



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PALIVOVÉ ČLÁNKY

FUELL CELLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ SEDLÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JIŘÍ HEJČÍK, PH.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Sedláček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Palivové články

v anglickém jazyce:

Fuell cells

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Palivové články se zdají být vhodným zdrojem ekologické energie a tak se jejich vývoji a výrobě věnuje stále větší množství firem, které se snaží nalézt uplatnění svých produktů v různých odvětvích lidské činnosti.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je za pomoci dostupných zdrojů informací zpracovat přehled současných konstrukcí palivových článků a provést jejich porovnání.

Seznam odborné literatury:

- [1] NOVÁK, V. Palivové články, rozdělení, principy, vlastnosti. TZB - Info [online]. 5.7.2010 , 1, [cit. 2011-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6617-palivove-clanky-rozdeleni-principy-vlastnosti>>. ISSN 1801-4399.
- [2] <http://www.horizonfuelcell.com>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje rozdělení palivových článků, princip jejich činnosti a složení jednotlivých typů článků. Uvádí výhody, či nevýhody jednotlivých typů článků a shrnuje jejich základní parametry. V práci je dále uveden současný stav vývoje palivových článků a vhodné oblasti jejich uplatnění.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektroda, pracovní teplota, anoda, katoda, elektrolyt, palivo.

ABSTRACT

This bachelor thesis describes the distribution of fuel cells, principle of their operation and composition of the individual cell types. It states the advantages or disadvantages of the individual cell types and summarizes their basic parameters. This thesis also refers to the current state of development of fuel cells and convenient areas of their application.

KEYWORDS

Electrode, working temperature, anode, cathode, electrolyte, fuel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁČEK, T. *Palivové články*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Hejčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Palivové články jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Hejčíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	1
1 Princip palovového článku	2
1.1 Historie.....	3
2 Základní komponenty P. Č.	5
2.1 Elektrody a katalyzátory	5
2.2 Monopolární a bipolární desky	6
2.3 Elektrolyt	7
3 Alkalický palivový článek	8
4 Článek s polymerním elektrolytem	10
5 Článek s kyselinou fosforečnou	13
6 Článek s roztavenými uhličitany	15
7 Článek s tuhými oxidy	18
8 Methalonový palivový článek	20
9 Závěr	23
Literatura	24
Seznam použitých zkratk a symbolů	25

ÚVOD

Palivový článek je vnímán jako velmi perspektivní technologie, která představuje čistou technologii výroby elektrické energie s vysokou účinností. Má prokazatelné přínosy z hlediska energetické efektivity, využití alternativních zdrojů energie a ochrany životního prostředí. Ačkoliv historie tohoto principu sahá do poloviny 19. století, komerční nasazení je bohužel stále spíše jen ve fázi příprav. V současné době se na nejrůznějších místech po celém světě zabývají výzkumem, vývojem a posléze i výrobou palivových článků a s nimi spojených komponentů stovky výzkumných pracovišť a firem, protože právě tato technologie je vnímána jako jeden z nejnadějnějších alternativních elektrochemických zdrojů pro mobilní, ale i stacionární využití.

Očekáváme, že palivové články budou brzy uplatněny jako náhrada za baterie a akumulátory, stanou se alternativou k současným malým a středním zdrojům na fosilní paliva, plynovým motorům, diesela agregátům, plynovým mikroturbinám a malým kogeneračním jednotkám. Hlavně se ale počítá s jejich nasazením v automobilovém průmyslu.

Palivové články se řadí mezi zařízení, ve kterých dochází na základě elektrochemických procesů k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou. Jedná se v podstatě o standardní elektrochemický zdroj klasické konstrukce s elektrodami, jehož elektrolyt není reakcí spotřebováván (jak tomu je u baterií). Tento zdánlivý nedostatek zde ovšem představuje velmi výrazné plus, protože pokud jsou do článku přiváděny aktivní látky (palivo) trvale, článek může pracovat prakticky bez časového omezení. Palivový článek se tedy nevybíjí a tudíž je možno vypustit pojem "kapacita článku".

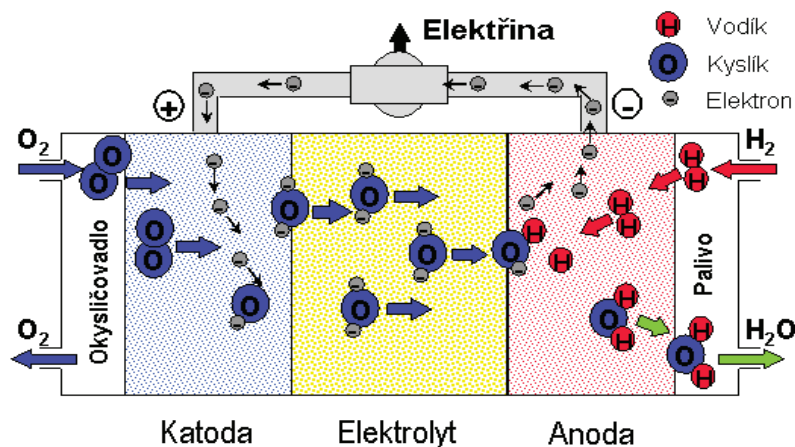
Existuje několik typů palivových článků, které se i přes stejný funkční princip vzájemně značně liší, každý z nich je vhodný pro jiné použití. Základní rozdělení článků můžeme dělit podle pracovních teplot, které jsou u většiny palivových článků vyšší (u některých typů velmi výrazně) než u baterií, což se odráží jak v technologii výroby, tak i v určité době náběhu, než dosáhnou jmenovitých provozních parametrů.

1 PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které je schopno přeměňovat chemickou energii elektroaktivních materiálů v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo na energii elektrickou, kde je dosaženo velké účinnosti v porovnání s konvenčními spalovacími motory.

Skládá se z porézních elektrod, které jsou odděleny elektrolytem. V místě pórů elektrod vzniká tak zvané třífázové rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí okysličovadla. Do palivového článku je palivo přiváděno z vnějšku. Palivový článek nemá žádnou kapacitu, to znamená, že pokud jsou do něj přiváděny látky, může pracovat prakticky neomezeně dlouhou dobu. Důležitými parametry, které se u jednotlivých článků mění, jsou měrný výkon a to buď hmotnostní [W/kg], nebo objemový [W/dm³], dále pracovní teplota, podle níž jsou články děleny na nízkoteplotní, středně teplotní a vysokoteplotní. [1]

Základní princip přeměny energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem, pracovní teplotou a konkrétními chemickými reakcemi na katodě a anodě. Princip transformace je znázorněn na obr.1.1

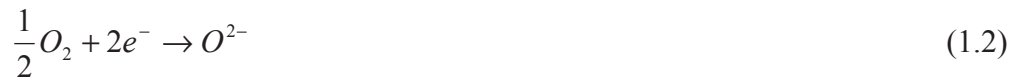


Obr.1.1 Princip činnosti palivového článku [1]

Na zápornou elektrodu, které říkáme palivová (anoda), je přiváděna aktivní látka (palivo). Palivo představuje čistý vodík, nebo jeho sloučeniny, které zde oxidují. Atomy paliva se zbavují za přispění katalyzátoru jednoho nebo více elektronů z valenční sféry a uvolněné elektrony, které představují elektrický proud se, pohybují vnějším obvodem ke kladné elektrodě (katodě). Tato reakce na anodě je popsána obecnou rovnicí (1.1)



Na kladné elektrodě, kam se přivádí okysličovadlo, probíhá redukce. Atomy okysličovadla přijímají elektrony a pronikají elektrolytem směrem k anodě, kde se sloučí s kationy vodíku dle rovnice (1.2)



Pokud dojde k přerušení vnějšího obvodu se zátěží, probíhající chemické reakce se okamžitě zastaví.

Přeměnu energie nazýváme jako tzv. studené spalování, protože nedochází k termickému expanznímu procesu.

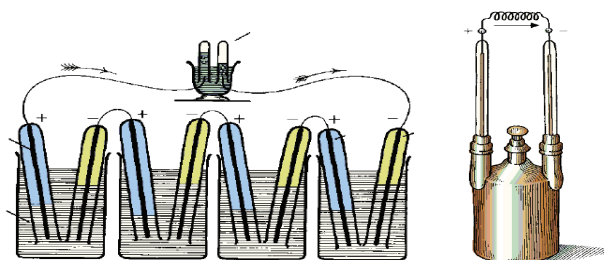
1.1 Historie

Palivové články byly zpočátku považovány spíše jen za kuriozitu. Princip byl objeven již v roce 1838 švýcarským vědcem Christianem Friedrich Schönbeinem. Na základě jeho poznatků sestrojil první palivový článek v roce 1839 britský soudce, vědec a vynálezce sir William Rober Grove. Díky tomuto počínu je Grove považován za „otce“ palivových článků.



