



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

PALIVOVÉ ČLÁNKY  
FUEL CELLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Peter Ralbovský

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Libor Chroboczek

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/11

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Peter Ralbovský

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

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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:

### **Fuel cells**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem bakalářské práce bude odborná rešerše zabývající se problematikou palivových článků.

Cíle bakalářské práce:

- 1, Princip činnosti palivových článků.
- 2, Rozdělení palivových článků.
- 3, Výhody a nevýhody palivových článků jako zdroje energie.
- 4, Reforming paliva.

## Palivové články

### Seznam odborné literatury:

Palivové články, Porš,Z., ÚJV Řež a.s 2002

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Libor Chroboczek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 31.10.2010 16:13

L.S.

*Amelia*

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu



Vf. 

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologií palivových článků, jejich principem a rozdělením. Také je zde uveden postup pro získání vodíku ze zemního plynu jako paliva. Dále jsou zde uvedeny výhody a nevýhody palivových článků. V závěru práce jsou uvedeny aplikace palivových článků a jejich využití v kogeneraci a trigeneraci.

## Abstract

This bachelor's thesis deals with a fuel cells technology, their principle and division. There's also describes how to obtain hydrogen from natural gas as fuel. Furthermore, there are advantages and disadvantages of fuel cells. At the end of the work there are applications of fuel cells and their use in cogeneration and trigeneration.

## Klíčová slova

Palivový článek, reforming zemního plynu, vodík, kyslík, elektrická energie, AFC, PEMFC, DMFC, PAFC, MCFC, SOFC, kogenerace, trigenerace

## Keywords

Fuel cell, natural gas reforming, hydrogen, oxygen, electric power, AFC, PEMFC, DMFC, PAFC, MCFC, SOFC, cogeneration, trigeneration



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval sám bez cizí pomoci. Vycházel jsem přitom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2011

.....  
podpis autora

Tímto děkuji vedoucímu práce Ing. Liborovi Chroboczkovi za odbornou pomoc při zpracování této práce.

## OBSAH

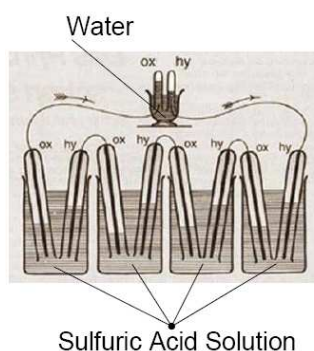
|             |                                                                                  |           |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>    | <b>ÚVOD.....</b>                                                                 | <b>9</b>  |
| <b>2</b>    | <b>HISTORIE .....</b>                                                            | <b>10</b> |
| <b>3</b>    | <b>PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU.....</b>                                            | <b>11</b> |
| <b>4</b>    | <b>ROZDĚLENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ.....</b>                                          | <b>13</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>NÍZKOTEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY .....</b>                                        | <b>13</b> |
| 4.1.1       | <i>Palivový článek s alkalickým elektrolytem AFC .....</i>                       | <i>13</i> |
| 4.1.2       | <i>Palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC) .....</i>       | <i>14</i> |
| 4.1.3       | <i>Methanolový palivový článek (DMFC).....</i>                                   | <i>15</i> |
| <b>4.2</b>  | <b>STŘEDNĚ TEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY.....</b>                                      | <b>16</b> |
| 4.2.1       | <i>Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC) .....</i>                      | <i>16</i> |
| <b>4.3</b>  | <b>VYSOKOTEPLTNÍ PALIVOVÉ ČLÁNKY.....</b>                                        | <b>17</b> |
| 4.3.1       | <i>Palivový článek s uhlíčitánovou taveninou (MCFC) .....</i>                    | <i>17</i> |
| 4.3.2       | <i>Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC) .....</i>                        | <i>18</i> |
| <b>5</b>    | <b>VÝHODY A NEVÝHODY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ JAKO ZDROJE ENERGIE .....</b>             | <b>21</b> |
| <b>5.1</b>  | <b>APLIKACE S PALIVOVÝMI ČLÁNKY .....</b>                                        | <b>22</b> |
| 5.1.1       | <i>Využití s fotovoltaickými články a větrnými elektrárnami.....</i>             | <i>22</i> |
| 5.1.2       | <i>Palivové články v autech.....</i>                                             | <i>24</i> |
| 5.1.3       | <i>Přenosné palivové články jako externí napájecí zdroj.....</i>                 | <i>24</i> |
| 5.1.4       | <i>Systém využití energie spalin z vysoko-teplotních palivových článků .....</i> | <i>25</i> |
| <b>6</b>    | <b>REFORMING PALIVA .....</b>                                                    | <b>27</b> |
| <b>6.1</b>  | <b>VODÍK.....</b>                                                                | <b>27</b> |
| <b>6.2</b>  | <b>SYSTÉM PŘÍPRAVY A REFORMINGU PALIVA .....</b>                                 | <b>27</b> |
| <b>7</b>    | <b>KOGENERACE S PALIVOVÝMI ČLÁNKY .....</b>                                      | <b>30</b> |
| <b>7.1</b>  | <b>POROVNÁNÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ S PÍSTOVÝMI SPALOVACÍMI MOTORY .....</b>          | <b>30</b> |
| <b>7.2</b>  | <b>KOMERČNÍ VYUŽITÍ A PARAMETRY KJ S PALIVOVÝMI ČLÁNKY.....</b>                  | <b>30</b> |
| <b>8</b>    | <b>TRIGENERACE S PALIVOVÝMI ČLÁNKY .....</b>                                     | <b>32</b> |
| <b>8.1</b>  | <b>REALIZOVANÁ TRIGENERACE S PAMFC V LONDÝNĚ .....</b>                           | <b>32</b> |
| <b>9</b>    | <b>ZÁVĚR.....</b>                                                                | <b>34</b> |
| <b>10</b>   | <b>ZDOJE .....</b>                                                               | <b>35</b> |
| <b>10.1</b> | <b>ZDROJE LITERATURA:.....</b>                                                   | <b>35</b> |
| <b>10.2</b> | <b>ZDROJE INTERNET: .....</b>                                                    | <b>35</b> |

## 1 ÚVOD

V dnešní době se neustále zvyšuje poptávka po elektrické energii a lidstvo se bez ní už neobejde. Každý člověk je na ní závislý, jak v práci tak i doma. Elektrická energie nám zajišťuje jistý životní standart a nikdo se ho nechce vzdát. S větší spotřebou energie roste i její produkce a tím se také zvyšuje vypouštění skleníkových plynů do ovzduší u elektráren, které tyto plyny produkují. Proto je velmi důležité, abychom nacházeli nové způsoby výroby elektrické energie a tepla, které by snížily produkci skleníkových plynů. Většina elektrické energie je vyrobena z fosilních paliv, jejich zdroj není neomezený. Spotřebu fosilních paliv by bylo možné omezit využíváním účinnějších zařízení pro výrobu elektrické energie, abychom byli schopni využít z paliva co nejvíce energie. Jednou z možností by mohly být právě palivové články, které mají vysokou účinnost a navíc produkují minimální množství skleníkových plynů. Palivové články začínají mít ve světě své místo a jejich rozmach bude v blízké budoucnosti.

## 2 HISTORIE

První princip palivového článku byl objeven v roce 1838 švýcarským vědcem Christianem Friedrichem Schönbeinem. Ten nechal publikovat ve vědeckém časopise článek s teoretickým principem palivových článků. Na základě této publikace sestavil v roce 1839 první funkční palivový článek vědec a vynálezce sir William Robert Grove, který zjistil, že lze vyrobit elektřinu procesem inverzním k elektrolýze vody. Jeho článek se skládal ze skleněných trubiček, v nichž byly platinové elektrody. Spodní konec elektrod byl ponořen do roztoku kyseliny sírové, která sloužila jako elektrolyt. Horní uzavřená část byla naplněna kyslíkem a vodíkem. U tohoto článku se podařilo naměřit napětí přibližně 1 V. Jako ukazatel posloužila nádoba, ve které probíhala elektrolýza vody. Toto zařízení nedokázalo vyrobit dostatek elektřiny, aby mohlo být využito v průmyslu.



OBRÁZEK 1: NÁKRES W. R. GROVEOVA POKUSU [4]

První použití termínu palivový článek bylo až v roce 1889, kdy se Ludwig Mond a Charles Langer pokusili vyrobit článek pracující se vzduchem a svítiplynem.

O první úspěšný palivový článek v roce 1932 se zasloužil Dr. Francis Thomas Bacon. Jeho článek byl na kyslíko-vodíkové bázi používající niklové elektrody, které byly levnější než platinové a jako elektrolyt použil hydroxid draselný. V roce 1952 dokázal sestavit Bacon se spolupracovníky palivový článek o výkonu 5kW.

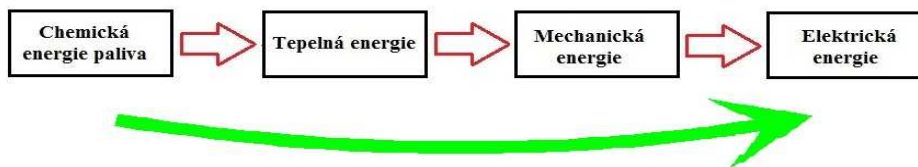


OBRÁZEK 2: F. T BACON A JEHO PALIVOVÝ ČLÁNEK [5]

Velký rozmach použití palivových článků se datuje do 60. let 20. století, bylo to především díky kosmickému výzkumu NASA. Palivový článek byl výhodný z pohledu energie/hmotnost a jeho odpadním produktem vodíko-kyslíkového článku byla voda. Byl použit například pro vesmírné moduly Gemini a Apollo.

