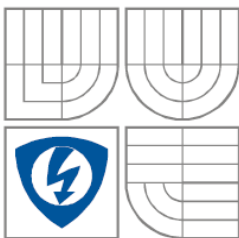


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

MODIFIKACE VLASTNOSTÍ Kladné ELEKTRODY NA BÁZI MnO_x PRO AFC POMOCÍ DOPANTŮ

CATHODE PARAMETER MODIFICATION OF MnO_x – BASED AFC CATHODE
THROUGH DOPANTS

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT
SEMESTRAL PROJECT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. David Kamrla

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.

BRNO, 2009

Obsah

Úvod.....	5
1 Alkalický palivový článek.....	4
1.1 Elektrody a chemické reakce v AFC.....	4
1.2 Třífázové rozhraní na elektrodě.....	5
1.3 Elektrolyt AFC.....	6
2 Výroba elektrod (teoretická část).....	7
2.1 Struktura elektrody.....	7
2.2 Postup výroby elektrody.....	8
2.2.1 Postup přípravy katalytického materiálu MnO_x + dopant.....	8
2.2.2 Příprava katalytického materiálu Pt.....	9
2.2.3 Lisování společné difúzní a katalytické vrstvy.....	10
2.2.4 Nanášení oddělovací vrstvy.....	10
2.2.5 Nástřik katalytické vrstvy.....	10
2.3 Měření elektrod AFC.....	10
2.4 Problémy dosavadních postupů.....	13
2.4.1 Problémy se změnou objemu při odpařování ředidel.....	14
2.4.2 Pórovitá elektroda.....	15
3 Výroba elektrod (praktická část).....	17
3.1 Výroba elektrod AFC.....	17
3.1.1 Vzorky N1, N2 – Chez A, snížení množství ředidel.....	17
3.1.2 Vzorek O1 – Chez A + MnO_x , sušení pasty.....	18
3.1.3 Vzorky O2, O3, O4 a O5 – mokrá elektroda.....	19
3.1.4 Vzorky P1, P3-P5 – ChezA bez míchání v ultrazvukové pračce.....	20
3.1.5 Vzorky P2 a P6 – Vulcan bez míchání v ultrazvukové pračce.....	22
3.1.6 Vzorky P7 a P8 – Nástřik platiny na difúzní vrstvu.....	23
3.1.7 Návrhy pro budoucí odzkoušení.....	24
3.2 Seznam použitých přístrojů a chemikálií.....	25
4 Závěr.....	27
5 Seznamy.....	28
5.1 Seznam obrázků.....	28
5.2 Seznam použitých zkratk.....	28
5.3 Použitá literatura.....	28

Úvod

Semestrální projekt 2 vychází z poznatků bakalářské práce [1] a je rozšířením semestrálního projektu 1, který shrnuje poznatky do teoretického optimalizovaného návodu pro výrobu elektrod alkalického palivového článku (AFC). Poznatky a myšlenky ze semestrálního projektu 1 budou zde ověřeny a potvrzeny nebo vyvráceny při praktických pokusech.

1 Alkalický palivový článek

Alkalické palivové články (AFC) patří do kategorie nízkoteplotních palivových článků. Jejich pracovní teplota se pohybuje mezi 20 až 100 °C, výkon dosahuje až 20 kW a účinnost se pohybuje mezi 45 a 60%. [2]

Základním principem fungování je stejně jako u ostatních palivových článků inverzní proces elektrolýzy vody. Palivový článek je složen z elektrického okruhu a porézních elektrod, které jsou odděleny elektrolytem. V oblasti pórů elektrod vzniká tzv. třífázové rozhraní mezi elektrodou, elektrolytem a reagenty, které vznikly oxidací paliva a redukcí okysličovadla. [2]

Elektrolyt musí být iontově vodivý, avšak pro elektrický proud musí být dielektrikem – elektrony nesmí propouštět. V alkalických palivových článcích je jako elektrolyt použit koncentrovaný kapalný hydroxid draselný KOH. [2]

Palivem používaným v AFC je čistý vodík H_2 . Jako okysličovadlo je nutné používat pouze čistý kyslík O_2 , protože oxid uhličitý CO_2 obsažený ve vzduchu způsobuje degradaci elektrolytu, dochází k tzv. otravě elektrolytu. [2]

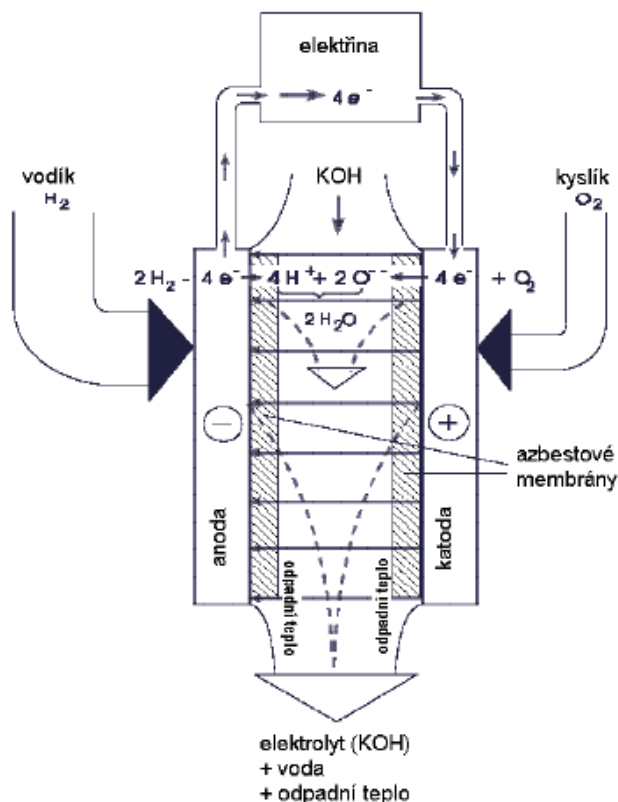
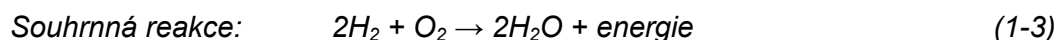
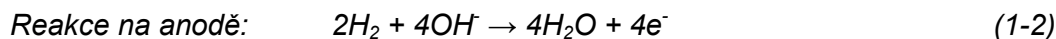
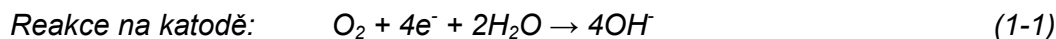
1.1 Elektrody a chemické reakce v AFC

Elektrody alkalického palivového článku fungují jako katalyzátor probíhajících chemických reakcí a musí umožňovat vznik třífázového rozhraní, tedy kontakt tří fází (reagující plyny, elektrolyt a elektroda). Elektrolyt vytváří na povrchu elektrod smáčivý film, skrze nějž difundují reagující plyny k elektrodě, kde dochází k chemickým reakcím (1-1 až 1-3). Cílem je, aby plocha smáčivého filmu byla co největší a aby skrze elektrodu mohla pronikat plynná fáze, proto se používají elektrody porézní. [2]

Na obou elektrodách vzniká elektrický potenciální rozdíl přibližně 1,2 V, který při zatížení článku obvykle poklesne na hodnotu 0,5 až 0,8 V. [3]

Elektrody v AFC jsou vyráběny jako vícevrstvé, zpravidla ze spékaného niklu, s příměsí uhlíku, opatřené tenkou vrstvou platiny, která funguje jako katalyzátor. Nikl zvyšuje elektrickou vodivost elektrody. [2]

Hydroxid draselný KOH je ve vodném roztoku disociován na ionty K^+ a OH^- . Kyslík přiváděný ke katodě je volnými elektrony z vnějšího okruhu redukován a jeho reakcí s vodou vzniká hydroxidový aniont OH^- (1-1), který je elektrolytem transportován na anodu. Vodík přiváděný na anodu zde reaguje s hydroxidovým aniontem OH^- za vzniku vody, při čemž se uvolní 4 elektrony (1-2).