Obr.1.2 Sir W. R. Grove (1811-1896) [1]

Jeho článek byl tvořen platinovými elektrodami, umístěnými ve skleněných trubičkách, jejichž dolní konec byl ponořen do elektrolytu. Elektrolyt byl tvořen roztokem kyseliny sírové a horní uzavřená část byla vyplněna kyslíkem a vodíkem. Napětí takového článku bylo přibližně 1V. Jako ukazatel generovaného elektrického napětí a proudu sloužila nádobka (na Obr. 1.3 nahoře), ve které probíhala elektrolýza vody. Celé zařízení ale neprodukovalo takové množství energie, aby bylo použitelné v průmyslu.



Obr.1.3 Groveův palivový článek [1]

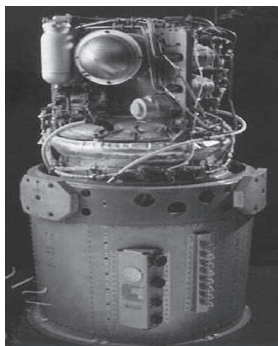
Termín „palivový článek“ poprvé použili v roce 1889 Ludwig Mond a Charles Langer, kteří se pokusili vytvořit funkční článek pracující se svítiplynem a vzduchem. V roce 1886 byl ve Francii zkonstruován automobil, který byl poháněn palivovými články. Tento projekt byl ojedinělý, ale pokračování vývoje nenastalo.

V roce 1932 vyvinul britský vědec Dr. Francis Thomas Bacon první funkční zařízení s kyslíko-vodíkovým palivovým článkem s niklovými elektrodami. Kyselý elektrolyt byl nahrazen zásaditým (KOH), čímž odstranil korozivní účinky elektrolytu na elektrody. V roce 1952 byl sestrojen týmem pod vedením Bacona 5kW systém s palivovým článkem, jehož elektrolyt obsahoval 45% KOH. [1],[8]



Obr.1.4 Dr. Francis Thomas Bacon v laboratoři [1]

Teprve v 60. letech 20. století byl obnoven intenzivní vývoj palivových článků v nejrůznějších zemích. Na univerzitách, v laboratořích, i v průmyslu. Důvodem tohoto zájmu byly požadavky na různá zařízení potřebná pro výzkum vesmíru. Šlo především o nezávislé zdroje energie pro družice a satelity. Vesmírný modul Apollo nesl 3 jednotky palivových článků, kde každá jednotka obsahovala 31 sériově spojených elementárních palivových článků. Hmotnost systému byla 100 kg, průměrný elektrický výkon činil 0,6 kW při napětí $27 \div 31V$. Elektrolytem byl 85 % KOH při provozní teplotě 260 °C.

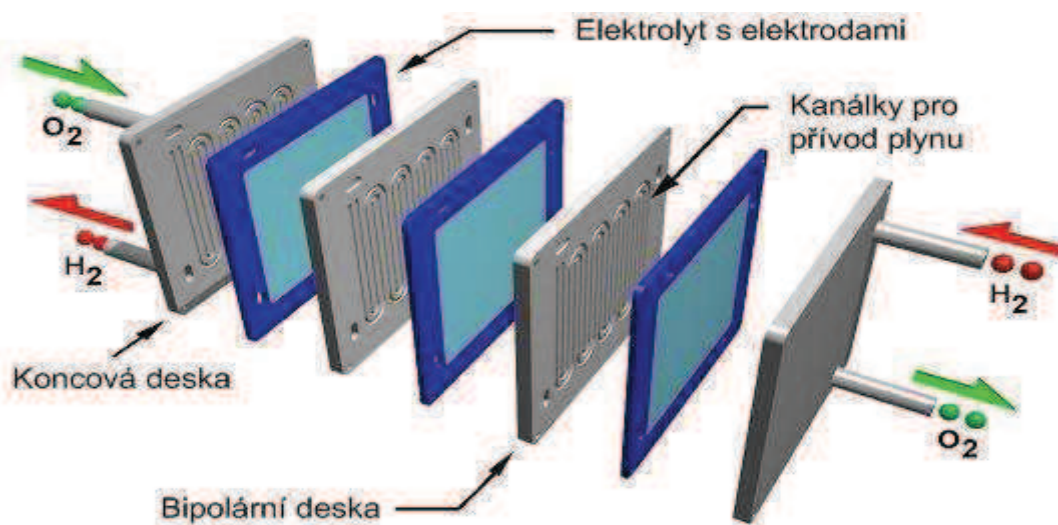


Obr.1.5 Systém palivových článků použitý v projektu Apollo [4]

Následujících dvacet let výzkumu přineslo řadu úspěchů a začaly se objevovat optimistické myšlenky o budoucím masovém rozšíření článků prakticky ve všech průmyslových odvětvích, dokonce i o úplném vytěsnění klasických baterií. S rostoucími nároky na materiály a technologii výroby se tento optimismus vytratil. Ukazuje se, že palivové články nelze především z cenových důvodů stále ještě vnímat jako běžně dostupný zdroj energie. [4]

2 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY P. Č.

Každý palivový článek je zpravidla tvořen dvěma elektrodami, které jsou odděleny elektrolytem, nebo iontoměničovou membránou. Jejich struktura zpravidla závisí na použitém palivu, případně na vlastnostech oksyličovadla. Aby bylo dosaženo potřebných výkonnostních parametrů, umísťujeme články do svazků a jednotlivé články jsou spojeny bipolárními deskami z důvodu úspory místa.



Obr.2.1 Svazek palivových článků [2]

2.1 Elektrody a katalyzátory

Na anodě a katodě, dochází k chemickým reakcím, které byly již zmíněny (1.1),(1.2). Struktura elektrod musí být uzpůsobena skupenství přiváděného paliva a vlastnostem oksyličovadla. Nejčastěji je palivo i oksyličovadlo přiváděno v plynném skupenství, a proto je nutné vytvořit co nejvíce míst, kde se může setkávat fáze pevná (elektroda a případný katalyzátor), kapalná (některé elektrolyty) a plynná (palivo). Oblast styku těchto tří fází se nazývá tzv. třífázová hranice. Pouze na této hranici se mohou vodíkové elektrony uvolňovat a zbylé kationy difundovat do elektrolytu, popřípadě se opět slučovat s atomy kyslíku na vodu. Z tohoto důvodu se elektrody dělají porézní. Tlak přiváděného plynu brání protékání kapalného elektrolytu skrz porézní strukturu elektrody. [1]

Známý materiál elektrod je především platina nebo palladium. Tyto kovy jsou ovšem velmi drahé a proto se dnes používají mnohem více sítky z Raneyova niklu nebo stříbra, dále také i v kombinaci s uhlíkovými vlákny. Uhlík je výborný vodič, který je odolný proti degradaci vlivem kyselých elektrolytů a v některých případech může fungovat i jako katalyzátor.

Katalyzátory jsou látky, díky jejichž přítomnosti může v článku chemická reakce nastat, nebo při ní jen napomáhají. Nejsou chemickou reakcí spotřebovávány. Dobrou funkci plní katalyzátor z platiny, paladia i niklu. Faktor ceny je ale opět nepříznivý, proto se při výrobě tyto materiály nanáší na uhlíkový základ (saze), čímž dojde i ke zvýšení poréznosti. Kromě toho se v dnešní době začínají prosazovat katalyzátory obsahující biologické enzymy. [5]

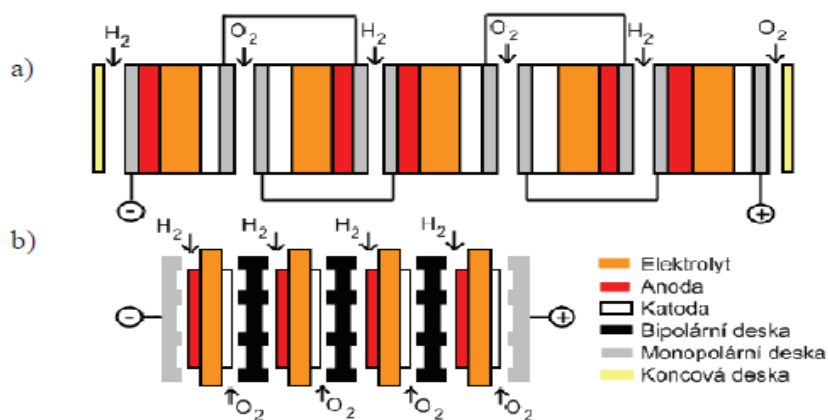
2.2 Monopolární a bipolární desky

Bipolární desky jsou uloženy mezi jednotlivými články tvořící svazek. Mají následující funkce:

