

Vlastnosti a aplikace palivových článků

Tomáš Pacáček

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Tomáš Pacáček
Osobní číslo:	T23415
Studijní program:	B0788A270001 Procesní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vlastnosti a aplikace palivových článků

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši dané problematiky na základě doporučené literatury.
- Na demonstračním zařízení proměřte charakteristiky a vlastnosti vodíko-kyslíkového palivového článku.
- V diskuzi vyhodnotte naměřené charakteristiky a vlastnosti vodíko-kyslíkových palivových článků.
- Uvedte příklady aplikace palivových článků v praxi.
- Citujte použitou literaturu

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Mastný, P. a kol.: Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT v Praze, 2011.
2. Porš, M.: Palivové články, ÚJV Řež, 2002.
3. Český, A. a kol.: Palivové články-progresivní technologie pro ekologickou výrobu energie, ČEA Praha, 2003.
4. Srinivasan, S.: Fuel Cells. From Fundamentals to Applications, Springer, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 10. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou palivových článků jako jedné z perspektivních technologií pro výrobu elektrické energie v kontextu probíhající transformace globální energetiky směrem k udržitelnosti a dekarbonizaci.

Teoretická část se zaměřuje na podrobné vysvětlení principu činnosti palivových článků, jejich klasifikaci, vhodná paliva (zejména vodík), a srovnání klíčových parametrů. Součástí je také kapitola o současných i budoucích možnostech nasazení palivových článků v praxi.

Praktická část se věnuje laboratornímu měření vodíko-kyslíkového palivového článku. Zahrnuje měření voltampérových a výkonových charakteristik článku, výpočet jeho účinnosti a základní parametry elektrolyzéru jakožto zdroje vodíku. Cílem této části je ověření funkce článku v kontrolovaných podmínkách a porovnání dosažených výsledků s teoretickými předpoklady.

Klíčová slova: palivový článek, vodík, PEMFC, SOFC, MCFC

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the issue of fuel cells as one of the promising technologies for electricity generation in the context of the ongoing transformation of global energy systems toward sustainability and decarbonization.

The theoretical part focuses on a detailed explanation of the operating principles of fuel cells, their classification, suitable fuels (particularly hydrogen), and a comparison of key parameters. It also includes a chapter on the current and future possibilities of fuel cell deployment in practical applications.

The practical part is dedicated to laboratory measurements of a hydrogen-oxygen fuel cell. It includes the measurement of the cell's voltage-current and power characteristics, the calculation of its efficiency, and the basic parameters of the electrolyzer as a hydrogen source. The aim of this section is to verify the fuel cell's functionality under controlled conditions and to compare the obtained results with theoretical assumptions.

Keywords: fuel cell, hydrogen, PEMFC, SOFC, MCFC

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a podporu při realizaci experimentální části, které významně přispěly ke zpracování této práce. V neposlední řadě vyjadřuji vděčnost své rodině a partnerce za morální podporu a vytvoření podmínek pro úspěšné studium.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ZÁKLADNÍ PRINCIP PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	13
1.1 HISTORIE A VÝVOJ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	13
1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIP ČINNOSTI PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	14
2 TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	15
2.1 PROTONOVĚ VÝMĚNNÝ MEMBRÁNOVÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK (PEMFC)	16
2.2 PALIVOVÝ ČLÁNEK S PEVNÝMI OXIDY (SOFC)	18
2.2.1 Popis jednotlivých částí SOFC.....	20
2.3 PALIVOVÝ ČLÁNEK S TAVENÝMI KARBONÁTY (MCFC)	21
2.4 MÉNĚ KOMERČNĚ POUŽÍVANÉ TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	23
2.4.1 PAFC	23
2.4.2 AFC	24
3 TYPY PALIV PRO PALIVOVÉ ČLÁNKY.....	25
3.1 VODÍK A JEHO VÝROBA	25
3.1.1 Výroba vodíku z vody	27
3.2 ALTERNATIVNÍ PALIVA K VODÍKU	28
3.2.1 Metanol	28
3.2.2 Etanol	28
3.2.3 Amoniak.....	28
3.2.4 Metan.....	29
4 VÝHODY A NEVÝHODY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	30
5 APLIKACE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ V PRAXI.....	31
5.1 DOPRAVA	31
5.1.1 Automobily na vodíkový pohon.....	31
5.1.2 Letadla a lodě využívající palivové články	32
5.1.3 Vlaky využívající palivové články	33
5.2 STACIONÁRNÍ APLIKACE.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
6 LABORATORNÍ MĚŘENÍ	37
6.1 MĚŘENÍ VOLTAMPÉROVÉ A VÝKONOVÉ KŘIVKY VODÍKO-KYSLÍKOVÉHO PALIVOVÉHO ČLÁNKU	37
6.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY ELEKTROLYZÉRU	43
6.3 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI SOUSTAVY ELEKTROLYZÉR-PALIVOVÝ ČLÁNEK	45
6.4 ŘAZENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	49
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57

SEZNAM OBRÁZKŮ	60
SEZNAM TABULEK.....	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63

ÚVOD

Jelikož se v dnešní době dává velký důraz na udržitelnou energetiku bez závislosti na fosilních palivech, tak se čím dál více v kontextu s touto změnou mluví o palivových článcích a jejich využití ať už jako pohon pro elektro auta, nebo domácí jednotky zajišťující elektřinu a teplo v domácnosti, ale také jako velké elektrárny o výkonu desítek MW.

Téma této bakalářské práce bylo zvoleno s ohledem na současnou transformaci energetické infrastruktury, která je motivována snahou o dekarbonizaci, zvýšení energetické účinnosti a rozvoj nízkoemisních technologií. Nejaktivnější v této problematice jsou hlavně vyspělejší státy jako členové Evropské unie, Velká Británie, Japonsko, Jižní Korea, Čína, ale tato snaha se postupně rozšířila i do rozvojových a rychle se rozvíjejících zemí, jako například Indie, Brazílie a Jihoafrická republika.

Cílem práce je poskytnout komplexní přehled o principech fungování palivových článků, jejich typech, používaných palivech, výhodách i nevýhodách, a především o možnostech jejich praktického uplatnění.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí, teoretické a praktické. Teoretická část shrnuje dostupné poznatky o problematice palivových článků a vytváří základ pro část praktickou, která zahrnuje několik konkrétních laboratorních měření a jejich vyhodnocení.

Teoretická část práce se zaměřuje na rozbor jednotlivých typů palivových článků, jejich konstrukci a fungování. Dále jsou popsány různé druhy paliv a jejich vlastnosti. Součástí práce je také analýza výhod a nevýhod této technologie a přehled aktuálních aplikací palivových článků v dopravě a stacionárních zařízeních.

Praktická část práce je věnována laboratornímu měření charakteristik vodíko-kyslíkového palivového článku. Jsou zde provedeny experimenty zaměřené na měření voltampérových a výkonových křivek, účinnosti sestavy článku a charakteristik elektrolyzéru.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ PRINCIP PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Palivové články patří mezi elektrochemické zdroje energie, které přímo přeměňují chemickou energii paliva na elektrickou energii, respektive na stejnosměrný proud. Funkce palivových článků je podobná klasickým akumulátorům, ve kterých probíhá přeměna chemické energie na energii elektrickou s tím rozdílem, že palivovému článku je externě dodáváno palivo, což mu umožňuje libovolně dlouhodobý provoz. Palivo může být vodík v plynném, nebo kapalném stavu, alternativou k čistému vodíku mohou být nepřímo vodík obsahující paliva, jako jsou uhlovodíky a alkoholy, mezi nejčastěji používané se řadí zemní plyn, metan, propan, metanol a etanol. Základní článek se skládá z porézní katody a porézní anody s hustým elektrolytem vloženým mezi ně. Katoda je hostitelem reakce redukce kyslíku, zatímco na anodě dochází k oxidaci paliva. Palivové články nabízejí nejen vysokou energetickou účinnost a nízké emise, ale představují také další výhody, jako je vysoká hustota energie, flexibilita velikosti, stabilní provoz a spolehlivost. [1][2][3]

1.1 Historie a vývoj palivových článků

Není zcela jasné, kdo jako vůbec první objevil princip palivových článků. Podle ministerstva energetiky Spojených států amerických to byl německý chemik Christian Friedrich Schönbein, kdo v roce 1838 provedl první vědecký výzkum fenoménu palivového článku. V soukromých dopisech které psal Schönbein Faradayovi se ale výslovně zmiňuje, že si nedokáže představit, jak byl Grove schopen generovat energii oxidací kladné elektrody. Sir William Robert Grove v roce 1839 uskutečnil řadu experimentů, které prokázaly možnost vyrobit elektrický proud prostřednictvím chemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem a platinovým katalyzátorem. Na základě zmíněných dopisů je tedy pravděpodobné, že za principem palivového článku stojí právě Sir William Robert Grove. [3][4]

V roce 1896 vyvinul William W. Jacques první palivový článek s praktickými aplikacemi a v roce 1900 Walther Nernst poprvé použil zirkonium jako pevný elektrolyt. [4]

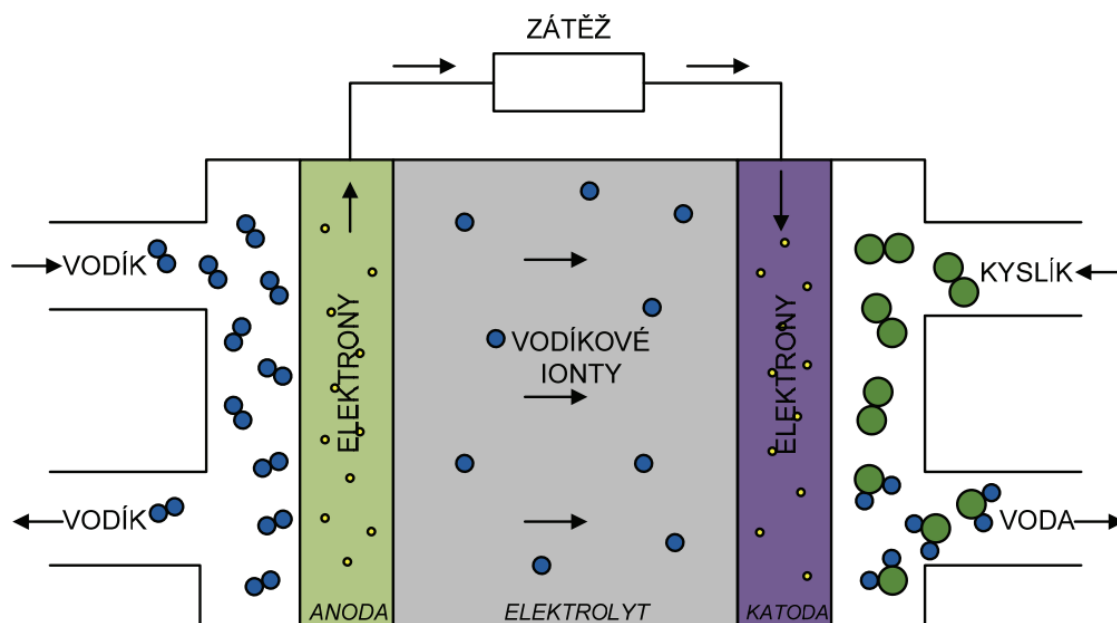
Počátkem roku 1933 lze díky vývoji Thomase Francise Bacona říci, že palivový článek dosáhl svého dospívání. Bacon vyvinul první palivový článek vyrobený z vodíku a kyslíku s praktickým využitím. Následná spolupráce s NASA v 50. letech velkou měrou přispěla k vývoji této technologie.

Palivové články vyvíjené od roku 1970 se vyznačovaly podstatnými aspekty, jako potlačení difúzních omezení v elektrodách, pro získání větší oblasti působení, snížení

nákladů na katalyzátory, zvýšení výkonu a delší životnost. Energetická krize v 70. letech vedla k většímu zájmu o alternativní zdroje energie, následně se vývoj palivových článků zaměřil na jejich využití v energetice a dopravě. [3]

1.2 Základní princip činnosti palivových článků

Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, anody (záporná elektroda) a katody (kladná elektroda), oddělených elektrolytem. Díky chemické reakci na anodě se vodík rozděluje na vodíkové ionty a elektrony. Vodíkové ionty procházejí elektrolytem ke katodě, zatímco elektrony proudí vnějším obvodem a vytvářejí tak elektrický proud. Tento princip je pro všechny typy palivových článků stejný, jednotlivé typy se ale mohou lišit materiálem elektrod, použitým elektrolytem, pracovní teplotou a konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Základní princip palivového článku je znázorněn na Obrázku 1, který zobrazuje vysokoteplotní palivový článek s pevným elektrolytem, kterému je dodáváno jako palivo čistý vodík a jako oksylichovadlo kyslík. [3][5]



Obrázek 1 Základní princip palivového článku

(zdroj: [3])

2 TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Stejně jako u jiných technologických zařízení, tak se i typy palivových článků dělí podle svých specifických provozních parametrů, nebo také podle elektrochemických dějů, které v nich probíhají. Níže uvedená tabulka shrnuje základní charakteristiky tří hlavních typů palivových článků: PEMFC, SOFC a MCFC a jejich odlišnosti z hlediska technických vlastností a aplikací.

Tabulka 1 Srovnání charakteristik PEMFC, SOFC a MCFC.

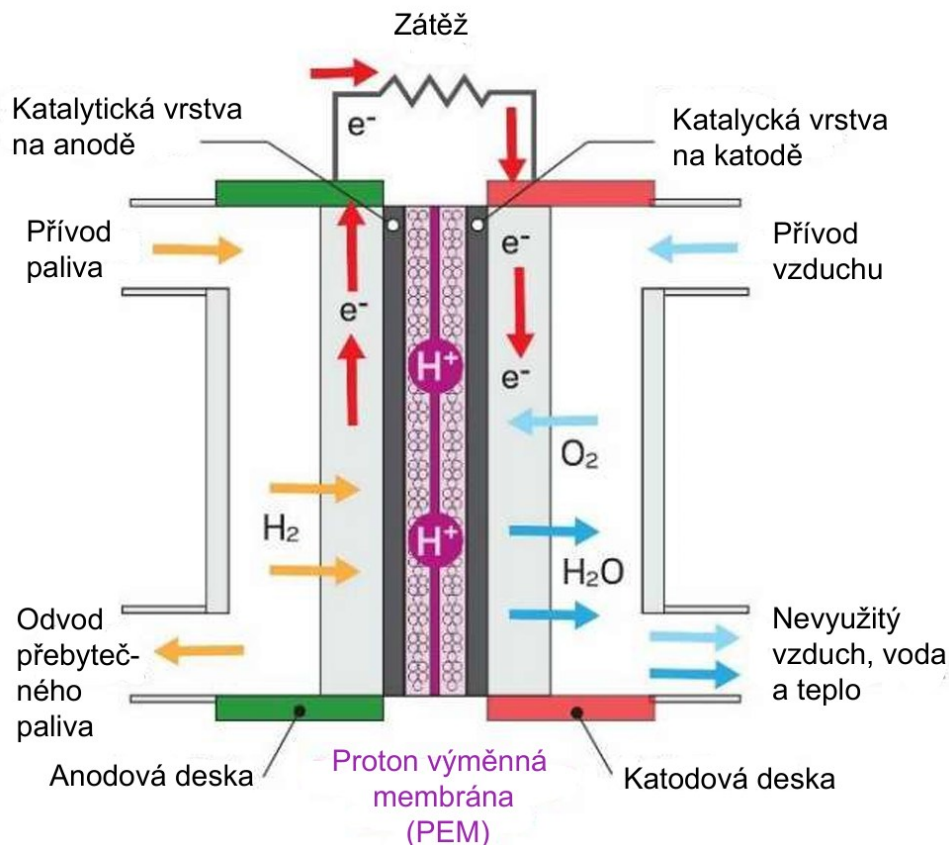
Charakteristika	PEMFC (Protonová membrána)	SOFC (Pevný oxid)	MCFC (Tavené karbonáty)
Provozní teplota (°C)	60–110	500–1000	500–700
Účinnost systému (%)	40–55	40–60	50–60
Kombinovaná účinnost tepla a energie (%)	70–90	<90	>80
Výkon sestavy (kW)	1–100	0,5–2000	300–3000
Hustota energie (kW·h/m ³)	112,2–770	172–462,09	25–40
Hustota výkonu (kW/m ³)	3,8–6,5	4,20–19,25	1,5–2,6
Životnost (hodiny)	2000–3000	1000	7000–8000
Napětí článku (V)	1,1	0,8–1,0	0,7–1,0
Elektrolyt	Polymerní membrána	Stabilizovaný oxid zirkoničitý (YSZ)	Tavené karbonáty
Typ paliva	Vodík	Vodík, zemní plyn, bioplyn, uhlí	Zemní plyn, bioplyn, uhlí
Doba spuštění	<1 min	60 min	10 min
Výhody	1) Malé rozměry 2) Nízká hmotnost 3) Rychlý start a odezva na zátěž 4) Nízká provozní teplota	1) Vysoká účinnost 2) Flexibilita paliva 3) Pevný elektrolyt 4) Vhodné pro kogeneraci 5) Hybridní/plynové turbíny	1) Různorodost paliva 2) Vysoká účinnost

