



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## VODÍK A AUTOMOBIL HYDROGEN AND AUTOMOBILES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ BŘOUŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. ZDENĚK KAPLAN, CSC.

BRNO 2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Lukáš Břoušek

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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:

### **Vodík a automobil**

v anglickém jazyce:

### **Hydrogen and automobiles**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium, rozbor a vlastní hodnocení možností využití vodíku k pohonu automobilu.

Cíle bakalářské práce:

Vytvořit ucelený přehled možností využití vodíku k pohonu automobilu s vlastním kritickým hodnocením jednotlivých systémů.

Seznam odborné literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

Kameš, J.: Alternativní pohon automobilů, BEN-Technická literatura, 2004, ISBN 80-7300-127-6.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 27.10.2014

L.S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

---

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





## ABSTRAKT

Práce vznikla za účelem porovnání možností pohonu osobního automobilu za pomoci vodíku. Popíšeme jeho vlastnosti, způsoby výroby, skladování, distribuci i možnosti využití. Blíže vysvětlíme princip dosud známých zařízení na bázi vodíku a porovnáme je. K tomu využijeme komplexní analýzu Well to Wheel (od zdroje ke kolu), která je dnes hojně využívána. V závěru publikace provedeme na základě této analýzy zhodnocení a nastíníme, jakým směrem se budou vodíkové technologie v budoucnosti ubírat.

## KLÍČOVÁ SLOVA

vodík, palivový článek, spalovací motor, emise, obnovitelný zdroj, alternativní palivo, akumulace energie, výroba vodíku

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to demonstrate the possibilities of hydrogen-based gear in personal cars. The thesis also describes the hydrogen from the perspective of the characteristics, the form of production, conserving, distributing and its utilization. Furthermore, in more details are described and compared currently well-known hydrogen-based devices, for this purpose the complex analysis Well to Wheel will be used. Final part of this publication will be devoted to evaluation of this analysis and also the thesis will outline what are the probable trends of the hydrogen-based technologies.

## KEYWORDS

hydrogen, fuel cell, combustion engine, emission, renewable source, alternative fuel, energy storage, hydrogen production



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BŘOUŠEK, L. *Vodík a automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 51 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2015

.....

Lukáš Broušek



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Zdeňkovi Kaplanovi, CSc. za cenné připomínky a odborné rady při vypracovávání bakalářské práce. Děkuji také svým rodičům za podporu během celého studia.





## OBSAH

Úvod.....	8
1 ALTERNATIVNÍ POHONY AUTOMOBILŮ .....	9
1.1 LPG.....	9
1.2 CNG,LNG.....	10
1.3 Biogenní paliva a alkoholy .....	11
1.3.1 Bionafta .....	11
1.3.2 Alkoholy.....	11
1.4 Elektromobily .....	12
1.5 Hybridní pohony .....	13
2 Vodík.....	14
2.1 Charakteristika a vlastnosti prvku.....	14
2.2 Způsoby výroby .....	15
2.2.1 Z fosilních zdrojů .....	15
2.2.2 Z obnovitelných zdrojů.....	18
2.3 Uskladnění a distribuce.....	20
2.3.1 Stlačený vodík .....	20
2.3.2 Zkapalněný vodík .....	21
2.3.3 Skladování vodíku v kryokompresních tancích.....	22
2.3.4 Ve formě kovových hydridů.....	22
2.3.5 Skladování sorpcí .....	22
2.3.6 Čerpací stanice.....	22
2.4 Distribuce.....	23
2.4.1 Silniční přeprava.....	23
2.4.2 Použitím plynovodů.....	24
3 Druhy vodíkového pohonu .....	25
3.1 Spalování v pístových motorech.....	25
3.1.1 Automobily spalující vodík .....	26
3.1.2 Hythane®.....	28
3.2 Využití v palivových článcích .....	29
3.2.1 Historie .....	29
3.2.2 Princip palivového článku .....	30
3.2.3 Rozdělení a popis .....	31
3.2.4 Zrod využití palivového článku v automobilu.....	38
4 Technicko-ekonomické zhodnocení paliv .....	39
Závěr.....	42



---

Seznam použitých zkratek a symbolů .....	47
--	----

## ÚVOD

Spalovací motor byl vynalezen v druhé polovině 19. století. Na začátku století dvacátého pak založil Henry Ford se svými společníky firmu Ford Motor Company, která za první rok svojí existence vyprodukovala až 1700 automobilů. Dalším jeho cílem bylo zkonstruovat levné kvalitní auto dostupné pro každého. To se mu po několikaměsíčním vývoji nakonec povedlo a v letech 1906 až 1908 spatřily světlo světa modely N a T za pouhých 825 dolarů. Po vozech byla tak velká poptávka, že společnost začala roku 1913 s pásovou výrobou a další rok bylo prodáno až 250 tisíc automobilů. Tento počín se stal historickým milníkem a automobilismus zažil velký rozmach [8], [9].

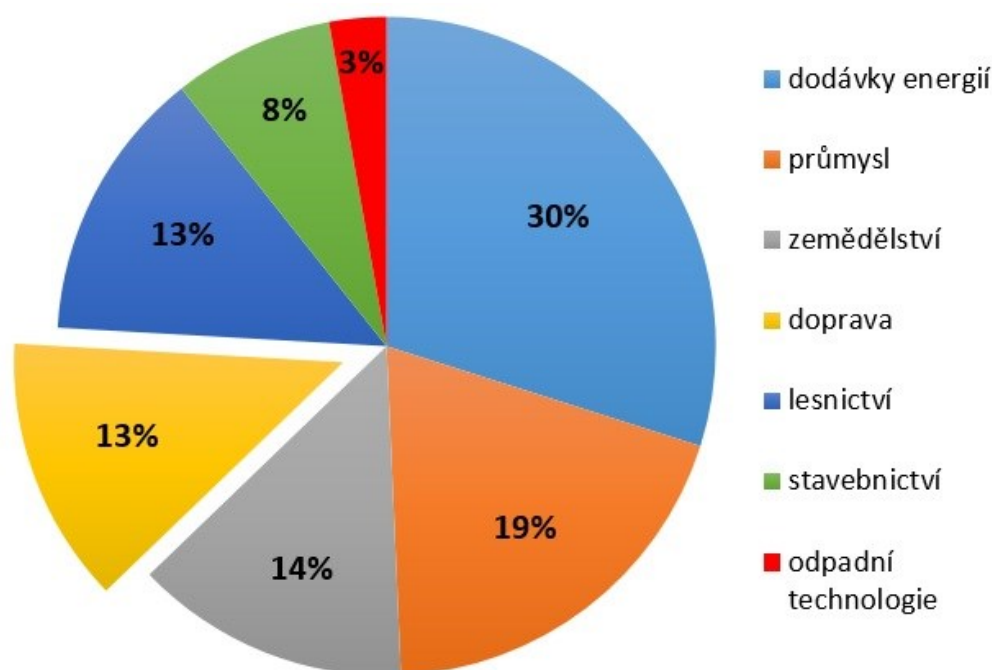
Do 60. let minulého století se veřejnost o exhalace z automobilů moc nezajímala a ropy bylo díky ropným nalezištím ve Spojených státech amerických (převážně v Texasu) a importu ze zahraničí dostatek. Výrazná změna nastala až v 70. letech, kdy země OPEC záměrně snížili těžbu a zároveň vyhlásily embargo na vývoz ropy do zemí, které podporovaly Izrael během Jomkipurské války (hlavně USA a Nizozemí). Tento první a prozatím největší ropný šok způsobil růst ceny ropy a během jednoho roku se její cena zvedla více než čtyřnásobně. Události přiměly společnost začít přemýšlet o alternativních palivech a snížení závislosti na ropě, jejíž největší naleziště leží převážně v politicky nestabilních oblastech. Zásoby ropy nejsou taktéž nevyčerpatelné a mnozí odborníci se domnívají, že těžba černého zlata již dosáhla svého vrcholu a do budoucna bude pouze klesat. Tomuto smýšlení také přispělo zhoršení kvality ovzduší a růst průměrné teploty klimatického systému Země, resp. globální oteplování [10].