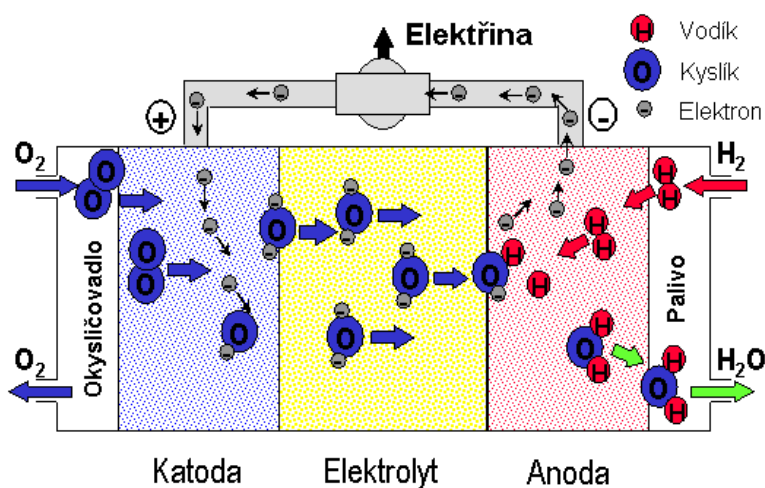
### 3 PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které během oxidačně-redukční reakce mění chemickou energii přímo na elektrickou energii, vodu, teplo anebo vodní páru.



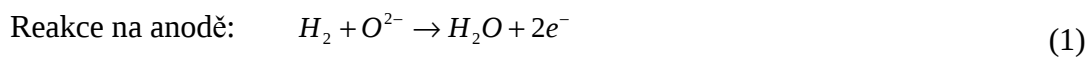
OBRÁZEK 3-1: TRANSFORMACE ENERGIE

Princip, na kterém pracují palivové články, je pro všechny stejný. Různé druhy palivových článků se však liší materiálem elektrod, elektrolytem, pracovní teplotou i různými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce článků je děj inverzní k elektrolýze. K jedné anodě přivádíme vodík (nebo jiné uhlíkové palivo) a ke katodě přivádíme kyslík nebo okysličovadlo. Prostor mezi elektrodami zaujímá elektrolyt. Funkcí elektrody je vyvolat reakci v oblasti pórů elektrody mezi palivem, okysličovadlem a elektrolytem, vzniká třífázové rozhraní, aniž by se účastnila reakce a korodovala. V elektrolytu dochází ke slučování kyslíku a vodíku na vodu, přitom vzniká na elektrodách elektrické napětí a zároveň vzniká teplo. Na obr. 3-2 je uveden vysokoteplotní palivový článek s pevným alkalickým elektrolytem, kde palivo je čistý vodík a okysličovadlo čistý kyslík.



OBRÁZEK 3-2 PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU[1]

V místě třífázového rozhraní dochází k elektrochemické oxidaci paliva a redukci okysličovadla podle těchto rovnic:



Pozn: Molekulární kyslík je přiváděn na katodu PČ, kde se dvěma elektrony redukuje na kyslíkový anion, který je transponován elektrolytem k anodě. Na anodě se přiváděný vodík redukuje kyslíkovým aniontem za vzniku vody, přičemž uvolněné elektrony jsou z anody vedeny na katodu, jako využitelný elektrický proud.

## 4 ROZDĚLENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

V dnešní době se palivové články dělí na 6 základních typů, které jsou rozděleny podle pracovní teploty do třech kategorií:

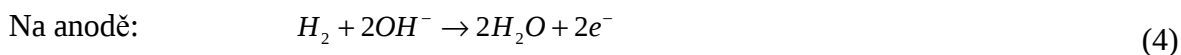
- Nízkoteplotní palivové články (od 60 do 130 °C)
  - PČ s alkalickým elektrolytem (AFC – Alkaline Fuel Cell)
  - PČ s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC – Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
  - PČ s iontovou (protonovou) membránou (DMFC – Direct Methanol Fuel Cell)
- Středně teplotní palivové články (od 160 do 220 °C)
  - PČ s kyselinou fosforečnou (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)
- Vysokoteplotní palivové články (od 600 do 1050 °C)
  - PČ s tavenými karbonáty (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell)
  - PČ s pevným oxidickým elektrolytem (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)

### 4.1 Nízkoteplotní palivové články

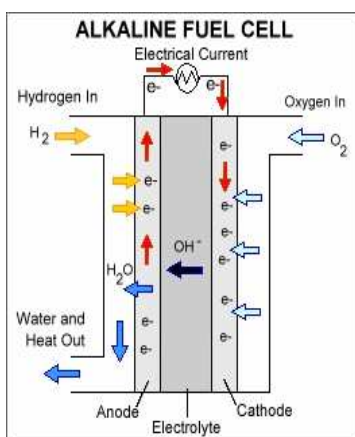
#### 4.1.1 Palivový článek s alkalickým elektrolytem AFC

Tyto palivové články jsou jedny z technologicky nejvyspělejších. Vývoj v této oblasti se datuje od roku 1960. Za jejich vývojem stojí především NASA, která je použila v kosmických lodích jako zdroj energie a na výrobu pitné vody.

Elektrolytem těchto článků může být KOH nebo NaOH v koncentracích 35 – 50%. Více se používá KOH jako elektrolyt, protože má ze všech alkalických hydroxidů největší vodivost. Koncentrace hydroxidů je závislá na pracovní teplotě palivového článku. Může se pohybovat v rozmezí 65-260 °C. Nejvyšší teploty dosahuje 85% koncentrace KOH. Při koncentraci v rozmezí 35-50% jsou pracovní teploty menší než 120 °C, proto jej řadíme do nízkoteplotních palivových článků. V alkalickém prostředí je kinetika redukce  $O_2$  rychlejší než v kyselém prostředí  $H_3PO_4$ . Díky nízké korozivosti nemusíme používat drahé platinové katalyzátory, což výrazně sníží cenu palivového článku. U těchto palivových článků se jako okysličovadlo používá čistý kyslík nebo vzduch. Při použití vzduchu jako okysličovadla, je nutné z něj odstranit  $CO_2$ , který v hydroxidech tvoří málo rozpustné uhličitany, to snižuje vodivost elektrolytu a zanášení pórů a tím zvyšuje ztráty. Při použití čistého vodíku jako paliva, můžeme dosáhnout účinnosti kolem 60%.



## Palivové články



OBRÁZEK 4-1 PALIVOVÝ ČLÁNEK AFC [6]

**Výhody AFC:**

- Nízká provozní teplota
- Rychlý start
- Vysoká účinnost
- Malá hmotnost a rozměry
- Potřebují malé množství platinového katalyzátoru

**Nevýhody AFC:**

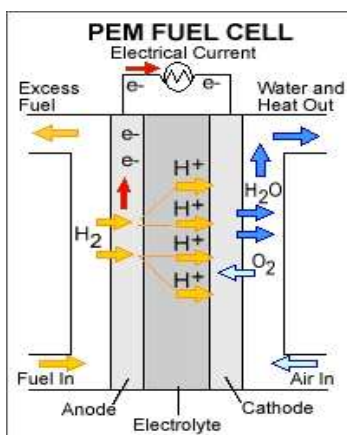
- Složitý systém vodního hospodářství
- Velká citlivost na  $CO$ ,  $CO_2$
- Relativně malá životnost
- Palivo pouze čistý vodík

**4.1.2 Palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC)**

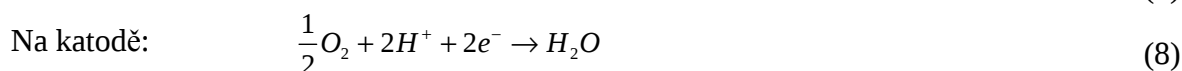
Tyto palivové články se vyznačují velkou proudovou hustotou, díky tomu mají nízkou hmotnost a malé rozměry. Protože PEMFC pracuje při nízkých teplotách, je schopen rychleji najíždět do provozu a rychle reagovat na změnu výkonu. Tento typ článků je proto vhodný pro pohon vozidel. Jako elektrolyt je použita membrána, která je schopna vést ionty a také umožňuje dobré těsnění v chemickém procesu, snižuje korozi a zvyšuje životnost článku.

PEMFC používá jako katalyzátor platinu, pro kterou je nebezpečný oxid uhelnatý, který se při styku s platinou absorbuje do platiny a vzniká neaktivní povrch. K omezení obsahu  $CO$  z reformovaného paliva je nezbytné, přidat před vstup do článku další stupeň pro katalytickou oxidaci  $CO$  na  $CO_2$ .

Pro provoz těchto typů článků je nutné zajistit vysoký obsah vody v elektrolytu, proto se nesmí voda odpařovat rychleji, než vzniká. Tím by rychle klesala vodivost membrány, proto by pracovní teplota neměla přesáhnout  $100^\circ C$ . Články mohou pracovat i nad  $100^\circ C$ , ale musí se zvýšit tlak tak, aby se voda nevařila, tím se však snižuje životnost článků. Účinnost PEMFC se pohybuje okolo 50-60%.



OBRÁZEK 4-2 PALIVOVÝ ČLÁNEK PEMFC [6]

**Výhody PEMFC:**

- Odolný proti  $CO_2$  v oksyličovadle i v palivu
- Nízká provozní teplota
- Rychlý start
- Elektrolyt není citlivý na korozi
- Rychlé spouštění

**Nevýhody PEMFC:**

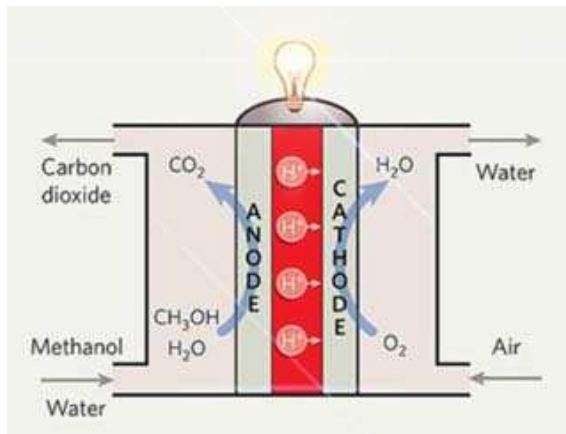
- Citlivost na  $CO$  a  $S$  v palivu
- Používá drahé platinové katalyzátory
- Používá drahé membrány

**4.1.3 Methanolvý palivový článek (DMFC)**

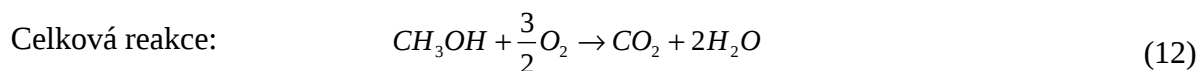
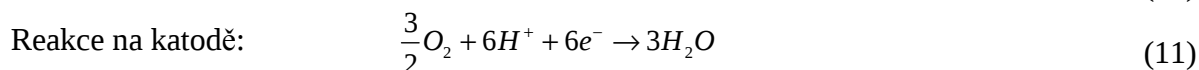
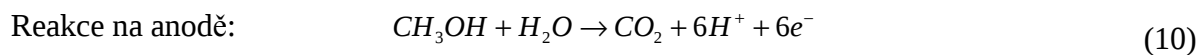
Tyto palivové články nepoužívají jako palivo čistý vodík, ale k produkci elektronů a protonů je vodík nahrazen roztokem methanolu. Největší výhodou metanolu je to, že odpadají problémy se skladováním, přepravou a tankováním čistého vodíku.