- Umožňují elektrický kontakt mezi články a vedou proud
- Přivádí palivo k elektrodám, resp. odvádí odpadní produkty
- Utěsňují prostor článku
- Odvádí odpadní teplo pomocí chladících kanálků

Používané materiály pro výrobu jsou uhlíkové polymery a grafit. Polymery jsou výhodné z ekonomického hlediska a navíc mají poměrně snadnou výrobu, jsou vstříkovány do forem. Příkladem je polypropylén, do kterého jsou přidány částičky grafitu na zlepšení elektrické vodivosti. Naopak grafit má sice velmi dobrou elektrickou vodivost a korozivzdornost, ale natolik pórovitou strukturu, která způsobuje nežádoucí propouštění plynného paliva. Proto se do něj přidává např. pryskyřice, která zvyšuje jeho nepropustnost. Tím se zvyšují náklady na výrobu. Dražšími možnostmi jsou ušlechtilé kovy, které nejsou porézní. I zde požadujeme odolnost proti korozi v kyselém prostředí. Příkladem je korozivzdorná ocel, která vydrží tisíce provozních hodin. Dalšími možnostmi jsou titan, niob, tantal, nebo pozlacené kovy.

Bipolární desky jsou zapojeny sériově za sebou. Na konce svazku jsou umístěny koncové desky (monopolární desky). Další variantou konstrukce svazků je monopolární uspořádání. Proud zde není veden od jednoho článku ke druhému, ale je sbírán na okrajích desek. Výhodou je, že v případě defektu se může poškozený článek překlenout a svazek dále funguje. [5]



Obr.2.2 a) monopolární a b) bipolární stavba svazku [2]

2.3 Elektrolyt

Elektrolyt se nachází mezi anodou a katodou a působí mezi nimi jako elektrický izolátor. Způsobuje mezi nimi elektrické napětí a zároveň zajišťuje tok volných elektronů vnějším obvodem. V případě, že palivem je vodík, vzniká zde napětí kolem 1,23 V. Hlavním kritériem dělení palivových článků je právě dle typu použitého elektrolytu a dále podle provozní teploty palivového článku :

- Alkalický palivový článek (AFC - Alkaline Fuel Cell)
- Palivový článek s polymerním elektrolytem (PEFC - Polymer Electrolyte FC)
- Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC - Phosphoric Acid FC)
- Palivový článek s roztavenými uhlíčitany (MCFC – Molten Carbonate FC)
- Palivové články s tuhými oxidy (SOFC - Solid Oxide FC)
- Methanolový palivový článek (DMFC - Direct Methanol FC)

Pro jednotlivé typy palivových článků jsou na elektrolyty kladeny různé požadavky. V některých požadavcích se ale všechny elektrolyty shodují. Z důvodu funkčnosti požadujeme např. odolnost vůči degradaci, která je důležitá v případě, že je používáno uhlovodíkové palivo, nebo také požadavky na ekologičnost a v neposlední řadě na cenu. [1]

3 ALKALICKÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK

(AFC - Alkaline Fuel Cell)

Palivový článek s alkalickým elektrolytem je jeden z prvních detailněji zkoumaných a vyvíjených typů palivových článků. Již v 60. letech našel poměrně široké uplatnění v americkém vesmírném programu Apollo – sloužil pro výrobu elektrické energie a vody (ta je odpadem procesu) na vesmírných plavidlech. Jeho elektrolytem byl v té době 85% KOH a pracovní teplota se pohybovala v rozmezí 100-250 °C (vysokoteplotní varianta). Novější typ tohoto článku pracuje v rozmezí nižších teplot a s nižší koncentrací elektrolytu.

Alkalické palivové články se dnes tedy řadí mezi nízkoteplotní palivové články, které jsou schopné provozu prakticky za „ pokojové teploty “, v rozmezí 23 – 70 °C. Nejčastěji používané typy však pracují s teplotami mezi 60 – 90 °C a alkalickým elektrolytem (poutaném v porézní matici), kterým je roztok 35 - 50% KOH nebo NaOH. [6]

Při chemických reakcích v alkalickém článku s roztokem KOH jsou nejdůležitější složkou anionty OH^- , kterých je v roztoku nadbytek. S těmito anionty reaguje na anodě přiváděný vodík podle rovnice (3.1)

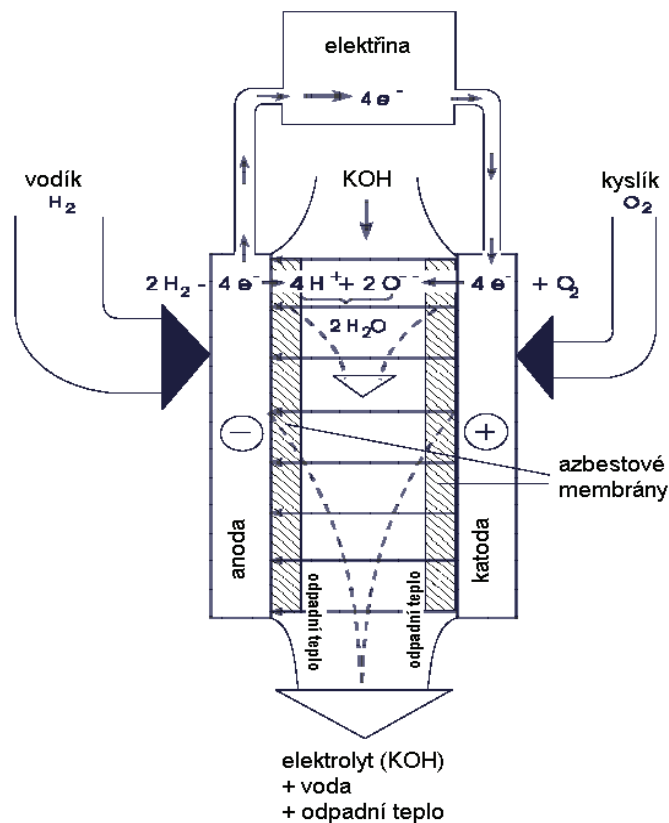


Uvolněné elektrony putují vnějším obvodem ke katodě, kde pak reagují s přiváděným kyslíkem a vodou dle rovnice (3.2)



Anionty OH^- pronikají elektrolytem a pohybují se dále k anodě. Z rovnic lze vysledovat, že voda se na anodě produkuje dvakrát rychleji, než se na katodě spotřebovává. U některých typů článků je tomu naopak. [4]

Přenos náboje je uskutečněn migrací hydroxylových (OH^-) iontů ke katodě, kde reakcí s molekulami vodíku vytváří molekuly vody a pouští elektrony do elektrického obvodu. Na anodě vzniklá voda osmoticky migruje ke katodě, kde se regeneruje na OH^- ionty. Produktem reakcí je tedy voda, elektrický proud a určité množství tepla. Část vody je zpracována opět na potřebnou reakci, zbylá voda se odvádí s odpadním teplem do zásobníků, kde se odfiltruje od elektrolytu. Tato voda, která se zdá být odpadním produktem, se může recyklovat a může být použita např. pro již předem zmíněnou posádku raketoplánu, nebo je možno ji opět rozložit na vodík a kyslík. [8]



Obr. 3.1 Základní koncepce AFC [9]

Mezi výhody alkalických článků patří relativně rychlá kinetika redukce kyslíku v zásaditém prostředí, nízká náchylnost ke korozi, což umožňuje použití celé škály různých neplatinových elektrodových materiálů. To samozřejmě výrazně snižuje cenu celého článku. Další výhodou je poměrně jednoduchá konstrukce článku, jeho vysoká účinnost, která se pohybuje mezi 60-80 %, a rychlý náběh do provozního režimu.

Nevýhodou je vysoká citlivost tohoto zařízení vůči i nepatrným množstvím oxidu uhličitého v palivu i oxidovadle. Ten totiž tvoří s alkalickým hydroxidem nerozpustné uhličitany, které snižují iontovou vodivost a způsobují zanášení pórů. Vyžaduje tedy náročné (tzn. nákladné) čištění obou aktivních materiálů a čas od času výměnu elektrolytu. [9]

U tohoto typu článku můžeme pracovat s výkony do 20 kW. Jako palivo se používá čistý vodík. Z důvodu citlivosti na čistotu vodíku a kyslíku je jeho použití omezeno na aplikace, ve kterých je k dispozici elektrolyticky získaný vodík a kde nerozhodují náklady na jeho získávání.