Alternativních paliv bylo do dnešního dne objeveno a úspěšně odzkoušeno poměrně dost. Některé si našly své místo na trhu, jiné se moc neuplatnily. Mezi odborníky panuje názor, že nejvíce perspektivní je právě vodík. Možnosti jeho využití a porovnání s konvenčními i alternativními palivy představí tato práce.

# 1 ALTERNATIVNÍ POHONY AUTOMOBILŮ

Alternativní pohony pro automobily hledáme, jak již bylo zmíněno v úvodu, abychom nahradili fosilní paliva, jejichž zásoby se rychle tenčí. Využívají je pro svoji práci spalovací motory, které produkují značné množství škodlivých a nebezpečných látek způsobujících skleníkový efekt a s ním související globální oteplování. Mezi nejrizikovější složky výfukových emisí řadíme oxid uhelnatý, oxid uhličitý, oxidy dusíku, oxid siřičitý, nespálené uhlovodíky a pevné částice. Přes veškerou snahu výrobců automobilů i zákonodárců ve formě legislativních nařízení na omezení emisí, jejich množství v atmosféře stále přibývá. Cílem je tedy najít takové palivo, které by bylo obnovitelné a s co možná nejnižšími emisemi.

Níže uvedeme přehled nejběžněji užívaných alternativních paliv. Konkrétně se jedná o LPG, zemní plyn, bionaftu, alkoholy a vozidla využívající naakumulovanou elektrickou energii jako jsou elektromobily a hybridy. Pohon dopravních prostředků vodíkem detailněji rozebereme v následujících kapitolách.



obr. 1 - Podíl lidské činnosti na skleníkovém efektu [4]

## 1.1 LPG

LPG je zkratka anglických slovíček Liquefied Petroleum Gas. V překladu tedy zkapalněný ropný plyn. Dnes se pod tímto názvem myslí směs propanu a butanu. Tyto plyny jsou získávány právě zpracováním ropných plynů. Kolem 60% se vyrábí rafinací zemního plynu, zbylých asi 40 % jako vedlejší produkt při zpracování ropy. V budoucnu se tento nepoměrně pravděpodobně ještě navýší s ohledem na ubývající ropné zásoby [11], [12].

Při výrobě ze zemního plynu nacházíme rozdíly ve složení, jež se liší od naleziště k nalezišti. Rafinací tedy vypreparujeme nevhodné složky, jako jsou vyšší alkany, oxid uhličitý, sulfan, dusík aj. Z ropy získáme LPG tak, že smícháme plyny z jednotlivých fází jejího zpracování a poté v absorbéru jednotlivé složky od sebe oddělíme. Poměr získaného butanu a propanu je

asi dva ku jedné. Jen pro zajímavost, množství těchto plynů odpovídá zhruba 2-3 % zpracovávané ropy [11], [12].

Nápad využít plynné palivo pro pohon motoru sahá do druhé poloviny 19. století, kdy francouzský vynálezce Étienne Lenoir využil pro svůj motor svítíplyn. První stoje poháněné LPG byly postaveny ve 30. letech 20. století v sousedním Německu. Větší zájem o toto palivo byl upozorován až v 80. letech. Od té doby se vybuďovala dosti hustá síť čerpacích stanic. K roku 2011 se uváděl počet stanic v České republice cca na devět set. LPG se spaluje buďto v motorech k tomu určených nebo si lze motor na tento pohon přebudovat. Motivací pro jeho využívání je několik. První výhodou jsou nízké emise. Při dokonalém spálení čistého propanbutanu vzniká jen vodní pára a oxid uhličitý. Protože směs není nikdy dokonale čistá a ani spalování ideální, získáváme další polutanty, ale ve srovnání s benzinem či naftou dostáváme podstatně nižší hodnoty. Další výhodou je ekonomičnost provozu, které nahrává nižší spotřební daň [11], [12].

## 1.2 CNG,LNG

CNG je zkratka pro stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas). Jeho hlavní složkou je metan v zastoupení kolem 85%. Dále obsahuje oxid uhličitý, propan, butan, vyšší uhlovodíky a v malém množství další látky. Pod označením LNG se skrývá zkapalněný zemní plyn (Liquified Natural Gas). Ten je zkapalněn zchlazením pod teplotu  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z důvodu obtížného skladování se zemní plyn výhradně používá ve stlačené formě [13], [14].

Zemní plyn získáváme těžbou, jedná se tedy také o fosilní palivo. Jeho výhoda spočívá v převažujícím obsahu metanu, kde při jeho spalování získáváme mnohem menší množství škodlivých látek, než u benzínu a nafty. Malý obsah uhlíku vede ke snížení produkce oxidu uhličitého až o 25 %. Ostatní škodlivé látky, jako například oxid uhelnatý či oxidy dusíku, jsou nižší o 80 % než při spalování benzínu nebo nafty. Saze, oxid siřičitý a zdraví škodlivý benzol nevznikají vůbec. Dalšího snížení exhalací docílíme použitím třicestného katalyzátoru. Jedná se tedy o neekologičtější fosilní palivo [13], [14].

Vozidla poháněná CNG jsou tedy ekologická, ale i ekonomická. Kromě úspory financí bychom měli dále zmínit výhody v podobě vysokého oktanového čísla, díky němuž nedochází ke klepání motoru. U zážehových motorů tak může být navýšen kompresní poměr. Vzhledem k měkkému spalování dochází i ke snížení hlučnosti. Ve srovnání se vznětovými motory také nehrozí zamrznutí palivového systému za nízkých teplot a odpadají i problémy se studenými starty. CNG je vhodný i z bezpečnostních hledisek. Jeho zápalná teplota je oproti benzínu dvojnásobná a také při úniku okamžitě stoupá vzhůru, protože je lehčí než vzduch [13], [14].

I přes velkou řadu výhod má jeho využití i svá negativa. Tou byla nižší dojezdová vzdálenost spojená s malým počtem čerpacích stanic. Dnes je situace optimističtější. Dojezdová vzdálenost se může porovnávat s benzinovými i naftovými pohony a při využití bivalentních pohonů vzroste akční rádius o dalších několik stovek kilometrů. Počet čerpacích stanic v posledních 10 letech vzrostl více jak osminásobně a dá se očekávat stavba mnoha dalších. K dnešnímu dni jich funguje v České republice 83, počet vozidel využívajících CNG je 8817 (z toho více jak 500 autobusů) [13], [14].

### 1.3 BIOGENNÍ PALIVA A ALKOHOLY

Biomasa je hmota organického původu (rostlinného i živočišného). Energie biomasy má původ ve slunečním záření a lze ji oproti energii z fosilních paliv obnovovat. Patří tedy mezi obnovitelné zdroje. Pro energetické zdroje se využívá cíleně pěstovaná rostlinná biomasa (tzv. energetické plodiny) a odpady zemědělské, lesní, popř. potravinářské produkce. Biomasa může být využita pro výrobu elektřiny, tepla a může sloužit k pohonu vozidel. Její energii lze získat chemickými, popř. bio-chemickými procesy.