Nevýhody	1) Citlivost na nízké teploty, vlhkost, salinitu a nečistoty v palivu	1) Vysoká provozní teplota 2) Dlouhá doba spuštění 3) Omezený počet vypnutí 4) Intenzivní teplo	1) Pomalejší odezva 2) Vysoce korozivní 3) Nízká hustota výkonu
Aplikace	Doprava, přenosné napájecí zdroje, bezpilotní letecké prostředky (UAV)	1) Doprava, vojenské aplikace, pomocné napájecí jednotky, letecký průmysl 2) Off-grid telekomunikace	Decentralizovaná výroba energie, průmyslové využití

(Zdroj: [5])

2.1 Protonově výměnný membránový palivový článek (PEMFC)

Palivové články s protonovou výměnnou membránou využívají polymerní elektrolytovou membránu k vedení protonů z anody ke katodě. V PEMFC je plynný vodík přiváděn na anodu, kde je rozdělen na vodíkové ionty a elektrony. Ionty jsou vedeny přes membránu polymerního elektrolytu ke katodě, zatímco elektrony protékají vnějším obvodem a generují elektrickou energii. Na katodu je přiváděn kyslík O_2 , který reaguje společně s ionty vodíku H^+ a elektrony. Ionty se spojují s kyslíkem, tím vzniká voda H_2O . Voda je pak z palivového článku odvedena. [3][6]

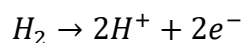


Obrázek 2 Princip PEMFC

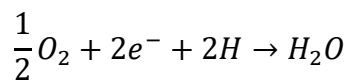
(Zdroj: [7])

Reakce v palivových člancích PEM

Reakce na anodě:

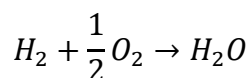


Reakce na katodě:



Iont H⁺ je přes elektrolyt přenášen z anody na katodu vlivem chemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem. Tento mechanismus probíhá souběžně s pohybem elektronů ve vnějším elektrickém obvodu, jak znázorňuje obrázek 4. Reakce probíhající na anodě a katodě jsou vzájemně propojeny a společně tvoří celkovou reakci palivového článku, která zajišťuje jeho funkci.

Celková reakce:



Na katodě se v průběhu provozu hromadí produktová voda, která musí být průběžně odstraňována, aby nedocházelo k omezení dalších chemických reakcí

Jednotlivé články poskytují výstupní napětí přibližně 1,1 V, z toho důvodu bývají vzájemně sériově propojovány pomocí bipolární desky (BPP), díky tomu se napětí sčítá a lze tak sestavit velmi výkonné sestavy. BPP spojuje celý povrch jedné katody (elektricky pozitivní) a celý povrch jedné anody (elektricky negativní) dalšího článku – odtud název bipolární – a poskytuje řadu elektrických spojení mezi sousedními články. [5][8]

MEA (Membrane Electrode Assembly, česky "sestava membrány a elektrod") je klíčovou součástí PEMFC. Zajišťuje místo, kde probíhají elektrochemické reakce vedoucí k výrobě elektrické energie. MEA se skládá z protonově výměnné membrány, katalytické vrstvy a difúzní vrstvy (porézní plyny). Protonově výměnná membrána bývá nejčastěji vyrobena z polymeru nafion. Katalytická vrstva obsahující katalyzátor (obvykle platina nebo její slitiny) je aplikována na obě strany membrány, anodu (pomáhá při oxidaci vodíku) a na katodu (podporuje redukci kyslíku). Difúzní vrstva se nanáší na katalytickou vrstvu membrány. [9]

PEMFC mají několik výhod, včetně vysoké účinnosti, nízkých emisí a rychlého spuštění. Jsou také lehké a kompaktní, takže jsou ideální pro použití ve vozidlech a přenosných elektronických zařízeních. Mají však určitá omezení, včetně vysokých nákladů a citlivosti na nečistoty. [6]

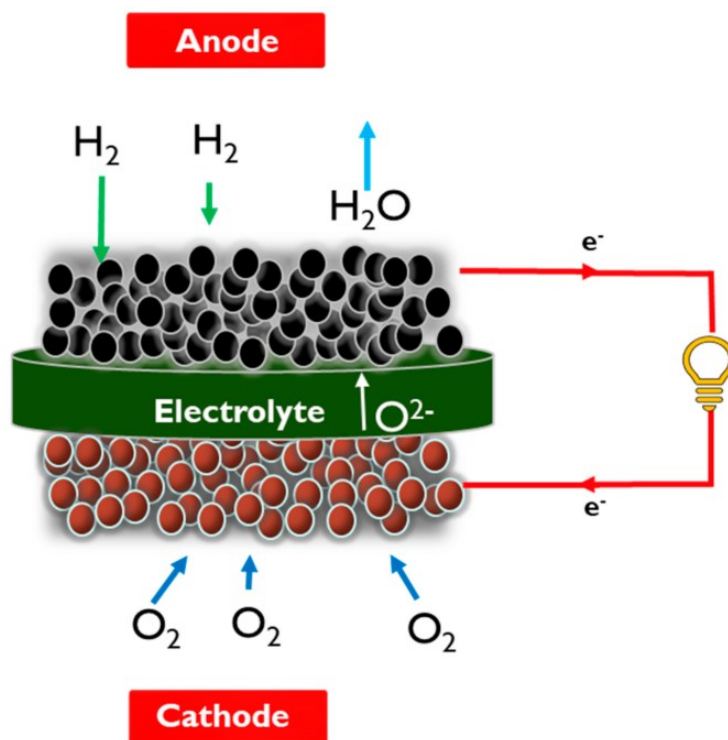
2.2 Palivový článek s pevnými oxidy (SOFC)

SOFC je typ vysokoteplotního palivového článku, jehož elektrolyt je pevný oxid, díky čemuž zvládne pracovat za vysokých teplot v rozmezí 600 a 1000 °C.

Zjednodušeně lze konstrukci SOFC označit jako tzv. sendvičovou strukturu, skládající se ze tří prvků (anoda, katoda, elektrolyt), tyto jsou spojeny kovovou maticí, která zajišťuje shromažďování elektrického proudu a ten následně dodáván do vnějšího obvodu.

Základní princip chemických reakcí (zobrazen na Obrázku 3), se mírně liší oproti PEMFC. Na anodě dochází k elektrochemické oxidaci paliva. Redukce oxidantu probíhá na katodě. Elektrolyt slouží jako selektivní můstek přenášející anionty kyslíku od katody k anodě. Kyslík přiváděný ke katodě se redukuje přijmutím volného elektronu a vzniká tak oxidový aniont. Tento kyslíkový aniont poté prochází keramickým elektrolytem k anodě a reaguje s palivem (vodíkem) přiváděným na anodu, díky čemuž se odtrhává elektron a

vzniká voda a teplo jako vedlejší produkt. Následně se uvolněné elektrony pohybují vnějším obvodem a vytváří tak elektrickou energii. Každý samostatný článek je schopný generovat napětí naprázdno přibližně 1 V, Pro praktické využití se články navzájem sériově propojují, aby produkovaly požadované napětí/výkon. [10]

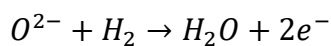


Obrázek 3 Zobrazení základního principu SOFC na bázi oxidově iontového (O-SOFC) elektrolytu

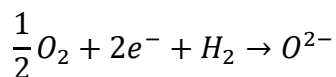
(Zdroj: [10])

Reakce v palivových člancích PEM

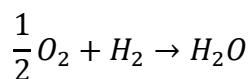
Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Celková reakce:



2.2.1 Popis jednotlivých částí SOFC

Anoda je klíčovou elektrodou palivového článku, kde dochází k oxidaci paliva. Aby plnila svou funkci, musí splňovat několik požadavků: umožňovat rychlou a čistou reakci s palivem, zajišťovat dobrou elektronovou vodivost k propojení s interkonektorem a mít termomechanické vlastnosti a chemickou setrvačnost podobné těm, které mají nejbližší komponenty článku.

Z hlediska materiálů se anody nejčastěji vyrábějí z kovů a uhlíkových sloučenin, jako je nikl, železo, kobalt, platina nebo grafit. Nikl (Ni) je nejobvyklejší volbou díky své relativní cenové dostupnosti. Nicméně má i nevýhody, například odlišný tepelný koeficient ($13,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) oproti elektrolytu ($11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), což může vést k odlupování materiálu. Tento problém je zmírněn přidáním proměnlivé koncentrace yttriem stabilizovaného zirkonia (YSZ) do niklové matrice, což zajišťuje koeficient tepelné roztažnosti podobný elektrolytu a zlepšuje přilnavost anody k YSZ. [10][11] Dalším problémem je tvorba uhlíkových usazenin (coking), která může bránit reakci plynu a vést k poškození struktury. Tento jev lze omezit přidáním malého množství oxidu ceričitého (5 %) a molybdenového (1 %) do cermetu Ni + YSZ. Tato úprava rovněž zlepšuje stabilitu anody během provozu. [10][11] Anody tedy obvykle kombinují materiály jako je Ni/YSZ, které umožňují vysokou elektronovou a iontovou vodivost, rozšíření trojfázové hranice (TPB) a dlouhodobou mechanickou a chemickou stabilitu. [10][11]

Katoda je kyslíková elektroda palivového článku, kde dochází k redukci kyslíku. Stejně jako anoda, i katoda musí splňovat řadu požadavků, mezi něž patří vysoká elektronová vodivost, chemická kompatibilita s ostatními součástmi, a termální stabilita v provozních podmínkách článku. V průběhu času se pro katody vyvinula volba materiálů na bázi perovskitových oxidů, které mají obecný vzorec ABO_3 (například LaMnO_3 , LaCoO_3 , LaFeO_3). Nejčastěji používaným materiálem je lanthanum manganit LaMnO_3 , který je dopován strontiem ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ - LSM), což zlepšuje elektronovou vodivost a umožňuje dosažení dobrého kompromisu mezi vysokou vodivostí a koeficientem tepelné roztažnosti. Pro dosažení širší trojfázové hranice (TPB) je první vrstva katody na straně elektrolytu tvořena směsí LSM prášku a YSZ prášku v poměru 50/50. Aplikace této vrstvy na elektrolyt může probíhat různými metodami, jako je elektrochemické napařování nebo sítotisk. Provozní teplota SOFC podporuje rychlou reakci redukce kyslíku na katodě, což vede k vysoké hustotě výkonu článku. Nicméně, vysoké teploty také zrychlují degradaci materiálů, což zvyšuje náklady a klade přísnější požadavky na těsnění. Snížení provozní teploty na

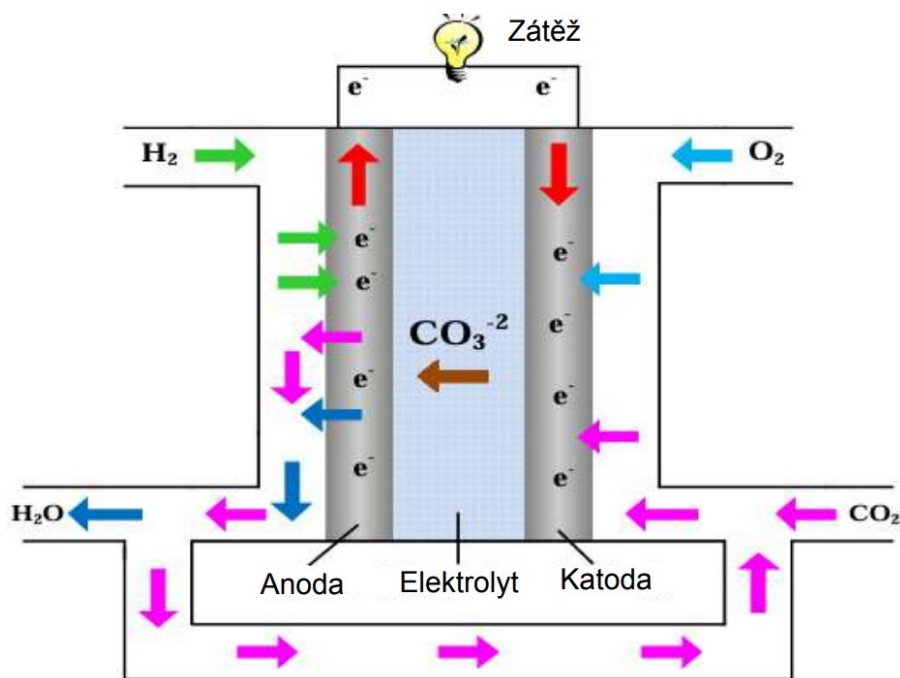
500–700 °C by mohlo částečně vyřešit některé z těchto problémů a prodloužit životnost SOFC. [10][11]

Elektrolyt v SOFC je keramická membrána, která je umístěná mezi vzduchovou a palivovou elektrodou a umožňuje prostup iontových látek přes svou krystalovou mřížku. Materiál elektrolytu musí být dostatečně hustý a měl by mít zanedbatelnou elektronovou vodivost. Obvykle jsou SOFC provozovány při vysokých teplotách (800–1000 °C), aby byla zajištěna dostatečná iontová doprava elektrolytem. Nejmodernějším materiálem pro elektrolyty, který vykazuje vynikající chemickou stabilitu a kompatibilitu s koeficientem tepelné roztažnosti (TEC) Ni/YSZ (anoda) při provozních teplotách, je zirkonium oxid stabilizovaný yttriem (YSZ). Tento materiál je v současnosti nejběžněji používaným elektrolytem v SOFC. Nejčastější metodou výroby elektrolytu je elektrochemické napařování. [10][11]

2.3 Palivový článek s tavenými karbonáty (MCFC)

Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) je typický vysokoteplotní palivový článek, který během provozu produkuje velké množství odpadního tepla. Pro dosažení maximální energetické účinnosti je jedním z klíčových opatření sekundární využití tohoto tepla. Za tímto účelem byl navržen propojený systém skládající se z MCFC, Stirlingova motoru a regenerátoru. V tomto systému slouží MCFC jako zdroj vysokoteplotního tepla pro sekundární energetické zařízení, zatímco Stirlingův motor dále využívá odpadní teplo z MCFC a přeměňuje jej na mechanickou práci. Regenerátor zde funguje jako protiproudý výměník tepla, který efektivně absorbuje část odpadního tepla k přehřátí reagujících látek, čímž se zvyšuje celková energetická účinnost systému. [12]

Jako elektrolyt u MCFC se běžně používá roztavený uhličitan, neboli uhličitanová směs alkalických kovů Li, K, Na a Cs. Materiál membrány bývá složením LiAlO_2 . Častým materiálem pro kladnou a zápornou elektrodu je oxid nikelnatý a porézní nikl s lithiem. Do anody a katody musí být nepřetržitě přiváděn vodík a kyslík, aby byla zachována celá elektrochemická reakce. Při této reakci je produkován oxid uhličitý, který proudí z anody do katody, zatímco uhličitanové ionty proudí z katody na anodu. [12][13] Základní princip MCFC je znázorněn na Obrázku 4.