Rozdíl mezi vodíkem a methanolem je v pomalejší oxidaci methanolu, protože při jeho oxidaci prochází přes několik reakčních mezistupňů. V těchto mezistupních vznikají skupiny  $COH$ ,  $COOH$ ,  $CO$ , které se absorbují na katalyzátor a zabraňují jeho další adsorpci. K odstranění uhlíkatých skupin se do anodové vrstvy přidává Ruthenium (Ru), které zabraňuje otravu platiny.

Elektrolytem je zde opět membrána a funguje podobně jako u PEMFC. U této membrány nehrozí vysušení, protože je zvlhčována z anodové strany vodou, která je obsažena v methanolovém palivu. Konečná účinnost je okolo 40%.



OBRÁZEK 4-3 PALIVOVÝ ČLÁNEK DMFC [22]



#### Výhody DMFC:

- Využití tekutého methanolu jako paliva
- Není nutný reforming paliva

#### Nevýhody DMFC:

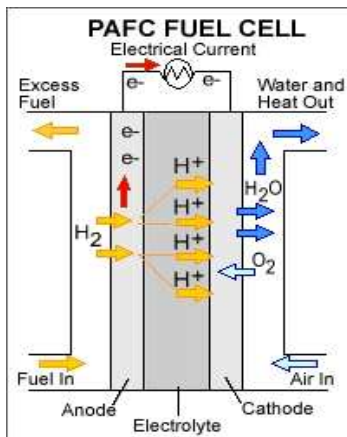
- Drahý platinový katalyzátor
- Toxický charakter methanolu

## 4.2 Středně teplotní palivové články

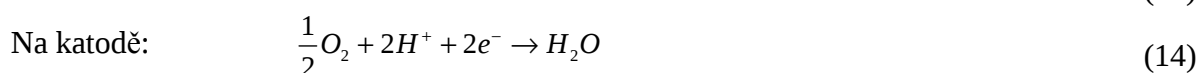
### 4.2.1 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Palivové články s kyselinou fosforečnou byly první komerčně využívaným typem. Jako elektrolyt byla použita koncentrovaná kyselina fosforečná a na elektrodách byly použity platinové katalyzátory. Kyselina fosforečná odstraňuje problémy s absorpcí  $\text{CO}_2$  a brání korozi některých kovů.

Článek dnes pracuje při provozní teplotě 200 °C a jeho největší nevýhodou je pomalý start, protože je nutné jeho zahřátí na pracovní teplotu. Z tohoto důvodu není vhodný pro mobilní zařízení. Jako palivo se opět používá čistý vodík a chemické reakce na elektrodách jsou stejné jako u PEMFC.



OBRÁZEK 4-4 PALIVOVÝ ČLÁNEK PAFC [6]



#### Výhody PAFC:

- Odolný proti vysokému obsahu  $CO_2$  v palivu
- Nevyžadují čištění vzduchu a paliva
- Stálý elektrolyt

#### Nevýhody PAFC:

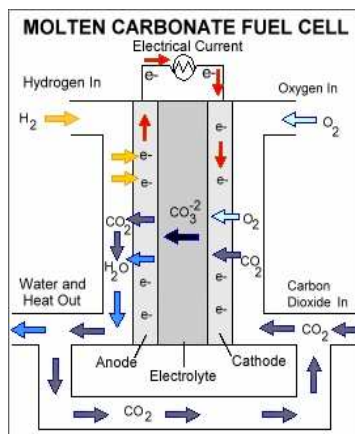
- Citlivost na síru v palivu
- Snáší pouze 2% obsahu  $CO$  v palivu
- Před startem je nutný přehřev
- Mají velkou hmotnost a rozměry

### 4.3 Vysokoteplotní palivové články

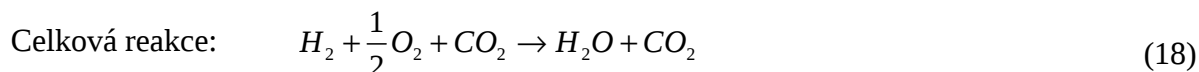
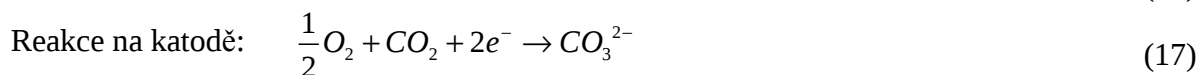
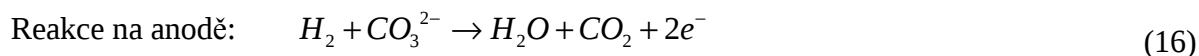
#### 4.3.1 Palivový článek s uhličitánovou taveninou (MCFC)

Pracovní teplota těchto článků je okolo 650 °C a jako elektrolyt se používají taveniny alkalických uhličitánů. Vysoká teplota je potřebná k zajištění dostatečné vodivosti uhličitánového elektrolytu a umožňuje použít levných součástí článku. Článek nevedí oxidy uhlíku, ale naopak je oxid uhličitý přiváděn spolu s kyslíkem na katodu, kde je

elektrochemicky přeměněn na ionty  $\text{CO}_3^{2-}$ . Tyto ionty se pohybují roztaveným elektrolytem směrem k anodě, kde reagují s vodíkem a vzniká voda a oxid uhličitý. Hlavní výhodou oproti předešlým typům PČ je, že má vnitřní reforming paliva, který nám zjednodušuje palivový systém. Před startem tohoto PČ je nutné ho zahřát na provozní teplotu, tím se nám snižuje celková účinnost a znemožňuje rychlý start článku. Tento článek dosahuje účinnosti až 60%.



OBRÁZEK 4-5 PALIVOVÝ ČLÁNEK MCFC [6]



#### Výhody MCFC:

- Umožňuje vnitřní reforming paliva
- Vysoká účinnost reakce
- Nepotřebují platinové katalyzátory
- Výroba vysokopotencionálního tepla

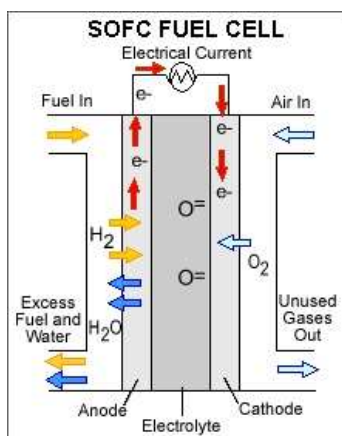
#### Nevýhody MCFC:

- Velký nárok na materiály
- Velká citlivost na síru
- Dlouhotrvající start (rozehřátí)
- Značná koroze elektrod

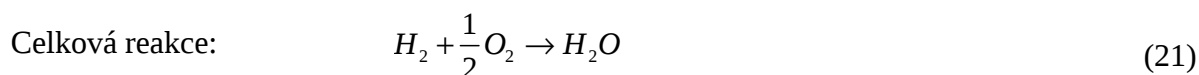
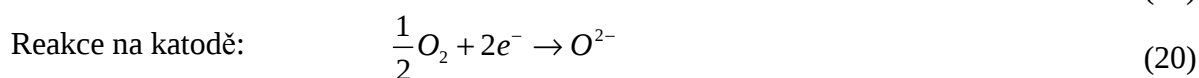
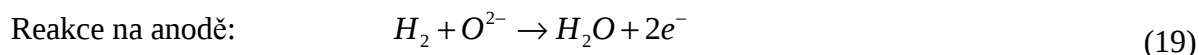
#### 4.3.2 Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC)

Pracovní teplota těchto PČ je ze všech nejvyšší, pohybuje se v rozmezí 800 - 1050 °C. Díky vysoké pracovní teplotě nepotřebují drahé katalyzátory a můžeme využít spaliny z PČ pro kogeneraci, jako elektrolyt je zde použit iontově vodivý keramický materiál. Většinou se jedná o oxid zirkoničitý  $\text{ZrO}_2$  stabilizovaný oxidy yridia  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Ten se při provozních

teplotách stává vodivým pro ionty kyslíku a umožňuje přechod od katody k anodě. Vysoká teplota SOFC nám dovoluje vnitřní reforming paliva, což vede k dosažení vyšší účinnosti. Účinnost tedy může dosáhnout až 65%. Použité materiály musí mít stejný koeficient teplotní roztažnosti, aby nevznikalo teplotní pnutí.