#### 1.3.1 BIONAFTA

Bionafta je palivo určené pro vznětové motory. Zakládá se na bázi metylesterů nenasycených mastných kyselin rostlinného původu. Metylestery jsou produktem esterifikace, což je reakce triglyceridu s metanolem za působení katalyzátoru. Jako surovinu obsahující triglycerid se používají rostlinné oleje, které jsou upřednostňovány před živočišnými tuky. Nejvíce bionafty se vyrábí z řepky olejné – uvádí se až 80 %. Z tohoto důvodu se vžil a používá místo bionafty termín MEŘO (metylester řepky olejné). Řepka se pěstuje z toho důvodu, že její semena obsahují velké množství oleje. Udává se až jedna třetina [15], [16].

Dnes existuje bionafta I. a II. generace. Původní myšlenka byla využívat čisté MEŘO jako ekvivalentní náhrada motorové nafty. Zanedlouho se však začaly objevovat problémy. Můžeme vzpomenout například nižší výkon spojený s menší výhřevností, výrazný vzrůst spotřeby oleje a problémy s provozem v zimních měsících. Přesto, že vozidla spalující bionaftu I. generace vykazovala nízké emise a byla 100% obnovitelná, nakonec se od nich začalo upouštět. Poté se přišlo s nápadem vytvořit směs s motorovou naftou. Tak vznikla bionafta II. generace, i když tento název není pro výsledný produkt zcela přesný. V České republice jsou k dispozici dva typy a to s obsahem 2-5 % a 30-36 % MEŘO v obyčejné naftě. Při porovnání všech výhod a nevýhod není bionafta přesvědčivým alternativním palivem [15], [16].

#### 1.3.2 ALKOHOLY

Pro pohon vozidel se využívají nejjednodušší alkoholy – metanol a etanol.

##### **METANOL**

Metanol se dříve označoval jako dřevěný líh, protože vznikal jako vedlejší produkt při výrobě dřevěného uhlí. Význam dřevěného uhlí se vytrácí a tak se většina dnes vyrobeného metanolu vyrábí ze zemního plynu. Můžeme jej vyrábět i z biomasy, ale náklady na výrobu stoupnou asi dvojnásobně [17], [18].

Je to čistá kapalina bez zápachu a pro člověka jedovatá. Metanol má vysoké oktanové číslo, což nám umožní vyšší kompresi a tedy i vyšší účinnost. Předností jsou také nižší emise v průměru o 20-70 %. Nevýhodou je toxicita, detergentní účinek, urychlení opotřebení kovových i plastových materiálů a malá energetická hustota [17], [18].

##### **ETANOL**

O užívání etanolu jako paliva máme zmínky z Francie, kde se hojně využívá dodnes. U nás se v minulosti používal etanol jako palivo zejména z důvodu nedostatku klasických paliv, a to v období světových válek. Po druhé světové válce upadl a zájem o něj se projevil až 90. letech minulého století [19], [21].

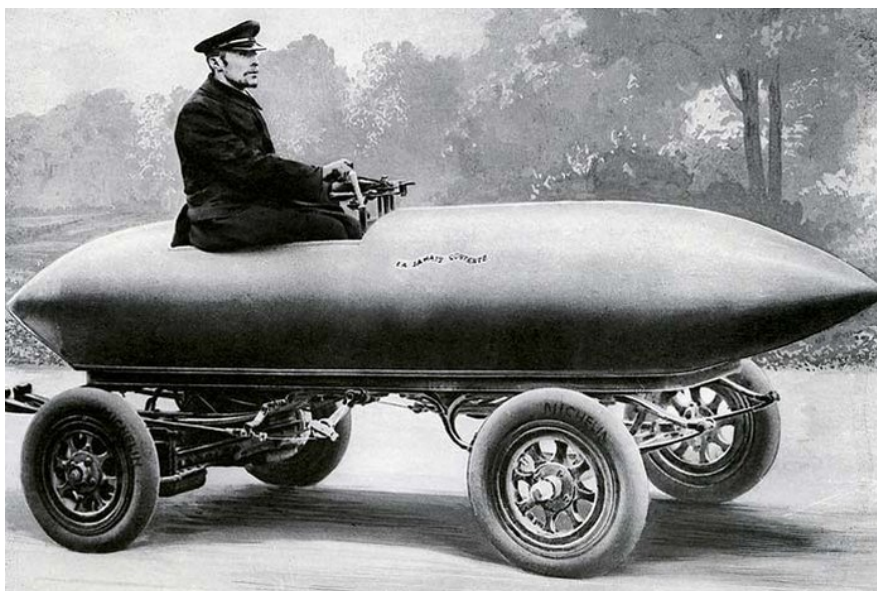
Základem výroby etanolu je alkoholové kvašení neboli fermentace. Fermentace probíhá při vhodné kyselosti substrátu a při vhodné teplotě. Po určité době dojde vlivem působení vznikajícího etanolu na kvasinky k postupnému zastavení procesu. Tím je dána maximální dosažitelná koncentrace etanolu, která v běžných podmínkách dosahuje 12–13 % objemu. V České republice se etanol vyrábí z mírné nadprodukce obilí. Potenciální možností je i výroba z cukrové řepy [19], [21].

Etanol lze použít jako palivo ve směsích, kde je jeho zastoupení až 85% (zbytek směsi je benzín). Označuje se E85 a pro jeho využití je potřeba mít upravenou pohonnou jednotku. Také za přispění Evropské unie se ve větší míře využívá druhá možnost. Etanol se přimíchává do benzínu v řádu jednotek procent. Do budoucna se počítá s postupným navyšováním kvót. Výhody a nevýhody využití jsou téměř shodné s metanolem [19], [21].

Bioplyn a dřevoplyn se hojně využíval v období druhé světové války. V dnešní době se téměř nevyužívají, a proto zde nejsou podrobněji popsány.

#### 1.4 ELEKTROMOBILY

Elektromobil je znám déle než vozidla se spalovacími motory. Již před rokem 1900 se podařilo belgickému závodníkovi a vynálezci Jenatzymu překonat hranici 100 km/h. Elektrický pohon byl tehdy oblíbený pro svou jednoduchou manipulaci (nebylo potřeba startovat vůz klikou), absenci hluku a vibrací motoru a k tomu odpadaly i problémy s řazením [22].



obr. 2 - Camille Jenatton ve voze *La Jamais Contente*

Zlom přinesla stavba nových silnic a nutnost cestovat na velké vzdálenosti. Přispěly také objevy ropy a snížené ceny pohonných hmot, Fordova hromadná výroba produkující automobily za dostupné ceny a snad také i vynalezení elektrického startéru v roce 1912. Elektromobily přešly do ústraní a renesanci zažívají až v posledních letech [22].



Základními částmi vozidla na elektřinu jsou akumulátory, trakční motor, regulátor výkonu a převodovka. Při provozu elektromobilu nevznikají žádné emise, pokud neuvažujeme znečištění vzniklé výrobou elektrické energie. Další výhodou je dobrá momentová charakteristika, malá hlučnost a malý počet pohyblivých komponentů (malé opotřebení, odpadá nutnost mazání motoru, aj.). Limitujícím faktorem zůstávají akumulátory. Omezená kapacita určuje dojezd vozidla, pomalé nabíjení a pořizovací náklady brání vyšší konkurenceschopnosti ve srovnání s klasickými pohony.