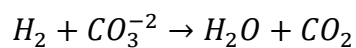


Obrázek 4 Princip MCFC

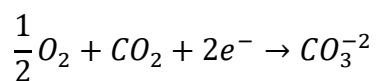
(Zdroj: [12])

Reakce v palivových člancích MCFC

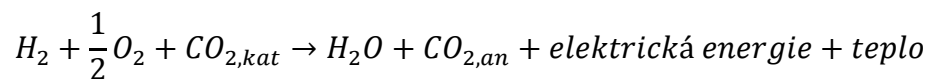
Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Celková elektrochemická reakce:

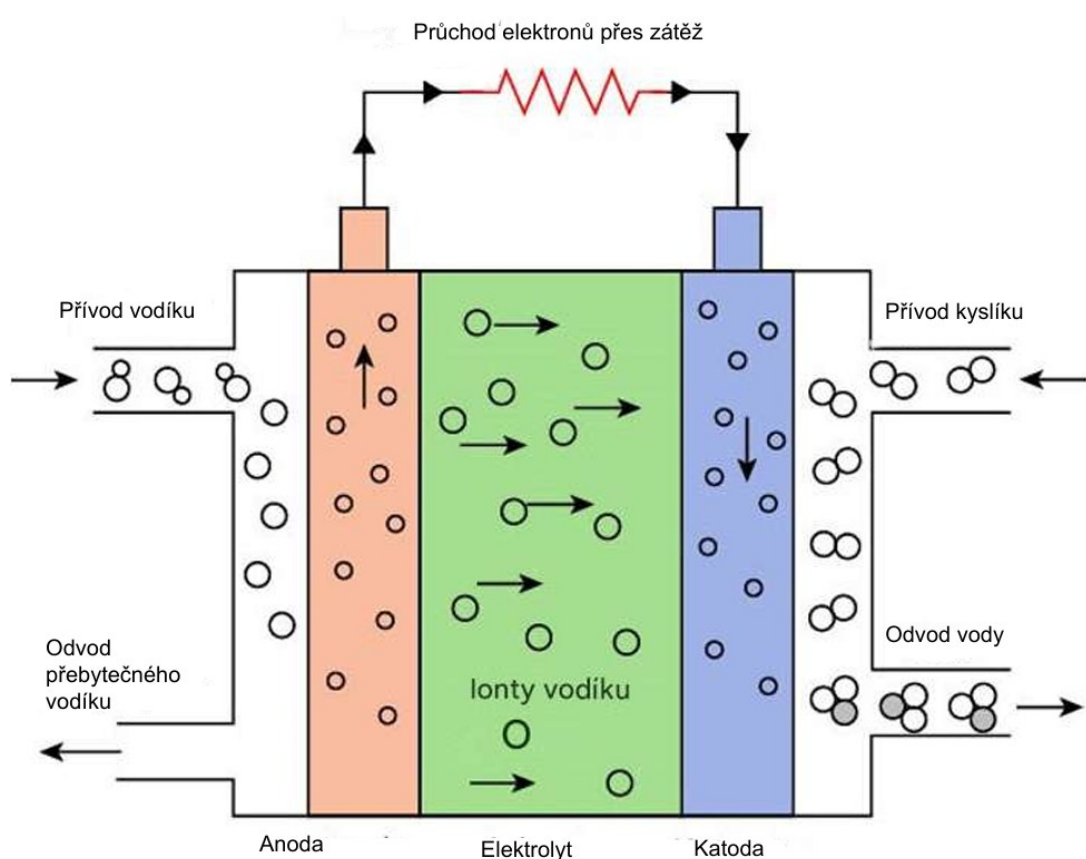


2.4 Méně komerčně používané typy palivových článků

2.4.1 PAFC

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) má obdobný princip jako PEMFC jak lze vidět na Obrázku 6, tedy princip elektrochemické reakce mezi vodíkem a kyslíkem, přičemž dochází k produkci elektřiny, tepla a vody.

Phosphoric Acid, neboli kyselina fosforečná (H_3PO_4) označuje elektrolyt, který je zadržován v porézním materiálu a umožňuje prostup vodíkových iontů z anody na katodu.



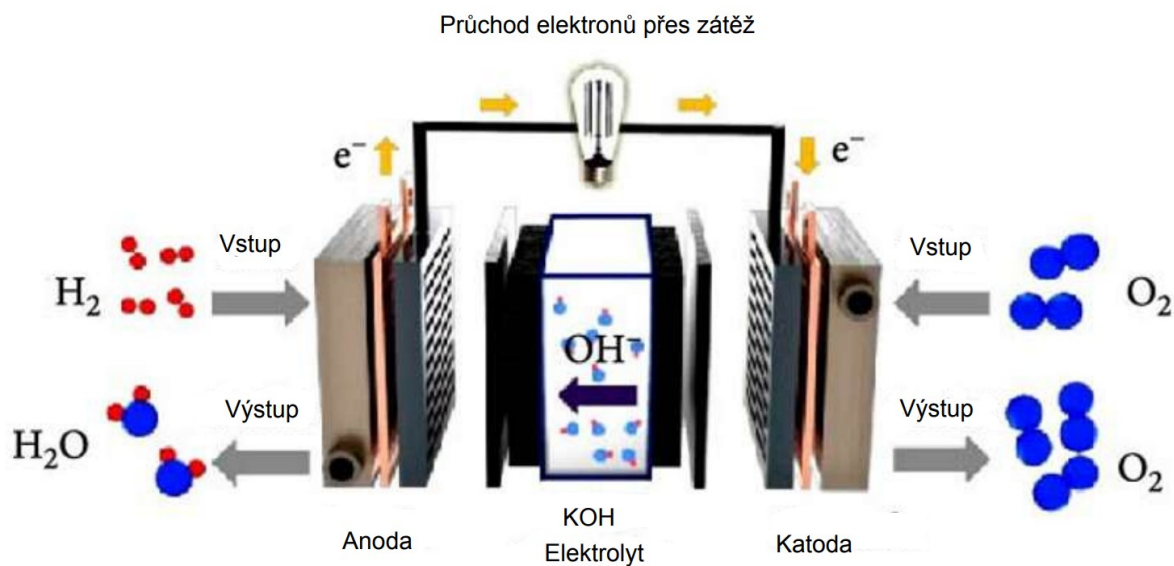
Obrázek 5 Základní princip PAFC

(Zdroj: [5])

PAFC patří mezi středně teplotní systémy, pracující při teplotách v rozmezí 150–220 °C. Tyto palivové články se vyznačují poměrně vysokou účinností, v aplikacích kombinované výroby tepla a elektřiny může celková účinnost dosahovat až 85 %. Ve srovnání s PEMFC mají PAFC nižší hustotu výkonu, což znamená, že potřebují větší prostor pro stejný výkon. Pro větší komerční využití je zapotřebí zvýšení hustoty výkonu, prodloužení životnosti a snížení výrobních nákladů. [5]

2.4.2 AFC

Alkaline Fuel Cell (AFC) označuje palivový článek, který ke svému fungování využívá alkalický elektrolyt, vodný hydroxid draselný (KOH). Princip jejich činnosti (Obrázek 6) spočívá v tom, že vodík je přiváděn k anodě, zatímco kyslík se dostává ke katodě. Mezi těmito elektrodami dochází v kapalném elektrolytu k iontové výměně, která vede k produkci stejnosměrného proudu. V současné době se pracovní teplota v AFC pohybuje okolo 70 °C, což ho zařazuje do nízkoteplotní technologie. Díky těmto nižším teplotám lze jako katalyzátor místo platiny použít běžné kovy jako například nikl, což snižuje náklady na výrobu. Při provozu AFC vznikají vedlejší produkty (voda a teplo), které je nutné odvádět. Tento problém se řeší recirkulací elektrolytu, který funguje zároveň jako chladicí médium, zatímco voda se odstraňuje odpařováním. Oproti PEMFC mají AFC nižší pořizovací náklady díky možnosti využití levnějších kovových katalyzátorů, avšak jejich životnost je kvůli kapalnému elektrolytu kratší. Účinnost přeměny chemické energie na elektrickou se pohybuje kolem 60-70 % což je i výrazně více než častěji používané PEMFC. Jejich hlavní nevýhoda je kratší životnost, kvůli kapalnému elektrolytu dochází k jeho postupné degradaci. [5]



Obrázek 6 Princip AFC

(Zdroj [5])

3 TYPY PALIV PRO PALIVOVÉ ČLÁNKY

Palivo používané v palivových článcích musí splňovat několik klíčových požadavků pro zajištění efektivního, spolehlivého a bezpečného provozu. Nečistoty v palivu mohou poškodit komponenty palivového článku, proto se klade velký důraz na vysoké čistoty paliva. Dále je nutné, aby zvolený typ paliva byl kompatibilní s konkrétním typem palivového článku. Palivo by mělo být dostupné a udržitelné což zahrnuje ekologicky šetrné metody získávání a nízký dopad na životní prostředí. Důležitá je také bezpečnost při manipulaci a skladování. Palivo by mělo být snadno přepravitelné a skladovatelné bez výrazného rizika hořlavosti, toxicity a jiných nebezpečných vlastností. Aby se technologie palivových článků dále rozvíjela od dopravy přes stacionární výrobu energie až po přenosné zdroje, je potřebné, aby jejich palivo bylo ekonomicky efektivní. Náklady na jeho výrobu a distribuci musí být konkurenceschopné vůči jiným energetickým zdrojům. [5]

Klíčovým prvkem v palivech pro palivové články je vodík, protože je hlavním zdrojem energie při jeho elektrochemické reakci s kyslíkem. Čistý vodík je hojně využíván pro PEMFC, nicméně existují palivové články jako SOFC, DMFC a MCFC, pro které je technologicky a ekonomicky výhodnější využívat uhlovodíky (např. metan, bioplyn, zemní plyn), alkoholy (např. metanol, etanol), nebo amoniak. [5]

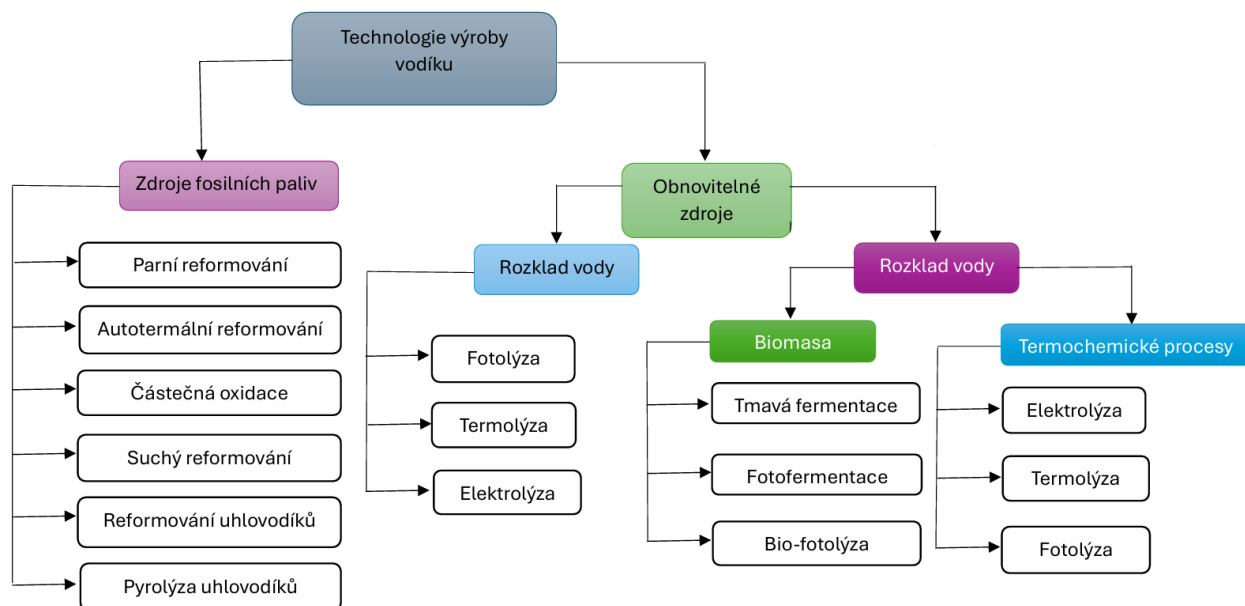
3.1 Vodík a jeho výroba

V roce 1766 objevil Henry Cavendish atom vodíku po tom, co provedl experiment reakce kovů s kyselinou sírovou. Samotný prvek pojmenoval až Antoine Lavoisier, který ho francouzsky nazval *hydrogène*. [14]

Čistý vodík je chemická sloučenina, která se skládá ze dvou atomů (H_2). Při normální teplotě a tlaku nemá žádný zápach, chuť ani barvu a není rozpustný ve vodě. Měrná energie vodíku je nejvyšší ze všech paliv (přibližně 2,6 krát větší než benzín).

Vodík lze vyrábět pomocí různých zdrojů energie, jako například jaderné energie, ropy, zemního plynu, biomasy, uhlí, sluneční energie, větrné energie, vodní energie a geotermální energie). Pro získání vodíku existuje velká škála technologických procesů, což zvyšuje flexibilitu jeho výroby a využití. Celosvětová produkce vodíku je tvořena z přibližně 96% procesy zpracováním fosilních paliv, jako jsou reformování zemního plynu, nebo zplyňování ropy a uhlí. Při těchto procesech vznikají skleníkové plyny, což je v rozporu s potenciálem vodíku jako čistého paliva. Zbylá část výroby vodíku připadá na zplyňování obnovitelných

zdrojů a odpadních proudů, elektrolytické dělení molekul vody, fotolytické štěpení vody s využitím solární energie a biologických/elektrochemických materiálů. [14][15] Následující Obrázek 7 zobrazuje rozdělení technologií pro získání vodíku.



Obrázek 7 Dělení technologií pro výrobu vodíku

(Zdroj: [14])

Pro orientaci v tom, z jakého technologického procesu byl vodík vyroben se v současnosti využívá barevné označování vodíku dle tabulky 2.

Tabulka 2 Barevné pojmenování vodíku dle jeho výroby

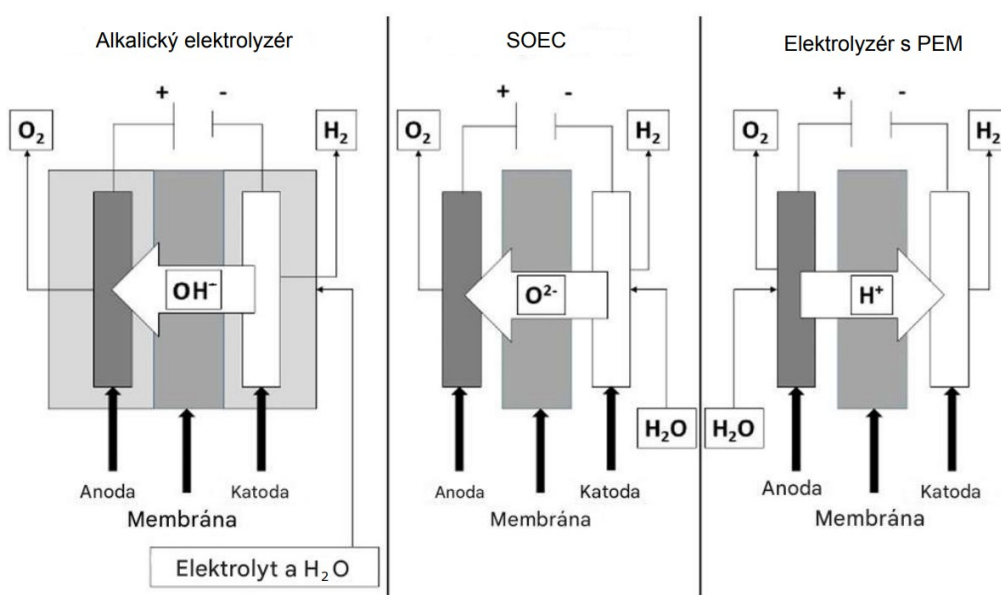
Typ vodíku	Výrobní proces
Zelený	Elektrolýza vody s využitím pouze obnovitelných zdrojů energie
Modrý	Reformování metanu se zachycováním a ukládáním uhlíku
Tyrkysový	Pyrolýza metanu za vzniku vodíku a pevného uhlíku
Šedý	Reformování metanu
Černý	Reakce vody s černým uhlím
Hnědý	Reakce vody s hnědým uhlím
Růžový	Elektrolýza vody s využitím zdrojů jaderné energie
Žlutý	Elektrolýza vody s využitím zdrojů energie na bázi fosilních paliv
Zlatý nebo bílý	Přírodně se vyskytující vodík v geologických formacích

(zdroj: [15])

3.1.1 Výroba vodíku z vody

Voda je nejhojnějším a nejdostupnějším zdrojem pro výrobu vodíku, jelikož ji lze rozložit na vodík a kyslík, aniž by se při tomto procesu vytvářely škodlivé emise, při použití energie z obnovitelných zdrojů. Nejzákladnější a nejpoužívanější metoda pro rozklad vody je elektrolyza, při které vodou proudí elektrický proud mezi dvěma elektrodami. Kromě elektrické energie se štěpení vody dá provést za pomoci tepelné energie (termolýza), fotonické energie (fotoelektrolýza), nebo mikroorganismů (biofotolýza). [14]

Mezi základní typy elektrolyzérů dle použitého elektrolytu se řadí alkalický elektrolyzér, elektrolyzér s PEM (polymerní výměnná membrána) a SOEC (elektrolyzér s pevným oxidovým elektrolytem). Alkalický elektrolyzér, který jako elektrolyt používá NaOH nebo KOH, se již komerčně využívá, nicméně má relativně nízkou účinnost kolem 50-65%. Nejvíce používaný elektrolyzér s PEM umožňuje ukládat a distribuovat velké množství energie, díky čemuž je často využíván v sektoru dopravy. PEM dosahuje i vyšší účinnosti, a to okolo 50-75 %. Elektrolyza s SOEC probíhá endotermicky při vysokých teplotách, kdy dodaná tepelná energie může být dodána z odpadního tepla tepelných, nebo jaderných reaktorů. I když účinnost SOEC se blíží 90 %, tak zatím není komerčně životaschopný, z důvodů technologické náročnosti a vysokým investičním nákladům. [15] Obrázek 8 zobrazuje základní princip zmíněných elektrolyzérů.