OBRÁZEK 4-6: PALIVOVÝ ČLÁNEK SOFC [6]



#### Výhody SOFC:

- Umožňuje vnitřní reforming paliva
- Vysoká účinnost
- Výroba vysokopotencionálního tepla
- Nepotřebují platinové katalyzátory

#### Nevýhody SOFC:

- Velké nároky na materiály
- Dlouhotrvající start (rozehřátí)
- Pomalé reakce na pracovní změny

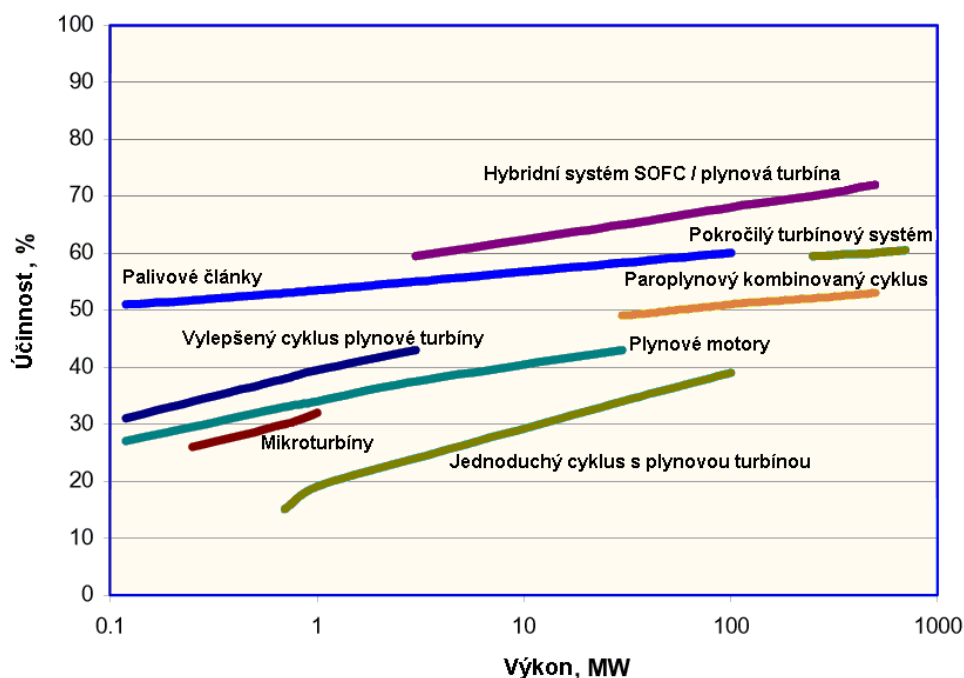
## Palivové články

TABULKA 1: ROZDĚLENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ [1]

| Druh                         | Nízkoteplotní                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Středněteplotní                                                                                                                                                                                                                            | Vysokoteplotní                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                              | Alkalické AFC<br>(Alkaline Fuel Cells)                                                                                                                                                                                                                             | Membránové<br>PEMFC (Proton<br>Exchange<br>Membrane Fuel<br>Cells)                                                                                                                                                                         | Přímé metanolové DMFC<br>(Direct Methanol Fuel<br>Cells)                                                                                                                                                                                                                                                          | Kyselé PAFC<br>(Phosphoric Acid<br>Fuel Cells)                                                                                                                                                                                             | S tavenými karbonáty<br>MCFC (Molten<br>Carbonate Fuel Cells)                                                                                                                                                                                                                                                | S pevnými oxidy<br>SOFC (Solid<br>Oxide Fuel<br>Cells)                                                                                                                                                                                         |
| Elektrolyt                   | Hydroxid draselný                                                                                                                                                                                                                                                  | Iontoměničná<br>membrána                                                                                                                                                                                                                   | Iontoměničná membrána                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Kyselina<br>fosforečná                                                                                                                                                                                                                     | Tavené karbonáty lithia,<br>vodíku, draslíku                                                                                                                                                                                                                                                                 | Oxid zirkoničitý<br>s příměsí yttria                                                                                                                                                                                                           |
| Pracovní<br>teplota (°C)     | 60 – 100                                                                                                                                                                                                                                                           | 20 – 80                                                                                                                                                                                                                                    | 20 – 130                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 170 – 250                                                                                                                                                                                                                                  | 600 – 650                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 800 – 1000                                                                                                                                                                                                                                     |
| Pohyblivý iont               | $\text{OH}^-$                                                                                                                                                                                                                                                      | $\text{H}^+$                                                                                                                                                                                                                               | $\text{H}^+$                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | $\text{H}^+$                                                                                                                                                                                                                               | $\text{CO}_3^{2-}$                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $\text{O}^{2-}$                                                                                                                                                                                                                                |
| Elektrodové<br>reakce        | $\text{A } \text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$<br>$\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ | $\text{A } \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$<br>$\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ | $\text{A } \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$<br>$\Sigma \text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ | $\text{A } \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$<br>$\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ | $\text{A } \text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$<br>$\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ | $\text{A } \text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$<br>$\text{K } \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$<br>$\Sigma \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ |
| Účinnost (%)<br>(elektrická) | 45 – 60                                                                                                                                                                                                                                                            | 40 – 60                                                                                                                                                                                                                                    | 40                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 38 – 45                                                                                                                                                                                                                                    | 45 – 60                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 50 – 65                                                                                                                                                                                                                                        |
| Výkon(kW)                    | Do 20                                                                                                                                                                                                                                                              | Do 250                                                                                                                                                                                                                                     | Do 10                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 50 – stovky kW                                                                                                                                                                                                                             | Do několika MW                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Do několika MW                                                                                                                                                                                                                                 |
| Používané<br>palivo          | Vodík                                                                                                                                                                                                                                                              | Vodík<br>Reformovaná<br>paliva                                                                                                                                                                                                             | Methanol (Ethanol)                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Vodík<br>Reformovaná<br>paliva                                                                                                                                                                                                             | Vodík<br>Nepřímá paliva                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Všechny druhy<br>bez<br>reformování                                                                                                                                                                                                            |
| Možné<br>aplikace            | Kosmické lodě,<br>lodě, ponorky                                                                                                                                                                                                                                    | Univerzální                                                                                                                                                                                                                                | Přenosné články                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Výroba energií                                                                                                                                                                                                                             | Výroba energií                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Výroba energií                                                                                                                                                                                                                                 |

## 5 Výhody a nevýhody palivových článků jako zdroje energie

Spalování primárních energetických zdrojů jako například dřevo, uhlí, zemní plyn a další se provádí spalováním. Technologie u palivových článků je založena na přímé přeměně chemické energie v palivu na elektrickou energii. Touto přeměnou dosahujeme vyšší účinnosti než při normálním spalování primárních zdrojů. Produkuje se horká voda, pára nebo plyny sloužící k rozvodu tepla nebo pro pohánění turbín, které díky mechanické práci v generátoru vyrábějí elektrickou energii. Tato přeměna paliva na elektrickou energii je zatížená velkými ztrátami a má tedy relativně nízkou účinnost. Navíc produkuje velké množství spalin, které jsou nežádoucí pro životní prostředí. Teplo v palivovém článku vzniká bez plamene nebo výbuchu přímou přeměnou energie paliva na elektrickou energii. Odpadá tedy přeměna tepelné energie na mechanickou práci a následně přeměna na elektrickou. V palivovém článku se nenacházejí žádné pohyblivé části a tím je zajištěn tichý a účinnější chod palivových článků.



OBRÁZEK 5: POROVNÁNÍ ELEKTRICKÉ ÚČINNOSTI PČ S KONVENČNÍM ZAŘÍZENÍM[1]

### Výhody:

- Vysoká životnost
- Nízké opotřebení
- Tichý chod (neobsahuje pohyblivé části)
- Produkuje velmi nízké emise
- Široký palivový program (po úpravě paliva)
- Velké rozmezí výkonů
- Možnost využití vysoko-potencionálního tepla

**Nevýhody:**

- Náběh PČ může trvat i několik minut
- Udržování optimální teploty a tlaku aktivních medií
- Citlivost na některé příměsi v palivu nebo okysličovadle ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $S$ )
- Účinnost klesá s dobou provozu
- Vysoké investiční náklady

Nejvíce provozních hodin byly provozovány PČ společností UTC (dříve ONSI a IFC) typu PC25 (PAFC) o výkonu 200 kW, které vyprodukovaly přes miliardu kWh.

Na obrázku je uveden systém, který spojuje pět jednotek PC25. Tyto palivové články poskytují  $1MW_{el}$  pro americkou poštu v Anchorage na Aljašce. Toto zařízení pracuje paralelně k rozvodové síti. Je schopno tedy napájet poštu nebo dodávat energii do sítě.



OBRÁZEK 6: PALIVOVÉ ČLÁNKY UTC PC25 5X 200KW V ANCHORAGE, ALJAŠKA [16]

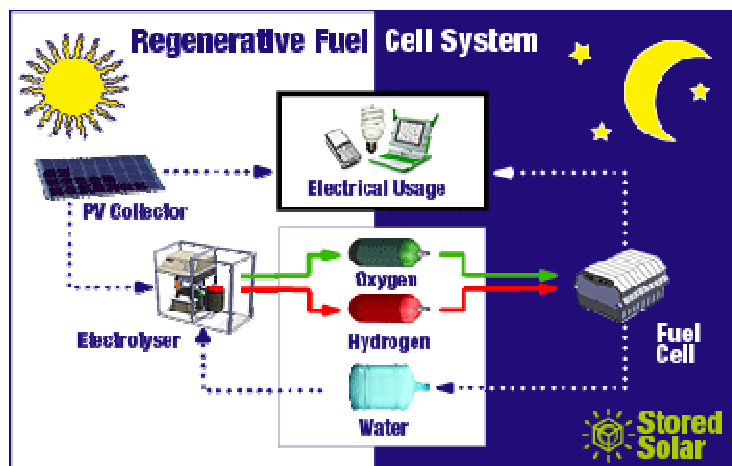
## 5.1 Aplikace s palivovými články

Vodík vyráběný z obnovitelných zdrojů energie neprodukuje žádné emise a je to tedy čistá forma energie. Vodík je nejčastěji vyroben z obnovitelných zdrojů v elektrolyzéru, který používá elektřinu k oddělení vody na vodík a kyslík. Produkty elektrolýzy využijeme v palivových článcích a tím můžeme regulovat dodávaný výkon a také nahrazovat fotovoltaické články nebo větrné elektrárny v případě, kdy nejsou schopny dodávat požadovaný elektrický výkon. Další aplikace s palivovými články mohou být využívány jako pohon automobilů, kde díky palivovým článkům odchází z výfuku automobilu pouze čistá voda. Palivové články jsou využívány jako externí zdroj energie a u vysokoteplotních článků můžeme využívat energii spalin v hybridních systémech.