Současné prototypy vykazují životnost okolo 8000 hodin, ale pro ekonomickou životaschopnost a pro aplikaci v širším měřítku je nutné dosáhnout minimálně hranice 40000 hodin. Trh s těmito zařízeními je stále ještě omezený z důvodu vysoké ceny a také kvůli nutnosti dodávat čistý kyslík z již zmíněného důvodu tvorby karbonátu. [2],[4]

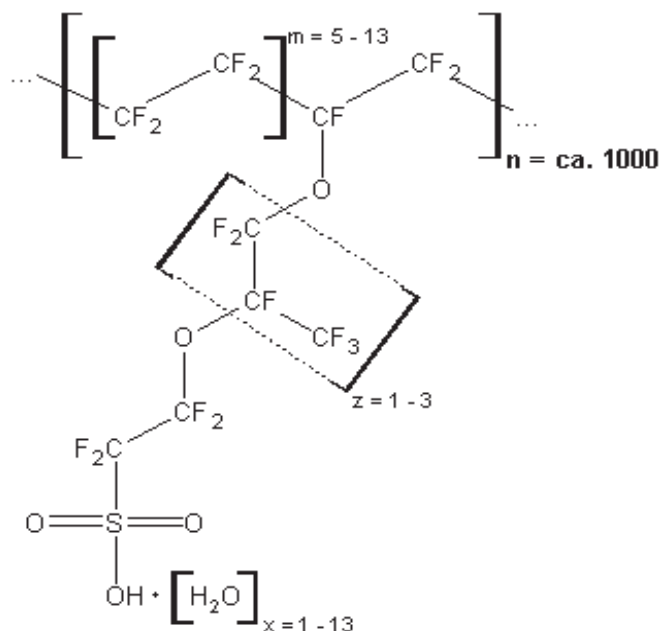
4 ČLÁNEK S POLYMERNÍM ELEKTROLYTEM

(PEFC - Polymer Electrolyte Fuel Cell)

Některé literatury uvádějí název tohoto článku jako - článek s protonovou membránou (PEM-FC), nebo článek s tuhým elektrolytem. Tyto články jsou principiálně stejné a vyznačují se rychlou reakcí přeměny energie, také vysokou hustotou proudu, což umožňuje konstrukci článku o nízké hmotnosti a malých rozměrech.

Použití polymerní katexové membrány bylo původně použito v roce 1959 W. T. Grubbsem. Požadovaná funkce iontové membrány byla vytvořit iontově vodivé bariéry plynu. Kontakt mezi povrchem katalyzátoru a přilehlou membránou byl tvořen silnými kyselinami. Následný vývoj ukázal, že článek funguje i bez kyseliny. Dnešní články tohoto typu používají jako elektrolyt pouze samotnou hydratovanou membránu. [1]

Článek se tedy skládá z protonově vodivé membrány umístěné mezi dvě pórovité elektrody nazývané GDL – Gas Diffusion Layer. Samostatné články jsou většinou konstruovány do větších svazků, jejichž konstrukce je popsána v kap. 2 (Obr. 2.1). Nejvhodnější materiál membrán se v dnešní době usilovně vyvíjí, nejčastěji se však používá membrána známá pod obchodními názvem NAFION[®], nebo jí membrány podobné. Jedná se o materiál na bázi uhlíku a fluoru, který je svou stavbou podobný teflonu. K řetězci teflonu jsou připojeny skupiny obsahující sulfonovou kyselinu. Tloušťka elektrolytu se pohybuje kolem 200 mikronů.



Obr. 4.1 Chemická struktura materiálu membrány NafionTM [6]

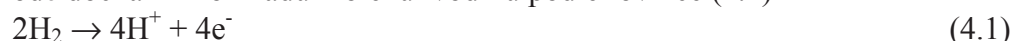
Použitím polymerní, respektive pevné membrány jako elektrolytu je zajištěna řada výhod. Funkce takovýchto článků nezávisí na jejich poloze, a tudíž můžeme uvažovat o jejich užití pro mobilní aplikace. Odpadá také problém s vnější korozí, neboť jedinou látkou v kapalně fázi je voda. Dále není oproti AFC tolik náchylný na přítomnost CO₂ v přiváděných plynech.

Kyselé polymerní membrány jsou naopak citlivé na přítomnost iontů v použitých materiálech, se kterými přijdou do styku. Snižují totiž jejich propustnost, a proto se bohužel musí používat drahé platinové elektrody, které se musí vkládat do drahých korozivzdorných pouzder. Používají se například pouzdra z pozlaceného titanu. Platina, ze které jsou vyrobeny elektrody je navíc citlivá na přítomnost CO, který obsahuje palivo hlavně v případě, získává-li se potřebný vodík reformací zemního plynu nebo jiných fosilních paliv. Tento problém se řeší použitím reaktoru, který odstraní CO před vstupem do samotného článku, nebo použitím platinových elektrod, které navíc obsahují ruthium. Reaktor zachytí CO a odštěpí ho jako CO₂. Obě tyto řešení opět ale zvyšují cenu článku. [9]

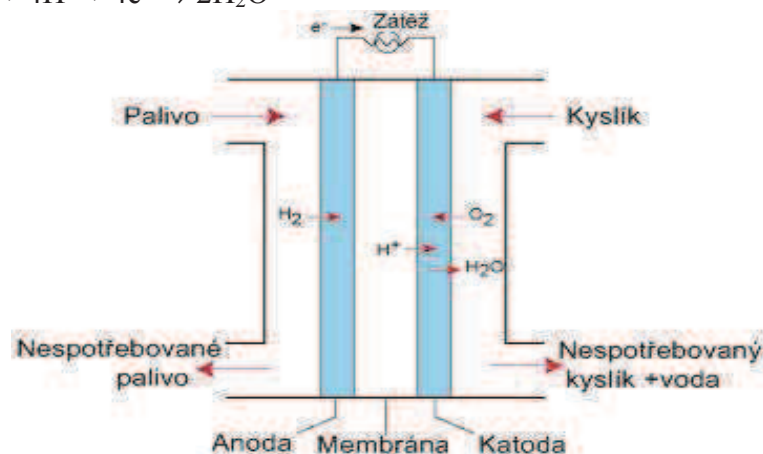
Pro správnou funkci PEFC musí být membrány stále dostatečně hydratovány, jinak by prudce klesala jejich vodivost. To znamená, že se voda nemůže odpařovat rychleji, než vzniká. Z toho plyne, že provozní teplota nesmí jít nad hranici 100 °C. Článek pracuje tedy v rozmezí teplot 60 - 80 °C. Již při pokojové teplotě (21 °C) dodává článek 50 % svého výkonu. Provoz článku PEFC při teplotě vyšší, než 100 °C je možný jen v případě vyššího provozního tlaku, který zajistí stále tekutý stav vody. Tím však dochází ke snížení životnosti článku. [6],[8]

Obě elektrody jsou ze zadních stran opatřeny destičkou s jemnými kanálky, která je vyrobena z grafitu. Stěny mezi kanálky zajišťují elektrický kontakt se zadní částí elektrody a vedou elektrický proud do vnějšího obvodu. Samotné kanálky rozvádějí na anodě palivo a na katodě kyslíčovadlo.

Na anodě dochází k rozkladu molekul vodíku podle rovnice (4.1)

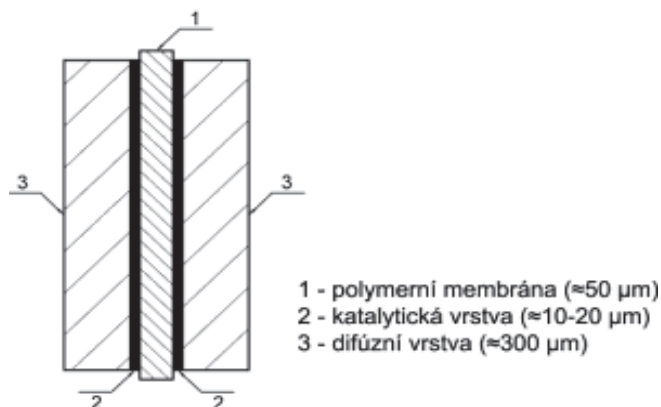


Obě složky putují ke katodě. Elektrony vnějším obvodem se zátěží, zatímco kationty vodíku migrují membránou. Na katodě pak probíhá reakce (4.2) za vzniku vody v kapalně fázi. [10]



Obr. 4.2 Princip PEM článku [2]

V praxi se častěji používá trochu jiná varianta konstrukce tohoto článku zvaná "Membrane electrode assembly". Jde o polymerní membránu s nalisovanými katalytickými vrstvami kladné i záporné elektrody, které jsou opatřené difúzními vrstvami. Celková tloušťka této konstrukce zpravidla nepřesahuje 1 mm, což vyžaduje mnohem menší technologickou náročnost výroby. (Obr. 4.2)



Obr. 4.2 Konstrukce článku MEA (Membrane electrode assembly)

Účinnost PEFC se pohybuje v rozmezí 50-60 %. Po zdokonalení a vyřešení negativ mohou mít tyto články velký potenciál. Z důvodu vysoké ceny se pracuje také na vývoji membrány ekvivalentní k membráně NAFION[®]. Již vznikla myšlenka náhrady za membránu alkalického typu, kde by se daly použít i neplatinové katalyzátory a bylo by možné dosáhnout nižší ceny.