Obrázek 8 Základní typy elektrolyzérů

(Zdroj: [15])

3.2 Alternativní paliva k vodíku

3.2.1 Metanol

Metanol (CH_3OH) je kapalné organické palivo, které v oblasti palivových článků nachází uplatnění zejména v technologii DMFC (Direct Methanol Fuel Cells), tedy přímých metanolových článků. Tyto články umožňují přímé využití metanolu bez nutnosti jeho předchozí přeměny na vodík. Oxidací metanolu uvnitř článku vzniká elektrická energie, oxid uhličitý a voda. [16]

Mezi hlavní výhody patří snadná manipulace a skladování, protože metanol je kapalný při běžné teplotě a tlaku. Ve srovnání s vodíkem má také vyšší energetickou hustotu na objem, což z něj činí atraktivní palivo zejména pro přenosné a malé energetické systémy. Na druhou stranu má použití metanolu i svá omezení. Palivové články DMFC dosahují nižší účinnosti než vodíkové články, navíc při reakci vzniká oxid uhličitý, což znamená, že metanol není zcela bezemisním palivem. [16]

Metanol oproti čistému vodíku má několik výhod, jako vyšší hustotu energie, bezpečnost, snadnější přepravu a skladování a také je mnohem levnější. [16]

3.2.2 Etanol

Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) je organická sloučenina patřící mezi alkoholy, běžně známá jako hlavní složka alkoholických nápojů. V oblasti energetiky je však ceněn jako obnovitelné kapalné biopalivo, které lze vyrábět fermentací biomasy nebo syntézou z etylenu.

V oblasti moderní energetiky se ethanol používá především v přímých etanolových palivových článcích DEFC (Direct Ethanol Fuel Cells). V těchto článcích probíhá chemická reakce, při které se ethanol přeměňuje na elektřinu, vodu a oxid uhličitý. Výhodou tohoto paliva je, že není složitá infrastruktura, jelikož ethanol se snadno skladuje, přepravuje a tankuje podobně jako benzín. Ethanol je také méně toxický než například metanol a má vyšší hustotu energie. Kvůli složitosti reakce, kdy vzniká přitom i řada nežádoucích meziproductů (např. acetaldehyd, kyselina octová), bývá celková účinnost palivového článku s ethanollem nižší než u vodíkových článků. [17]

3.2.3 Amoniak

Amoniak (NH_3), známý také jako čpavek, je bezbarvý plyn s charakteristickým štiplavým zápachem. V přírodě se vyskytuje běžně, jako přirozený odpadní produkt metabolismu

živočichů. Průmyslově se amoniak vyrábí převážně Haberovou–Boschovou syntézou, což je reakce plynného vodíku a dusíku za vysokého tlaku a teploty. [18][19]

Amoniak se v palivových článcích využívá jako nositel vodíku nebo přímo jako palivo. Přímé použití amoniaku bez externí reformace je možné zejména u palivových článků typu SOFC díky jejich vysokým pracovním teplotám, kdy se amoniak rozkládá na vodík a dusík a jejich vyšší toleranci na nečistoty v palivu. [18][19]

Hlavními výhodami amoniaku oproti vodíku při použití v palivových článcích je jeho jednodušší a levnější skladování, kdy je kapalný při -33°C nebo při mírném tlaku. Dále má již zavedenou infrastrukturu výroby a skladování díky jeho využití i v zemědělství a chemickém průmyslu. [18][19]

3.2.4 Metan

Metan (CH_4) je hlavní složkou zemního plynu a patří mezi nejdostupnější fosilní paliva. Lze ho ale také vyrábět biologickou cestou, například z bioplynu při rozkladu organického odpadu. Díky tomu může být v některých případech nízkoemisní, nebo dokonce uhlíkově neutrální, pokud pochází z obnovitelných zdrojů.

V palivových článcích se metan nepoužívá přímo jako palivo (kromě některých výjimek), ale nejprve se reformuje, to znamená, že se chemicky přemění na vodík (H_2) a oxid uhelnatý (CO), obvykle pomocí páry (tzv. steam reforming). Tento proces se často provádí přímo uvnitř palivového článku, pokud to konstrukce umožňuje. Nejčastější palivový článek využívající jako palivo metan je SOFC (solid oxide fuel cell), který zajišťuje vysokou účinnost a nízké emise. [20]

4 VÝHODY A NEVÝHODY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Palivové články (FC) přinášejí řadu výhod ve srovnání s tradičními spalovacími motory, jako je vysoká účinnost, nulové emise skleníkových plynů a tichý provoz. Nabízejí také flexibilitu v použití různých typů paliv, přičemž vodík je nejběžněji využívaným palivem díky své dostupnosti a ekologickým spalovacím vlastnostem. Palivové články dosahují vysoké účinnosti, přičemž dokážou přeměnit až 60 % energie uložené ve vodíku na elektrickou energii, zatímco tradiční spalovací zážehové motory mají účinnost pouze přibližně 30-36 %, vznětové pak 42-43 % [21][22]. Další výhodou je, že FC produkují kvalitní tepelnou energii jako vedlejší produkt, která může být využita pro kogeneraci nebo další aplikace. Navíc výroba vodíku pomocí elektrolyzéru se dá naplánovat na dobu, kdy je všeobecně elektrická energie levnější, například přes poledne nebo přes noc, což může zlepšit ekonomiku projektu.

Na druhé straně však existují i některé nevýhody, přičemž hlavním problémem jsou vysoké výrobní náklady, způsobené složitými výrobními procesy a nutností použití vzácných a nákladných materiálů, jako je platina. Další komplikací je nedostatečná infrastruktura pro vodík, což ztěžuje jeho výrobu, skladování a distribuci ve velkém měřítku. Také je třeba zvážit bezpečnostní obavy při manipulaci a skladování vodíku, než bude možné tuto technologii masově přijmout. Další z hlavních nevýhod vodíku je jeho nízká molekulová hmotnost, díky které mohou jeho molekuly pronikat přes některé kovy a plasty a aktivovat tím jejich praskání, nebo křehnutí a následné nekontrolovatelné uvolnění tohoto plynu, kdy může dojít k požáru/výbuchu, jelikož je vodík vysoce hořlavý (od 4 % koncentrace ve vzduchu). V důsledku toho musí být zařízení na výrobu, skladování, přepravu a využití vodíku navržena tak, aby zabránila, detekovala a zmírnila uvolňování vodíku. Navíc nízká energetická hustota vodíku znamená, že pro uložení dostatečného množství paliva na delší dobu je potřeba velký prostor, což může být nevhodné pro některé aplikace. [22][23]

Dále je potřeba zmínit nedostatečnou infrastrukturu čerpacích stanic, která celosvětově v roce 2021 čítala přibližně 730 veřejně dostupných stanic. Například veřejně dostupných rychlonabíjecích stanic pro elektromobily bylo v roce 2021 přibližně 570000. [24]

5 APLIKACE PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ V PRAXI

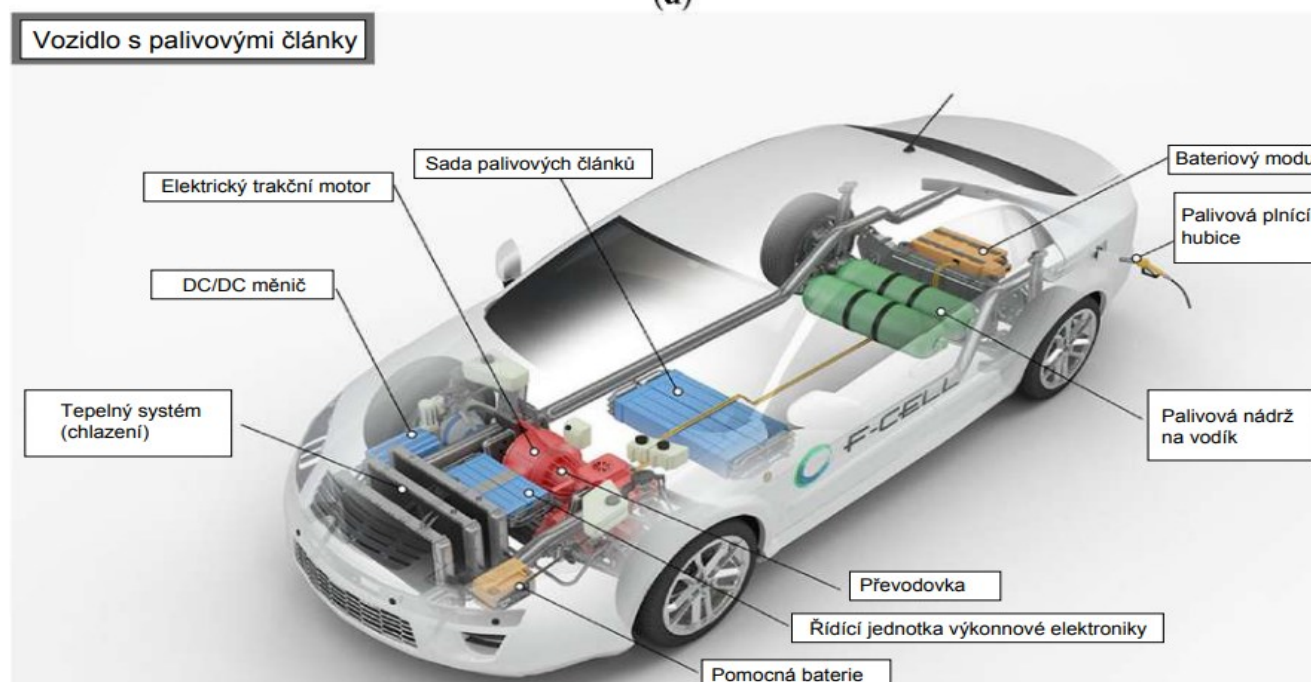
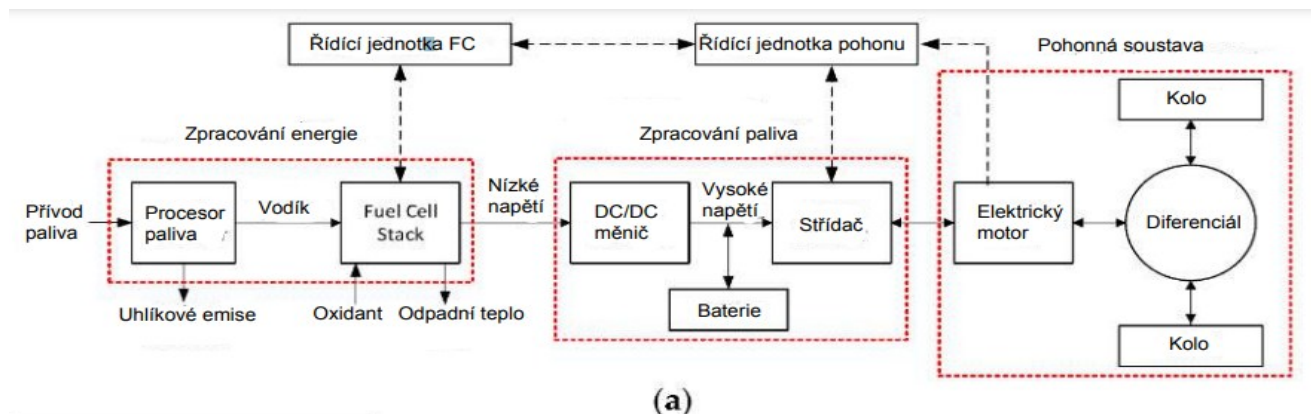
5.1 Doprava

Dopravní sektor čelí tlaku na snižování emisí skleníkových plynů, což podporuje přechod na čistší technologie, jako jsou palivové články. Tyto systémy nabízejí téměř nulové emise, vyšší účinnost oproti tradičním spalovacím motorům a snadnou údržbu, což je činí slibnou alternativou pro budoucnost. Zatímco využití vodíku v dopravě je stále omezené kvůli nízkému počtu vodíkových vozidel (FCEV), vidí se v něm velký potenciál zejména pro těžká vozidla a náročné aplikace. Investice do vodíkové infrastruktury rostou, zejména v Japonsku, Německu a USA, aby se usnadnilo širší přijetí této technologie. [5][25]

5.1.1 Automobily na vodíkový pohon

Vodíkové elektrické vozidlo (FCEV) se skládá z (schéma na Obrázku 9) palivového článku, systému řízení energie a elektromotoru, přičemž baterie zajišťuje stabilitu při přechodných stavech a rekuperaci energie. Jelikož FC generuje relativně nízké výstupní napětí, tak je zapotřebí použít DC/DC měnič ke zvýšení a regulaci napětí před jeho dodáním do elektromotoru. Navzdory výhodám, jako je vyšší účinnost (až 60 %) a nižší emise, má technologie své limity jako vysoké náklady na výrobu, nebo problémy se skladováním a distribucí vodíku.

Aby se vodíkové technologie skutečně prosadily, je nutné pokročit ve čtyřech hlavních oblastech: zvýšit efektivitu celého vodíkového řetězce, vybudovat rozsáhlejší infrastrukturu, snížit náklady a získat podporu veřejnosti. Přestože vodíková vozidla mohou být efektivnější než klasická benzinová auta, využití vodíku z fosilních zdrojů přináší menší ekologické přínosy než obnovitelné zdroje, což podtrhuje důležitost investic do zelené energie. [5][25]



Obrázek 9 Popis automobilu na vodíkový pohon

(Zdroj [25])

5.1.2 Letadla a lodě využívající palivové články

Palivové články jsou obecně vhodnější než spalování fosilních paliv pro malé letouny na krátké tratě, protože efektivita obou technologií se liší v závislosti na velikosti. Na rozdíl od turbínových motorů palivové články udržují relativně stabilní účinnost při širokém rozsahu výstupního výkonu. To je dáno tím, že výroba elektrického proudu v palivovém článku roste s aktivní plochou dostupnou pro reakce v katalytických vrstvách. Dvojnásobná velikost reakční plochy znamená dvojnásobek proudu. Díky tomu lze palivové články snadněji zmenšovat při zachování výkonu, což umožňuje efektivnější pohonné systémy u menších letadel ve srovnání se spalováním fosilních paliv. Pro větší letadla jsou však výhodnější spalovací motory, protože mají vyšší specifický výkon a nižší nároky na tepelnou správu než palivové články. Například pro středně velký letoun, jako je Boeing 737, by palivový článek

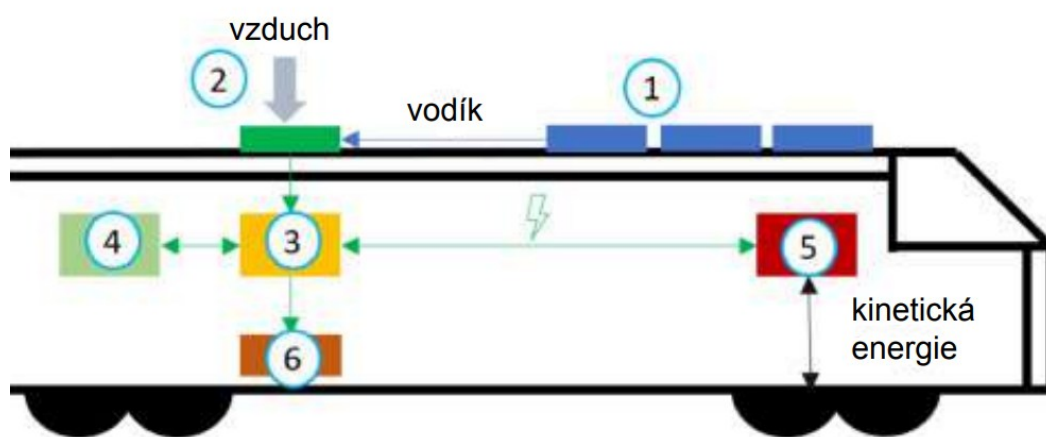
vážil třikrát více než odpovídající turbovrtulový motor, což vysvětluje dominanci spalovacích motorů u dlouhých letů. [5]

Palivové články pokrývají široké výkonové spektrum, a proto se hodí pro různé typy lodí. Nejčastěji se používají PEM palivové články (PEMFC) poháněné vodíkem, zejména u menších plavidel operujících poblíž pobřeží, jako jsou turistické lodě, kanálové čluny a trajekty. Technologie SOFC se testovala i na větších lodích, například výletních či nákladních. [26]

5.1.3 Vlaky využívající palivové články

Palivové články se ve vlacích využívají jako alternativa k dieselovým motorům, zejména na neelektrifikovaných tratích. Pokud se jako palivo využívá zelený vodík, pak je provoz bezemisní, což je důležitý aspekt pro dekarbonizaci dopravního sektoru.