### 5.1.1 Využití s fotovoltaickými články a větrnými elektrárnami

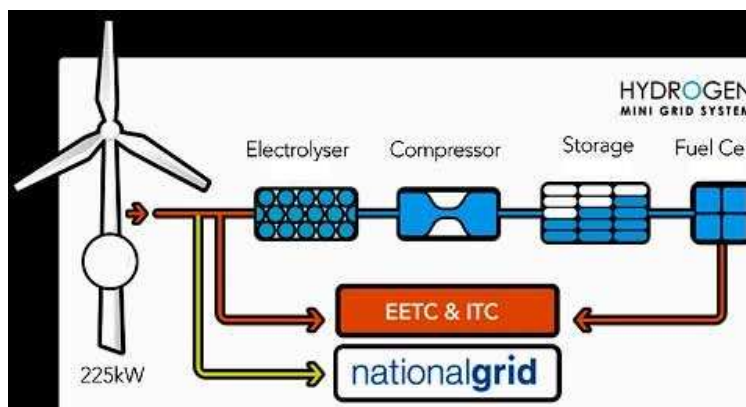
Regenerační technologie palivových článků je výhodná pro řízení fotovoltaických článků. Toto zařízení funguje tak, že přes den vyrábíme elektřinu pomocí fotovoltaických článků. Při velké poptávce po elektrické energii se posílá energie do sítě. Když je menší poptávka

po elektrické energii, tak se energie využije k výrobě vodíku a kyslíku elektrolýzou vody v elektrolyzáru. Vyrobený vodík a kyslík se uchovává v tlakových nádobách. Přes den si tedy vyrobíme zásoby paliva a okysličovadla, které využijeme v noci v palivových článcích, kdy fotovoltaické články nevyrábějí energii.



OBRÁZEK 7: VYUŽITÍ FV ČLÁNKŮ S PALIVOVÝMI ČLÁNKY [11]

Další možností je využití větrné elektrárny, která taky nedodává nepřetržitě elektrickou energii. Výroba elektrické energie je závislá na síle větru, tím pádem dochází ke kolísání výkonu a při bezvětří nebo velmi silném větru se nevyrábí vůbec. Stejně jako u slunečních kolektorů se tedy část energie odvádí do elektrolyzáru, kde se vyrobí vodík a kyslík. V případě potřeby se spustí palivový článek.



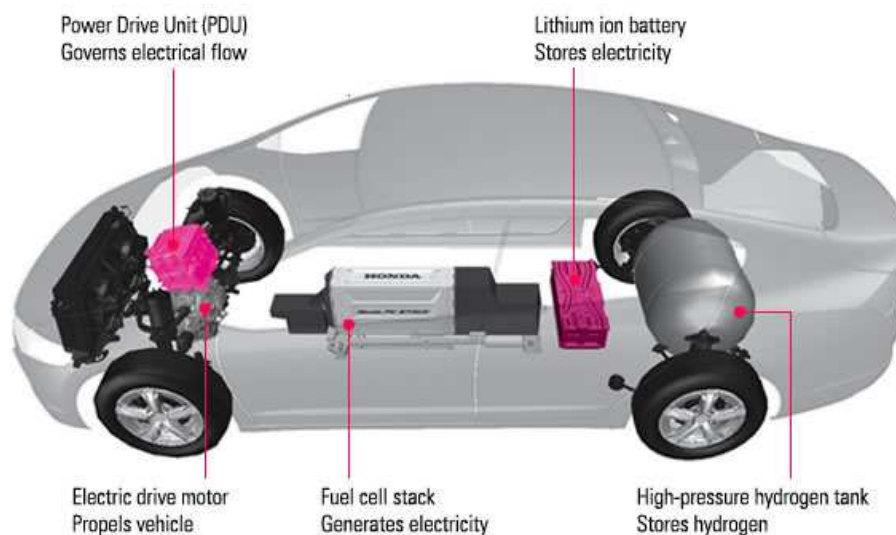
OBRÁZEK 8: VYUŽITÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S PALIVOVÝMI ČLÁNKY [12]

Tyto aplikace by řešily problémy fotovoltaických článků a větrných elektráren, s nerovnoměrnou distribucí elektrické energie do sítě a jejich kompenzací. Hlavní výhodou je to, že by se pokryly náklady na výrobu vodíku elektrolýzou, které jsou finančně náročné. Tímto krokem bychom získali další obnovitelný zdroj energie.

### 5.1.2 Palivové články v autech

Auta s palivovými články se začínají vyrábět, protože jejich nespornou výhodou je to, že produkují minimální emise a jsou tak šetrné pro životní prostředí. Další výhodou je, že palivové články jsou tiché. V roce 2002 firma Honda začala testovat vozy Clarity FCX, které byly poháněny palivovými články. Honda Clarity má spotřebu vodíku ekvivalentní jako u spalovacího motoru 4,1 litru/100 km. Výkon tohoto auta je 100 kW a maximální rychlost je 160 km/h. Je tedy adekvátní náhradou za normální automobily. Při výrobě vodíku se vytváří téměř poloviční emise  $CO_2$  než výroba a spalování benzínu.

Honda vyvinula pro tyto automobily nový palivový článek s názvem V-Flow. Jedná se o článek PEMFC, který má jinou strukturu. Hlavní změnou je vertikální proudění plynů, což usnadní odtok vody jako vedlejšího produktu. Dalším vylepšením jsou zvlněné průtočné kanály, kterými proudí vodík a vzduch, tím se zvětšila délka kanálu a navíc se palivo a okysličovadlo dobře rozptýlí po povrchu elektrody. Všechny tyto změny vedly ke snížení hmotnosti a rozměrů palivových článků ale i ke zvětšení výkonu.



OBRÁZEK 9: SCHÉMA ULOŽENÍ PČ V HONDĚ CLARITY [17]

### 5.1.3 Přenosné palivové články jako externí napájecí zdroj

Největším výrobcem těchto PČ je firma Toshiba Corporation. Tato firma zahájila v roce 2009 prodej externího zdroje napájení jménem Dynario<sup>TM</sup>. Tento externí zdroj je vlastně článek DMFC, který používá methanol jako palivo. Toshiba přišla s tímto produktem, aby si zákazník mohl dobít elektrické spotřebiče bez nutnosti připojení k elektrické síti. Methanol se do PČ vstříkne do specializované kazety injekcí. Dynario<sup>TM</sup> začne produkovat elektřinu, která je dodávána do digitálního spotřebního zboží např. mobilní telefon, digitální přehrávač a další. Toshiba uvádí, že na jedno naplnění zásobníku methanolem dokáže Dynario<sup>TM</sup> generovat dostatek energie pro nabití dvou typických mobilních telefonů. Na výstupu tohoto článku dostaneme DC5V-400mA.

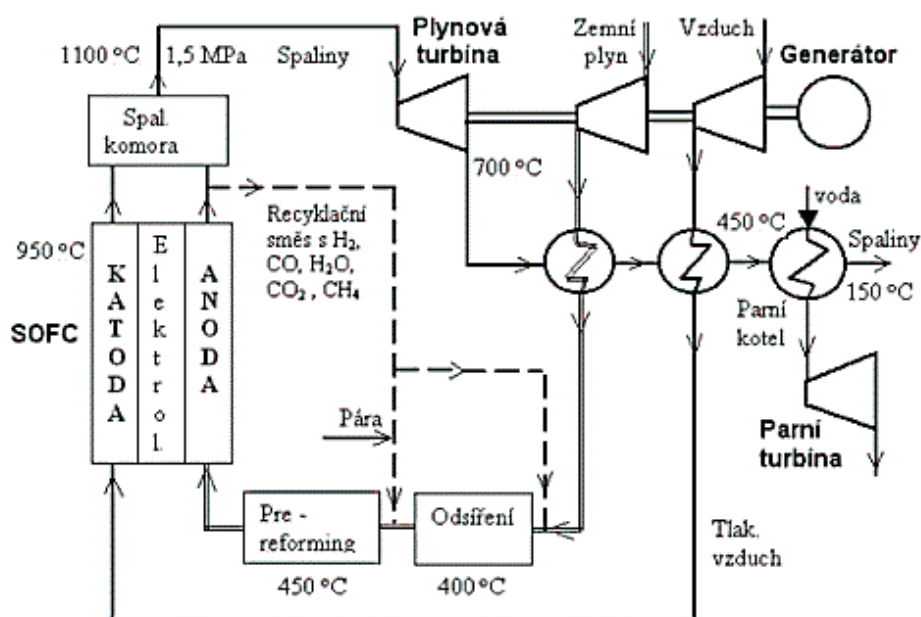


OBRÁZEK 10: NAPLNĚNÍ DYNARIA METHANOLEM [18]

#### 5.1.4 Systém využití energie spalin z vysoko-teplotních palivových článků

Výstupní napětí ze souboru PČ se výrazně mění podle proudové zátěže, složení palivových plynů, teploty a tlaku. K eliminaci těchto vlivů se používají tzv. DC/DC regulátory. Toto napětí je stejnosměrné a je nutné ho převést na střídavé napětí pomocí DC/AC inventory. Vysoko-potencionální teplo produkované PČ se dá použít k reformingu zemního plynu ale i k ohřevům pomocí výměníků tepla. Pro systémy pracující při atmosférickém tlaku se teplo může využít v parním kotli pro generaci páry, která by poháněla parní turbínu, a tím zvýšila výrobu energie. Pro využití nízko-potencionálního tepla lze využít výměníky k ohřevům a topení.

U palivových článků SOFC, které mohou pracovat při vyšších tlacích, můžeme využít nespáleného paliva a vysoko-potencionálního tepla k výrobě další energie. Nespálené palivo v PČ použijeme ve spalovací komoře a k následnému pouštění spalin na plynovou turbínu. Podle teploty spalin z plynové turbíny můžeme využít vysokou teplotu na výrobu páry v parním kotli a k následnému pohánění parní turbíny.



OBRÁZEK 11: SCHÉMA HYBRIDNÍHO SYSTÉMU SOFC S PLYNOVOU A PARNÍ TURBÍNOU [14]

Hybridní systém na obrázku 16 byl sestaven na základě vypočítaných a z části prakticky ověřených parametrů s aplikací článků SOFC a spalovací turbínou o celkových výkonech 3 MW<sub>el</sub> a 10 MW<sub>el</sub> a jsou uvedeny v Tabulce 2. V této tabulce je i uvedena účinnost celého systému, která dosahuje 61%. Díky vysoké účinnosti jsou hybridní systémy vhodné pro výrobu elektrické energie.