## 1.5 HYBRIDNÍ POHONY

Hybridní koncept je založen na kombinaci více zdrojů energie. Nejčastěji se setkáváme s klasickým spalovacím motorem a elektromotorem. Snahou výrobců je získat pohon, který dokáže vzájemně eliminovat negativa druhého zdroje. Optimalizací směřujeme k úspoře paliva i redukcí exhalací.

Automobilky již představily řadu konceptů či prototypů. Řada z nich zařadila nejméně jedno hybridní vozidlo do své nabídky. Hybridní vozidla zažívají v dnešní době značný boom. Také dotační programy jim pravděpodobně pomůžou k vyšší prodejnosti.



*obr. 3 - Toyota Prius – první sériově vyráběný hybridní automobil [23]*

Vodíku jako palivu se budeme podrobněji věnovat v dalších kapitolách.



## 2 VODÍK

Vodík (latinsky Hydrogenium) je nejlehčí a nejjednodušší chemický prvek. Objevil jej Angličan Henry Cavendish. Všiml si, že při rozpadu neušlechtilých kovů v kyselině vzniká hořlavý plyn. Později také jako první zjistil, že voda je vlastně sloučeninou kyslíku a právě vodíku [24].

### 2.1 CHARAKTERISTIKA A VLASTNOSTI PRVKU

Je to nejrozšířenější prvek v celém vesmíru a třetím nejrozšířenější prvek na Zemi. Vyskytuje se volně i vázaný ve sloučeninách. Volný vodík se nalézá například v plynném obalu hvězd. Na Zemi se volný vodík za normálních podmínek téměř nevyskytuje, a proto je zde vázán jen ve sloučeninách. Největší množství vodíku je vázáno ve vodě, která pokrývá dvě třetiny zemského povrchu. Nachází se také vázán i v organických a anorganických sloučeninách. Je též významným biogenním prvkem. Přírodní vodík je směsí tří izotopů: lehkého vodíku neboli protia, těžkého vodíku nazývaného deuterium a tritium. Protium nemá v jádře žádný neutron, je stabilní a zdaleka nejrozšířenější izotop vodíku. Deuterium, značíme D, je také stabilní, má o jeden neutron více a nepodléhá radioaktivní přeměně. V přírodě se vyskytuje ve formě těžké vody (D<sub>2</sub>O), jež našla uplatnění jako moderátor v jaderných reaktorech. Tritium označujeme písmenem T. Má v jádru dva neutrony navíc a je nestabilní [24].

Jedná se o bezbarvý plyn bez chuti i zápachu. Je lehčí než vzduch. Molekulový vodík je poměrně stabilní, navzdory vysoké hodnotě vazebné energie také málo reaktivní. S většinou prvků se proto slučuje až za zvýšené teploty či za přítomnosti katalyzátorů. Reakce vodíku bývají exotermní, čili bývají provázeny uvolňováním tepla a někdy i světelným efektem. Významné jsou redukční vlastnosti vodíku. Atomový vodík je naproti tomu velmi reaktivní. Reaguje s celou řadou látek již za nízkých teplot. Existuje krátkou dobu, protože se slučuje na vodík molekulový. Vodík je typický nekov, který tvoří vodíkové můstky s dusíkem, kyslíkem a fluorem [24].

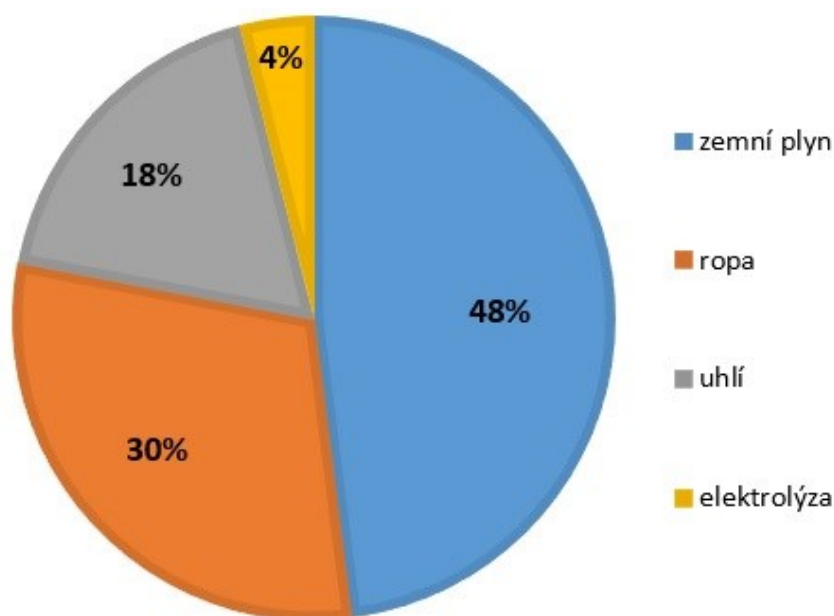
Tabulka 1 - Vlastnosti vodíku [24]

Vlastnost	Hodnota
<b>Molární hmotnost</b>	2,016 g/mol
<b>Hustota kapalné fáze (-259,2 °C, 0,1MPa)</b>	70,8 kg/m <sup>3</sup>
<b>Hustota plynné fáze (20 °C, 0,1MPa)</b>	0,089 kg/m <sup>3</sup>
<b>Teplota varu</b>	-252,8 °C
<b>Teplota tuhnutí</b>	-259,2 °C
<b>Teplota vznícení</b>	585 °C
<b>Výhřevnost kapalné fáze</b>	120,1 MJ/kg
<b>Výhřevnost plynné fáze</b>	10,8 MJ/m <sup>3</sup>

Spalné teplo kapaln� fáze	141,9 MJ/kg
Spalné teplo plynn� fáze	12,8 MJ/m <sup>3</sup>

## 2.2 ZPŮSOBY VÝROBY

 ist  vodík se v p irod  nevyskytuje. Nachází se jen ve sloučeninách, ze kterých jej musíme v robn mi procesy získávat. Pat r  mezi n  fosilní paliva, biomasa a voda. Dnešní výroba vodíku se opírá p ev zn  o fosilní zdroje. Snahou je tuto situaci zm nit a vyu ivat více zdroje obnoviteln . Změna patrn  nastane, jakmile se zefektivní technologie výroby z těchto zdrojů [4].



obr. 4 - Procentu ln  zastoupen  surovin na výrobě vodíku [4]

### 2.2.1 Z FOSILNÍCH ZDROJŮ

Uvádí se, že je takto vyrobeno více jak 90% produkovaného vodíku. Pou ivan mi surovinami ve v robn mi procesech jsou ropa, uhlí, zemní plyn. Vedle n mi produkty jsou oxid uhelnatý a oxid uhličitý. Stru n  zde pop eme nejb zn j i technologie výroby.

#### PARNÍ REFORMOVAN  UHLOVODÍKŮ

V sou asn  době se jedná o nejpou ivan j i a také nejlevn j i způsob získávání vodíku. Nejb zn j i surovinou je zemní plyn, jež tvo r  p ev zn  metan [4], [19].