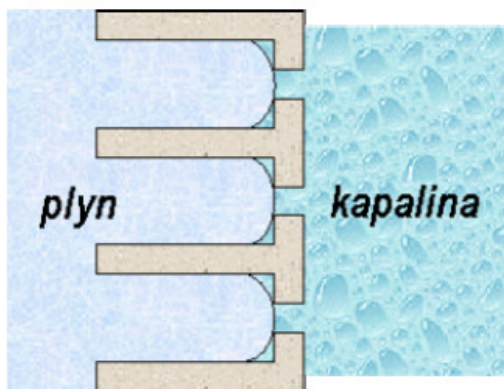


Obr. 1 - Princip alkalického palivového článku [2]

1.2 Třífázové rozhraní na elektrodě

Elektroda v palivovém článku plní funkci katalyzátoru probíhajících dějů. Jejím účelem je vyvolat reakci mezi reaktanty (palivo a okysličovadlo) a elektrolytem, aniž by se jí sama účastnila nebo podléhala korozi. Z definice elektrody vyplývá, že musí mít též vlastnosti elektrického vodiče a umožnit kontakt tří fází – plynných reaktantů, kapalného elektrolytu a pevné elektrody. [1] [3]

Rozhraní mezi kapalinou a plynem lze stabilizovat několika různými způsoby, z nichž všechny jsou založeny na kapilárním efektu. Kapalina vzlíná úzkými póry elektrody, tlak plynu však zabraňuje kapalině vnikat do větších pórů (obr. 2). Elektrolyt má tak snahu vytvářet tenký smáčivý film na vnitřní straně elektrody. Reagující plyn, který je obtížně rozpustný v elektrolytu, může difundovat skrz tento film k povrchu elektrody, kde dochází k reakci plynu s kapalinou. [1] [2]



Obr. 2 - Schematický řez pórovitou elektrodou a třífázové rozhraní [2]

1.3 Elektrolyt AFC

Elektrolyt je v alkalickém palivovém článku zásaditý, používá se vodný roztok hydroxidu draselného KOH. Jeho koncentrace se liší podle pracovní teploty. Pro vyšší teploty je nutné použít vyšší koncentraci, pro teplotu dosahující 250 °C koncentraci až 85 hmotnostních procent. Při nižších (tzn. běžných pracovních) teplotách do 100 °C se používá roztok o koncentraci 35 až 50 hmotnostních procent. Vodný roztok KOH je jako elektrolyt upřednostňován proto, že má ze všech alkalických hydroxidů nejvyšší iontovou vodivost. [1] [2]

U některých konstrukčních řešení AFC elektrolyt cirkuluje, čímž je odváděno vzniklé teplo (viz reakce 1-4) a eliminuje se tak možnost varu vody. Při cirkulaci elektrolytu se pomaleji projevují účinky případné otravy alkalického elektrolytu CO₂. [1] [2]

Elektrolyt je zadržován v matici vyrobené obvykle z polytetrafluorethylénu (PTFE). Jako katalyzátory se používají různé kovy (Pt, Rh, Ag, Ni, Mn) a jejich oxidy. [1]

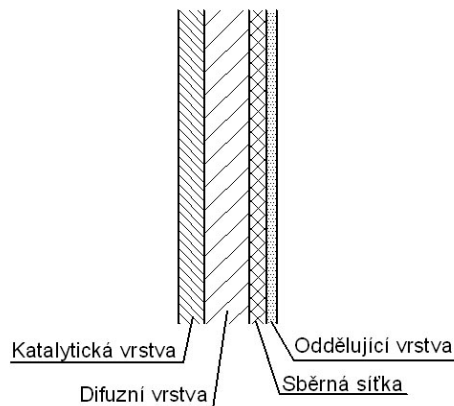
Při otravě elektrolytu reaguje CO₂ s hydroxidovými ionty elektrolytu a vzniká uhličitán draselný (1-4), který se již neúčastní reakcí na elektrodách. Článek tím ztrácí na výkonu a účinnosti. [2]



Otrava elektrolytu je jedním z hlavních důvodů, proč AFC nejsou příliš rozšířené.

2 Výroba elektrod (teoretická část)

2.1 Struktura elektrody



Obr. 3 - Vrstvy elektrody AFC [1]

- Katalytická vrstva – probíhají zde reakce elektrolytu s reagenty. Je tvořená vrstvou obohacenou o katalyzátor (Anoda – Pt, Katoda - PT či MnO_x + dopant (katoda)). Uvolňují se (anoda) / Spotřebovávají se (katoda) elektrony chemickými reakcemi. [1]
- Difúzní vrstva – slouží k rovnoměrnému přísunu plynu ke katalytické vrstvě a transportu elektronů mezi sběrnou sítíkou a katalytickou vrstvou. Tvoří ji uhlík slepený pomocí PTFE nebo spékaný nikl s příměsí uhlíku. [1]
- Sběrná síťka – sbírá (anoda) / dodává (katoda) elektrony do chemické reakce, materiálem je zpravidla nikl. [1]
- Oddělovací vrstva – tvoří ji tenký nástrík PTFE, který je propustný pro plyn (reagent), ale nepropustný pro kapalinu (elektrolyt). [1]

Při předchozích experimentech [1] (viz obr. 4) se ukázalo, že elektrody se společnou katalytickou a difúzní vrstvou mají lepší elektrické vlastnosti než elektrody s lisovanou difúzní vrstvou a katalytickou vrstvou nanesenou nástríkem. Další experimenty budou zaměřeny na zdokonalení výroby elektrod se společnou difúzní a katalytickou vrstvou.

Nevýhodou tohoto řešení je vyšší spotřeba katalytického materiálu a snížení katalytické účinnosti (ne všechen katalytický materiál je na třífázovém rozhraní a účastní se chemických reakcí), což u alternativních levných katalyzátorů (MnO_x + dopant) není z ekonomického hlediska problém.

Z předchozích experimentů [1] taktéž vyplývá, že elektrody vytvořené z uhlíku typu Vulcan mají lepší elektrické i mechanické vlastnosti než elektrody z uhlíku typu Chezacarb A. S ohledem na cenu platinového katalyzátoru by bylo vhodnější zvolit spíše dražší, ale pro výrobu elektrod AFC výhodnější uhlík typu Vulcan (cena uhlíku je nižší než cena katalyzátoru). Uhlík typu Chezacarb A je ekonomicky mnohem výhodnější než Vulcan, pro palivové články založené na alternativních levných katalyzátorech již není cena uhlíku nezanedbatelná (oproti ceně katalyzátoru), proto bude snaha optimalizovat postup výroby tak, aby byl použitelný i levnější uhlík typu Chezacarb A. Zamezení vzniku prasklin a zlepšení mechanických vlastností (pevnosti a spolehlivosti) může být dosaženo zvýšením podílu pojiva.

Elektroda může být i obrácená, tj. oddělující vrstva bude ze strany difúzní vrstvy a katalytická vrstva bude ze strany sběrné sítě. Dá se předpokládat, že tato varianta bude mít nižší chemicky aktivní plochu třífázového rozhraní (stín od drátků sběrné sítě). Výhodou bylo odstranění elektrického odporu difúzní vrstvy. Protože difúzní vrstva je vytvořena z uhlíku, který má malý elektrický odpor, nebude tato varianta prakticky odzkoušena.

2.2 Postup výroby elektrody

Výroba elektrody sestává z několika kroků. Prvním krokem je příprava katalytické směsi, kterou tvoří plnivo (uhlík), katalyzátor a případné dopující prvky. Ve druhé fázi se z katalytické směsi vytvoří přidáním ředidel (destilovaná voda a ethanol, popř. destilovaná voda a isopropylalkohol) a pojiva (PTFE) pasta, která se nanese na sběrnou síťku a za tepla nalisuje. V posledním kroku se provede nástřik oddělující vrstvy (PTFE). [1]

2.2.1 Postup přípravy katalytického materiálu MnO_x + dopant

Oxid manganu (MnO_x) je alternativní katalyzátor pro kladnou elektrodu, který nahrazuje drahou platinu. Množství MnO_x se zvolí tak, aby na 9 molů uhlíku připadal 1 mol Mn a 1 mol případného dopantu.

Práškový uhlík se v magnetické míchačce rozptýlí v destilované vodě a přidá se dopující prvek. Suspenze se uvede do varu a je postupně kapátkem přidán vodný roztok KMnO_4 . Po 10 minutách varu proběhne redukce KMnO_4 na uhlíkových sazích dle níže uvedené rovnice (2-1). [2]



Několikanásobnou dekantací se ze směsi odstraní podstatná část vedlejších produktů. Nakonec je katalytická směs oddělena filtrací a vysušena.

Tab 1. Hmotnosti navážek pro jednotlivé vzorky s katalytickým materiálem [3]

Označení směsi	Navážky		
	č. 1	č. 2	č. 3
C + katalyzátor + dopant	č. 1	č. 2	č. 3
C + Pt	1 g C	0,212 g H_2PtCl_6	-
C + MnO_x	1 g C	1,46 g KMnO_4	-
C + MnO_x + Mn	1 g C	1,46 g KMnO_4	2,09 g $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
C + MnO_x + Zn	1 g C	1,46 g KMnO_4	1,06 g $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$
C + MnO_x + Mg	1 g C	1,46 g KMnO_4	2,14 g $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
C + MnO_x + Ni	1 g C	1,46 g KMnO_4	2,42 g $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

2.2.2 Příprava katalytického materiálu Pt

Pro přípravu platinové katalytické vrstvy se smíchá destilovaná voda (H_2O) a isopropylalkohol (IPA) v poměru 2:1. Do směsi budou poté přidány uhlíkové saze (Vulcan) a kyselina chloroplatičitá (H_2PtCl_6). Zvolí se takové množství H_2PtCl_6 , aby katalyzátor Pt ve výsledném vzorku tvořil s uhlíkem 10% molárního množství. [1]

Suspenze se důkladně promíchá v ultrazvukové pračce a následně se v sušící peci důkladně vysuší. Vzniklý uhlíkový prášek s rovnoměrně rozptýlenou H_2PtCl_6 se vloží do pece s ochrannou atmosférou, kde za teploty 400 °C dojde k rozložení H_2PtCl_6 na platinu (viz Tab. 2). [1] [3]