I když je technologie palivových článků známa již od konce 19. století, tak se komerčně ve vlakové dopravě využívá pouze v posledním desetiletí. První komerčně využívaný vlak Coradia iLint poháněný palivovými články byl uveden do provozu roku 2018 v Německu, schéma jeho komponent je zobrazeno na obrázku 10. [27]



Obrázek 10 Schéma výkonových a energetických komponent modelu elektrického vlaku Coradia iLint s vodíkovými články

(zdroj:[27])

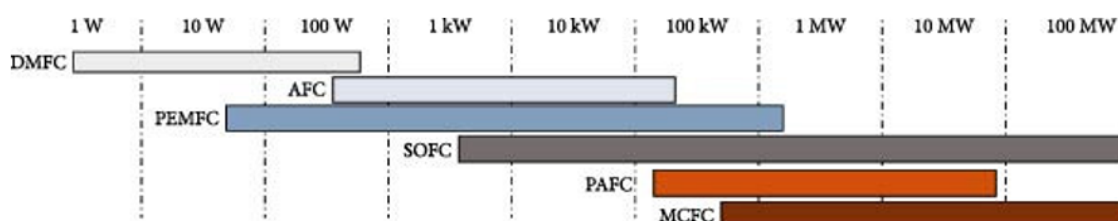
Popis komponent

1. Palivové nádrže - umístěné na střeše, aby se v případě úniku vodík rychle rozšířil do okolního prostředí.
2. PEMFC - k přeměně vodíku na stejnosměrný proud.
3. Trakční měnič/konvertor - k regulaci toků energie mezi různými výkonovými komponenty.
4. Lithium - iontové baterie, ukládají přebytečné energie vyrobené palivovým článkem a energie získané brzděním. V případě potřeby mohou také zvýšit zrychlení.
5. Trakční motor - slouží k zrychlení a brzdění.
6. Pomocný měnič - přizpůsobuje elektrický proud různým palubním zařízením.

5.2 Stacionární aplikace

Stacionární palivové články mají širokou škálu využití, od jednoduchých záložních zdrojů, až po velké energetické systémy, s výkonovým rozsahem od kilowatt po megawatty. Očekává se, že v příštích letech dojde k výraznému rozšíření stacionárních palivových článků. Vodíkové palivové články se již osvědčily při výrobě energie v Japonsku, Koreji a Severní Americe, přičemž Evropa představuje další slibný trh. Stacionární palivové články mohou stabilizovat energetické sítě a zajišťovat lokální dodávky energie v blízkosti obnovitelných zdrojů.

Nejčastěji používaným typem palivových článků pro stacionární aplikace jsou PEMFC, avšak vhodné jsou také SOFC, MCFC, AFC a PAFC. Nízkoteplotní varianty mají výhodu rychlého startu, zatímco vysokoteplotní, jako SOFC a MCFC, umožňují přímou výrobu tepla a efektivnější využití paliva bez nutnosti externího reformování (chemického procesu přeměny uhlovodíkových paliv na vodík), čímž dosahují vyšší účinnosti.



Obrázek 11 Výkonový rozsah technologie palivových článků

(Zdroj [5])

Stacionární zdroje mají zatím hlavní využití v oblastech, kde je nízká kvalita infrastruktury distribučních služeb. V těchto oblastech se stacionární články využívají buď, jako hlavní zdroje energie v kombinaci s bateriemi, nebo jako záložní zdroje energie při výpadku dodávek z distribuční sítě. Příklad praktického využití je zobrazen na obrázku 12, kde je zobrazen již funkční PEM palivový článek o výkonu 100 kW, který slouží jako záložní zdroj energie pro Nemocnici ve státě Washington.



Obrázek 12 Záložní zdroj PEMFC o výkonu 100 kW pro nemocnici ve státě Washington, zvýrazněny jsou palivové články

(zdroj: [28])

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

6.1 Měření voltampérové a výkonové křivky vodíko-kyslíkového palivového článku

Cílem tohoto laboratorního měření bylo experimentálně určit voltampérovou (VA) a výkonovou (P) charakteristiku vodíkovo-kyslíkového palivového článku. Dle schématu zapojení na Obrázku 13 byla propojena příslušná aparatura, jak lze vidět na Obrázku 14. Světelné záření z lampy dopadá na fotovoltaiický článek, na kterém dochází k přímé transformaci světelné energie na elektrickou energii. Vzniká tedy stejnosměrný elektrický proud, který proudí k elektrolyzéru, kde dochází k elektrolyze destilované vody. Tím vznikají dva oddělené plyny (vodík a kyslík). Plyny byly uchovány v oddělených zásobnících a následně vedeny do palivového článku. K výstupu palivového článku bylo připojeno měřicí zařízení s proměnným zatěžovacím odporem. Pomocí multimetru byly při různých hodnotách odporu zaznamenány odpovídající hodnoty napětí U a proudu I . Pro každou dvojici U a I byl vypočten elektrický výkon podle vztahu:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Příklad výpočtu pro 2. řádek Tabulky 3:

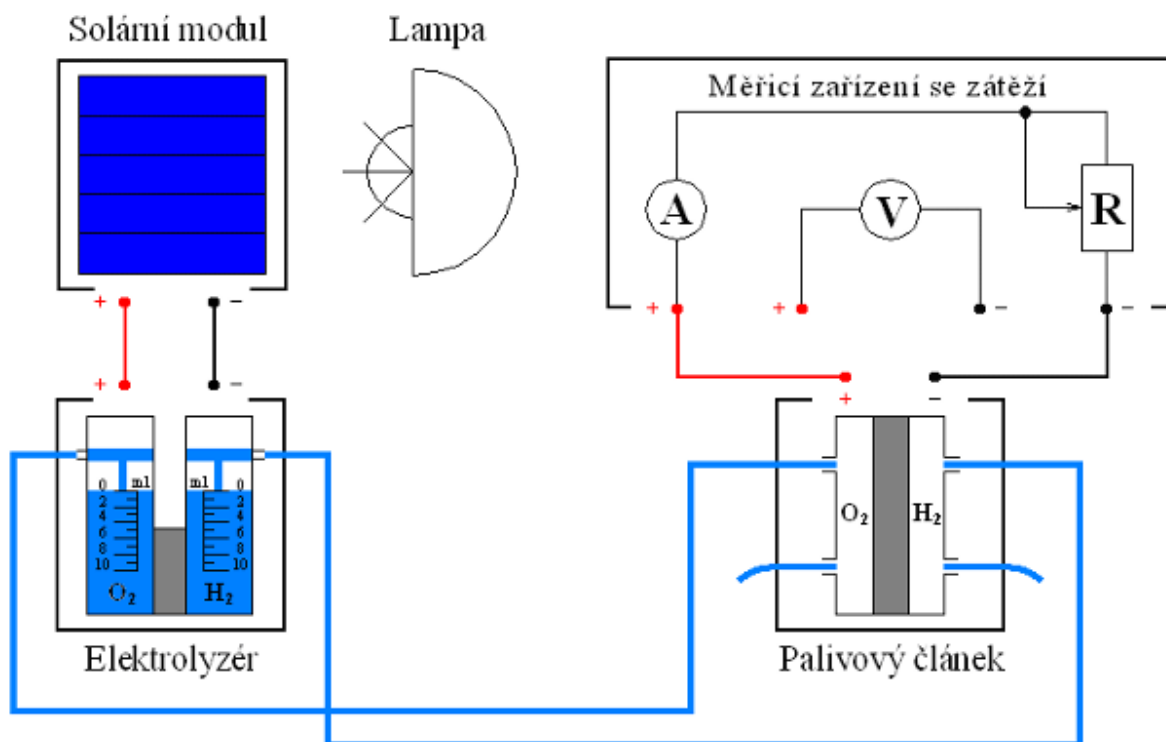
$$P_2 = U_2 \cdot I_2$$

$$P_2 = 0,8 \cdot 3$$

$$P_2 = 2,4 \text{ mW}$$

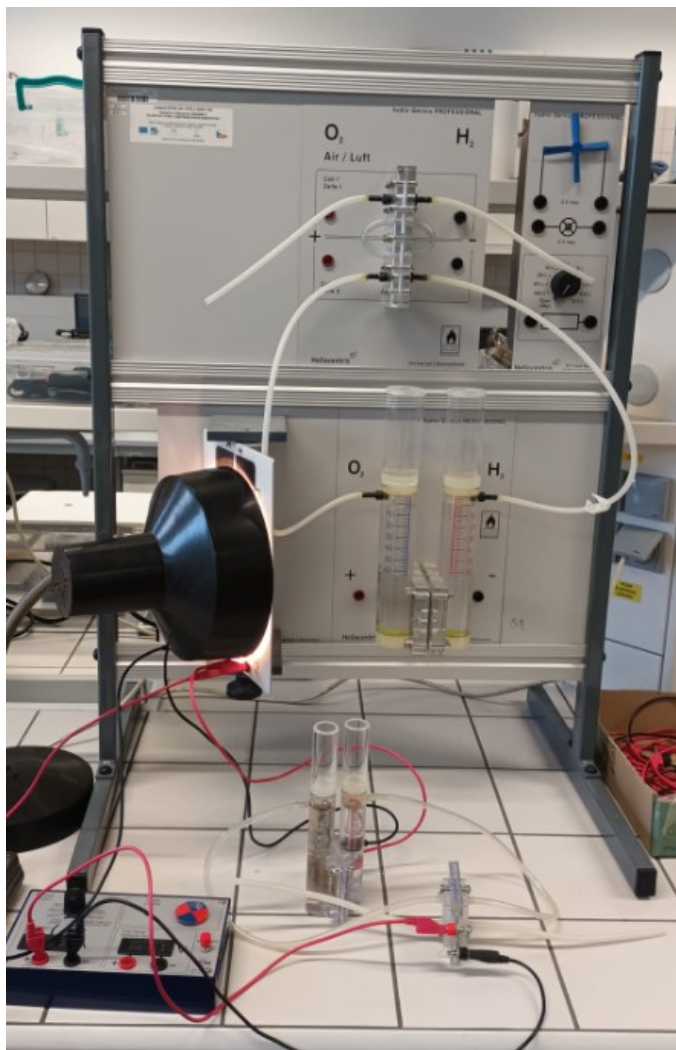
Naměřené hodnoty byly zaznamenány do Tabulky 2 a následně graficky zpracovány ve formě:

- Voltampérové charakteristiky ($U = f(I)$), na Obrázku 18
- Výkonové charakteristiky ($P = f(I)$), na Obrázku 19



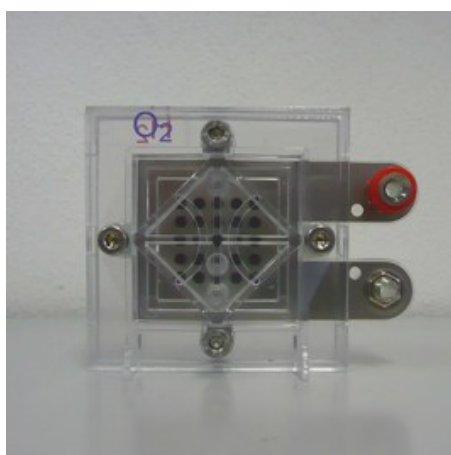
Obrázek 13 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku

(zdroj: [29])



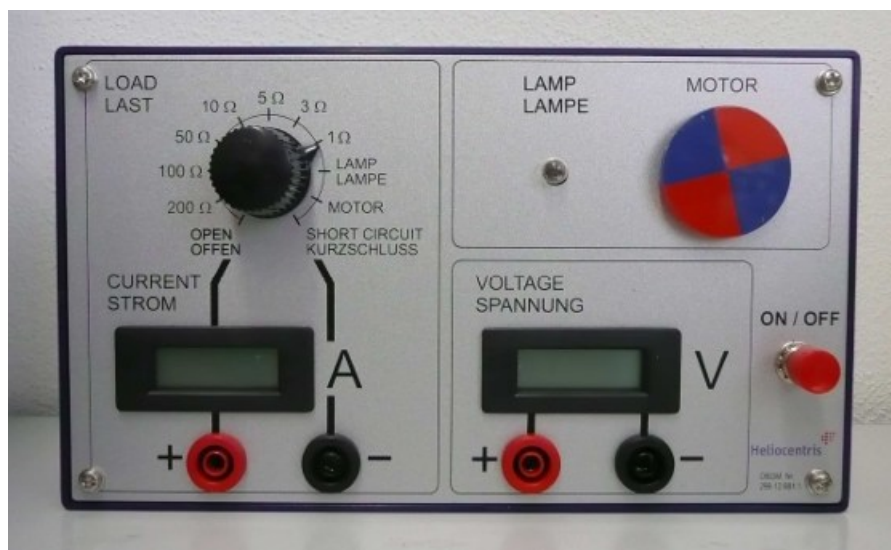
Obrázek 14 Fotografie zapojení měřící aparatury pro měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku

(zdroj: vlastní)



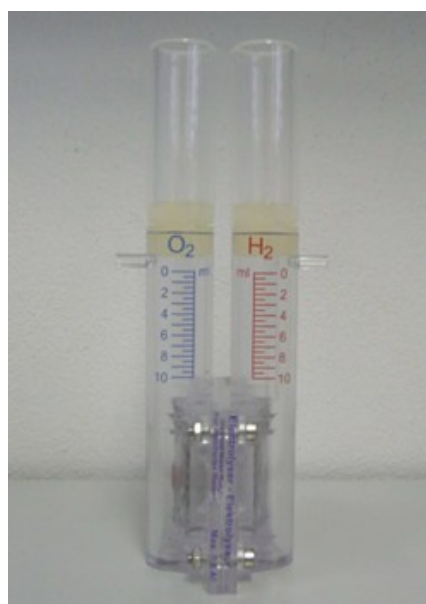
Obrázek 15 Palivový článek

(zdroj: [29])



Obrázek 16 Měřicí zařízení se zátěží

(zdroj: [29])



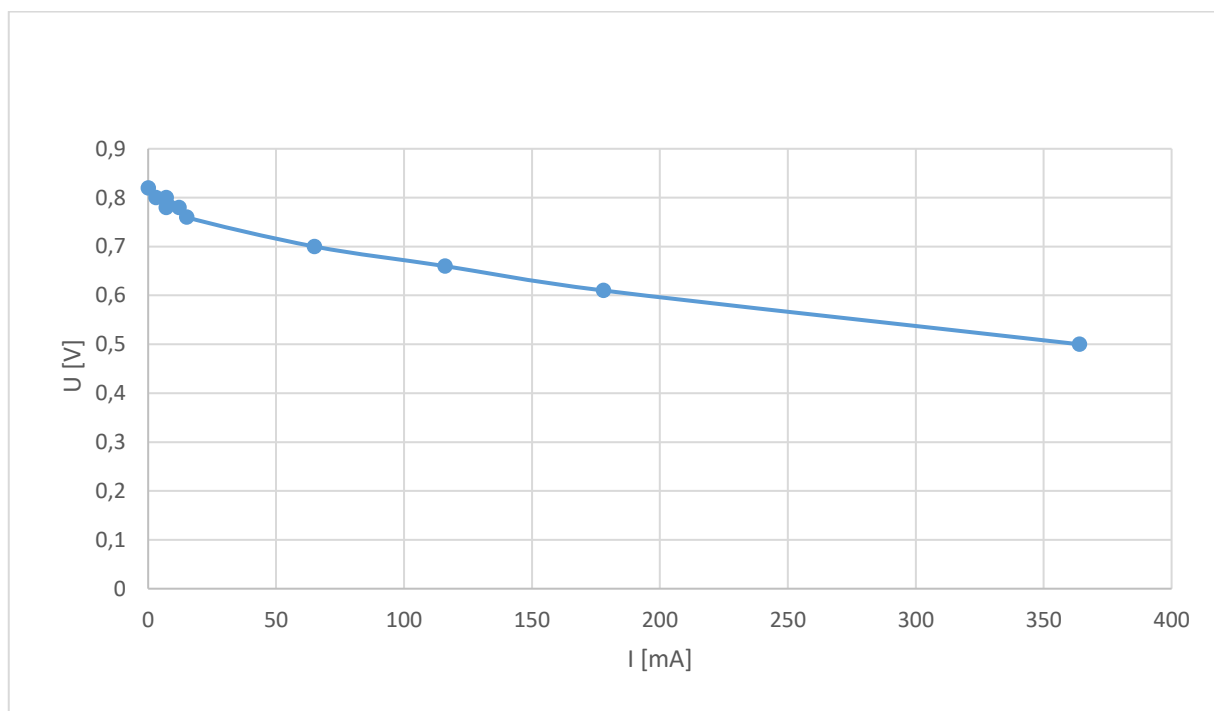
Obrázek 17 Elektrolyzér

(zdroj: [29])

Tabulka 3 Měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku.