Díky své vysoké proudové hustotě, která je vyšší než $0,3\text{W}/\text{cm}^2$, dobrému poměru hmotnost/výkon, rychlému náběhu do provozního stavu, velké flexibilitě při změně polohy a pohybového stavu (zrychlování a zpomalování) jsou tyto články v hodné pro použití v elektromobilech. V dnešní době už našly uplatnění např. v autobusech městské hromadné dopravy. [7]

Nevýhody, které brzdí masovější aplikace, jsou jednak zajištění čistoty přiváděného vodíku, která má velký vliv na výkonnost, dále samotný problém skladování vodíku. Z důvodu nebezpečí jeho úniku a exploze v případě havárie je nutné ho skladovat ve stabilních tlakových nádržích. Vodíkový pohon také zatím nemůže konkurovat spalovacím motorům v dojezdu na jedno natankování. Je to z důvodu nízké hustoty energie takto skladovaného vodíku. Tento problém se již podařilo z části vyřešit použitím nějaké vysokoenergetické kapaliny, která dokáže v procesu reformování vodík uvolnit. Tyto schopnosti má např. methan, nebo ethan. Využití této přeměny má ale opět negativní dopad na cenu, neboť takové vozidlo by muselo být vybaveno vhodným reformátorem.

5 ČLÁNEK S KYSELINOU FOSFOREČNOU

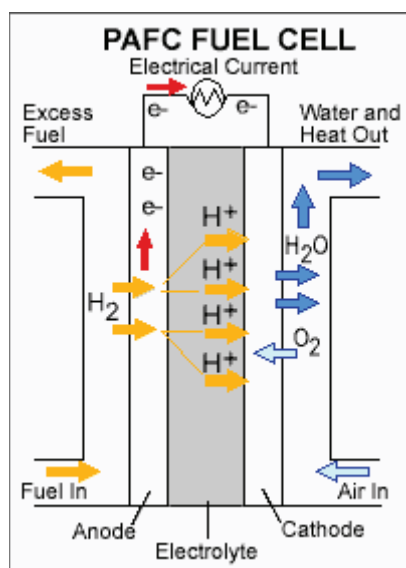
(PAFC - Phosphoric Acid FC)

Tyto články jsou dosud jediným komerčně využívaným typem palivových článků. Důvodem je zřejmě fakt, že jde o jeden z nejdéle a tak i nejlépe prostudovaných systémů. Někdy v šedesátých letech byla klasická porézní elektroda tvořena PTFE (polytetrafluorethylenem) s vrstvou platinové černě, což byly drobné platinové částičky s velkým aktivním povrchem a pórovitostí, s množstvím přibližně 9 mg Pt/cm^2 . Postupem času byla vrstva platinové černě vyměněna za grafit jen s příměsí platiny. Tím došlo ke snížení potřebného množství drahého prvku. V současné době se používá množství asi $0,1 \text{ mg Pt/cm}^2$ na anodě a $0,5 \text{ mg Pt/cm}^2$ na katodě. [1]

Jde o středněteplotní palivový článek, ve kterém je jako elektrolyt použita koncentrovaná kyselina fosforečná (H_3PO_4). Kyselina je fixována v teflonovo-silikonovo-karbidové matrici. Rovnice chemických reakcí a přeměn jsou stejné jako u článku PEFC (4.1),(4.2).

Pracovní teplota se pohybuje mezi $160 - 220 \text{ }^\circ\text{C}$, nesmí ale klesnout pod $45 \text{ }^\circ\text{C}$, protože pod touto teplotou se koncentrovaná kyselina fosforečná mění v krystaly. U PAFC musí být z důvodu vyšší provozní teploty zajištěn odvod tepla. Chladivo, kterým je voda, nebo vzduch, je vedeno chladicími kanály umístěnými obvykle v každém pátém článku svazku. Chlazení kapalinou je sice mnohem složitější, ale lépe odvádí teplo. Přednost chlazení vzduchem je v jeho jednoduchosti, spolehlivosti a nižší ceně v porovnání s chlazením kapalinami obecně. [1]

Díky kyselému elektrolytu odpadá problém se vstřebáváním oxidu uhličitého a navíc koncentrovaná H_3PO_4 s přehledem brání korozi některých kovů. Na obou elektrodách je však nutná platinová katalýza. Vyšší provozní teplota zvyšuje rychlost probíhajících reakcí, což ale způsobuje pokles rovnovážného napětí článku.



Obr. 5.1 Základní koncepce PAFC [6]

Jemná porézní struktura matrice do značné míry brání úniku elektrolytu během činnosti článku, i když jeho menší množství může být strženo proudem paliva, či okysličovadla. Po určité době se proto elektrolyt kontroluje a případně doplňuje. Při nesprávně zvolené pracovní teplotě dochází k rozkladu elektrolytu nebo k pohlcování vodní páry a to elektrolyt degraduje. [7],[10]

Mezi nevýhody PAFC jednoznačně patří pomalý náběh (3 hodiny), který se odvíjí od vyšších pracovních teplot článku. Je tedy nutné nejdříve systém předeřhřát na provozní teplotu, což je problematické u mobilních systémů.

Výhodou je poměrně přijatelná cena, díky které je možné články použít např. k výrobě elektrické energie ve velmi odlehlých oblastech, kde by se nevyplatilo budovat elektrické vedení. Systémy jsou schopny vyvinout výkon až 11 MW (pracují s tlakem 8 bar), nicméně nejvíce použitých stacionárních generátorů má výkon 100kW. V současné době jich je v provozu téměř 300. Články PAFC, které jsou součástí zdrojů elektrické energie s většími výkony (od 50 kW do 10 MW), řadíme mezi nejspolehlivější. Před několika lety se uvažovalo nad použitím tohoto typu článku pro pohon autobusů městské hromadné dopravy, ale dnes už se od této myšlenky upustilo. [9]

Palivem je vodík, který se v předřazeném konvertoru vyrábí z uhlíkatých paliv, kterými jsou např. LPG, zemní plyn atd.. PAFC není tolik náchylný vůči přítomnosti CO. Problémem je ale relativně slabá účinnost, která se pohybuje okolo hranice 40 %. Je jen o něco příznivější, v porovnání s konvenčními spalovacími motory, jejichž účinnost je 33 – 35 %. Z výsledku experimentu ale vyplynulo, že účinnost lze zvýšit recyklací odpadové páry jakožto vedlejšího produktu reakce až na 80 %. Nepříznivý je také poměr hmotnost/výkon. Tyto palivové články jsou totiž výrazně rozměrnější v porovnání s ostatními typy. [4],[6]