Uhlovod kov  sloučeniny reagují s vodní párou za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Teplotu reakce pomáhá v razn  snížit využití katalyzátoru na bázi oxidu nikelnatého. Reakce tedy probíhá v rozmezí teplot 750-800  C a tlaku 3-5 MPa. Pokud surovina obsahuje s ru, je nutné ji ods it, abychom zabránily negativním dopadům na katalyzátor. Proces probíhá za přebytku vodní páry v poměru 3:1 [4], [19].

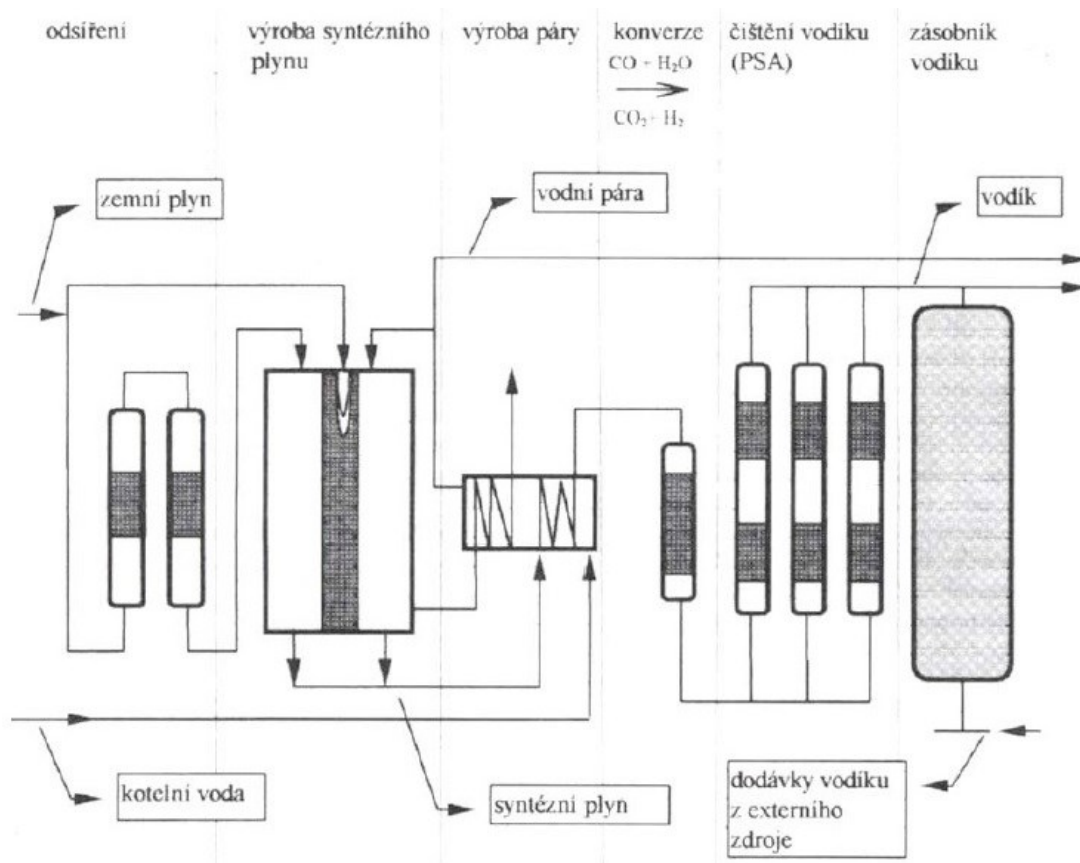


Oxid uhelnatý se s využitím vodní páry dále konvertuje na oxid uhličitý a vodík. Při této exotermní reakci stoupne teplota z 380°C na 500°C a dochází ke snížení koncentrace oxidu uhelnatého až na 0,2-0,3 % objemu [4], [19].



Zbýlý oxid uhelnatý i uhličitý se v dalším reaktoru převedou zpět na metan. Metanizační reaktor využívá teplotu okolo 400 °C. Využívá obrácených reakcí z rovnic (1) a (2) [4], [19].

Účinnost zmíněného postupu výroby se pohybuje od 70 do 85 %. Umožňuje získat vodík o čistotě 98 % objemu, zbylé dvě procenta zaujímá především metan. K získání 1 m<sup>3</sup> vodíku je zapotřebí jen 1,5 kWh energie, ale vzniká velké množství oxidu uhličitého [4], [19].



obr. 5 - Schéma parního reformování zemního plynu [25]

### PARCIÁLNÍ OXIDACE

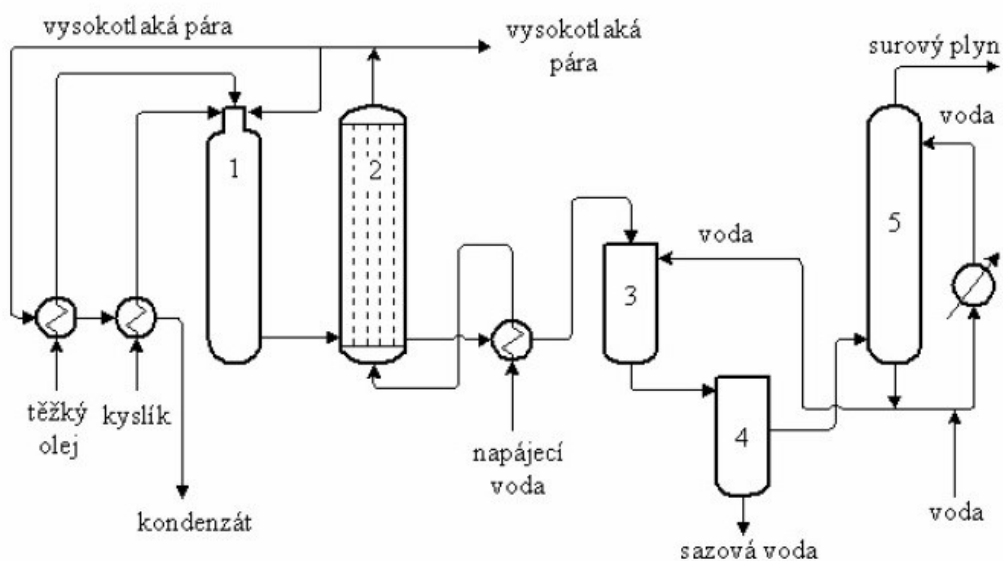
Parciální oxidace je druhým nejhojněji využívaným způsobem výroby vodíku. Surovinou jsou uhlovodíky vzniklé při zpracování ropy. Lze použít jak plynné, tak kapalné frakce. Nejčastěji se využívají těžké ropné frakce, které již obtížně nacházejí jiné využití [4], [19].

Uhlovodíky se zplyňují za pomoci kyslíku a vodní páry při teplotě 1300-1500 °C. Velikost tlaku je 3-8 MPa. Proces parciální oxidace probíhá podle rovnice (4), částečně dle rovnice (5). Obě reakce jsou velmi exotermické a zvyšují teplotu směsi na horní hranici uvedeného teplotního rozmezí. Pro zvýšení účinnosti a snížení teploty necháme reagovat část nezoxidované suroviny se zmíněnou vodní parou. Jedná se o endotermní reakci, která sráží teplotu na hodnotu asi 1350 °C. Tento proces popisuje rovnice (6) [4], [19].



Výslednými produkty je kromě vodíku směs obsahující oxid uhelnatý, oxid uhličitý, vodní páru, metan, sulfan a další. Dále musíme počítat se vznikem sazí. Konverzí, vypírkou a metanizací zredukujeme množství sulfanu i oxidů uhlíku na zlomky procent. Množství čistého vodíku dosahuje podobně jako u parního reformingu hodnoty okolo 98 % [4], [19].