Tab 2. Stupně tepelného rozkladu roztoku kyseliny chloroplatičité

Teplota [°C]	Reakce
82,3	odpaření IPA
100,0	odpaření H_2O
160,0	$\text{H}_2\text{PtCl}_6 \rightarrow \text{PtCl}_4 + 2\text{HCl}$
300,0	$\text{PtCl}_4 \rightarrow \text{PtCl}_2 + \text{Cl}_2$
350,0	$\text{PtCl}_2 \rightarrow \text{Pt} + \text{Cl}_2$

Složky chlorovodík (HCl) a chlor (Cl_2) jsou za dané teploty v plynném skupenství a ze směsi by se měly odpařit. Při 400 °C by již měla být platina kompletně vyloučena na uhlíku; je potřeba ověřit, aby se platina místo na uhlíku nevyloučila na keramické misce. [1]

Rozklad platiny ve vzduchové atmosféře má tu nevýhodu, že mohou vznikat oxidy platiny PtO_x . Tento zjednodušený postup je však technologicky i ekonomicky výhodnější než tepelné žhání v inertní atmosféře, které by vzniku oxidů platiny zamezilo. [1]

2.2.3 Lisování společné difúzní a katalytické vrstvy

V prvním kroku je promíchána katalytická směs (uhlík + katalyzátor), pojivo (PTFE) a ředidla (voda + ethanol) v ultrazvukové pračce. Množství ředidla je takové, aby došlo k dokonalému promíchání. Tím vznikne suspenze, která se následně suší, dokud hmota nenabude konzistence pasty.

Pastu nanese přes šablonu o definované tloušťce na sběrnou síťku a následně lisujeme za tepla. Měla by vzniknout konzistentní ohebná vrstva, která by měla držet na síťce a mít požadované elektrické a chemické vlastnosti. [1]

V posledním kroku se vystřihne elektroda do požadovaného tvaru. [1]

2.2.4 Nanášení oddělující vrstvy

Oddělující vrstva vznikne nástřikem cca 1 ml 6% suspenze PTFE. Po zaschnutí by měla vzniknout jednolitá vrstva PTFE, která propouští plyn, ale nikoli kapalný elektrolyt. [1]

2.2.5 Nástřik katalytické vrstvy

Pokud se nepodaří vytvořit elektrodu se společnou difúzní a katalytickou vrstvou, je možno vytvořit elektrodu s oddělenou difúzní a katalytickou vrstvou. Difúzní vrstva se nalisuje dle bodu 2.2.3, pouze místo katalytické směsi se použijí pouze uhlíkové saze. [1]

Pro tvorbu tekuté katalytické směsi (inkoustu) se použije stejných poměrů složek směsi uvedených v postupu pro nanášení na rotační diskovou elektrodu dle práce Doc. Ing. Vítězslava Nováka PhD. [4], pouze poměr ředidel bude desetinný, aby byla vyšší produktivita práce. Bude tedy použito 100 mg katalytické směsi s 6 ml destilované vody a s 3 ml ethanolu, která se rozmíchá v ultrazvukové pračce. Poté se přidá 20 µl 60% emulze PTFE a opět v ultrazvukové pračce důkladně promíchá. Ethanol se používá místo IPA, protože má menší molekuly a lepší vzlínavost a je tak pro nanášení nástřikávací pistolí vhodnější. [1]

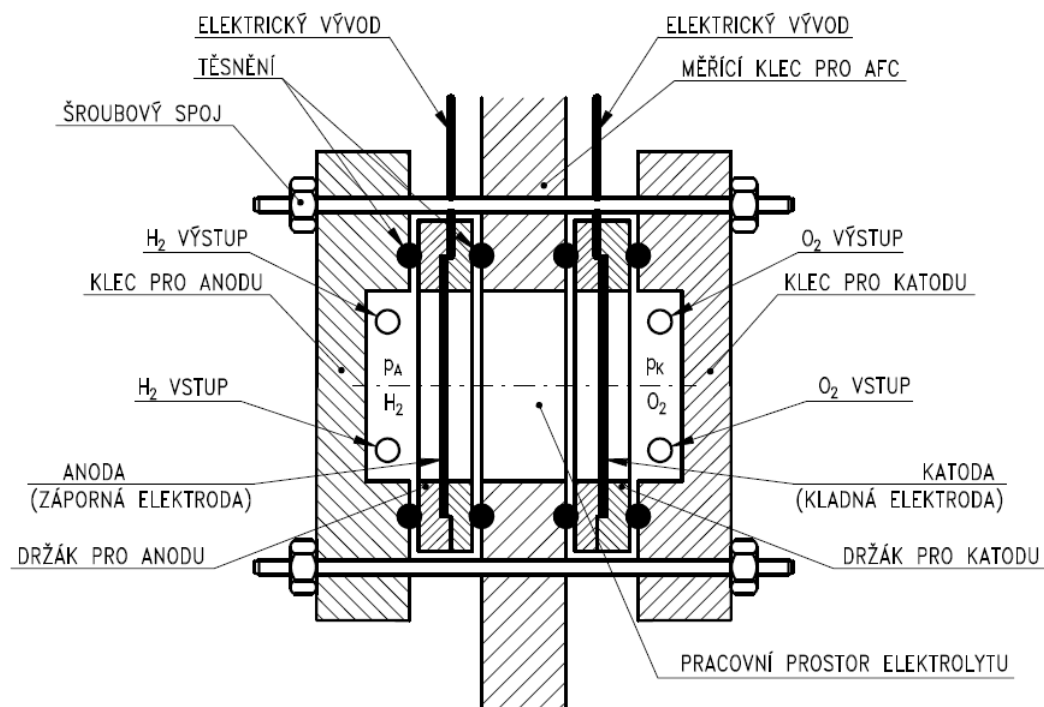
Vzniklý inkoust se na difúzní vrstvu elektrody nástříká a nanesená vrstva se nechá vyschnout. Nástřik se několikrát zopakuje. [1]

2.3 Měření elektrod AFC

Vyrobené elektrody budou podrobeny měření ampér-voltové a výkonové charakteristiky [5]. Cílem tohoto měření je porovnat účinnost elektrod s různou konstrukcí a různými katalyzátory a srovnat tyto účinnosti s účinnostmi katalyzátorů změřených pomocí rotační diskové elektrody (RDE) a pomocí rotační diskové elektrody s prstencem.

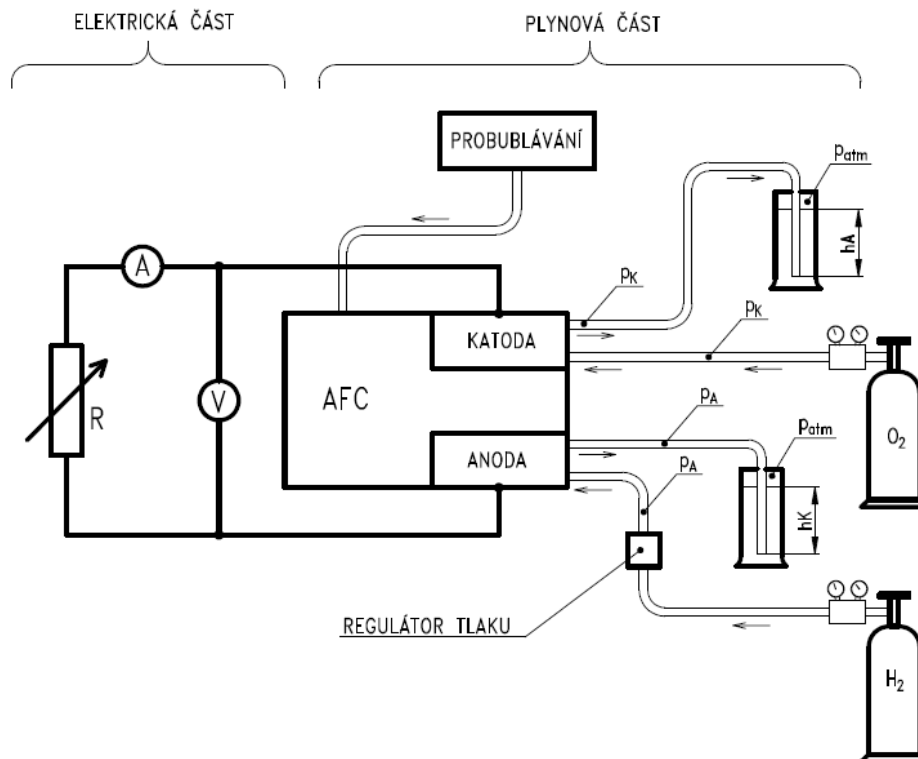
Před započítím samotného měření je nezbytné upravit každou elektrodu tak, aby se dala vložit do elektrodové klece. Z vytvořených elektrod se vystřihne kruh o průměru 32 mm s vývodním páskem pro připojení do vnějšího elektrického obvodu. Z vývodního pásku se opatrně odstraní difúzní vrstva. Vystřižená elektroda se zacvakne do držáku. [1]