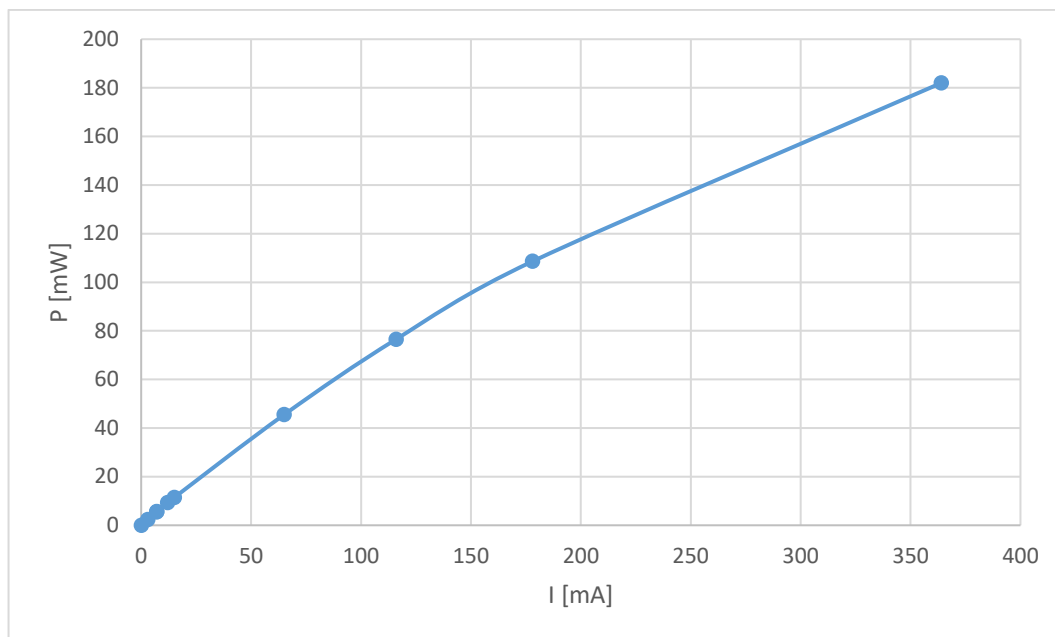
č. měření	zatěžovací odpor R [Ω]	proud I [mA]	napětí U [V]	Výkon P [mW]
1.	OPEN (nekonečno)	0	0,82	0
2.	200	3	0,8	2,4
3.	100	7	0,78	5,46
4.	50	15	0,76	11,4
5.	10	65	0,7	45,5
6.	5	116	0,66	76,56
7.	3	178	0,61	108,58
8.	1	364	0,5	182
9.	lamp	7	0,8	5,6
10.	motor	12	0,78	9,36

(zdroj: vlastní)



Obrázek 18 Voltampérová charakteristika palivového článku

(zdroj: vlastní)



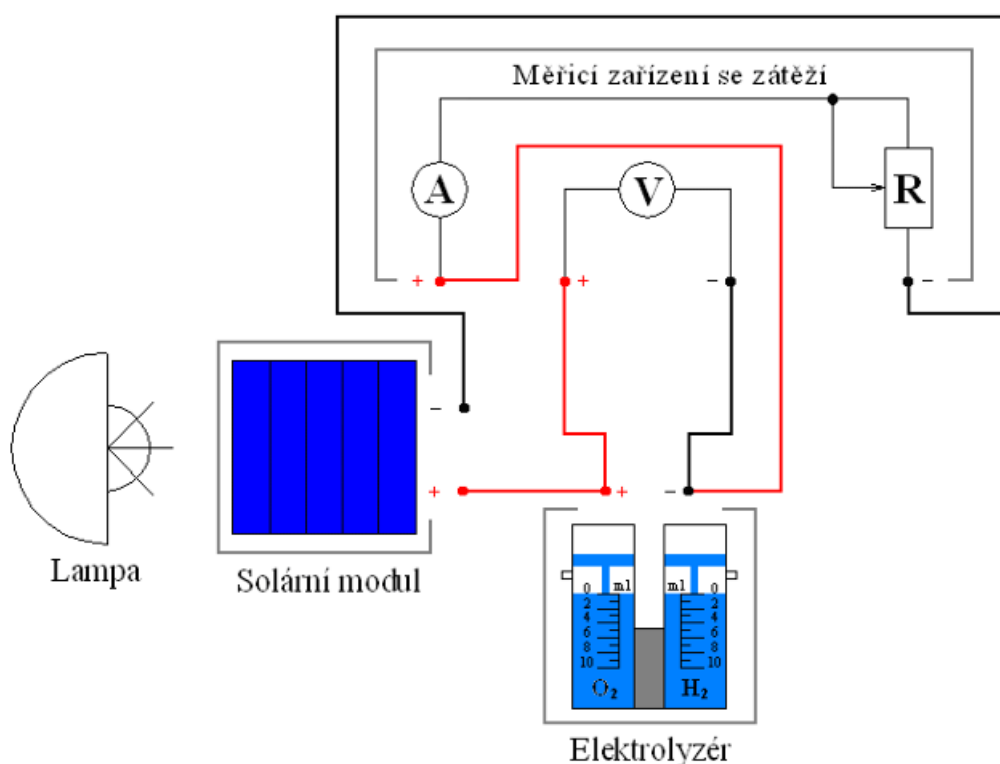
Obrázek 19 Výkonová charakteristika palivového článku

(zdroj: vlastní)

Z měření (viz Tabulka 3) vyplývá, že palivový článek dosahuje nejvyššího výkonu při nižších zatěžovacích odporech, konkrétně při 1Ω , kdy byl výkon 182 mW. Se snižujícím se odporem rostl proud, zatímco napětí postupně klesalo (obrázek 18). Nejvyšší napětí 0,82 V bylo naměřeno při otevřeném obvodu, kdy však nebyl naměřen žádný proud a výkon byl nulový. Výkonová křivka (Obrázek 19) ukazuje typický průběh se zřetelným maximem. Při vyšších odporech (např. 200Ω) nebo při běžném zatížení (lampa, motor) byl výkon nízký, což potvrzuje, že článek je nejefektivnější při vhodném dimenzování zátěže. Provedené měření odpovídá očekávanému chování palivového článku a to, že výkon i účinnost výrazně závisí na velikosti připojené zátěže.

6.2 Měření charakteristiky elektrolyzéru

Cílem měření bylo určit voltampérovou (VA) charakteristiku elektrolyzéru, tedy závislost proudu na přivedeném napětí. Toto měření, dle zapojení na Obrázku 20, umožňuje posoudit účinnost a provozní chování elektrolyzéru při rozkladu vody na vodík a kyslík. Do elektrolyzéru byla naplněna destilovaná voda. Díky osvětlení solárního článku se generuje elektrický proud, který je přiváděn k elektrolyzéru. Pomocí nastavitelného zatěžovacího odporu (Obrázek 16), byl nastaven velmi nízký odbor (nastavení „SHORT CIRCUIT“). Následně se měnila intenzita osvětlení solárního modulu jeho pootočením, nebo oddálením od lampy. Pro každé nastavení byly změřeny hodnoty napětí (U) a proudu (I) pomocí měřicího zařízení. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do Tabulky 4 a následně zpracovány do grafu VA charakteristiky ($I = f(U)$) na Obrázku 22.



Obrázek 20 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření charakteristiky elektrolyzéru.

(zdroj:[30])



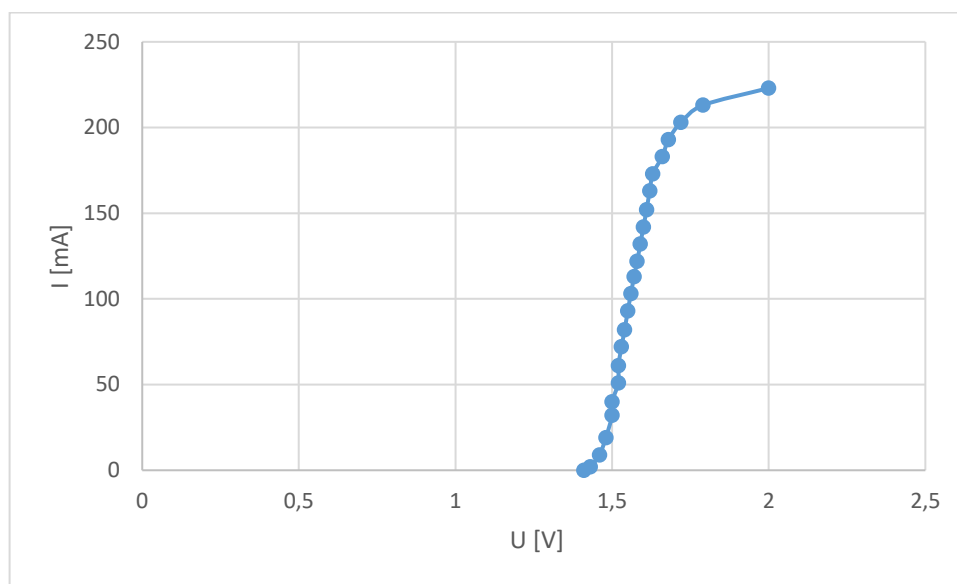
Obrázek 21 Fotografie zapojení měřící aparatury pro měření voltampérové charakteristiky elektrolyzéru

(zdroj: vlastní)

Tabulka 4 Naměřené hodnoty stejnosměrnného napětí a stejnosměrnného proudu elektrolyzéru

č. měření	proud I [mA]	napětí U [V]	č. měření	proud I [mA]	napětí U [V]
1.	0	1,41	13.	113	1,57
2.	2	1,43	14.	122	1,58
3.	9	1,46	15.	132	1,59
4.	19	1,48	16.	142	1,6
5.	32	1,5	17.	152	1,61
6.	40	1,5	18.	163	1,62
7.	51	1,52	19.	173	1,63
8.	61	1,52	20.	183	1,66
9.	72	1,53	21.	193	1,68
10.	82	1,54	22.	203	1,72
11.	93	1,55	23.	213	1,79
12.	103	1,56	24.	223	2

(zdroj: vlastní)



Obrázek 22 Voltampérová charakteristika elektrolyzérů

(zdroj: vlastní)

Z naměřených hodnot (Tabulka 4) je patrné, že rozkladné napětí v našem systému je 1,43 V, při tomto napětí začne vodou procházet proud a je zahájena elektrolyza vody, tedy rozklad vody na vodík a kyslík. Se zvyšujícím se napětím začíná proud výrazně narůstat, což ukazuje na zintenzivnění elektrolyzy. Voltampérová charakteristika má nelineární průběh, proud roste zpočátku pomaleji, ale po překročení přibližně 1,5 V se růst zrychluje. Maximální proud byl dosažen při napětí 2,0 V a činil 223 mA. Tento průběh odpovídá typickému chování elektrolyzérů, kdy k výraznější produkci vodíku a kyslíku dochází až po dosažení určitého napěťového prahu. Naměřené výsledky potvrzují, že elektrolyzátor vyžaduje dostatečné napětí pro efektivní provoz, které následně lineárně roste až do horní meze (koncové napětí).

6.3 Měření účinnosti soustavy elektrolyzátor-palivový článek

Cílem tohoto měření bylo určit účinnost soustavy tvořené elektrolyzátelem a vodíko-kyslíkovým palivovým článkem. Účinnost byla vyjádřena jako poměr výstupní elektrické energie z palivového článku k elektrické energii spotřebované elektrolyzátelem při výrobě vodíku a kyslíku (zapojení dle schématu na Obrázku 23). Solární článek byl osvětlen lampou a jeho výstupní napětí bylo přivedeno na elektrolyzátor a zahájila se elektrolyza vody. Po nashromáždění dostatečného množství plynu byl spuštěn palivový článek. Ten byl připojen k zatěžovacímu zařízení s nastavitelným odporem. Při různých hodnotách zátěže byly

měřeny hodnoty napětí a proudu palivového článku na multimetru a následně byl vypočten výkon dle rovnice (1). Pro každou dvojici měření byla vypočtena účinnost celé soustavy:

$$\eta = \frac{P_{výstup}}{P_{vstup}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Příklad výpočtu pro 3. řádek Tabulky 6:

Výpočet vstupní energie (příkon P_1):

Tabulka 5 Naměřené hodnoty vstupního napětí, proudu a výkonu elektrolyzéro

č. měření	proud I [mA]	napětí U [V]	Příkon P_1 [mW]
1.	290	2,01	582,90

(zdroj: vlastní)

$$P_1 = U_1 \cdot I_1$$

$$P_1 = 2,01 \cdot 290$$

$$P_1 = 582,9 \text{ mW}$$

Výpočet výstupní energie (výkon P_3):

$$P_3 = U_3 \cdot I_3$$

$$P_3 = 0,81 \cdot 3$$

$$P_3 = 2,43 \text{ mW}$$

Výpočet účinnosti soustavy η_3 :

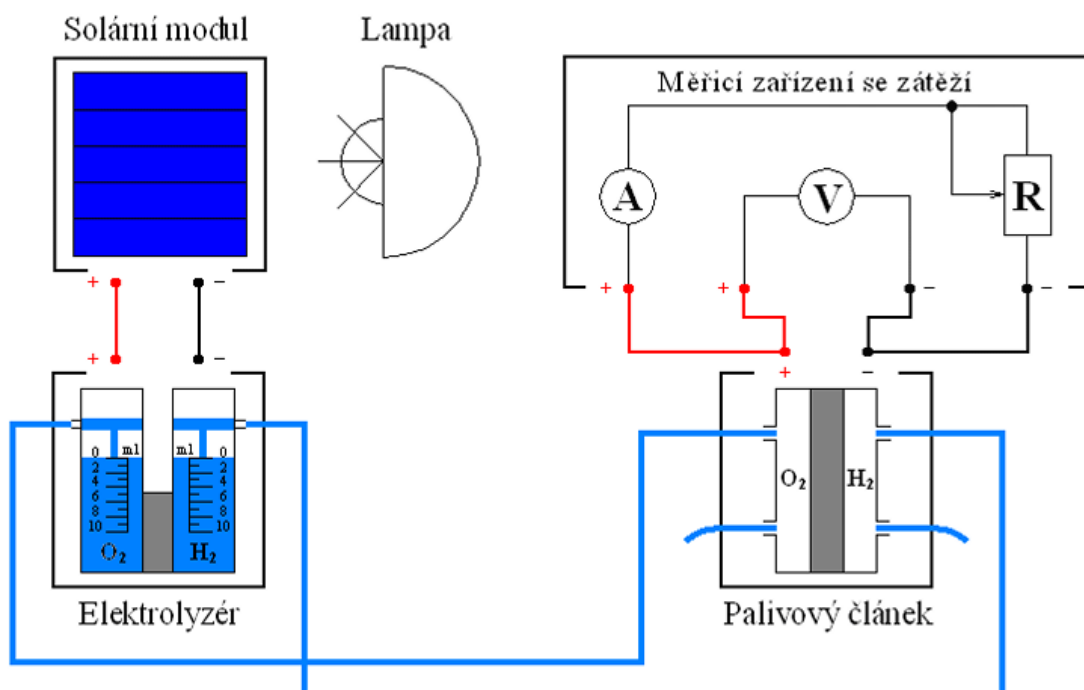
$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_1} \cdot 100\%$$

$$\eta_3 = \frac{2,43}{582,9} \cdot 100\%$$

$$\eta_3 = 0,42\%$$

Naměřené hodnoty byly zaneseny do tabulky a graficky znázorněny jako křivka účinnosti v závislosti na výstupním proudu palivového článku ($\eta = f(I)$).

Získané hodnoty byly zaneseny do Tabulky 5 a zpracovány ve formě grafu závislosti účinnosti na výstupním stejnosměrném proudu palivového článku ($\eta = f(I)$).



