení napětí naprázdno.

Po připojení palivového článku k baňce s vyrobeným vodíkem bylo provedeno měření, přičemž byl zaznamenán výrazný pokles v naměřeném výkonu. Maximální

dosážený výkon byl 18,7 mW při odebíraném proudu 94 mA a napětí 199 mV. Tento pokles pravděpodobně souvisel s čistotou použitého vodíku, která je výrazně nižší než u vodíku získaného elektrolyzou vody. Navzdory nižšímu výkonu je možné pomocí tohoto přístupu provádět měření na palivovém článku po dostatečně dlouhou dobu, přibližně 10 minut, a dosáhnout tak naměření potřebných charakteristik. Je také možné sledovat stabilitu výkonu palivového článku v čase, která je srovnatelná s měřeními pomocí elektrolyzéry.

Součástí úlohy byl také výpočet množství vyrobeného chemickou reakcí, které bylo 223,7  $cm^3$ . Palivový článek udržoval stabilní výkon po dobu 10 minut, následně jeho výkon začal postupně klesat až na nulu po několik dalších minut z důvodu nedostatku vodíku. Množství spotřebovaného vodíku bylo měřeno během stabilního provozu článku a bylo vypočteno 6,5  $cm^3$  spotřebovaného vodíku. Velký rozdíl mezi vypočítaným a spotřebovaným množstvím je způsoben vysokým průtokem vodíku na začátku reakce, který není regulován, a nadbytečné množství je odváděno z palivového článku jako nevyužité palivo. Dále k rozdílu přispívá množství vodíku, které zůstává v baňce na konci reakce. Pokud by bylo vyrobeno menší množství vodíku, nebyl by zajištěn kontinuální provoz po dostatečně dlouhou dobu.

Napěťová účinnost palivového článku v této laboratorní úloze dosáhla 38 %, zatímco napěťová účinnost palivového článku s použitím elektrolyzéry byla 74 % (nebereme v úvahu účinnost elektrolyzéry), což je výrazně vyšší hodnota. Tyto výsledky se týkají stejného typu palivového článku. Chemická reakce pro výrobu vodíku je často využívána v laboratořích, nicméně z naměřených hodnot je patrné, že elektrolyza vody je vhodnější pro průmyslové aplikace, nejen kvůli vyšší čistotě vodíku.

## Literatura

- [1] Sandoval Bustamante, J, Singh, A, Soto Crisanto, MI, Joao, I, a Mohsin, B. *Comparative Analysis of Mechanical Energy Storage Systems*. Long Beach, California, USA. August 6–8, 2023. V001T04A001. ASME. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/POWER2023-108530>. [cit. 2024-04-22].
- [2] MITALI, J.; DHINAKARAN, S. a MOHAMAD, A.A. *Energy storage systems: a review*. Online. Energy Storage and Saving. 2022, roč. 1, č. 3, s. 166-216. ISSN 2772-6835. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>. [cit. 2024-04-22].
- [3] SAZALI, Norazlianie. Emerging technologies by hydrogen: A review. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2020, roč. 45, č. 38, s. 18753-18771. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.021>. [cit. 2023-12-02].
- [4] National Center for Biotechnology Information. *Hydrogen*. PubChem Compound Summary for CID 783. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Hydrogen>. [cit. 2024-04-22].
- [5] ISHAQ, Haris; DINCER, Ibrahim a CRAWFORD, Curran. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. Online. *International journal of hydrogen energy*. 2022, roč. 47, č. 62, s. 26238-26264. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>. [cit. 2023-12-02].
- [6] Balat, M. *Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems*. International Journal of Hydrogen Energy Volume 33, Issue 15, August 2008, Pages 4013-4029. Dostupné z: <https://rmi.org/the-truth-about-hydrogen/>. [cit. 2024-04-22].
- [7] SHIVA KUMAR, S. a HIMABINDU, V. *Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review*. Online. Materials science for energy technologies. 2019, roč. 2, č. 3, s. 442-454. ISSN 2589-2991. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>. [cit. 2024-04-22].
- [8] USMAN, Muhammad R. *Hydrogen storage methods: Review and current status*. Online. Renewable and sustainable energy reviews. 2022, roč. 167, s. 112743. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112743>. [cit. 2024-04-22].

- [9] BAILEY, Alla, Lisa ANDREWS, Ameya KHOT, Lea RUBIN, Jun YOUNG, Thomas D ALLSTON a Gerald A TAKACS. *Hydrogen Storage Experiments for an Undergraduate Laboratory Course/Clean Energy: Hydrogen/Fuel Cells*. Journal of chemical education [online]. WASHINGTON: American Chemical Society and Division of Chemical Education, 2015, **92**(4), 688-692 [cit. 2023-03-16]. ISSN 0021-9584. Dostupné z: doi:10.1021/ed5006294
- [10] Chapter 8: Overview of Fuel Cell Types. In: *Fuel Cell Fundamentals*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2016, s. 269-302. ISBN 9781119113805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119191766.ch8>.
- [11] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. 2002 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [12] YUAN, Xiao-zi; SHAIGAN, Nima; SONG, Chaojie; AUJLA, Mantaj; NEBUR-CHILOV, Vladimir et al. *The porous transport layer in proton exchange membrane water electrolysis: perspectives on a complex component*. Online. Sustainable energy & fuels. 2022, roč. 6, č. 8, s. 1824-1853. ISSN 2398-4902. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/D2SE00260D> [cit. 2024-01-04].
- [13] Battery university. *How does the Fuel Cell Work?* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/fuel\\_cell\\_technology](http://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology)
- [14] KABZA, Alexander. *Fuel Cell Formulary* [online]. 2016 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [http://www.pemfc.de/FCF\\_Smart.pdf](http://www.pemfc.de/FCF_Smart.pdf)
- [15] BEN, Selméne, Hatem ALLAGUI a Abdelkader MAMI. *The Identification of Randles Impedance Model Parameters of a PEM Fuel Cell by the Least Square Method*. International journal of advanced computer science & applications [online]. West Yorkshire: Science and Information (SAI) Organization Limited, 2017, **8**(8) [cit. 2023-04-06]. ISSN 2158-107X. Dostupné z: doi:10.14569/IJACSA.2017.080845
- [16] ŠPALKOVÁ, Zuzana a Věra VYSKOČILOVÁ. *Doplňkový studijní materiál: Chemické výpočty* [online]. Brno, 2014 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://www.vfu.cz/files/2110\\_021\\_spalkova.pdf](https://www.vfu.cz/files/2110_021_spalkova.pdf)
- [17] Hydrogen to system. *Fuel cell* [online]. [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://h2sys.fr/en/technology/fuel-cell/>

- [18] PILATOWSKY, I., R.J. ROMERO, C.A. ISAZA, S.A. GAMBOA, P.J. SEBASTIAN a W. RIVERA. *Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning* [online]. In: . 2011 [cit. 2023-04-22]. ISBN 978-1-84996-028-1. Dostupné z: <https://wme-z1.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2017/05/thermodynamics-of-fuel-cell-1.pdf>