Pro každé měření je zvolen jeden elektrodový pár, který je upevněn do elektrodové klece a tato je čtyřmi šrouby přišroubována k měřicí kleci AFC (viz Obr. 4). [1]

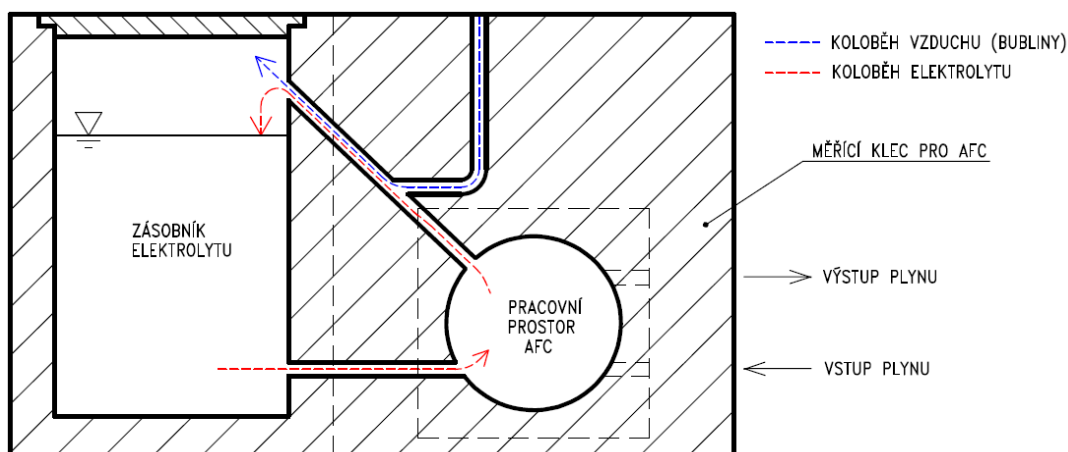


Obr. 4 - Sestavení AFC – řez pracovním prostorem. [1]

Do katodové klece (s platinovou elektrodou nebo elektrodou s alternativním katodovým katalyzátorem) se přivede kyslík z tlakové láhve, výstup se nechá přes vodní sloupec o výšce 10 cm probublávat do volné atmosféry. V pracovní oblasti tak vznikne mírný přetlak 980 Pa, který plyn protlačí přes oddělovací vrstvu a difúzní vrstvu do oblasti, kde dochází k chemickým reakcím. Podobně do anodové klece s platinovou elektrodou se přivede vodík. Výstup se opět nechá probublávat přes vodní sloupec o výšce 10 cm (viz Obr. 5). [1]



Obr. 5 - Schéma zapojení AFC. [1]



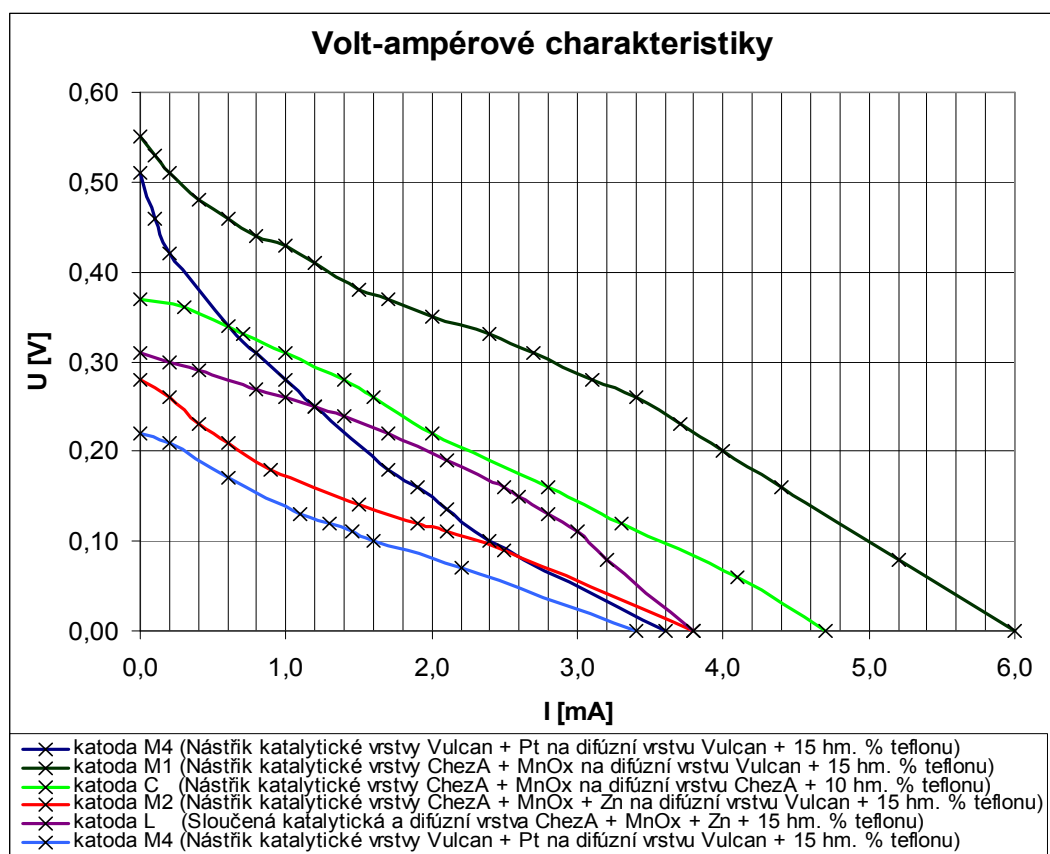
Obr. 6 - Schéma koloběhu elektrolytu - měřící klec v řezu. [1]

Elektrolytem je jednomolární roztok hydroxidu draselného (KOH) ve vodě [3]. Reakcí na elektrodě vznikne H₂O a elektrická energie (1-1). Aby nedocházelo k ředění elektrolytu, je zaveden nucený oběh probubláváním. Jedna bublina vytlačí sloupec, který jen nad ní, a místo něj ze zásobníku spodním přívodem nateče nezředěný roztok KOH (viz Obr. 6). V zásobníku je 200 ml roztoku, což je pro jednotlivá měření dostatečné množství na to, aby nedošlo k výraznému zředění vznikající vodou. Pro každou sadu měření je použit nový roztok KOH, zamezí se tak chybě způsobené otravou elektrolytu dle rovnice 2-1. [1]

Anoda a katoda se vnějším elektrickým okruhem propojí přes nastavitelnou impedanci a ampérmetr. Voltmetr se zapojí tak, aby ukazoval úbytek napětí na impedanci (viz Obr. 5). Pomocí daného zapojení lze změřit ampér-voltovou charakteristiku (závislost napětí mezi elektrodami na protékajícím proudu) a vypočítat výkonovou charakteristiku (závislost výkonu na proudu). Odpor AFC je o několik řádů nižší, než odpor voltmetru. Proud tekoucí voltmetrem lze zanedbat. [1]

Z ampér-voltové charakteristiky a výkonové charakteristiky lze vypočítat další parametry elektrodové dvojice, jako jsou plošná proudová a výkonová hustota, účinnost AFC a srovnat tyto parametry s jinými elektrodovými dvojicemi. [1] [2]

2.4 Problémy dosavadních postupů



Obr. 7 - V-A charakteristiky proměřených kladných elektrod. [1]

Předchozí měření [1] (viz. obr 4) bylo zatíženo chybou postupné degradace společné záporné elektrody (vzorek M4 měřený dvakrát, na začátku a na konci, měl při druhém měření výrazně horší elektrické vlastnosti). Aby se daná chyba v příštích měřeních neopakovala, je nutno vyrobit časově stabilnější elektrody nebo pro každou katodu mít novou anodu se stejnými elektrickými vlastnostmi. Nejjednodušší řešení je vyrobit naráz větší elektrodovou

plochu, z níž budou vystřihnuty jednotlivé elektrody; docílí se tak stejných vlastností pro všechny elektrody vyrobené z jednoho výlisku. Nevýhodou je, že pokud se lisování nezdaří, promrhá se mnoho drahého platinového katalyzátoru.

Výsledné proudové hustoty z předchozích experimentů byly řádově 100x nižší než se očekávané. Cílem dalších experimentů bude zvýšit proudovou hustotu elektrodového systému a také jeho životnost.

2.4.1 Problémy se změnou objemu při odpařování ředidel

Pasta se skládá ze základního materiálu (uhlík + katalyzátor), pojiva (PTFE) a ředidel (destilovaná voda + ethylalkohol / IPA). Ředidla jsou nedílnou součástí pasty (zaručují tekutost o dané viskozitě), ale nejsou součástí výsledné nalisované elektrody. Odpaření ředidel s sebou nese změnu objemu, která se projeví dvěma způsoby:

a) Zmenšením tloušťky výsledné vrstvy oproti nanesené vrstvě. Oprava se provede korekcí výšky nanesené pasty.

b) Zmenšením plochy výsledné vrstvy oproti nanesené vrstvě. Toto smrštění se projevuje vznikem nežádoucích prasklin, popřípadě úplnou destrukcí nanášené vrstvy při lisování za tepla.