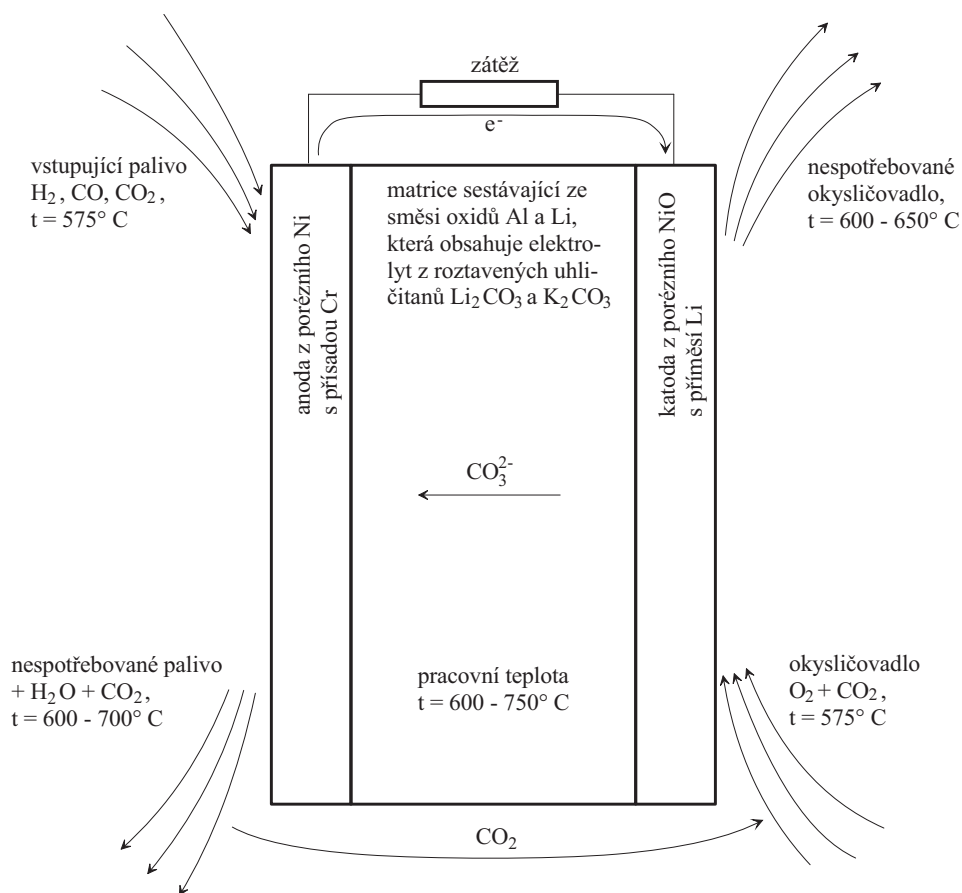


6 ČLÁNEK S ROZTAVENÝMI UHLIČITANY

(MCFC – Molten Carbonate FC)

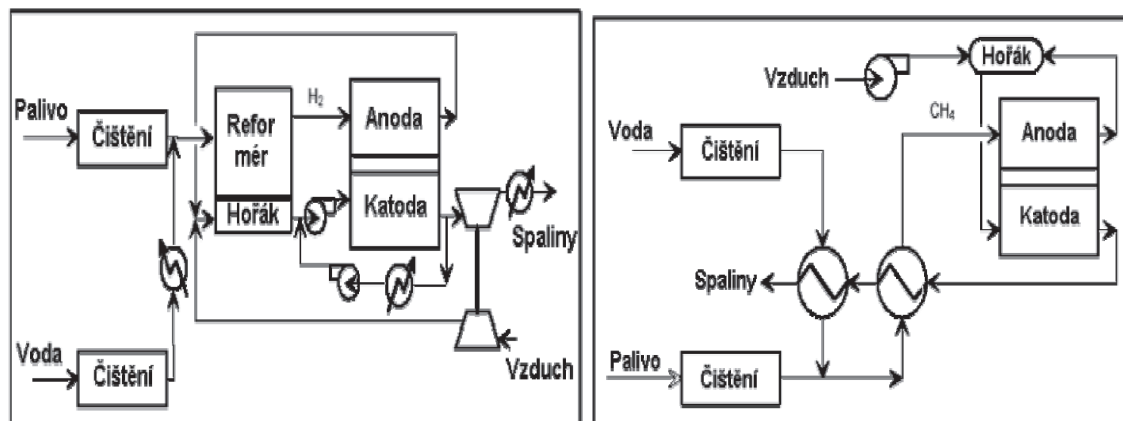
Palivové články s roztavenými uhličitany se řadí do skupiny vysokoteplotních palivových článků. Tomu odpovídá oblast pracovních teplot 600 - 700 °C. Jako elektrolyt se používá roztavená směs alkalických uhličitanů. Nejčastěji se jedná o směs uhličitanů lithia, draslíku a sodíku, která je umístěna v tuhé porézní keramické matici na bázi $\text{Li}_2\text{OAl}_2\text{O}_3$. Složení elektrolytu má vliv na účinnost z několika hledisek. Vyšší obsah Li znamená vyšší iontovou vodivost a nižší ohmickou ztrátu, ale naopak nižší difuzivitu, rozpustnost plynu a rychlejší korozi. Při pracovní teplotě článku vytváří směs uhličitanů vysoce vodivou taveninu, v níž je uhličitanovým aniontem CO_3^{2-} umožněna iontová vodivost. [1],[6]

Tento typ článku potřebuje mimo kyslíku i přívod oxidu uhličitého (CO_2) na katodu článku, kde je přeměňován právě na ionty CO_3^{2-} elektrochemicky. Tyto ionty se pak pohybují roztaveným elektrolytem směrem k anodě, kde reagují s přiváděným palivem za vzniku vody a CO_2 .



Obr. 6.1 Děje probíhající v článku s roztavenými uhličitany [10]

Palivem je vodík nebo oxid uhelnatý, v praxi je využívána zpravidla směs obou těchto plynů. Díky vysoké pracovní teplotě je možné methan či jiná paliva dokonce reformovat přímo uvnitř článku vodní párou, která vzniká na anodě. Při vnitřní endotermické reformní reakci uhlovodíkového paliva se tedy využívá odpadní teplo uvolněné v palivovém článku, díky čemuž dochází ke zvýšení elektrické účinnosti. Porovnání systému MCFC s vnějším a vnitřním reformingem paliva je na obr. 6.2. [1]



Obr. 6.2 Vnější (vlevo) a vnitřní (vpravo) reforming paliva [1]

Děje, které probíhají v článku MCFC (znázorněno na obr 6.1), lze popsat pomocí jednotlivých elektrodových reakcí:

Při použití vodíku jako paliva probíhá na anodě reakce dle rovnice (6.1).



S použitím oxidu uhelnatého CO jako paliva probíhá na anodě reakce dle rovnice (6.2).



Kromě toho probíhá na anodě zpravidla ještě boční reakce popsána rovnicí (6.3).



Podle rovnice (6.4) pak probíhá reakce na katodě.



Díky velice rychlé kinetice těchto reakcí je možné na elektrodách používat neplatínové katalyzátory, čímž je možno dosáhnout snížení nákladů. [6]

Anoda je tvořena různými typy slitin na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Al a je vysoce porézní. Katodu nejčastěji tvoří NiO, který je často dopovaný lithiem. Rozpustnost NiO v tavenině elektrolytu způsobuje problémy na katodě, protože ionty niklu pak postupně migrují k anodě, kde se redukují na kovový nikl. To může v nejhorších případech vést

až ke zkratování článku.

K výhodám tohoto typu článku patří již zmíněná rychlá kinetika elektrodových reakcí a díky vysoké provozní teplotě i možnost přímého reformingu paliva, jako konverze zemního plynu či jiných uhlíkatých paliv, čímž se výrazně zjednodušuje celý palivový systém. Výhodou je zajisté i to, že zde neplatí tak přísné podmínky na čistotu paliva. Tím odpadá nutnost předúpravy paliva a lze tak použít i méně čisté plyny, jako je bioplyn, uhelný plyn, zemní plyn, či skládkový plyn. [4],[6]

Vysoká teplota však způsobuje problémy spojené s teplotním pnutím v materiálech. Tyto články vyžadují přídavný zdroj energie pro zahřívání článku při startu. To má bohužel vliv na pokles účinnosti (50 - 85 %) a tato nutnost předehtřívání zároveň na nemožnost okamžitého startu. Další nepříznivý vliv způsobený vysokou provozní teplotou vede ke snížení životnosti článku z důvodu koroze.

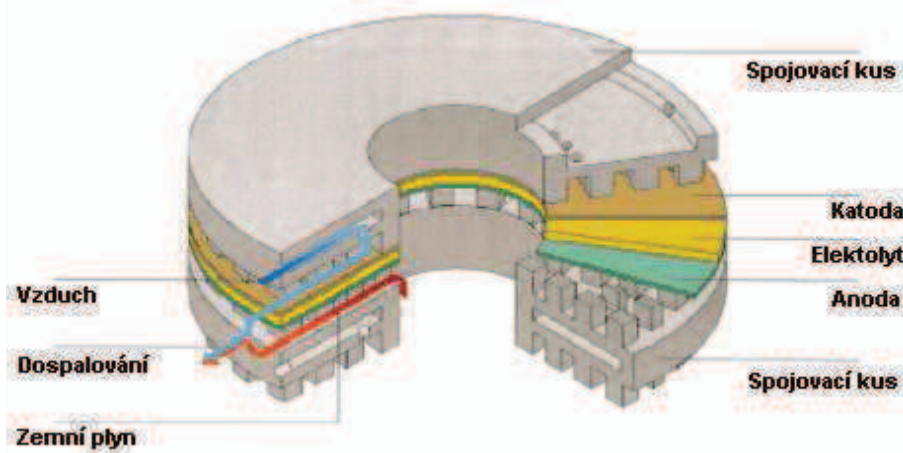
Výzkum v oblasti těchto článků počíná koncem padesátých let 20. století, kdy s nimi začali na laboratorní úrovni experimentovat dánští vědci Broers a Ketelaar za účelem přímého využití uhlí jako paliva. V šedesátých letech se na vývoji podílela největší měrou americká armáda a v sedmdesátých letech byl vývoj MCFC předán do soukromého sektoru. V současné době je ve světě aktivních více než 100 systémů s těmito články o výkonech větších než 250 kW (nejčastěji). K největším projektům patří experimentální elektrárna v Santa Clara postavená v roce 1996 o celkovém výkonu 2 MW, jejíž elektrická účinnost se blíží 60 %. Dalšími projekty byly například Kirin Brewery plant v Japonsku a 1 MW elektrárna ve městě Renton ve státě Washington. [4]