Hodnota účinnosti není ale u tohoto způsobu výroby nijak velká. Pohybuje se kolem 50 %. I zde je zapotřebí velkých investic a ve spojení s vyššími teplotami i tlaky se jeví jako nevhodný [4], [19].



obr. 6 - Schéma parní oxidace [19]

Popis obrázku: 1 – pec, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – vysokoteplotní konvertor CO,

4 – nízkoteplotní konvertor CO, 5 – absorbér CO<sub>2</sub>

## ZPLYŇOVÁNÍ UHLÍ

Nejstarší metoda na výrobu vodíku vůbec. Vstupní surovinou je, jak název napovídá, uhlí. To reaguje s kyslíkem a vodní párou za tlaku 2 MPa. Dle technologie se teplota procesu pohybuje od 600 do 1200 °C. Výsledkem je syntézní plyn složený z oxidu uhelnatého i uhličitého, vodíku a dalších nečistot pocházejících z uhlí. Jednou z nich je kupříkladu síra, kterou odsiřovacími procesy odstraňujeme. Na konci celého procesu dostáváme velmi čistý vodík [4], [19].

### 2.2.2 Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

Do obnovitelných zdrojů pro výrobu vodíku řadíme vodu a biomasu. Bavíme se o technologiích zcela čistých, avšak v porovnání s fosilními palivy stále ne zcela konkurence schopných. Výroba prostřednictvím elektrolyzy vody je prozatím nejvíce propracovaná. Biomasa najde uplatnění tam, kde je kupříkladu nadbytek rostlinného a živočišného odpadu. Výhodou biotechnologických procesů jsou mimo ekologičnost také podmínky výroby. Ta u některých probíhá za atmosférického tlaku a běžné teploty.

### ELEKTROLÝZA VODY

Elektrolýzou dokážeme rozdělit vodu na kyslík a vodík. Děje se tak průchodem stejnosměrného proudu. Elektrický proud má za následek štěpení chemických vazeb. Na anodě se vylučuje kyslík, na katodě vodík. Takto vyrobený vodík se prokazuje vysokou čistotou a není třeba jej dále dočišťovat. Proces popisuje následující chemická rovnice [4], [19].



Samotný proces se vyznačuje vysokou účinností 80-92 %. Optimismus nám ovšem bere fakt, že vodní elektrolyza vyžaduje elektrickou energii a ta je získávána s účinností méně než padesát procent. Nakonec se tedy dostaneme k hodnotám okolo 30 %. Na výrobu 1 m<sup>3</sup> vodíku je zapotřebí 5,2 kWh energie. Vodní elektrolyza dnes zastupuje patrně nejčistší způsob výroby vodíku, a proto se také objevuje v mnoha modifikacích [4], [19].

**Vysokoteplotní elektrolyza** se někdy též nazývá elektrolyzou parní. Energie je zde dodávána jak v elektrické, tak i tepelné podobě. Teplota procesu se pohybuje v rozmezí od 600 do 1000 °C. Platí, že čím vyšší teplota je, tím se také dosahuje vyšší účinnosti. Do elektrolyzátoru je přiváděna vodní pára a vodík, jehož přítomnost je nezbytná pro správnou funkci. Na výstupu získáváme tytéž látky. Produktem je asi 90 % vodíku, zbytek tvoří vodní pára. Kondenzační jednotka se pak postará o jejich separaci. Proces je inverzní funkci palivového článku s pevnými oxidy a účinnost dosahuje až 50 % [4], [19].

**Termochemické cykly** známe od konce 70. a začátku 80. let 20. století. Rozklad proběhne za pomoci několika chemických reakcí iniciovaných přívodem tepla. U hybridních cyklů je nápomocna i elektrická energie. Do procesu dodáváme pouze vodu a teplo, ostatní látky procházejí recyklací. Produktem je vodík a kyslík. Nejznámější je širičito-jódový cyklus. V prvním kroku, zvaném Bunsenova reakce, spolu exotermicky reagují jód, oxid siřičitý a voda za vzniku jodovodíku a kyseliny sírové. V dalším kroku prochází produkty endotermickým rozkladem podle rovnic (8),(9),(10). Účinnost je 40-52 % [4], [19].





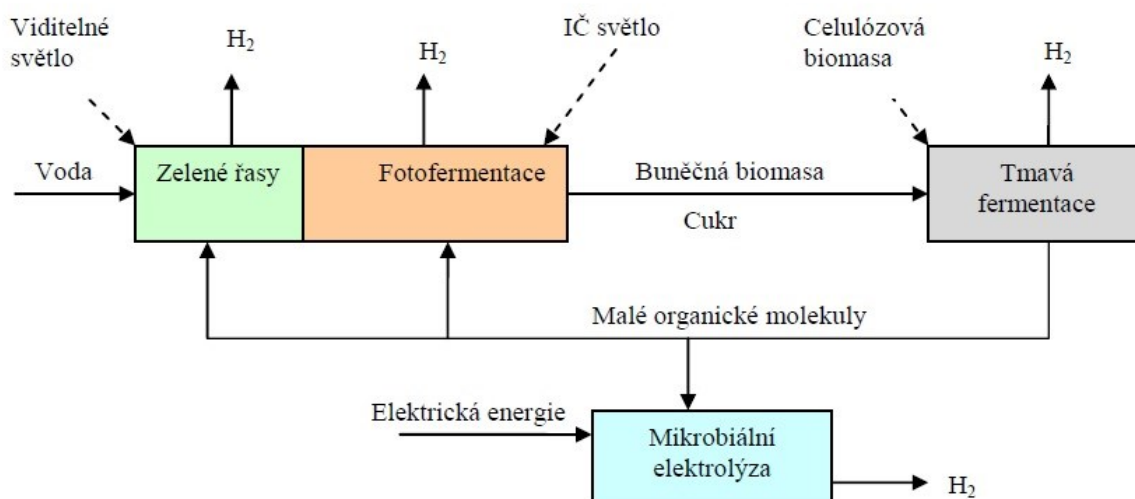
## FERMENTACE

Fermentací neboli kvašením označujeme chemickou přeměnu látek za anaerobních podmínek. Biomasu ve vodném prostředí rozkládají enzymy mikroorganismů. Rozdělujeme ji na fermentaci tmavou a fotofermentaci. Dále se také setkáme s kombinací obou metod [19], [26].

**Tmavá fermentace** probíhá samovolně bez přítomnosti světla. Probíhá při ní hydrolytický rozklad látek s vyšším obsahem vody a organického uhlíku na látky chemicky jednodušší [19], [26].

**Fotofermentace** naopak ke správné funkci světlo vyžaduje. Využívá pro svoji funkci slunečního záření a fotosyntetické bakterie. Produkty jsou oxid uhličitý a vodík [19], [26].

Oba principy se dnes již běžně kombinují. Výsledkem je zvýšení účinnosti až o desítky procent. Ve fermentaci je i kvůli zanedbatelným emisím značná perspektiva do budoucnosti.



obr. 7 – Třístupňový systém výroby biovodíku [26]

## FOTOLÝZA

Fotolýza je fotochemický proces, kde důsledkem absorpce světelného kvanta dojde ke štěpení vazeb. Pro výrobu vodíku jsou známy dvě metody, přímá a nepřímá [26].