Cílem tedy je snížit poměrné množství ředidel na nezbytné minimum a zaručení, že pasta z různých várek bude mít stejné poměrné množství ředidel. U jednoho složení pasty (tj. stejného složení základního materiálu – uhlík + katalyzátor + dopant) se určí poměrný obsah ředidel pomocí hmotnosti pasty – pokud se vždy použije stejné množství základního materiálu a pojiva, tak se pasta bude sušit do dosažení požadované hmotnosti (a tím i dosažení požadovaného zastoupení ředidel). Při velkých množstvích lze použít přímého měření pomocí viskozimetrů (viskozita je vlastnost, která je klíčová pro nanášení pasty).

Problém nastává, pokud chceme dosáhnout stejné viskozity u past s různými základními materiály a kde nejde efektivně použít viskozimetrů. Poměrné hmotnostní zastoupení ředidla již je nepřesné, protože různý základní materiál (katalyzátor a dopant) mají různou hustotu. Bude nutno pro každý materiál vyzkoušet a určit minimální množství ředidla, které stačí na to, aby pasta měla vhodnou viskozitu pro nanášení. Orientačně lze vycházet z poměru ředidel vůči uhlíku (ne tedy vůči hmotnosti celého základního materiálu).

Při předchozí výrobě elektrod byly nedostatkem velké časy odpařování. Časové úspory se dosáhne tak, že se použije jen tolik ředidel, aby došlo k důkladnému promíslení. Dostáváme tedy dvě různé hodnoty množství ředidel v pastě – při tvorbě pasty je ředidel více (z důvodu lepšího promíslení) než při nanášení (minimum ředidel při zachování vhodné viskozity pro nanášení).

2.4.2 Pórovitá elektroda

Zvýšení proudové hustoty elektrody je možné docílit mimo jiné i zvětšením plochy třífazového rozhraní (viz obr. 2). Při výrobě společné katalytické a difúzní vrstvy lze kromě plniva (uhlík), pojiva (PTFE), katalyzátoru a ředidel (IPA, ethylalkohol, voda) přidat další složku, která zvětší pórovitost elektrody. Daná přídatná složka může póry vytvářet různými způsoby:

a) Během lisování za tepla látka částečně nebo kompletně vysublimuje. Během lisování nemá plyn kam uniknout a v elektrodě vzniknou póry. Tento způsob nepovažuji za vhodný, protože při přípravě elektrod se ukázalo, že podobně se chovají ředidla a při rychlém lisování (bez dostatečného vysušení ředidel) se uvolní v lisované elektrodě tolik plynu, že vzorek ztratí konzistenci (elektroda se rozpadne). Navíc by bylo nutno vyřešit, jak zaručit, že páry budou ve vzorku rovnoměrně rozloženy.

b) Přídatná látka v pevném skupenství rovnoměrně rozptýlena v pastě; po vylisování za tepla se nechá přídatná látka vysublimovat za vyšší teploty, než je lisovací teplota. Prázdný prostor po vysublimovaném materiálu vytvoří požadované póry. Nevýhodou je další tepelné a mechanické namáhání elektrody a existuje nebezpečí, že elektroda změní své elektrické vlastnosti, ztratí soudržnost nebo začne hořet.

c) Přídatná látka v pevném skupenství rovnoměrně rozptýlena v pastě; po vylisování za tepla se nechá přídatná látka rozpustit v rozpouštědle. Případnou nevýhodou je možnost otravy elektrody, popřípadě celého elektrodového systému, zůstatkovým ředidlem nebo nedokonalé rozpuštěnou přídatnou látkou.

d) Tzv. pěnotvorné činidlo rozptýlené ve směsi; při lisování za tepla ve směsi vzniká pěna, jejíž bublinky vytvoří požadované póry. Nevýhodou tohoto řešení je, že vysoký tlak při lisování může pěnu znehodnotit. Další nevýhodou je, že přírůstek pěnotvorného činidla do směsi může ovlivnit chemické a elektrické vlastnosti elektrody.

Předpokladem je, že elektroda s uměle vytvořenými póry bude mít vyšší proudovou hustotu, tuto domněnku je potřeba v praxi vyzkoušet. Výroba elektrody s cíleně vytvářenými póry však bude proveditelná až tehdy, kdy se podaří výrobu elektrod optimalizovat natolik, že nebudou vznikat problémy se soudržností elektrod.

Volba konkrétního přídatného materiálu pro cílenou tvorbu pórů a aplikace do výroby je natolik obsáhlá a časově náročná problematika, že by to vydalo na samostatnou diplomovou práci, proto se touto problematikou budu zabývat jen okrajově.

Jak již bylo zmíněno, pórovitost vzniká i odpařováním ředidel z pasty při lisování za tepla. Aby elektrody měly strukturu identickou v co nejvyšší míře, je potřeba zaručit co

možno nejpodobnější pórovitost u jednotlivých elektrod. Toho docílíme nejvíce tím, že elektrody budou lisovány za stejných podmínek a různé pasty budou mít stejný objemový poměr ředidel, respektive stejnou viskozitu.

Stejného lisovacího tlaku se docílí, když lisovací síla bude působit na stejnou plochu. Stejně plochy u různých elektrod se docílí při nanášení pasty přes šablonu s definovanou plochou.

3 Výroba elektrod (praktická část)

V praktické části se provede ověření/vyvrácení vybrané teorie z kapitoly 2 s cílem co nejvíce se přiblížit návodu na výrobu ideální elektrody AFC. Výsledky na ideálních elektrodách by se měly být závislé na výsledcích z RDE.

3.1 Výroba elektrod AFC

Každý vzorek bude charakterizován údaji o jeho složení a přípravě, jež budou sestaveny do tabulky stejně jako v bakalářské práci [1], na kterou tato práce navazuje. Vzorky začínající písmenem A až M byly vytvořeny v bakalářské práci [1], vzorky v této práci zachovávají podobný způsob označování a v číslování navazují.

V horní části tabulky je uveden název vzorku a podrobnosti při přípravě pasty – gramáž a typ uhlíkových sazí, hmotnostní procento pojiva PTFE, množství ředidel v pastě při nanášení na síťku (H_2O a etanol v objemovém poměru 2:1) a doba, po kterou se vzorek rozmíchával v ultrazvukové pračce.

V druhé části tabulky jsou uvedeny parametry lisování vzorku - výsledná tloušťka elektrody h [mm], plocha nalisované vrstvy S [cm²], lisující zátěž m_g [kg], vypočítaný lisovací tlak [Pa], teplota τ [°C] a čas t [min] lisování.

Jednou z nejjednodušejí realizovatelných myšlenek, jak zabránit výraznému popraskání elektrod při lisování za tepla je použít méně ředidel při míchání pasty.

Aby se zabránilo odtrhávání uhlíkových vrstev od sběrné sítě vlivem špatného protečení pasty skrze síťku, je použita niklová síťka s průměrem drátu 200 μ m velikostí oka 400 μ m.

3.1.1 Vzorky N1, N2 – Chez A, snížení množství ředidel

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
N1, N2	1 g ChezA		10 hm %	8 ml	18 min
h_1 [mm]	S_1 [cm ²]	m_{g1} [kg]	p_1 [MPa]	τ_1 [°C]	t_1 [min]
0,75	11	1000	8,9	155±10	30
h_2 [mm]	S_2 [cm ²]	m_{g2} [kg]	p_2 [MPa]	τ_2 [°C]	t_2 [min]
2,5	28	1000	3,5	155±10	30

Byla nalisována pasta na jejíž výrobu bylo použito jen 12 ml ředidla ($\text{H}_2\text{O} + \text{IPA}$). 8 ml před rozmícháním a další 4 ml během rozmíchávání v ultrazvukové pračce. Lisovací teplota na základě poznání ze vzorků F, G, H, I byla zvýšena na 155 ± 10 °C, aby nedocházelo k nalepení elektrody na stůl lisu a následnému odtržení lisované vrstvy od sběrné sítě. Bylo odzkoušeno nanesení tenké vrstvy (vzorek N1) a tlusté vrstvy pasty (vzorek N2).

Oba vzorky mají výrazné praskliny zasahující místy skrze celou výšku elektrody. Tenčí elektroda N1 má více prasklin, ale méně širokých a hlubokých (praskliny tvoří ostrůvky o ploše cca 10 mm²). Elektroda s větší tloušťkou N2 má méně prasklin, ale více široké (praskliny tvoří ostrůvky o ploše cca 0,5 cm²).

Po nanesení nebyla pasta vysoušena v peci, čímž se podstatně zkrátil čas výroby elektrody a povrch elektrody je o něco lepší než např. vzorek C (viz [1] - Obr. 18).

Dalšího zlepšení může být dosaženo vysušováním vzorku v peci před lisováním za tepla.