7 ČLÁNEK S TUHÝMI OXIDY

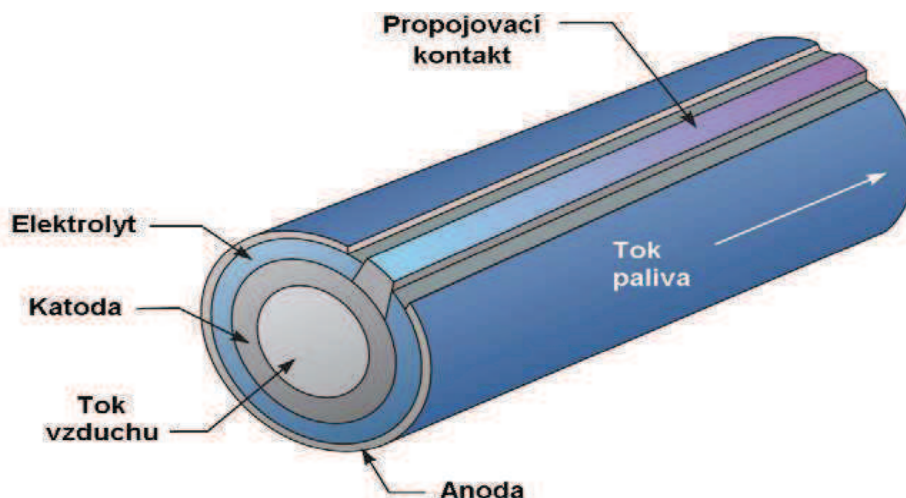
(SOFC - Solid Oxide FC)

Dalším typem článků, které patří do skupiny vysokoteplotních, jsou palivové články s tuhými oxidy. Jejich optimální pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 800 - 1000 °C, díky čemuž může opět probíhat přímá konverze uhlíkatých paliv (využití spalin z palivového článku). Před uvedením článku do provozu musí být ale bohužel poskytnuta energie k jeho zahřátí, což prodlužuje dobu náběhu a zvyšuje energetickou náročnost.

Na konstrukci těchto článků nejsou kladena žádná omezení ve smyslu uspořádání, lze ho proto koncipovat v různých geometrických tvarech. Nejdříve byl vyvíjen článek s deskovou konstrukcí (obr. 7.1), kterému se věnují společnosti po celém světě. Vývoj tubulárního uspořádání (obr. 7.2) vedl od 50. let 20. století k úspěšné konstrukci energetické jednotky s jmenovitým výkonem nad 100 kW. [1]



Obr. 7.1 Deskové uspořádání SOFC [1]



Obr. 7.2 Tubulární uspořádání SOFC - Siemens Westinghouse [1]

Elektrolytem je v tomto případě iontově vodivý keramický materiál. Nejčastěji to je oxid zirkoničitý (ZrO_2), který je stabilizovaný oxidy yttria (Y_2O_3). Tento materiál se za vysoké provozní teploty stává vodivým pro ionty kyslíku, kterým dovolí přemístění od katody k anodě. Iontová vodivost je za teploty okolo $1000\text{ }^\circ\text{C}$ srovnatelná s vodivostí kapalných elektrolytů. [3],[9]

V současné době se začaly pro zvýšení vodivosti už při teplotách okolo $700\text{ }^\circ\text{C}$ používat materiály na bázi ZrO_2 obohacené přísadou Sc_2O_3 .

Palivem může být vodík (H), oxid uhelnatý (CO), či produkty katalytického reformování uhlíkatých paliv, jako je například methan. [6]

V případě použití vodíku jako paliva probíhá na anodě reakce dle rovnice (7.1)



Při použití CO jako paliva probíhá reakce dle rovnice (7.2)



Podle rovnice (7.3) probíhá elektrodová reakce na katodě

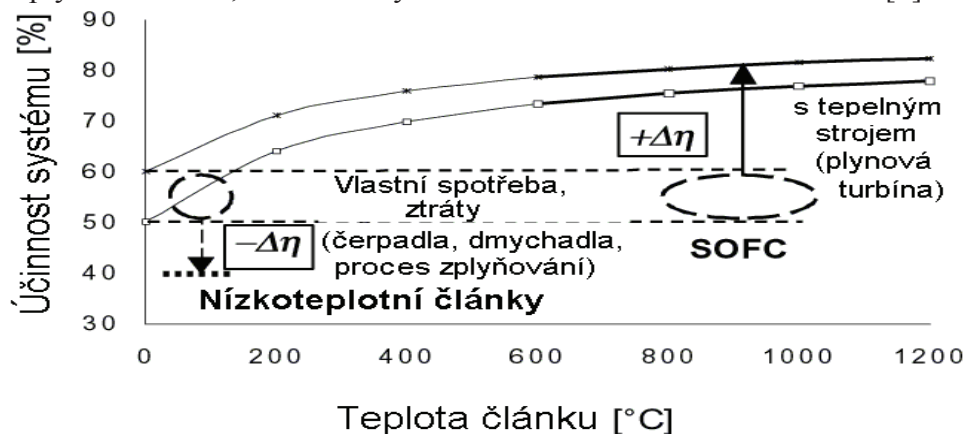


Materiál anody je směs keramicko-kovového sintrovaného materiálu na bázi Ni, který se zpravidla stabilizuje přidáním ZrO_2 . Jako katodové materiály se zpravidla rovněž používají vysoce porézní struktury na bázi $LaMnO_3$ dopovaného stronciem. [10]

Keramické materiály špatně snášejí opakované změny teplot, což může vést až k jejich praskání. Mezi další nevýhody patří dlouhá doba ohřevu na provozní teplotu, vysoké povrchové teploty a nutnost dobré tepelné izolace, což vyžaduje nároky na tepelnou odolnost konstrukčních materiálů.

Výhodami palivového článku s tuhými oxidy je, že nevyvolává korozi, odpadají zde problémy spojené s kapalným elektrolytem a neomezuje konstrukci článku z hlediska tvaru. Výhodou je také vysoká odolnost vůči síře, CO a CO_2 . [6],[7]

Účinnost článku z hlediska produkce elektrické energie je kolem 50-60 %, ale díky dostatečně vysoké teplotě produktů chemické reakce je můžeme využít pro následnou expanzi v plynové turbíně, čímž lze zvýšit účinnost až k hodnotám 80-85 %. [1]



Obr. 7.3 Vliv teploty na účinnost systému [1]

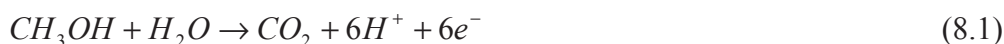
8 METHANOLOVÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK

(DMFC – Direct Methanol Fuel Cell)

Palivový článek DMFC se řadí do skupiny nízkoteplotních článků, neboť jeho pracovní teplota se pohybuje okolo 100 °C. Jde o alternativní a propracovanější verzi PEFC, které především v oblastech mobilního použití vykazují větší výhody než články PEM.

Také tento typ je vybaven iontoměničnou membránou ze syntetického materiálu, která plní funkci elektrolytu s kladnou iontovou vodivostí (H^+). Nejvíce používané jsou membrány s obchodním názvem Nafion[®]. Membrána se však nesmí vystavovat teplotám vyšším, jak 130 °C. Na rozdíl od článku PEM, jehož palivem je vodík a je jako plyn vedený k anodě, používá článek DMFC kapalný, nebo plynný methanol.