**Přímá biofotolýza** je podobná elektrolýze vody, jen místo elektrické energie je využito slunečního záření a enzymů. Potenciál účinnosti procesu se odhaduje až na 20 %, avšak za předpokladu, že se podaří udržet velmi nízký parciální tlak kyslíku. Na něj jsou enzymy velmi citlivé. Nejnovější výzkumy se pokouší užít látek zachycujících kyslík (např. hemoglobin), ale zatím je použití takových látek problematické a proces neefektivní. Hodnota účinnosti se pohybuje okolo 5 % [26].

**Nepřímá biofotolýza** je složitější proces skládající ze se z několika kroků. Nejdříve se produkuje biomasa fotosyntézou a následně koncentruje. Pak přijde na řadu tmavá fermentace produkující acetát. Nakonec konverzí acetátu získáme vodík [26].

### ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY

Zplyňování lze označit za konverzi tuhých paliv na uhlíkovém základě do směsi plynů (metan, vodík, oxid uhelnatý). Vhodnou surovinou jsou odpady z dřevařského průmyslu a zemědělská biomasa. Zplyňování probíhá v generátorech za omezeného přístupu vzduchu za teplot mezi 700 a 1200 °C. Výhodou je vysoká účinnost konverze i méně kvalitního paliva na plyn, který je možné efektivně využít [19].

## 2.3 USKLADNĚNÍ A DISTRIBUCE

Při nakládání s vodíkem musíme být obezřetní. Lehce tvoří s kyslíkem i se vzduchem výbušnou směs. Je lehce zápalný, tudíž je nasnadě vyvarovat se v jeho přítomnosti manipulovat s otevřeným ohněm. Hustota nižší než u vzduchu napovídá, jakým směrem poputuje, pokud by došlo k jeho úniku. Nejlepší variantou je uchovávat vodík na větraných místech. Pokud to není možné, doporučuje se zajistit odvětrávání stropních prostorů [24].

Nejnižší hustota ze všech prvků spolu s velmi nízkým bodem varu přidělávají konstruktérům další vrásky. Velmi lehký vodík ke všemu také dokáže pronikat skrze některé materiály [24].

### 2.3.1 STLAČENÝ VODÍK

Zkušenosti se skladováním stlačeného plynu obsahujícím vodík máme již od dob využívání svítíplynu. Dnes je vodík nejběžněji uchovávan právě ve stlačené formě. Vysoká hmotnost nádrží a malé skladovací kapacity dávají podněty k využití alternativních metod uskladnění. Ukládání ve stlačené formě vykazuje kompresní ztrátu 10-15 % z celkové energie [3], [27].

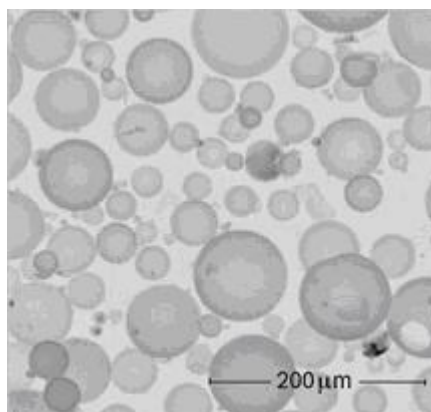
Dnes se nejčastěji setkáme s nádobami se skladovacím tlakem 35 MPa. Novější dokáží uchovat vodík při tlaku až 70 MPa, Zvyšování tlaku má za následek zvýšení energetické hustoty. Jako strop je definována tlaková hladina 100 MPa. Její překročení již nepřináší žádný pozitivní dopad [3], [27].

Tlakové zásobníky se skládají z několika částí. Hlavní částí je kompresní nádoba. Pro zabránění úniku paliva se doplňuje vhodnou nedifuzní bariérou. Nádoba s vložkou je doplněna ochranným pouzdem [3], [27].

Vyšší kapacity skladování stlačeného vodíku nabízejí **podzemní úložiště**. Využívají se vytěžené solné doly či vyčerpané naleziště zemního plynu. Skladovací tlak nedosahuje vysokých hodnot, abychom nepřekročily kapilární síly [3], [27].

Pro mobilní aplikace je ve vývoji skladování vodíku v **mikrokuličkách**. Kuličky mohou být vyrobeny například z křemičitého skla či polyamidu. Plnění probíhá difuzí za zvýšených tlaků i teplot. Po naplnění následuje ochlazení, čímž je vodík v kuličkách uvězněn. Pro vytěžení vodíku zpět stačí kuličky ohřát na správnou teplotu [28].





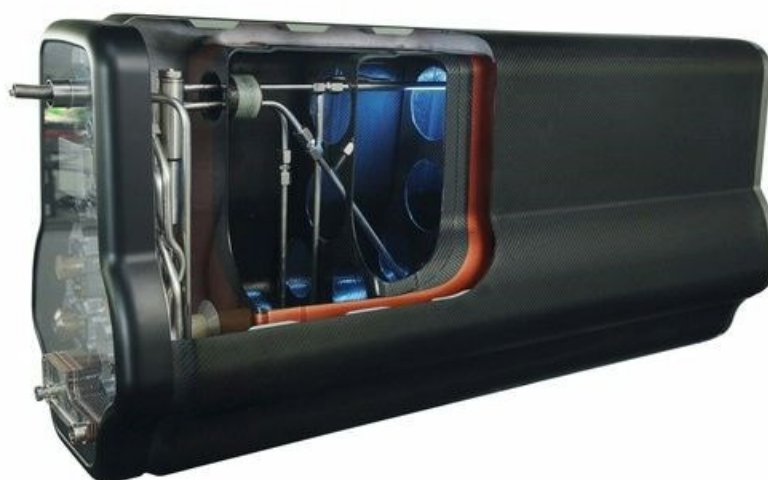
obr. 8 - Skladování v mikrokuličkách [28]

### 2.3.2 ZKAPALNĚNÝ VODÍK

Ve světě se můžeme setkat také s označením LH2. Kapalná fáze se vyznačuje vyšší energetickou hustotou, takže pro stejné množství energie uložené v palivu je zapotřebí menšího objemu. Transformace se provede zchlazením média pod teplotu varu, která u vodíku činí  $-253\text{ °C}$ . Přeměna je vysoce energeticky náročná a ztráty dosahují až třetiny energie ve vodíku uložené. S ohledem na zkapalnění je důležité zmínit nutnou konverzi jaderných spinů z ortho-vodíku na para-vodík, tedy přeměnu z paralelních spinů na spin antiparalelní. Zanedbáním tohoto kroku dojde k výrazným ztrátám [3], [27].

Kapalný vodík skladujeme v kryogenních zásobnících s několika vrstvami, doplněné o reflexní vrstvu a izolaci. Další ztráty vznikají odparem, pokud nejsou jímány do přídatných nádrží. Vodík uniká přetlakovým mechanismem, čímž se reguluje vnitřní tlak. Úbytek paliva se pohybuje v řádu jednotek procent denně [3], [27].