TABULKA 2: PARAMETRY HYBRIDNÍHO SYSTÉMU [14]

| Parametr zařízení a specifikace                                  | Jednotka o výkonu  |                     |
|------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|
|                                                                  | 3 MW <sub>el</sub> | 10 MW <sub>el</sub> |
| Čistý výstupní el. výkon ve střídavém proudu (MW <sub>el</sub> ) | 3,3                | 10,3                |
| Čistý el. výkon baterie SOFC (MW <sub>el</sub> )                 | 1,9                | 6,8                 |
| Výkon spalovací turbíny (MW <sub>el</sub> )                      | 1,4                | 3,6                 |
| Tok paliva - zemního plynu (kg/hod)                              | 391                | 1 296               |
| Kompresor - průtok vzduchu (kg/hod)                              | 18 565             | 55 440              |
| Tok výstupních plynů (kg/hod)                                    | 18 950             | 56 160              |
| Výstupní teplota plynů (°C)                                      | 210                | 357                 |
| Účinnost zařízení, vztažená k výhřevnosti paliva (%)             | 61                 | 61                  |
| Emise NO <sub>x</sub> (ppm obj.)                                 | < 5                | < 5                 |

## 6 Reforming paliva

### 6.1 Vodík

Elementární vodík na Zemi je zastoupen velmi vzácně. Nejčastěji v blízkosti sopek a v sopečných plynech a díky své nízké hmotnosti z atmosféry uniká. Vodík je ale hojně zastoupen ve sloučeninách jako například ve vodě, která pokrývá 2/3 zemského povrchu, ale také je součástí zemního plynu a v ložiscích uhlí. Vodík je nosičem energie a stejně jako elektřina představuje vysoce kvalitní formu energie až na to, že vodík můžeme uchovávat ve velkém množství. Pro palivové články je vodík pro reakci nezbytný, a proto ho získáváme různými způsoby. Jde už jen o to, jaký způsob bude nejméně energeticky náročný a co nejvíce šetrný k životnímu prostředí.

K palivovým článkům můžeme přivádět přímo čistý vodík, vyrobený v továrně a dovezený, nebo přímo před palivovým článkem si upravíme palivo, tak jak ho potřebujeme a díky tomu snížíme cenu za jeho transport k článku.

Největším problémem vodíku je jeho skladování. Jako nejlehčí plyn dokáže procházet materiálem nebo může být materiálem pohlcen. Vodík se skladuje v kapalně nebo plynné fázi. Pro skladování vodíku v plynné fázi se používají vysokotlaké nádoby vyrobené z nízkouhlíkové oceli bez použití svaru. Energetická náročnost tohoto skladování je nižší než při skladování v kapalně fázi. Při skladování vodíku v kapalně fázi musí být vodík ochlazen pod jeho teplotu varu při požadovaném tlaku. Tato teplota je  $-253^{\circ}\text{C}$  při atmosférickém tlaku a energetická náročnost na takové ochlazení a kompresi dosáhne až 30% ztrátu energie uchované v palivu. V běžných nádržích dosahuje ztráta vodíku skrz nádrž až 3% z obsahu nádrže za den.

### 6.2 Systém přípravy a reformingu paliva

Pro palivové články chceme, aby na anodu byl přiváděn plyn s co největším možným množstvím vodíku. Na katodu se většinou přivádí kyslík ze vzduchu, který je mechanicky čištěný přes prachový filtr. Pro reforming paliva se nejvíce hodí zemní plyn, protože obsahuje 98% metanu. Metan zajišťuje dobrou výtěžnost vodíku při reakcích v poměru 4:1. Před vlastním reformingem paliva musíme dát pozor na to, aby neobsahoval škodlivé látky pro palivový článek jako například chloridy, stopovou síru, amoniak a další. Je nezbytné tyto látky odstranit, protože zkracují životnost článku.

Hlavní reakce při parním reformingu zemního plynu je, že se metan obohacuje vodní párou a ohřeje se přibližně na  $800^{\circ}\text{C}$  ve speciálním zařízení reformeru a za přítomnosti katalyzátoru se metan přemění podle reakce:

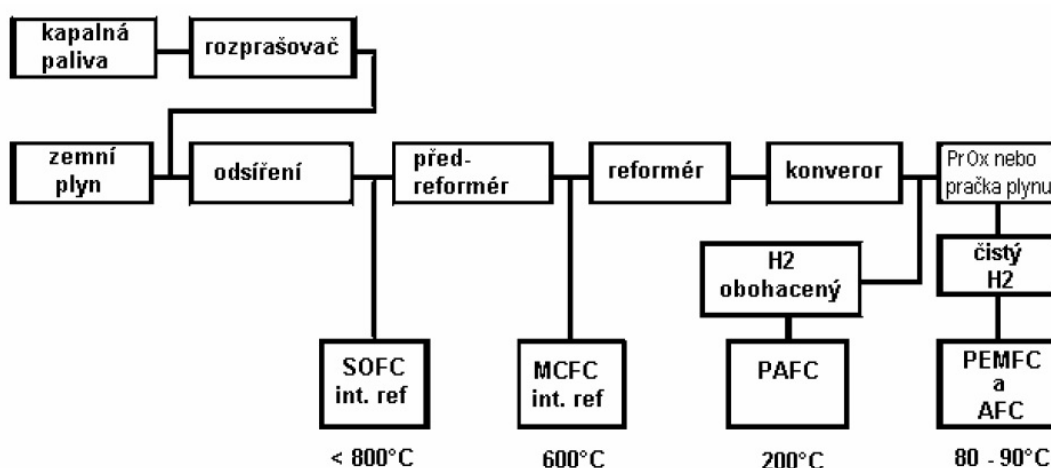


K této reakci je nutné přivést teplo, protože reakce je endotermická. Teplo získáme spalováním paliva, které nezreagovalo v palivovém článku. Následuje reakce, kde se vzniklý oxid uhelnatý reaguje s vodní parou v konvertoru podle rovnice:

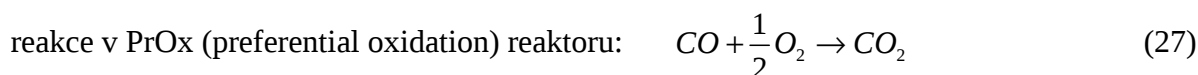


Tato reakce je exotermická, okolo  $200^\circ\text{C}$ , ale její tepelný efekt není tak výrazný jako při předešlé reakci.

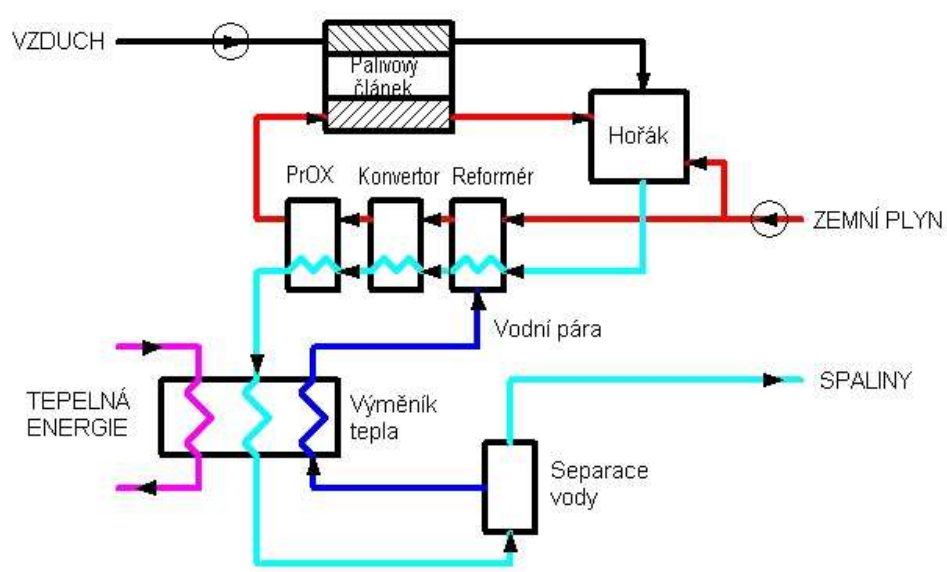
Na následujícím obrázku 12 je znázorněn reforming paliva pro různé palivové články. Pro vysokoteplotní články není potřeba upravovat palivo tak, jak pro středněteplotní a nízkoteplotní palivové články jak je zobrazeno na obrázku 13. V palivových článcích od pracovních teplot  $600^\circ\text{C}$  a více začíná uvnitř článku konverzní a reformní reakce. Reforming tedy probíhá přímo na anodě palivového článku. Výhodou vysokoteplotních článků je to, že jejich vysoká teplota se může využít k reformingu zemního plynu a tím se snižují náklady pro přípravu paliva. Nevýhodou však je nutný předehřev palivového článku na provozní teplotu.



OBRÁZEK 12: ZÁVISLOST ÚPRAVY PALIVA PRO RŮZNÉ PČ [1]



## Palivové články



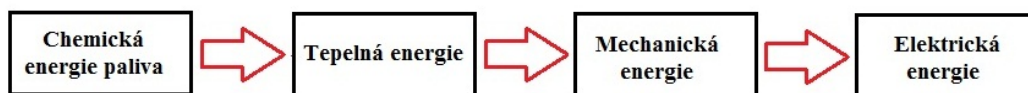
OBRÁZEK 13: SCHÉMA SYSTÉMU PŘÍPRAVY A REFORMINGU PALIVA [1]

## 7 Kogenerace s palivovými články

Palivové články se mohou také využít jak pro výrobu elektrické energie, tak i při kogeneraci. Kogenerace je společná výroba elektrické energie a tepla. U klasické elektrárny se dosahuje účinností okolo 35% a méně, zato u palivových článků dosahujeme účinností 40% a více a hlavně neprodukuje vedlejší produkty spalování. Palivový článek může být využit jako kogenerační jednotka se spalovacím motorem. Může tedy pokrývat lokální spotřebu tepla a elektřiny.

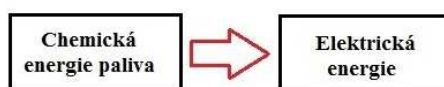
### 7.1 Porovnání palivových článků s pístovými spalovacími motory

V kogenerační jednotce pístový motor pohání generátor, ve kterém se vyrábí elektrická energie. Využíváme odpadní teplo výfukových spalin k ohřevu ve výměníku tepla. Účinnost takto vyrobené energie se pohybuje okolo 35% v závislosti na typu motoru a použitém palivu. Ve spalovacích motorech se energie mění v následujících krocích, viz obrázek 6.



OBRÁZEK 14: PŘEMĚNA ENERGIE VE SPALOVACÍCH MOTORECH

V těchto krocích dochází ke ztrátám energie a tím ke snížení účinnosti zařízení. U palivových článků se chemická energie paliva přemění přímo na elektrickou energii, viz obrázek 7. Jako odpadní produkt vzniká voda a teplo. Při využití odpadního tepla můžeme dosáhnout tepelnou účinnost vyšší než 80%.