Obrázek 23 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření účinnosti soustavy elektrolyzér a palivový článek.

(zdroj: [31])



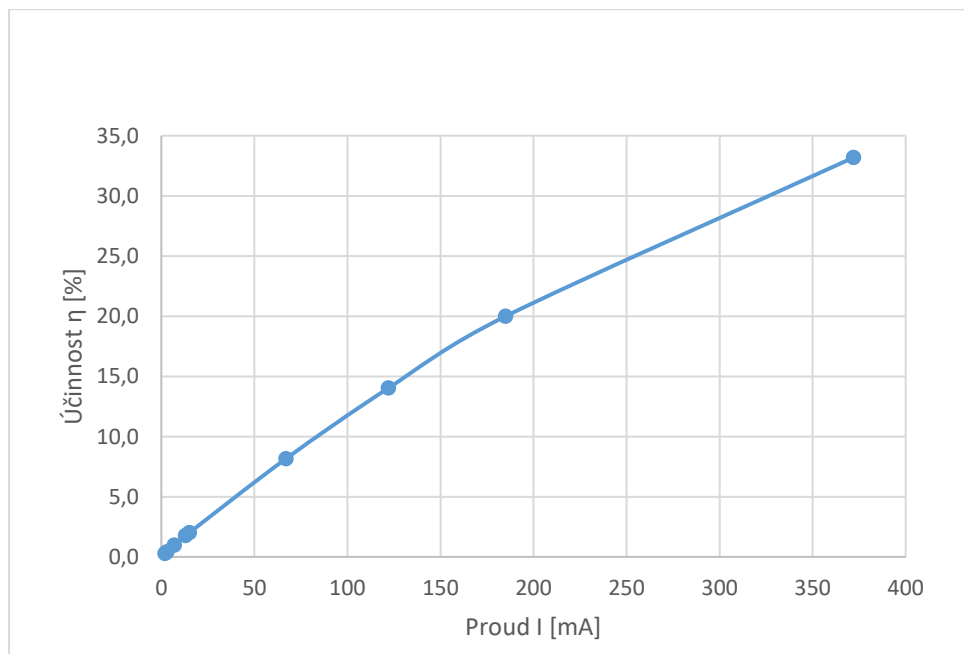
Obrázek 24 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro účinnosti sestavy elektrolyzéru a palivového článku

(zdroj: vlastní)

Tabulka 6 Naměřené hodnoty výstupního napětí, proudu a výkonu palivového článku a účinnosti soustavy elektrolyzér-palivový článek

č. měření	zatěžovací odpor R [Ω]	proud I [mA]	napětí U [V]	Výkon P_2 [mW]	účinnost η [%]
2.	OPEN (nekonečno)	0	0,86	0,00	-
3.	200	3	0,81	2,43	0,42
4.	100	7	0,80	5,60	0,96
5.	50	15	0,78	11,70	2,01
6.	10	67	0,71	47,57	8,16
7.	5	122	0,67	81,74	14,02
8.	3	185	0,63	116,55	19,99
9.	1	372	0,52	193,44	33,19
10.	lamp	2	0,85	1,70	0,29
11.	motor	13	0,79	10,27	1,76

(zdroj: vlastní)



Obrázek 25 Graf závislosti účinnosti na výstupním proudu v soustavě elektrolyzér-palivový článek

(zdroj: vlastní)

Z provedeného měření vyplývá dle Obrázku 25, že účinnost soustavy elektrolyzér-palivový článek je výrazně závislá na hodnotě zatěžovacího odporu, tedy na zatížení palivového článku. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při nízkých odporech, konkrétně při

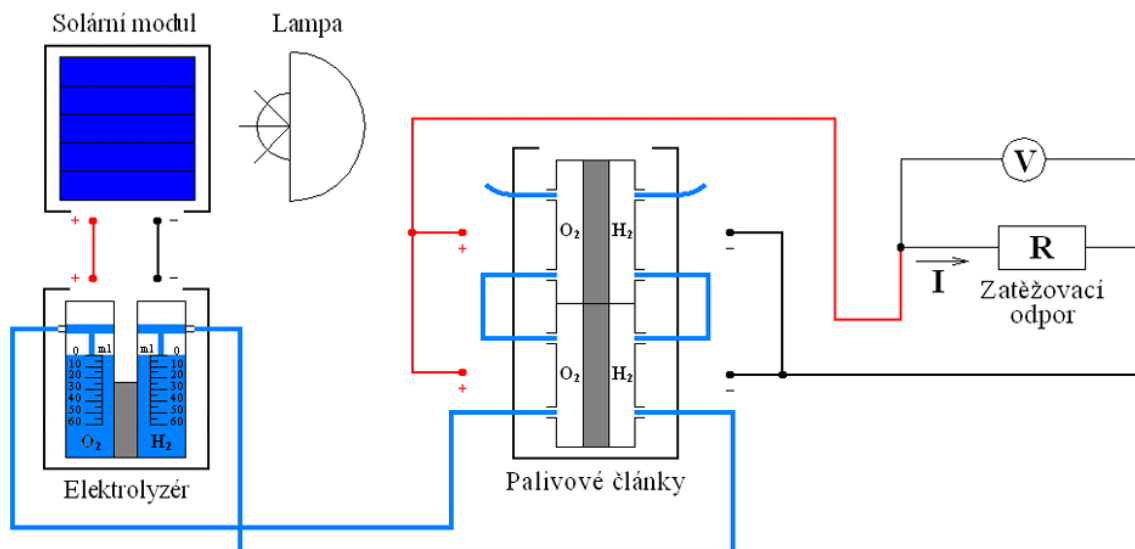
zátěži $1\ \Omega$, kdy účinnost dosáhla až 33,19 %. To odpovídá situaci, kdy palivový článek dodával nejvyšší výkon 193,44 mW při proudu 372 mA. Naopak při vysokých hodnotách odporu nebo při otevřeném obvodu (např. $200\ \Omega$ nebo OPEN) byla účinnost prakticky nulová, protože výstupní výkon článku byl velmi malý nebo žádný.

V případě reálných zátěží, jako je motor nebo lampa, se účinnost pohybovala v rozmezí 0,29–1,76 %. Tyto hodnoty ukazují, že při běžném praktickém využití soustava nevykazuje vysokou efektivitu. Důvodem jsou ztráty jak při elektrolýze vody, tak při následné přeměně chemické energie zpět na elektrickou v palivovém článku vlivem vnitřního odporu článku, polarizačních ztrát a neideálních pracovních podmínek. Navíc reálné zátěže, jako jsou motory nebo žárovky, často neodpovídají optimálním pracovním podmínkám palivového článku. Tyto zátěže mají zpravidla proměnlivý nebo nelineární odběr proudu, což může vést k provozu článku mimo jeho efektivní pracovní bod.

Pro zlepšení účinnosti soustavy elektrolyzér-palivový článek je kladen důraz na optimalizaci jednotlivých komponent a jejich vzájemnou integraci. Nejprve je třeba zlepšit účinnost elektrolyzéro, což lze dosáhnout použitím pokročilých materiálů pro elektrody a optimalizací pracovních podmínek, jako jsou teplota a tlak. Dále by měly být použity vysoce účinné katalyzátory pro palivový článek, které minimalizují ztráty a zvyšují reakční rychlost. Pro zvýšení celkové účinnosti soustavy je také doporučeno nasadit moderní měniče s nízkými ztrátami s funkcí MPPT (Maximum Power Point Tracking), které zajistí stabilní napětí i při změně zatížení, což zajistí spolehlivý a stabilní výkon. Recyklace odpadního tepla z obou zařízení může pomoci snížit energetické ztráty a zlepšit efektivitu systému.

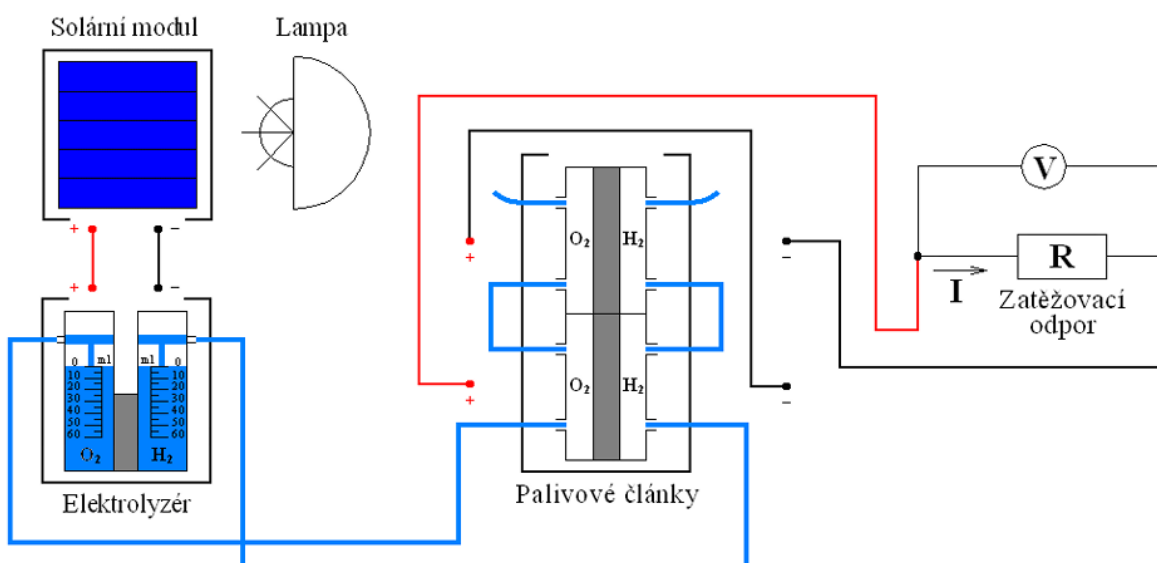
6.4 Řazení palivových článků

Cílem tohoto měření bylo porovnat elektrické vlastnosti vodíko-kyslíkových palivových článků při paralelním (Obrázek 26) a sériovém (Obrázek 27) zapojení. Konkrétně byla proměřena voltampérová charakteristika obou zapojení a následně graficky zpracována. Pomocí elektrolyzéro byly získány potřebné množství vodíku a kyslíku. Plyny byly vedeny do jednotlivých palivových článků. Dva palivové články byly propojeny do série (výstup jednoho článku připojen na vstup dalšího). Na výstup byl připojen měřicí obvod. Při změně zatěžovacího odporu byly zaznamenány hodnoty napětí (U) a proudu (I). Následně byly palivové články byly přepojeny tak, aby jejich vstupy a výstupy byly propojeny paralelně. Opět byla proměřena voltampérová charakteristika (napětí a proud při různém zatížení). Získaná data byla zpracována a porovnána pomocí grafů ($U=f(I)$).



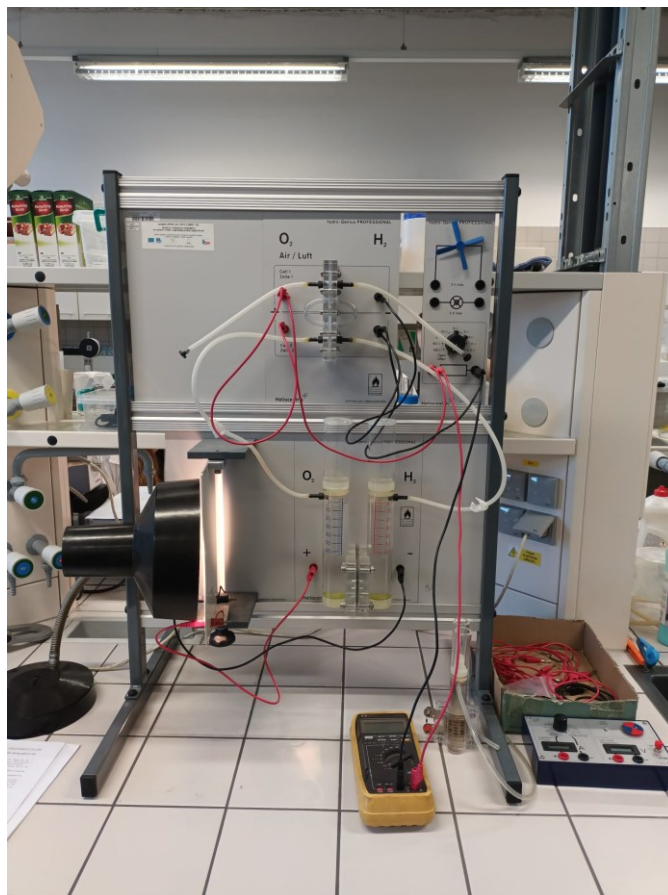
Obrázek 26 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky při paralelním řazení palivových článků.

(zdroj: [32])



Obrázek 27 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky při sériovém řazení palivových článků.

(zdroj: [32])



Obrázek 28 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky dvou palivových článků řazených paralelně

(zdroj: vlastní)



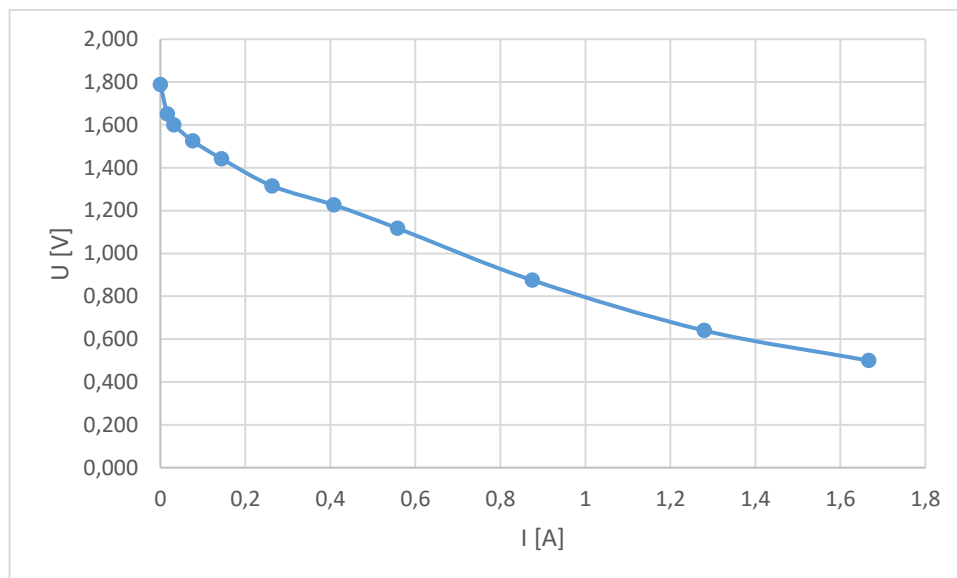
Obrázek 29 Fotografie zapojení měřící aparatury pro měření voltampérové charakteristiky dvou palivových článků řazených Sériově

(zdroj: vlastní)

Tabulka 7 Naměřené hodnoty napětí a proudu při sériovém řazení palivových článků

č. měření	zatěžovací odpor R [Ω]	proud I [mA]	napětí U [V]
1.	OPEN (nekonečno)	0	1,788
2.	100	0,017	1,651
3.	50	0,032	1,600
4.	20	0,076	1,525
5.	10	0,144	1,442
6.	5	0,263	1,315
7.	3	0,409	1,226
8.	2	0,559	1,117
9.	1	0,875	0,875
10.	0,5	1,280	0,640
11.	0,3	1,667	0,500

(zdroj: vlastní)



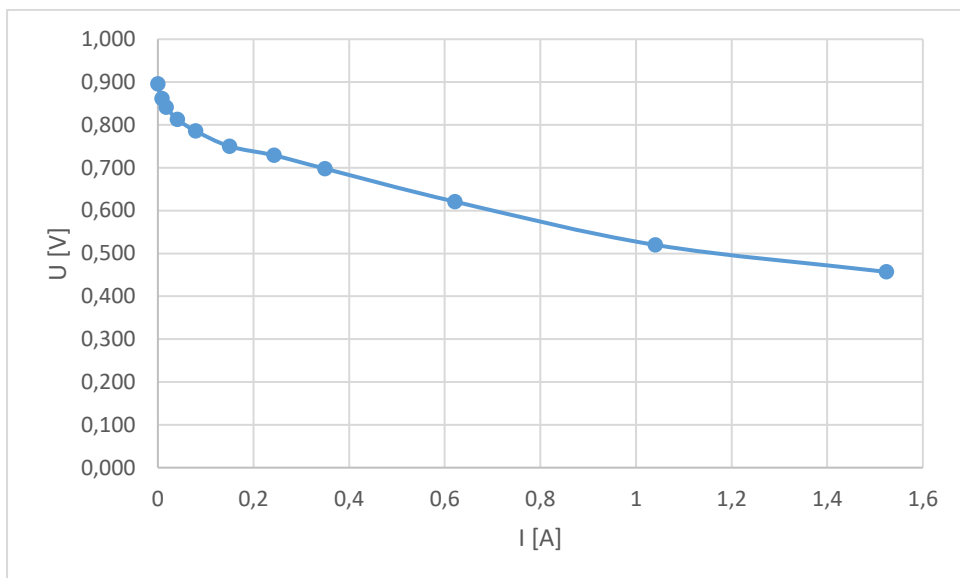
Obrázek 30 Voltampérová charakteristika při sériovém řazení palivových článků