3.1.2 Vzorek O1 – Chez A + MnO_x , sušení pasty

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
O1	2 g ChezA + MnO_x		10 hm %	9 ml	9 min
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
1,0	21,5	1000	4,6	155±10	30

Při míchání pasty byl zřetelný rozdíl mezi potřebným množstvím ředidla pro vznik tekuté pasty mezi uhlíkem (vzorek N) a uhlíkem s navařeným katalyzátorem MnO_x . Zde stačilo ke vzniku pasty 9 ml ředidla (6ml před míchání v ultrazvukové pračce, 3 ml přidány během míchání v ultrazvukové pračce). Rozdíl je zapříčiněn rozdílným objemem mezi uhlíkem a směsí uhlíku s navařeným katalyzátorem.

Pomocí vážení během vysoušení pasty se určilo množství zbytkových ředidel v nevylišované elektrodě. Při vysoušení vznikaly praskliny, které vznikaly smršťováním pasty. Praskliny se zahlazovaly opětovným roztíráním pasty.

Už při odpaření pětiny ředidel začala pasta výrazně tuhnout tak, že nově vznikající praskliny se již obtížně zacelovaly. V této fázi se vysoušení přerušilo, protože další vysoušení bez lisování by vedlo k neopravitelnému vzniku trhlin podobně jako u vzorku I2 (elektroda měla vzniknout vyschnutím pasty bez lisování, místo jednolitě vrstvy vznikly ostrůvky, které zakrývaly jen cca 50% sběrné sítě; tento pokus není v [1] ani zapsán, protože zcela evidentně jednalo o krok špatným směrem).

Výsledkem následného lisování za tepla byla velmi výrazně popraskaná elektroda, kde sběrná síťka byla odhalena na cca 80% plochy. Sběrná síťka s pastou se pokládá na zahřátý stůl lisu a k samotnému lisování dochází až za 20-60 sekund, během této doby se z pasty odpařila další část ředidel a při samotném lisování pasta nebyla tekutá, a tak nemohla tekutost kompenzovat vznikající praskliny.

Výsledkem je skutečnost, že pasta před lisováním nesmí být na hranici tekutosti a tuhnutí, jinak elektroda popraská.

3.1.3 Vzorky O2, O3, O4 a O5 – mokrá elektroda

Ozn. vzorku	Směs	Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
O2, O3	1 g ChezA + MnO _x	10 hm %	12 ml	9 min
Ozn. vzorku	Směs	Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
O4, O5	1 g Vulcan + Pt	10 hm %	12 ml	9 min

Všechny vzorky O byly připravovány současně. Po nezdaru se vzorkem O1 bylo potřeba nějak zachránit zbylé vzorky O. Nanesené pasty vysušené na hranici roztíratelnosti byly ponořeny do vody a ponechány k ustálení.

Po 44 hodinách nebyly vzorky tuhé. Vzorek O2 byl ponořen na 5 minut do vody s teplotou 90 °C, během této doby sice ztuhnul, ale popraskal (nikoli vlivem rozdílného objemu, ale vlivem nedostatečné soudržnosti) a nedržel na sběrné síťce.

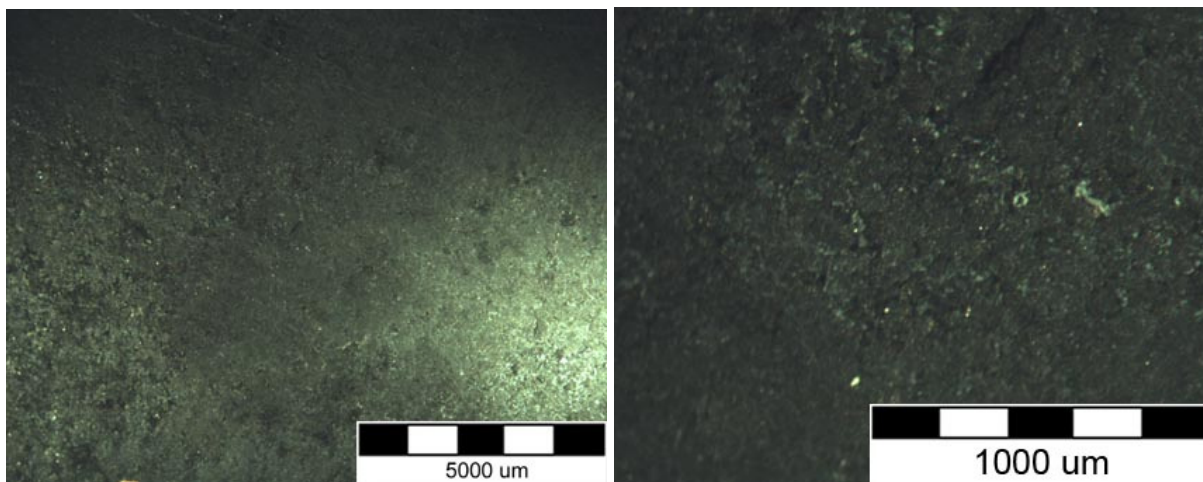
Tento způsob výroby se nepovedl, ale možná není nerealizovatelný. Lepšího výsledku by se možná dosáhlo, kdyby k vytvrzení v horké vodě došlo ihned, nikoli až po 44 hodinách.

Uhlíková vrstva z Vulcanu vykazuje po 2 týdnech známky tuhnutí a zatím drží tvar, v budoucnu bude odzkoušena možnost použití takto vyrobené elektrody v AFC a její stálost při měření.

Uhlíková vrstva z Chezacarb A po dvou týdnech jeví mnohem menší známky tuhnutí a pravděpodobně neztuhne natolik, aby s ní bylo možno provést měření.

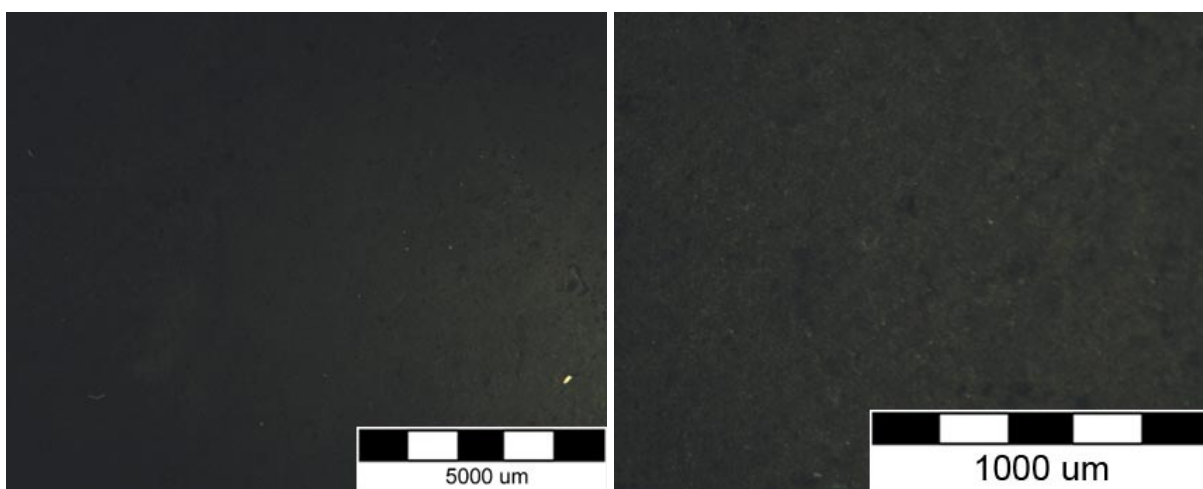
3.1.4 Vzorky P1, P3-P5 – ChezA bez míchání v ultrazvukové pračce

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P1	2 g ChezA + MnO _x		10 hm %	5 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	25,5	1000	3,8	155±10	30



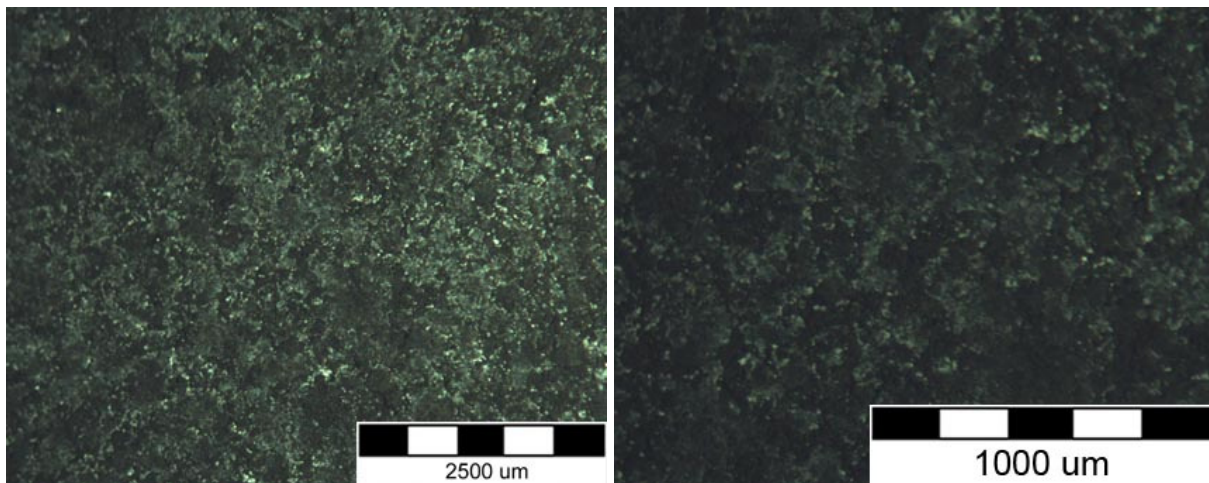
Obr. 8 - Elektroda P1 – ChezacarbA + MnO_x + 10 hm% PTFE.