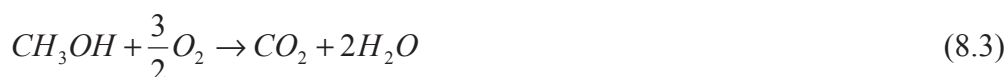
Podobně jako při reakci vodíku dochází k oxidaci paliva na anodě dle rovnice (8.1)



Na katodě dochází k redukci kyslíku dle rovnice (8.2)



Celkovou reakci v systému je možno popsat rovnicí (8.3)



K platinovému katalyzátoru se na anodě přidává ruthenium, které zabraňuje otravě platiny meziprodukty vzniklými během reakce. Charakteristickými skupinami těchto meziproduktů jsou COH nebo CO, které přecházejí na částice ruthenia a tak se dokončuje jejich odštěpení jako CO_2 . [6]

Difuzní vrstva provádí následující funkce. Především zajišťuje dopravu paliva a oxidačního činidla ke katalytické vrstvě, odvádí produkty z reakcí na anodě a katodě, zprostředkovává elektrickou vodivost. Je vyrobena z uhlíkové tkaniny impregnované teflonem. (obr. 8.1)

Zatím nevyřešeným problémem je prosakování methanolu z anody přes membránu ke katodě, kde dochází ke spalování methanolu bez užitku. Tento jev způsobuje zablokování katalyzátoru, což v celkovém pohledu vede ke snížení napětí článku. Na konstrukcích s co nejmenším průsakem se stále pracuje. Prosakování methanolu má spolu s pomalou oxidací methanolu (v porovnání s oxidací vodíku) negativní vliv na hodnoty výkon a účinnost DMFC, které jsou nižší než u článku PEFC. Pomalá oxidace je způsobena tím, že k ní dochází přes několik reakčních mezistupňů. Nevýhodou je také vysoká cena platinového katalyzátoru a dále jedovatost methanolu. [1],[4],[6]



Obr. 8.1 Uspořádání membránových elektrod DMFC [4]

A – elektrody, B – difuzní vrstva, C – katalytická vrstva, D – iontoměničná membrána

Výhodou článku je jednoduchá konstrukce, nízké provozní teploty a snadné ukládání paliva s vysokou hustotou energie. Díky tomu je článek vhodný k přenosným aplikacím. Při myšlence využití DMFC pro pohon automobilů je velkou výhodou, že by se stávající čerpací stanice nemusely nákladně přestavovat pro skladování methanolu, což by bylo nutné v případě použití vodíku.

V současné době již existují automobily s články DMFC, ale mnohem větší potenciál má jejich využití ve spotřební elektronice. Například napájení mobilních telefonů, mp3 přehrávačů, PDA, notebooků. Firma Toshiba již předvedla několik typů mp3 přehrávačů, notebooků, či PDA, které byly napájeny methanolovými palivovými články. Výhoda využití palivových článků v těchto aplikacích spočívá v jejich prakticky okamžitém dobití, kdy je pouze vyměněna kazeta s palivem. Běžný akumulátor se musí elektricky dobít v řádu několika hodin. [8]

Elektrická účinnost článků DMFC se pohybuje okolo 40 %. Jejich výkony jsou do 10 kW, proto je řadíme do nižší výkonové skupiny. [4]

Tab. 8.1 Shrnutí palivových článků

TYP	Nízkoteplotní			Středněteplotní		Vysokoteplotní	
	Alkalické	Membránové	Příme methalonové	Kyselé	S roztavenými uhlíčitany	S tuhými oxidy	
	-AFC-	-PEFC-	-DMFC-	-PAFC-	-MCFC-	-SOFC-	
Elektrolyt	Hydroxid draselný Hydroxid sodný	Iontoměničná membrána	Iontoměničná membrána	Kyselina fosforečná	Tavené karbonáty lithia, draslíku, sodíku	Oxid zirkoničitý s příměsí yttria	
Pracovní teplota (°C)	60 - 90	60 - 80	60 - 130	160 - 220	600 - 700	800 - 1000	
Pohyblivý iont	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	
Elektrická účinnost (%)	60 - 80	50 - 60	40 - 50	38 - 45	50 - 85	50 - 60 (80 - 85)	
Výkon (kW)	Do 20	Do 250	Do 10	50 kW - 10 MW	250 kW - několik MW	Do několika MW	
Používané palivo	Vodík	Vodík, methanol, ethanol	Methanol, ethanol	Vodík, zemní plyn, LPG	Vodík, zemní plyn, CO	Vodík, CO, ethan, zemní plyn, ...	
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální, autobusy, automobily	Přenosné články, automobily	Výroba energie	Výroba energie	Výroba energie	

9 ZÁVĚR

V dnešní době existuje několik druhů palivových článků, které se liší především pracovní teplotou, materiálem elektrod, elektrolytem, či membránou. Každý z nich je vhodný pro jinou aplikaci, ve které musí splňovat určité požadavky.

Mě nejvíce oslovilo použití palivových článků PEFC pro pohony automobilů, či autobusů. Jako hlavní přednost já osobně vnímám jejich vysokou účinnost, jejíž hranici nemohou spalovací motory konkurovat. Uvědomuji si, že hodnoty, které jsou v literaturách uváděny, jsou spíše ideální čísla, která by v realitě byla zřejmě o několik jednotek nižší, protože tyto hodnoty pramení z laboratoří, tedy z téměř ideálních podmínek kde je palivem ideálně čistý vodík. Další výhodou vidím v jejich tichém chodu. Ten je dán skutečností, že v článku nejsou přítomny žádné pohyblivé části. Na druhou stranu vím, že u existujících prototypů se vývojáři zamýšlí nad tím, jaký zvuk bezhlučnému automobilu uměle přiřadí. Zdá se jim být tiché auto totiž v provozu nebezpečné. Je asi pravdou, že zvuk spalovacích motorů máme už natolik zarytý v paměti, že bychom si na tuto revoluci museli nějakou dobu zvykat. Další velkou výhodou palivových článků jsou také jejich o několik řádů nižší emise škodlivin oproti všem ostatním zdrojům elektrické energie na fosilní paliva, což je významné zvláště s ohledem na stále rostoucí požadavky na vliv na životní prostředí.

Nasazení automobilů poháněných palivovými články na trh ale určitě nebude hned. Je stále ještě několik otazníků, které je třeba nejdříve vyřešit. Myslím si, že z hlediska technického je to hlavně použití vodíku jako paliva a jeho uskladnění. Protože jeho distribuční síť dosud neexistuje. Z hlediska ekonomického je to hlavně vysoká cena článků, kterou způsobuje nutnost použití velmi drahých materiálů. Věřím ale, že vědci naleznou takové materiály, které budou kvalitativně obdobné a cenově příznivější.

Byl bych moc rád, kdyby se palivové články v dohledné době staly používaným pohonem automobilů, či autobusů a nahradily spalovací motory. Cena ropy stále roste a zásoba také není věčná.

Další zajímavé uplatnění je podle mě v drobné elektronice, kde by palivové články DMFC nahradily současné baterie. Doba nabíjení by byla téměř nulová a provozní doba delší. Praktické by bylo napájet například přenosný počítač, telefon, či mp3 přehrávač.

Vývoj palivových článků budu i nadále sledovat, neboť mě tento zdroj elektrické energie budoucnosti oslovil a budu doufat v jeho brzký a velký rozmach.

LITERATURA

- [1] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. 2002 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>.
- [2] HASÍK, Jakub. *Palivové články*. Brno, 2007. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [3] Palivové články. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%A9_%C4%8Dl%C3%A1nky.
- [4] FURKA, David. *Palivové články* [online]. Praha, 2007 [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: http://elm-fur.wz.cz/palivove_clanky.pdf. Semestrální projekt. ČVUT..
- [5] Doležel I.: *Elektrochemie*. Skripta FEL ZČU, 1998.
- [6] TOMEČEK, David a Michael KUGLER. *Palivové články*. Praha, 2010/2011.
- [7] WILLIAMS, Mark. *Fuel Cell Handbook* [online]. Morgantown, West Virginia, November 2004 [cit. 2012-04-18]. ISBN 0-07-035688-0. Dostupné z: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/seca/pubs/fchandbook7.pdf>.
- [8] *Fuel Cells* [online]. 2008 [cit. 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.fuelcells.co.uk/>
- [9] NOVÁK. *Palivové články, rozdělení, principy, vlastnosti* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-03-25]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6617-palivove-clanky-rozdeleni-principy-vlastnosti>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A, V, W	jednotky elektrických veličin
W/kg	jednotka hmotnostního měrného výkonu
W/dm ³	jednotka objemového měrného výkonu
tzv.	takzvaný
mg, kg	jednotky hmotnosti
°C	jednotka teploty
GDL	Gas Diffusion Layer, difúzní plynová vrstva
MEA	Membrane Electrode Assembly, typ polymerní membrány
např.	například
FC	Fuel Cell, palivový článek
AFC	Alkaline Fuel Cell, alkalický palivový článek
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell, článek s polymerním elektrolytem
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell, palivový článek s kyselinou fosforečnou
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell, palivový článek s roztavenými uhličitany
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, palivový článek s tuhými oxidy
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell, methanolový palivový článek
tzn.	to znamená
W/cm ²	jednotka proudové hustoty
LPG	Liquefied Petroleum Gas, zkapalněný ropný plyn