(zdroj: vlastní)

Tabulka 8 Naměřené hodnoty napětí a proudu při sériovém řazení palivových článků

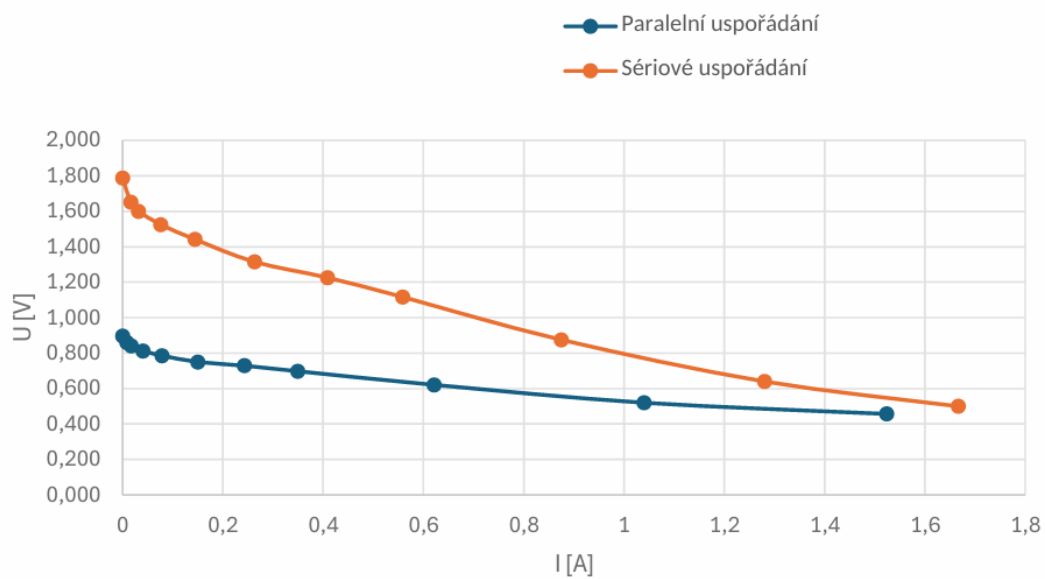
č. měření	zatěžovací odpor R [Ω]	proud I [mA]	napětí U [V]
1.	OPEN (nekonečno)	0	0,896
2.	100	0,009	0,861
3.	50	0,017	0,841
4.	20	0,041	0,813
5.	10	0,079	0,786
6.	5	0,150	0,750
7.	3	0,243	0,729
8.	2	0,349	0,698
9.	1	0,621	0,621
10.	0,5	1,040	0,520
11.	0,3	1,523	0,457

(zdroj: vlastní)



Obrázek 31 Voltampérová charakteristika při paralelním řazení palivových článků

(zdroj: vlastní)



Obrázek 32 Porovnání voltampérové charakteristiky pro paralelní a sériové řazení palivových článků

(zdroj: vlastní)

Měření ukázalo, že způsob řazení palivových článků má zásadní vliv na výsledné elektrické parametry soustavy (porovnání jednotlivých způsobů řazení na Obrázku 32). Při sériovém řazení se napětí jednotlivých článků sčítá, zatímco proud zůstává přibližně stejný jako u jednoho článku. Voltampérová charakteristika ukázala vyšší výstupní napětí, což je výhodné pro napájení zařízení vyžadujících vyšší napětí. Naproti tomu při paralelním řazení zůstává výstupní napětí přibližně stejné jako u jednoho článku, ale zvyšuje se výstupní proud, protože se sčítají proudové kapacity jednotlivých článků. Toto uspořádání je výhodné tam, kde je potřeba dodat více proudu při nízkém napětí. Výsledky odpovídají teoretickým předpokladům a potvrzují, že volba vhodného zapojení závisí na požadavcích konkrétní aplikace, kdy preferujeme vyšší napětí, nebo vyšší proud.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo seznámení se s principem funkce palivových článků, včetně jejich rozdělení výhodami, zápory i možnostmi a příklady praktického využití. Následně byly základní principy a vlastnosti ověřeny na laboratorních pokusech.

Teoretická část poskytla přehled o různých typech palivových článků, jejich vlastností, principů, využitím i porovnáním. Všeobecně se dostává největší pozornosti palivovým článkům typu PEMFC, díky jejich přesahu využití, jak ve stacionárních zařízeních, tak i v přenosných, či v dopravních prostředcích. Pro udržitelnost palivových článků je důležité zaměřit se i na vývoj, výrobu a distribuci jejich paliv, jelikož jejich slabší infrastruktura oproti fosilním palivům je jeden z hlavních nedostatků palivových článků.

V praktické části bylo při laboratorních podmínkách provedeno několik pokusů, jejichž hlavní komponenty byly vodíko-kyslíkový palivový článek a elektrolyzér. Proměřovaly se voltampérové a výkonové charakteristiky, účinnost celé soustavy i parametry při sériovém a paralelním řazením palivových článků. Následně pro interpretaci výsledků byly získané hodnoty zaneseny do grafů. Získaná data byla zhodnocena a porovnána s teoretickými předpoklady. Měření potvrdilo schopnost palivového článku generovat elektrickou energii s relativně vysokou účinností a bez produkce škodlivých emisí.

Z výsledků měření i získaných informací vyplývá, že palivové články představují perspektivní technologii s potenciálem pro širší uplatnění v rámci globálního zájmu dekarbonizace energetiky. Přestože čelí výzvám v oblasti výroby vodíku, cenové dostupnosti a životnosti komponent, pokračující vývoj a rostoucí investice do vodíkových technologií mohou tyto překážky postupně překonat.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Fuel cells: Materials needs and advances. Online. *MRS Bulletin*. 2024, roč. 49, č. 4. ISSN 1938-1425. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43577-024-00722-9>. [cit. 2025-05-13].
- [2] ČESKÁ ENERGETICKÁ AGENTURA. *Palivové články – progresivní technologie pro ekologickou výrobu energie*. Online. Konečná zpráva. Praha, 2003. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/3111.pdf>. [cit. 2025-01-11].
- [3] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [4] Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. Online. *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*. 2009, vol. 13, no. 9. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001336?via%3Dihub>. [cit. 2025-05-13].
- [5] A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications. Online. *International Journal of Energy Research*. 2024, roč. 48, č. 1. ISSN 1099-114X. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2024/7271748>. [cit. 2025-05-13].
- [6] A comprehensive review on different types of fuel cell and its applications. Online. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2024, roč. 13, č. 2, article 2. ISSN 2302-9285. Dostupné z: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.6348>. [cit. 2025-01-12].
- [7] *Review of Hydrogen Fuel Cell Technology and Its Application*. Online, jiný dokument. Nigeria: Olabisi Onabanjo University, 2024. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/377105856_Review_of_Hydrogen_Fuel_Cell_Technology_and_Its_Application. [cit. 2025-01-16].
- [8] Recent advances and future perspectives of carbon materials for fuel cell. Online. *Journal of Energy Chemistry*. 2021, roč. 54. ISSN 2095-4956. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120308200?via%3Dihub>. [cit. 2025-01-12].
- [9] Exploring Critical Parameters of Electrode Fabrication in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. Online. *Journal of Power Sources*. 2022, roč. 2022, č. 231638. ISSN 1873-2755. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775322006383?via%3Dihub>. [cit. 2025-01-12].
- [10] Cathode Materials for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells. Online. *Fuels*. 2024, roč. 5, č. 4, article 45, s. 805-824. ISSN 2673-3994. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2673-3994/5/4/45>. [cit. 2025-01-21].
- [11] On the Technology of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Energy Systems for Stationary Power Generation: A Review. Online. *Sustainability*. 2022, roč. 14, č. 22, article 15276. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/15276>. [cit. 2025-01-22].
- [12] Energy Efficiency Management of Coupling System for Molten Carbonate Fuel Cells. Online. *International Journal of Electrochemical Science*. 2022, roč. 17, č. 9, article 220945. ISSN 1452-3981. Dostupné z:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123011343?via%3Dihub>. [cit. 2025-01-23].
- [13] Renewable and Sustainable Energy Reviews. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023, roč. 179, article 113278. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212300134X?via%3Dihub>. [cit. 2025-01-23].
- [14] Hydrogen Combustion, Production, and Applications: A Review. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, roč. 49, č. 5. ISSN 0360-3199. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/380911011_Hydrogen_combustion_production_and_applications_A_review. [cit. 2025-01-25].
- [15] Green hydrogen. Online. *AIMS Energy*. 2023, roč. 11, č. 5. ISSN 2333-8342. Dostupné z: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/energy.2023042>. [cit. 2025-01-26].
- [16] Advances and challenges of methanol-tolerant oxygen reduction reaction electrocatalysts for the direct methanol fuel cell. Online. *Journal of Energy Chemistry*. 2023, vol. 77, s. 499-513. ISSN 2095-4956. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495622006210?via%3Dihub>. [cit. 2025-04-23].
- [17] Pt- and Pd- based intermetallic anode catalysts for direct ethanol fuel cell (DEFC): An overview. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 64, s. 357-362. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322028449>. [cit. 2025-04-23].
- [18] A review on alternative fuels in future energy system. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020, vol. 128, article 109927. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120302185>. [cit. 2025-04-22].
- [19] Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review. Online. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, roč. 60, s. 822–835. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211600161>. [cit. 2025-04-22].
- [20] Direct methane protonic ceramic fuel cells with self-assembled Ni-Rh bimetallic catalyst. Online. *Nature Communications*. 2023, vol. 14, no. 7485, article 7485. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-43388-8>. [cit. 2025-04-23].
- [21] Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. Online. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 17, article 6222, s. 1-27. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/17/6222>. [cit. 2025-05-08].
- [22] A Critical Review on Hydrogen Based Fuel Cell Technology and Applications. Online. *International Journal of Energy Research*. 2023, roč. 47, č. 6, article 7397, s. 3121-3145. ISSN 0363-907X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/er.7397>. [cit. 2025-02-03].
- [23] Hydrogen Safety Challenges: A Comprehensive Review on Hydrogen Explosion Accidents. Online. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 6, article 1350, s. 1-27. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/6/1350>. [cit. 2025-05-08].

- [24] Comparative study of electric and hydrogen mobility infrastructures in a remote context. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, vol. 50, no. 12, s. 1-15. ISSN 0360-3199. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924027769>. [cit. 2025-05-08].
- [25] Review of Fuel-Cell Electric Vehicles. Online. *Energies*. 2024, roč. 17, č. 9, article 2160. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/9/2160>. [cit. 2025-02-03].
- [26] Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives. Online. *Processes*. 2023, roč. 11, č. 1, article 97, s. 1–33. ISSN 2227-9717. Dostupné z: https://www.proquest.com/docview/2767266692?sourcetype=Scholarly%20Journals&utm_source=chatgpt.com. [cit. 2025-05-04].
- [27] Hydrogen fuel cell electric trains: Technologies, current status, and future. Online. *Applications in Energy and Combustion Science*. 2024, vol. 17, article 100255, s. 1-24. ISSN 2666-352X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666352X24000104?via%3Dihub>. [cit. 2025-05-04].
- [28] *Rural hospital invests in hydrogen*. Online. 2025, roč. 38, č. 3. American Hospital Association, 2025. Dostupné z: <https://www.hfmmagazine.com/rural-hospital-invests-hydrogen>. [cit. 2025-05-04].
- [29] VAŠINA, Martin. *Měření voltampérové a výkonové křivky vodíko kyslíkového palivového článku: Laboratorní cvičení z Environmentální fyziky*. Laboratorní úloha č. 10. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [30] VAŠINA, Martin. *Měření účinnosti soustavy elektrolyzér-palivový článek: Laboratorní cvičení z Enviromentální fyziky*. Laboratorní úloha č. 10. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [31] VAŠINA, Martin. *Měření charakteristiky elektrolyzérů: Laboratorní cvičení z Enviromentální fyziky*. Laboratorní úloha č. 11. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [32] VAŠINA, Martin. *Řazení palivových článků: Laboratorní cvičení z Environmentální fyziky*. Laboratorní úloha č. 13. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní princip palivového článku	14
Obrázek 2 Princip PEMFC	17
Obrázek 3 Zobrazení základního principu SOFC na bázi oxidově iontového (O-SOFC) elektrolytu	19
Obrázek 4: Princip MCFC	22
Obrázek 5 Základní princip PAFC.....	23
Obrázek 6 Princip AFC.....	24
Obrázek 7 Dělení technologií pro výrobu vodíku.....	26
Obrázek 8 Základní typy elektrolyzérů.....	27
Obrázek 9 Popis automobilu na vodíkový pohon	32
Obrázek 10 Schéma výkonových a energetických komponent modelu elektrického vlaku Coradia iLint s vodíkovými články.....	33
Obrázek 11 Výkonový rozsah technologie palivových článků.....	35
Obrázek 12 Záložní zdroj PEMFC o výkonu 100 kW pro nemocnici ve státě Washington, zvýrazněny jsou palivové články	35
Obrázek 13 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku	38
Obrázek 14 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku	39
Obrázek 15 Palivový článek	39
Obrázek 16 Měřicí zařízení se zátěží	40
Obrázek 17 Elektrolyzér	40
Obrázek 18 Voltampérová charakteristika palivového článku	41
Obrázek 19 Výkonová charakteristika palivového článku	42
Obrázek 20 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření charakteristiky elektrolyzéru. .	43
Obrázek 21 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky elektrolyzéru.....	44
Obrázek 22 Voltampérová charakteristika elektrolyzéru.....	45
Obrázek 23 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření účinnosti soustavy elektrolyzér a palivový článek.	47
Obrázek 24 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro účinnosti sestavy elektrolyzéru a palivového článku	47
Obrázek 25 graf závislosti účinnosti na výstupním proudu v soustavě elektrolyzér-palivový článek	48
Obrázek 26 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky při paralelním řazení palivových článků.	50

Obrázek 27 Schéma zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky při sériovém řazení palivových článků.....	50
Obrázek 28 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky dvou palivových článků řazených paralelně	51
Obrázek 29 Fotografie zapojení měřicí aparatury pro měření voltampérové charakteristiky dvou palivových článků řazených Sériově	52
Obrázek 30 voltampérová charakteristika při sériovém řazení palivových článků	53
Obrázek 31 Voltampérová charakteristika při paralelním řazení palivových článků.....	54
Obrázek 32 Porovnání voltampérové charakteristiky pro paralelní a sériové řazení palivových článků	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Srovnání charakteristik PEMFC, SOFC a MCFC.	15
Tabulka 2 Barevné pojmenování vodíku dle jeho výroby	26
Tabulka 3 Měření voltampérové a výkonové charakteristiky palivového článku.	41
Tabulka 4 Naměřené hodnoty stejnosměrného napětí a stejnosměrného proudu elektrolyzáru	44
Tabulka 5 Naměřené hodnoty výstupního napětí, proudu a výkonu palivového článku a účinnosti soustavy elektrolyzáru-palivový článek	48
Tabulka 6 Naměřené hodnoty napětí a proudu při sériovém řazení palivových článků.....	52
Tabulka 7 Naměřené hodnoty napětí a proudu při sériovém řazení palivových článků.....	53

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

I	ampér [A]	proud
R	ohm [Ω]	odpor
P	watt [W]	výkon
U	volt [V]	napětí
η	[-] / [%]	účinnost
AFC		alkalický palivový článek
DC		stejnosměrný proud
DEFC		palivový článek na bázi etanolu
DMFC		palivový článek na přímou metanolovou oxidaci
e		elementární náboj, elektron
FC		Palivový článek
FCEV		vozidlo s palivovým článkem
MCFC		palivový článek s tavenými uhličitany
MPPT		Sledování maximálního bodu výkonu
OPEN		otevřený obvod
PAFC		Palivový článek s kyselinou fosforečnou
PEM		proton výměnná membrána
PEMFC		palivový článek s proton výměnnou membránou
SOEC		tuhý oxidový elektrolyzér