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P3	1g ChezA + MnO _x + Mn		10 hm %	5 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	24	1000	4,2	155±10	30



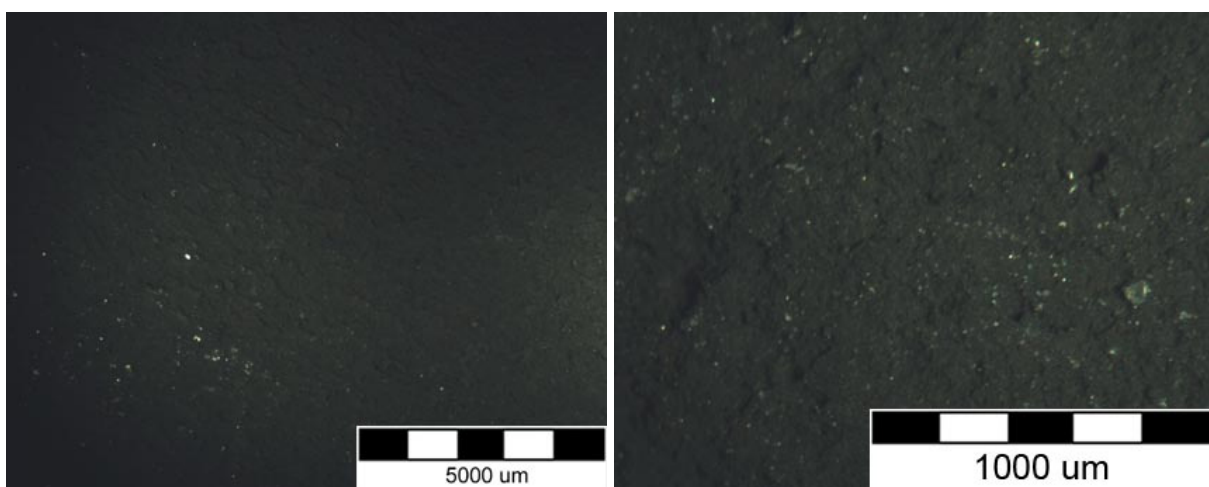
Obr. 9 - Elektroda P3 – ChezacarbA + MnO_x + Mn + 10 hm% PTFE.

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P4	1g ChezA + MnO _x + Mg		10 hm %	5 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	23,5	1000	4,2	155±10	30



Obr. 10 - Elektroda P4 – ChezacarbA + MnO_x + Mg + 10 hm% PTFE.

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P5	1g ChezA + MnO _x + Zn		10 hm %	6 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	22,5	1000	4,5	155±10	30



Obr. 11 - Elektroda P5 – ChezacarbA + MnO_x + Zn + 10 hm% PTFE.

Při míchání vzorků N a O bylo nutno během míchání v ultrazvukové pračce přidávat ředidlo, protože pasta začala tuhnout. Ředidlo nemohlo stihnout se tak rychle odpařovat, tedy uhlík absorboval více ředidla, a tak zůstalo méně ředidla k ovlivnění tekutosti pasty.

Dalšího snížení množství ředidel v pastě, a tím i snížení vývoje par během lisování za tepla, bylo dosaženo tím, že se vynechalo rozmíchávání pasty v ultrazvukové pračce.

Do katalytické směsi bylo přidáno tolik ředidla, až celý objem směsi byl smočen a výsledná pasta šla ručně rozmíchat. Následně bylo přidáno pojivo v podobě 6% suspenze PTFE, opět ručně promícháno. Vzniklá pasta byla nanесena na sítku a bez vysoušení se elektroda nechala vylisovat za tepla. Výsledkem je ohebná vrstva bez znatelných defektů, která dobře přilnula ke sběrné síťce (viz Obr. 8, Obr. 9, Obr. 10 a Obr. 11).

Nevýhodou tohoto postupu je vysoká přilnavost pasty k nerezové stěrce a nerovnoměrnost nanесené vrstvy. Tyto nerovnosti však byly během lisování vyrovnány a i přes nedůsledně nanесenou vrstvu vznikla po mechanické stránce velmi dobrá elektroda.

3.1.5 Vzorky P2 a P6 – Vulcan bez míchání v ultrazvukové pračce

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P2	0,5 g Vulcan + Pt		10 hm %	3 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	28	1000	3,5	155±10	30

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P6	0,5 g Vulcan + Pt		10 hm %	3 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	26,5	1000	3,7	170±10	30

Stejným postupem jako u vzorků P1 a P3 až P5 byl aplikován při výrobě vzorků P2 a P6 pro referenční zápornou elektrodu. Protože postup navaření katalyzátoru platiny je ověřen na uhlíku typu Vulcan, byl tento typ uhlíku upřednostněn před uhlíkem typu Chezacarb A.

Oba vzorky se po vylisování přilepily k hliníkové fólii oddělující lis od lisované elektrody. Při oddělování krycí fólie došlo v obou případech došlo k odtržení uhlíkové vrstvy od sběrné sítě. Elektrody tím byly znehodnoceny.

Je nutno postup výroby pro lisování elektrody s uhlíkem typu Vulcan modifikovat nebo zkusit navařit platinu na uhlík typu Chezacarb A.

3.1.6 Vzorky P7 a P8 – Nástřik platiny na difúzní vrstvu

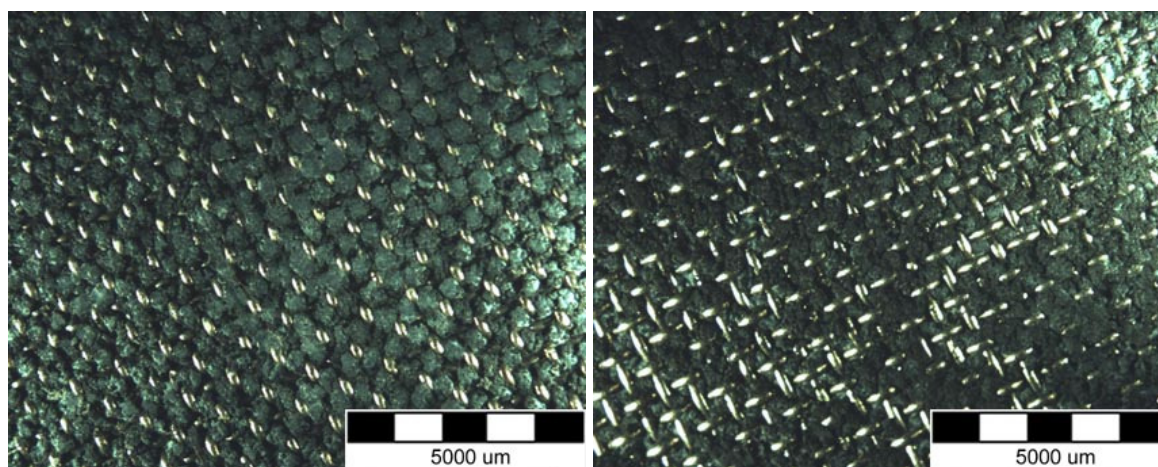
Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P7	0,6 g ChezA		10 hm %	6 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	27,5	1000	3,6	155±10	30

Ozn. vzorku	Směs		Hm. % PTFE	Mn. ředidla [ml]	Míchání
P8	0,6 g ChezA		10 hm %	6 ml	-
h [mm]	S [cm ²]	m _g [kg]	p [MPa]	τ [°C]	t [min]
~ 2	29	1000	3,4	155±10	30

Difúzní elektrody byly vylisovány stejným postupem jako u vzorku P1. U elektrody P7 došlo k částečnému přilepení difúzní vrstvy k oddělovací fólii a jejímu lokálnímu odtržení. Odtržení bylo jen na části plochy, která se vyřadila vybráním vhodné části k vystřížení.

Na difúzní vrstvu byl proveden nástřik 10 ml katalytického inkoustu (postup viz kapitola 2.2.5). Inkoust byl nanesen na kruhovou plochu o poloměru ~ 5 cm.

Ze strany sítěky byl proveden nástřik 1 ml 6% suspenze PTFE, který vytvořil oddělovací vrstvu.



Obr. 12 - Elektroda P7 a P8 – Oddělovací vrstva

Do měřicího obvodu (postup měření viz kapitola 2.3) byly vloženy vzorky P7 (jako anoda) a P8 (jako katoda), ale nebyly naměřeny uspokojivé výsledky. Napětí na prázdko po 60 minutovém měření se ustálilo na hodnotě jen 74,8 mV a proud na krátko jen 2,8 mA. Dodávaný proud a napětí se postupně zvyšovalo, ale velmi pomalým tempem. To může indikovat mj. difúzní/oddělovací vrstvu, která je velmi špatně propustná pro reaktanty.