OBRÁZEK 15: PŘEMĚNA ENERGIE V PALIVOVÝCH ČLÁNCÍCH

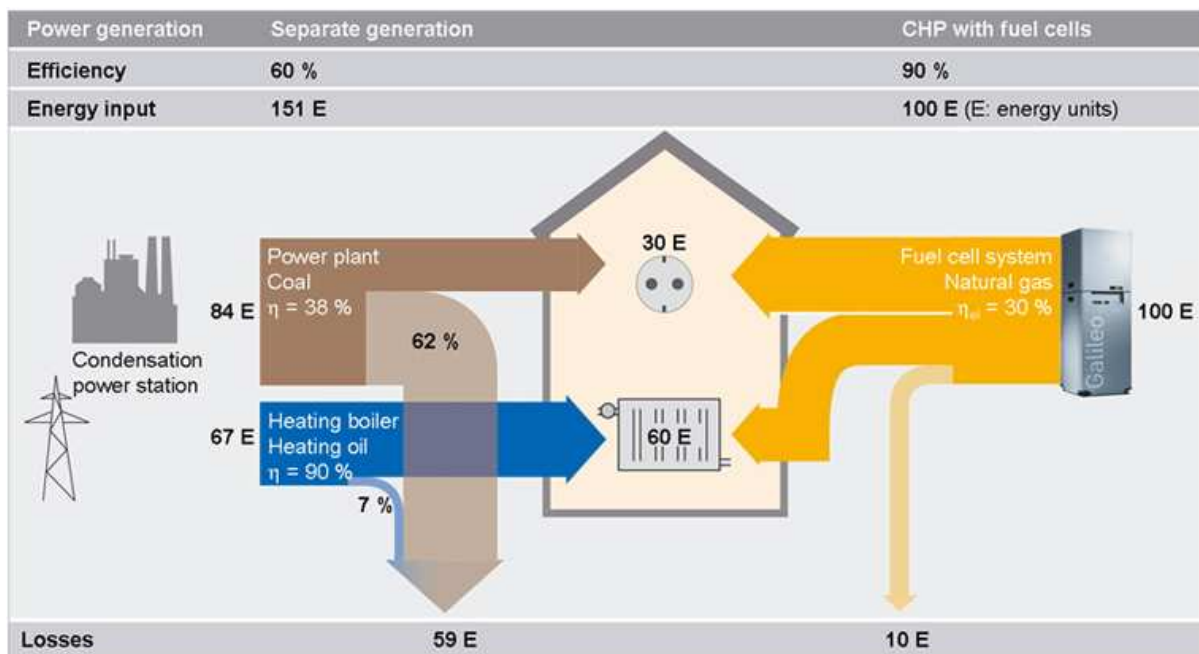
### 7.2 Komerční využití a parametry KJ s palivovými články

Firmy, které používají vysokoteplotní PČ (SOFC) jsou například Sulzer, Hexis AG, Vaillant, Panasonic, Ebbara Ballard a další. Tyto firmy jako palivo používají převážně zemní plyn a následným reformingem získají vodík.

Společnost Vaillant vyvinula systém s výkonem 4,6 kW<sub>el</sub>. Tento systém vydržel 330 000 provozních hodin při výrobě 1 000 000 kWh<sub>el</sub>. Takové množství by stačilo pro pokrytí spotřeby přibližně 300 bytů po dobu jednoho roku.

V Japonsku je v současnosti instalováno několik tisíc jednotek s využitím PČ. Většinou se jedná o jednotky s menšími výkony, ale jejich cíl je v roce 2011 mít 2100 MW instalovaného výkonu.

Největší využití mikrokogeneračních jednotek je tam, kde je neustálá poptávka po tepelné a elektrické energii tak, aby mohlo zařízení být v provozu co nejvíce hodin. Například se jedná o hotely, penziony, internáty, bazény, nemocnice, sídliště a různé průmyslové podniky. Velikost jednotky se nejčastěji odvozuje od spotřeby tepla v daném objektu.



OBRÁZEK 16: SCHÉMA ÚČINNOSTI KOGENERAČNÍ JEDNOTKY GALILEO 1000 OD FIRMY HEXIS[19]

Kogenerační jednotka Gallileo 1000 od firmy Hexis je využívána hlavně pro domy a menší bytové jednotky, kde má nahradit plynový kotel nebo boiler pro ohřev vody. Hexis uvádí, že účinnost této jednotky dosahuje až 90%. To je dosaženo díky použití vysokoteplotních palivových článků SOFC, které pracují v rozmezí teplot 800-850°C. Tyto články mají elektrickou účinnost 30%, které dodávají 1 kW elektrické energie a 2 kW tepelné energie. Pro případ, že by palivové články nestačily pokrýt dodávku tepla, má Gallileo 1000 integrovaný plynový hořák.

## 8 Trigenerace s palivovými články

Trigenerace je ve své podstatě kogenerace, u které se kromě elektrické energie a tepla také vyrábí chlad z jednoho zdroje paliva. Tím se zvyšuje účinnost zařízení a snižují se emise. Trigenerační jednotka je vlastně kogenerační jednotka s připojenou chladicí jednotkou. Hlavní výhodou tohoto systému je, že umožňuje využití tepla i mimo topnou sezónu a tím dosáhneme prodloužení ročního chodu jednotky. V letních měsících, kdy není výroba tepla tak potřebná, bychom mohli toto vyráběné teplo z kogenerace využít k výrobě chladu v chladicím zařízení. Tento vyrobený chlad může být využit kdekoliv, kde je zapotřebí klimatizace jako například v bytech, bankách, hotelech, nemocnicích, sportovních halách apod.

Výroba chladu se může provádět kompresorovým chlazením nebo absorpčním chlazením. U kompresorového chlazení je hlavní částí kompresor, který je náročný ohledně elektrické energie a tím se snižuje elektrická účinnost celé soustavy. U absorpčního chlazení není žádný kompresor jen čerpadlo, které je oproti kompresoru mnohem méně náročné na elektrickou energii a tím se zvýší elektrická účinnost celé soustavy. Hlavní faktor pro výběr způsobu chlazení je to, co potřebujeme na výstupu celé jednotky, jestli potřebujeme na výstupu celé jednotky vysokopotencionální teplo nebo elektrickou energii. Když potřebujeme vysokopotencionální teplo je lepší kompresorové chlazení, protože v absorpčním chlazení bychom část tohoto tepla využili k vypaření oběhové látky. V případě, kdy chceme na výstupu mít více elektrické energie, použijeme absorpční chlazení, které není tolik náročné na elektrickou energii. Navíc zajišťuje tichý chod. Součásti absorpčního chlazení pracují prakticky bez údržby. To dokazuje životnost i 30 let.

### 8.1 Realizovaná trigenerace s PAMFC v Londýně

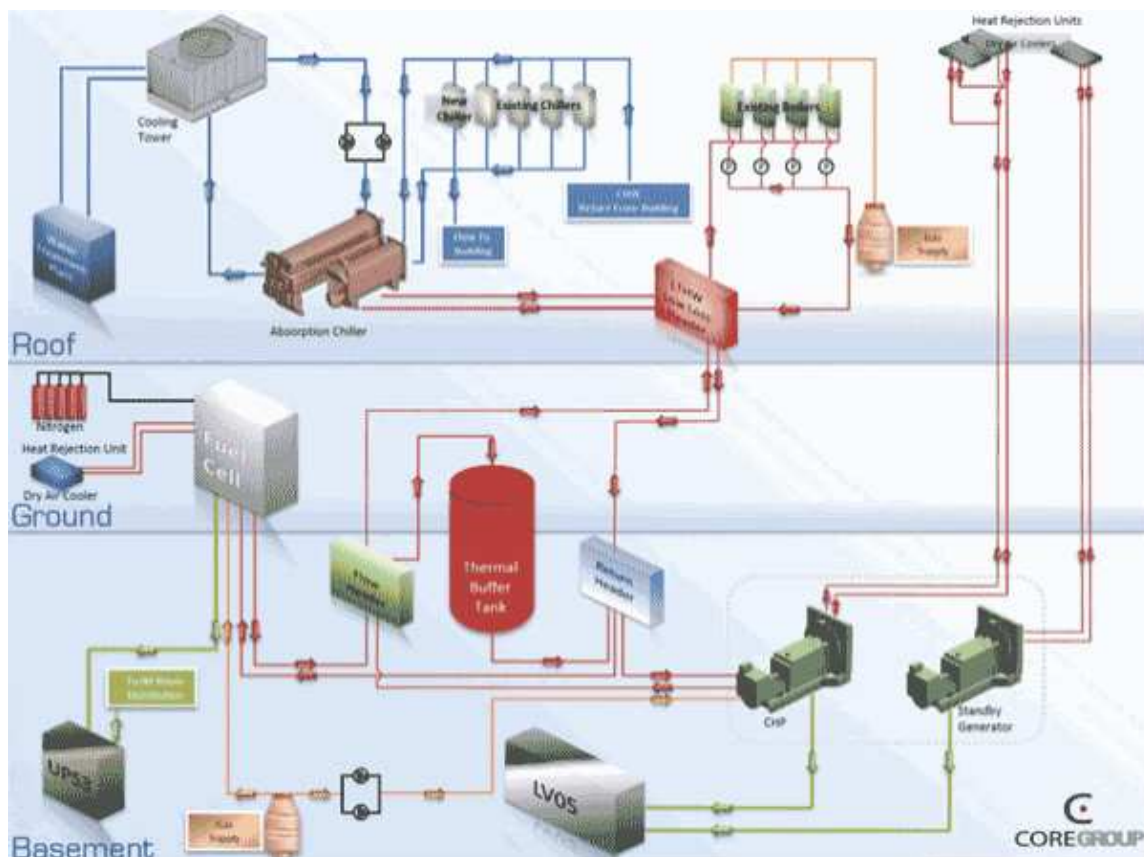
Firma Logan Energie realizovala projekt trigenerace s palivovými články v budově Palestra, která je sídlem ústřední vlády v Londýně. Tento projekt je založen na integraci palivového článku PAFC o výkonu 200kWe a absorpční chladicí jednotky. Projekt vznikl v roce 2008 na základě snižování spotřeby energie a snižování emisí skleníkových plynů. Na začátku projektu se odhadovalo snížení emisí uhlíku o 40% a výrazné snížení nákladu v důsledku kombinované výroby chlazení, tepla a elektrické energie. V čase největší poptávky po energii by měla být budova schopna pokrýt čtvrtinu vlastní spotřeby díky trigenerační jednotce. Tento projekt byl uveden do provozu v únoru 2009 a běží bez problému.