Z Obr. 12 je patrné nerovnoměrné nanášení odděľující vrstvy. Protože při měření nedocházelo k zatékání elektrolytu do plynové části AFC, přestože některé části elektrod nemají nanášení takřka žádnou odděľující vrstvu, dá se předpokládat, že funkci odděľující vrstvy plní i uhlíková vrstva. Nanášení odděľující PTFE vrstvy možná lze do budoucna z postupu výroby vyřadit.

3.1.7 Návrhy pro budoucí odzkoušení

Jak ukázal vzorek O1, tak množství ředidel není závislé jen hmotnosti směsi, ale velmi výrazně i na složení směsi. Možná jednodušších výsledků bude dosaženo, pokud se množství ředidel vztáhne na hmotnost uhlíku ve směsi (nikoli na hmotnost celé směsi). Pravděpodobně ani v takovémto případě nebude přímá závislost a bude třeba zavést opravný koeficient, který se bude lišit katalyzátor od katalyzátoru.

Množství ředidel se dá snadno odhadnout postupným přidáváním, dokud se nedostaneme na požadovanou tekutost. U množství pojiva PTFE již tak dobře nejde – správnost či nesprávnost odhadu pojiva se projeví až po nalisování, popřípadě až po proměření elektrických vlastností elektrody. Množství PTFE může ovlivnit nejen mechanické vlastnosti elektrody (přilnavost difúzní vrstvy ke sběrné síťce, koheze difúzní a katalytické vrstvy), ale i elektrické vlastnosti (velké množství pojiva může negativně ovlivnit distribuci reaktantů a velikost plochy třífázového rozhraní, a tím i výkon AFC).

Při lisování pasty s nižším obsahem ředidel vznikají elektrody s větší tloušťkou. To způsobuje problémy s dosavadní elektrodovou klecí, která má nižší hloubku drážky než je výška elektrody. Do budoucna bude potřeba buď odzkoušet nanášení vrstev s nižší tloušťkou nebo zařídit výrobu elektrodových klecí s větší hloubkou drážky.

3.2 Seznam použitých přístrojů a chemikálií

Tab 3. Chemikálie použité při výrobě elektrod AFC

Název	Vzorec	Číslo šarže	Výrobce
Polytetrafluoretylen 60 hm. %	$(C_2F_4)_n$	665800-100ML MKAA 4030	Sigma Aldrich, Co.
Kyselina hexachloroplatičitá 99,9%	H_2PtCl_6	CAS 26023-84-7 FW 409.82	Sigma Aldrich, Co.
Isopropylalkohol	C_3H_8O	220808	Penta IČ 101 40751
Chezacarb A	C	031212	
Chezacarb B	C	031212	
Carbon Vulcan XC72R GP-3893	C	CAS No. 1383-86-4	Cabot Corporation
Ethylalkohol	CH_3-CH_2-OH	131107	Penta IČ 101 40751
Tetrahydrát dusičnanu manganatého	$Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	211106 E	Penta IČ 101 40751
Dusičnan zinečnatý	$Zn(NO_3)_2$	DUZI	HiChem spol. s.r.o.
Manganistan draselný	$KMnO_4$	99020104	ML Chemica
Kyselina dusičná 65%	HNO_3	13102110086	Penta IČ 101 40751

Tab 4. Přístroje použité při výrobě elektrod AFC

Název	Výrobce, typ	Inventární číslo FEKT VUT
Kulový mlýn	Fritsch – Spartan	OEHM 1000 163429
Válcovací stolice		DDHM 1000 123978
Elektrická váha	Kern & Sohn, ABS 80 -4, NO: WB 0720019	OEHM 1000 163604
Elektrická váha	Denver instrument, S-603, S/N:110820322	OEHM 1001 183621
Ultrazvuková pračka	EMG technologie, EMMI-16	DHIM 1000 131433
Pracoviště s digestoří	Okresní průmyslový podnik v Přerově V.Č. 349	DK8 3635
Pipeta 2 ÷ 20 µl	Biohit, S/N 40599 60	OEHM 1000 132546
Vyhřívaný lis	Carver Inc., MO 3851-O	DHIM 314359
Magnetická míchačka s ohřevem	Vitrum HEIDOLPH MR HEI-Standard	OEHM 1000 1183621
Elektrická pec 0÷1250 °C	Clasic Clare 4.0	ZP 313 057
Nastříkací pistole	Hansa	OEHM 1000 13472
Pipeta 100÷1000 µl	Biohit S/N 5048987	OEHM 1000 1000136787
Pipeta 1÷1000 µl	Eppendorf research	OEHM 1000 182340
Pipeta 1÷200 µl	Eppendorf research	OEHM 1000 182341
Pipeta 0,5÷20 µl	Eppendorf research	OEHM 1000 182342
Název	Výrobce, typ	Inventární číslo FEKT VUT
Sušicí pec	Memmert, MO 100-800	OEHM 1000 182343
Kompresor 1,1 kW	Herkules OM 195/24CM1 5	OEHM 1000 153666
Mikromanipulátor	Olympus SZ	OEHM 1000 173700
Kamera mikroskopu	uEye UI-1440-C	ZP 313052
Objektiv 20x	Olympus 11ALX-2 WD38	OEHM 1000 134721
Okulár 1,4 – 4,5x + mikroskop	Olympus WHS710X-H/22	HIM 313020
Osvětlovací soustava	Olympus KL 200	ZP 313020

4 Závěr

Měření na RDE má jednoznačně daný postup měření a je zde relativně málo stupňů volnosti – homogenita, plocha a symetrie nanesené katalytické vrstvy a stupeň nasycení elektrolytu reaktantem, vířivé proudy.

Při tvorbě a měření na celých elektrodách je stupňů volnosti mnohem více – výsledné charakteristiky závisí nejen na typu a množství katalyzátoru, ale i na konstrukci elektrody. A konstrukce elektrody má velmi mnoho stupňů volnosti – typ konstrukce, poměr ředidla, poměr pojiva, typ a rozměry sběrné sítě, lisovací síla a doba, tloušťky jednotlivých vrstev apod. Optimalizace postupu výroby elektrod (zvláště pokud se optimální liší postup pro různé elektrody) je tedy mnohem náročnější a dlouhodobější.

V tomto semestrálním projektu se podařilo optimalizovat výrobu kladné elektrody s katalyzátorem MnO_x + dopant. Zbývá podobným způsobem optimalizovat výrobu referenční záporné elektrody a optimalizovat výrobu tak, aby se co nejvíce zlepšily elektrické vlastnosti. Omezit vliv záporných elektrod na měření kladných elektrod lze použitím záporné elektrody s vyšší plochou než u kladné elektrody – tím se zaručí, že V-A a výkonová charakteristika jsou omezovány kladnou elektrodou, nikoli referenční zápornou.

Pokusy semestrálního projektu 2 výrazně posunuly výrobu elektrod k mechanicky odolnějším a reprodukovatelným elektrodám.

Poznatky ze semestrálního projektu 2 budou uplatněny v navazující diplomové práci.

5 Seznamy

5.1 Seznam obrázků

Obr. 1 -	Princip alkalického palivového článku [2]	5
Obr. 2 -	Schematický řez pórovitou elektrodou a třífázové rozhraní [2]	6
Obr. 3 -	Vrstvy elektrody AFC [1]	7
Obr. 4 -	Sestavení AFC – řez pracovním prostorem. [1]	11
Obr. 5 -	Schéma zapojení AFC. [1]	12
Obr. 6 -	Schéma koloběhu elektrolytu - měřicí klec v řezu. [1]	12
Obr. 7 -	V-A charakteristiky proměřených kladných elektrod. [1]	13
Obr. 8 -	Elektroda P1 – ChezacarbA + MnO_x + 10 hm% PTFE.	20
Obr. 9 -	Elektroda P3 – ChezacarbA + MnO_x + Mn + 10 hm% PTFE.....	20
Obr. 10 -	Elektroda P4 – ChezacarbA + MnO_x + Mg + 10 hm% PTFE.....	21
Obr. 11 -	Elektroda P5 – ChezacarbA + MnO_x + Zn + 10 hm% PTFE.....	21
Obr. 12 -	Elektroda P7 a P8 – Oddělovací vrstva	23

5.2 Seznam použitých zkratk

FC	- palivový článek (fuel cell)
AFC	- alkalický palivový článek (alkaline fuel cell)
PTFE	- polytetrafluoretylen (obchodní značka Teflon)
IPA	- isopropylalkohol
MnO_x	- oxid manganu
RDE	- rotační disková elektroda

5.3 Použitá literatura

- [1] KAMRLA D. *Studium vodíkových palivových článků*, bakalářská práce Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2008, 40 s.
- [2] PORŠ Z. *Palivové články*. Ústav Jaderného výzkumu Řež a.s. Divize jaderné bezpečnosti a elektroniky, 2002, 78 stran.
- [3] NOVÁK V. *Výzkum pokročilých elektrodových materiálů*, zkrácená verze PhD thesis Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Vysoké učení technické v Brně, 2002, 27 s., ISBN 80-214-2105-3