Systém je nastaven pro provoz ve třech režimech:

1. Výroba elektrické energie do sítě.
2. Výroba elektrické energie pro záložní systémy, které poskytují záložní napájení pro kritické zařízení IT.
3. Systém je odpojen.

Trigenerační systém je schopen poskytovat 200kWe a přibližně 263 kWt energie pro zařízení budovy a dosahuje účinnosti 36%. Palivový článek slouží jako hlavní zdroj elektrické energie a zároveň slouží jako boiler pro ohřev vody, který je pořád zapnutý. V normálním režimu poskytuje palivový článek 200 kWe pro napájení budovy. Přibližně 130 kW nízkopotencionálního tepla o teplotě 63 °C je využito pro vytápěné soustavy a dalších zhruba

130 kW vysokopotencionálního tepla o teplotě 142 °C je využito pro absorpční chlazení, které klimatizuje jedno z datových center v budově. Palivo pro palivové články se vyrábí ze zemního plynu v reformeru, který je součástí trigeneračního systému. Díky výrobě vodíku pomocí parního reformingu dosáhneme snížení produkce  $\text{CO}_2$  zhruba o 40%, než kdybychom použili elektřinu z elektrické sítě, protože výroba elektrické energie je převážně vyráběna v uhelných elektrárnách, které mají vysoké emise  $\text{CO}_2$ .



OBRÁZEK 17: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TRIGENERAČNÍ SOUSTAVY V BUDOVĚ PALESTRA V LONDÝŇE [21]

Výhody trigenerační soustavy:

- Snížení emisí -  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ .
- Tichý chod, méně než 40dB.
- Vyšší efektivita provozu paliva k elektrické energii než u spalovacích motorů.
- Využití odpadního tepla.
- Snížení nákladu na energie.
- Nízké nároky na údržbu.
- Spolehlivost provozu.

Nevýhody trigenerační soustavy:

- Vysoké investiční náklady

## 9 Závěr

V této práci jsem se snažil přiblížit problematiku palivových článků, které by mohly nahradit ve velké míře konvenční zdroje energie. Velkou výhodou je, že dosahují vysoké účinnosti díky přímé přeměně chemické energie paliva na ušlechtilou elektrickou energii. Tyto články nabízejí možnost, jak efektivněji využít energii v palivu a tím snížit jeho spotřebu a produkci škodlivých emisí do ovzduší. Dá se říci, že palivové články vyrábí čistou energii, protože dochází ke slučování vodíku a kyslíku kde je odpadním produktem čistá voda. Prozatím nejperspektivnější využití palivových článků je pro výrobu elektrické a tepelné energie při kogeneraci v obytných nebo průmyslových objektech, kde je nutná nepřetržitá dodávka elektrické i tepelné energie. Další velké uplatnění by mohly mít palivové články při trigeneraci všude tam, kde je potřebná výroba elektrické a tepelné energie, ale i pro výrobu chladu. Z důvodů problematického skladování a distribuce vodíku, se jako zdroj pro jeho výrobu nejčastěji používá zemní plyn. Z něho je nutné vyrobit vodík výše popisovanými metodami (viz. kapitola 6). Tyto možné způsoby ovšem snižují celkovou účinnost článků, ale v porovnání s ostatními zdroji energie je jejich účinnost ještě stále poměrně vysoká. Se snižováním celosvětových zásob ropy se palivové články stávají perspektivním zdrojem energie pro pohony v automobilovém průmyslu. Nespornou výhodou je jejich zanedbatelná produkce skleníkových plynů v porovnání se spalovacími motory. Při vyřešení problému s distribucí vodíku určitě vzroste počet automobilů s palivovými články. K masovému rozmachu palivových článků prozatím brání jejich vysoká cena a zatím nedokončená distribuce vodíku. Při zvládnutí technologie výroby článků by se snížila jejich cena a palivové články by mohly nahradit zatím všechny dosavadní zdroje elektrické a tepelné energie na fosilní paliva.

## 10 Zdoje

### 10.1 Zdroje literatura:

- [1] PORŠ, Ing. Zdeněk. Palivové články [online]. Ústav Jaderného Výzkumu ŘEŽ, a.s. : Divize jaderné bezpečnosti a energetiky, 2002 [cit. 2011-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>>.
- [2] ČESKÝ, Ing. Antonín. Palivové články [online]. [s.l.] : Enviros, Česká energetická agentura, 2003 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/3111.pdf>>.

### 10.2 Zdroje internet:

- [4] [Http://en.wikipedia.org/](http://en.wikipedia.org/) [online]. 2011 [cit. 2011-02-01]. Wikipedia. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)>.
- [5] [Http://www.ieeeahn.org](http://www.ieeeahn.org) [online]. 3. září 2008 [cit. 2011-02-01]. IEEE Global History Network. Dostupné z WWW: <<http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/File:Bacon.jpg>>.
- [6] [Http://hydrogenfuelcell.net/](http://hydrogenfuelcell.net/) [online]. 2005 [cit. 2011-02-02]. Hydrogen Fuel Cells. Dostupné z WWW: <<http://hydrogenfuelcell.net/>>.
- [7] [Http://www.enviros.cz](http://www.enviros.cz) [online]. 2004 [cit. 2011-02-02]. Enviros. Dostupné z WWW: <[http://www.enviros.cz/palivove\\_clanky/palivove\\_clanky.html](http://www.enviros.cz/palivove_clanky/palivove_clanky.html)>.
- [8] [Http://3pol.cz/](http://3pol.cz/) [online]. 30. říjen 2003 [cit. 2011-02-02]. 3POL. Dostupné z WWW: <<http://3pol.cz/201-palivove-clanky-ii>>.
- [9] [Http://www.osel.cz](http://www.osel.cz) [online]. 20.května 2008 [cit. 2011-03-02]. Objective Source E-Learning. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=3578>>.
- [10] [Http://www.vodik.czweb.org](http://www.vodik.czweb.org) [online]. 8. března 2006 [cit. 2011-03-06]. H2WEB. Dostupné z WWW: <http://www.vodik.czweb.org/view.php?cislocclanku=2006030801>>.
- [11] [Http://www.storedsolar.com/](http://www.storedsolar.com/) [online]. 2008 [cit. 2011-03-12]. Stored solar. Dostupné z WWW: <<http://www.storedsolar.com/electrolysers.html>>.
- [12] [Http://hydrogencommerce.com/](http://hydrogencommerce.com/) [online]. 18. srpna 2008 [cit. 2011-03-10]. Renewalbe Hydrogen Energy. Dostupné z WWW: <<http://hydrogencommerce.com/indexa2.htm>>.
- [13] [Http://alvano9.sweb.cz/vodik.htm](http://alvano9.sweb.cz/vodik.htm) [online]. 2011 [cit. 2011-04-28]. Úvod do palivových článků. Dostupné z WWW: <<http://alvano9.sweb.cz/vodik.htm>>.
- [14] [Http://www.tzb-info.cz](http://www.tzb-info.cz) [online]. 24. března 2004 [cit. 2011-05-10]. Technická zařízení budov. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1899-vysokoteplotni-palivove-clanky-vhodna-paliva-a-moznosti-jejich-vyuziti-iii>>.
- [15] [Http://www.cne.cz](http://www.cne.cz) [online]. 2010 [cit. 2011-03-17]. Czech Nature Energy. Dostupné z WWW: <<http://www.cne.cz/mikrokogenerace/uvod-do-mikrokogenerace/>>.
- [16] [Http://www.fuelcelltoday.com](http://www.fuelcelltoday.com) [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Fuel Cell Today. Dostupné z WWW: <<http://www.fuelcelltoday.com/reference/image-bank/category?category=Stationary>>.
- [17] [Http://www.auto.cz](http://www.auto.cz) [online]. 25.08.2008 [cit. 2011-04-20]. Auto CZ. Dostupné z WWW: <<http://www.auto.cz/honda-fcx-clarity-budoucnost-patri-vodiku-1846>>.
- [18] [Http://www.toshiba.co.jp](http://www.toshiba.co.jp) [online]. 2009 [cit. 2011-05-01]. Toshiba. Dostupné z WWW: <[http://www.toshiba.co.jp/about/press/2009\\_10/pr2201.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2009_10/pr2201.htm)>.

- [19] [Http://www.fuelcellmarkets.com](http://www.fuelcellmarkets.com) [online]. 20011 [cit. 2011-05-01]. Fuel Cell Markets. Dostupné z WWW: <[http://www.fuelcellmarkets.com/hexis\\_SOFC\\_CHP/products\\_and\\_services/3,1,629,17,28577.html](http://www.fuelcellmarkets.com/hexis_SOFC_CHP/products_and_services/3,1,629,17,28577.html)>.
- [20] [Http://www.autolednický.cz](http://www.autolednický.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-05-03]. Autolednický. Dostupné z WWW: <<http://www.autolednický.cz/scripts/zbozi.php?KID=75>>.
- [21] [Http://www.cospp.com](http://www.cospp.com) [online]. 2010 [cit. 2011-05-07]. Cogeneration & On-Site Power Production. Dostupné z WWW: <<http://www.cospp.com/articles/print/volume-11/issue-4/project-profiles/pafc-fuel-cell-trigeneration.html>>.
- [22] [Http://www.geek.com](http://www.geek.com) [online]. 29. ledna 2009 [cit. 2011-05-07]. Geek. Dostupné z WWW: <<http://www.geek.com/articles/gadgets/toshiba-will-release-fuel-cell-charger-before-april-20090129/>>.
- [23] [Http://www.techtydenik.cz/](http://www.techtydenik.cz/) [online]. 2008 [cit. 2011-05-15]. Technický týdeník. Dostupné z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3800&mark=FCX%20Clarity%20poh%E1n%ED%20palivov%E9%20%E8l%E1nky>>.