Přetlak v zásobnících dosahuje hodnoty maximálně pět barů. Z tohoto důvodu není nutnost dodržovat striktní pravidla, co se tvaru týče. Tvarová variabilita a menší prostorová zástavba nahrává kapalnému vodíku k využití jako pohonu pro automobily. Značné transformační energetické ztráty ale naznačují jen slabé vyhlídky do budoucna [3], [27].



obr. 9 - Nádrž BMW na kapalný vodík [29]



### 2.3.3 SKLADOVÁNÍ VODÍKU V KRYOKOMPRESNÍCH TANCÍCH

Další z možností fyzikálního uskladnění. Metoda propojuje oba předešlé způsoby uchování vodíku. Vyšší tlak umožňuje uchovávat kapalný vodík za vyšších teplot. Na druhou stranu hodnota tlaku není tak vysoká jako pro stlačený vodík, a proto je tloušťka stěn menší. Vyjma menších energetických nároků vykazují kryokompresní tanky menší ztráty odparem [27].

### 2.3.4 VE FORMĚ KOVOVÝCH HYDRIDŮ

Princip ukládání ve formě hydridů je založen na absorpčním procesu. Některé kovy a jejich slitiny mají schopnost při vhodných teplotách a tlacích vázat vodík. Tento děj je exotermní, tedy je zapotřebí zásobník chladit. Jako vhodné materiály se jeví lehké kovy. Jakmile budeme chtít získat uložený vodík nazpět, je nutné teplo naopak dodávat. Problém zásobníků na bázi hydridů představuje jejich velký objem i hmotnost, nemluvě o jeho regeneraci (opětovném nasycení vodíkem). Vývoj se soustředí na vyvinutí hydridů s nízkou uvolňovací teplotou a s co možná nejvyšší gravimetrickou kapacitou [27].

### 2.3.5 SKLADOVÁNÍ SORPCÍ

Další možností je skladování vodíku pomocí fyzikální nebo slabé chemické sorpce. Činí se tak za pomoci vysokoporézních materiálů. Dnes nejvíce zkoumanými materiály jsou aktivované uhlí a Metal-Organic Framework (MOF). Materiály se prezentují vysokou hodnotou specifického povrchu a to více jak 5000 m<sup>2</sup>/g. Za pokojových teplot jsou materiály schopné navázat jen málo vodíku. Je proto nutné snížit teplotu nebo využít katalyzátoru, jež umožní disociaci atomů vodíku do póru. Většinou se jako katalyzátor využívá platina nebo palladium [27].

### 2.3.6 ČERPACÍ STANICE

Pro prosazení vodíkové technologie jako pohonu automobilu je zapotřebí dostatečná infrastruktura čerpacích stanic. Počet míst, kde je možno dotankovat vodík se zvyšuje a na světě jich nalezneme již více jak dvě stě. Nejvíce vodíkových stanic nalezneme v Německu a Spojených státech amerických. V menším počtu jsou také v dalších státech Evropy, Japonsku nebo Jižní Koreji. Na území České republiky se nachází jedna stanice [30].

Otevřena byla v roce 2009 Ústavem jaderného výzkumu v Reži. Partnerem projektu je akciová společnost Linde Gas, která stanici také zásobuje palivem. Vodík je uchováván v nadzemním zásobníku o objemu 50 m<sup>3</sup> a slouží pro pohon vodíkového autobusu TriHyBus, jezdící na lince Praha-Mělník. Autobus byl vyrobený plzeňskou firmou Škoda Electric a.s. Stanice plní vozidla plyným vodíkem o tlaku 35 MPa. Po úpravách lze dosáhnout plnicího tlaku až 100 MPa. Čerpací stanici můžou využít i jiné vozidla. Cena jednoho kilogramu vodíku se pohybuje okolo sto třiceti korun [30].



obr. 10 - Čerpací stanice na vodík v Neratovicích [30]

## 2.4 DISTRIBUCE

Naprostá většina vyrobeného vodíku se většinou spotřebovává v místě. Pokud je to zapotřebí, přepravu lze uskutečnit dvěma způsoby. Buďto pomocí dálkových plynovodů nebo uskladněný v tlakových nádobách.

### 2.4.1 SILNIČNÍ PŘEPRAVA

Vodík lze přepravovat ve dvou skupenstvích. V plynném stavu může být převážen ve velkém počtu malých lahví či uložen v několika dlouhých ležatých nádobách. Plynná forma musí být převážena za velkých tlaků a kamion dokáže přepravit pouze asi čtyři sta kilogramů paliva. Daleko výhodněji se tedy jeví přeprava v kapalném stavu, díky níž lze přepravit až několik tun. Vodík je převážen ve dvouplášťových vakuových zásobnících s kvalitní izolací. Vyprazdňování probíhá řízeným odpařováním. Přeprava je i v kapalně formě značně nákladná a cena vodíku stoupne až několikanásobně [19].



obr. 11 - velkokapacitní zásobník s vozem určeným pro přepravu stlačeného vodíku [19]

### 2.4.2 POUŽITÍM PLYNOVODŮ

Přeprava plynovody se používá, jestliže je zajištěn dostatečný odbyt. Převážná kapacita zařízení je totiž až padesát milionů metrů krychlových za jednu hodinu. Délka všech vodíkových plynovodů přesáhla ve světě více jak jednoho tisíce kilometrů. Přes dvě stě kilometrů je vybudováno v sousedním Německu [19].

Problémy v tomto případě přepravy způsobuje vodíková koroze, vodíkové křehnutí a vysoké nároky na těsnost systému [19].

### 3 DRUHY VODÍKOVÉHO POHONU

Vodíkové palivo dokáže pohánět automobil dvěma značně odlišnými způsoby. Prvním z nich je spalování směsi vodíku se vzduchem jako běžné pohonné hmoty v upravených čtyřtákních zážehových motorech. Tento systém se často označuje anglickou zkratkou HICE (hydrogen internal combustion engine). Výhodou tímto způsobem řešeného pohonu je mnohaletá praxe ve vývoji spalovacích motorů. Druhou možností jsou palivové články. Chemická energie vodíku se uvnitř palivových článků transformuje přímo na energii elektrickou pro pohon elektromotorů, které poté roztáčejí kola automobilu. Přednosti palivového článku jsou vysoká účinnost a nulové emise [3], [31].

#### 3.1 SPALOVÁNÍ V PÍSTOVÝCH MOTORECH

Nejdříve je nutno nahradit benzínové nádrže za tlakovou či kryogenní nádobu. Distribuci paliva provedou vysokotlaké palivové trubky. Při vstupu vodíku do sacího potrubí nebo přímo do válce narážíme na největší komplikace v zavádění vodíkového paliva v podobě předčasného zažehnutí. Problém způsobuje velmi nízká iniciační energie, které je zapotřebí pro zapálení. Směs se tak může snadno vznítit od žhavých částí spalovacího prostoru nebo od výfukového ventilu. Komplikace lze eliminovat volbou vhodného palivového systému [3], [31].

Palivové systémy můžeme rozdělit na tři typy. Tím nejjednodušším je tzv. central injection neboli centrální vstřikování. Palivová směs se tvoří v sacím potrubí na jediném místě v průběhu sací fáze motoru. Lze navíc využít původního modifikovaného systému vstřikování paliva. Centrální vstřikování je nejméně vhodná metoda. Je totiž náchylná k předčasnému samozápalu směsi [3], [31].

Zdokonalením předešlé metody vznikl port injection. Směs již není tvořena na jednom místě, nýbrž hned na několika místech sacího potrubí před sacím ventilem. Riziko předčasného vznícení paliva je sníženo prodlevou vstřiku. Nasávaný vzduch tak sníží teplotu rozžhavených míst. Port injection využívá vyššího tlaku vstřiku paliva. Vstřikovač je řízen buďto vačkou, která dává konstantní objem paliva, nebo elektronikou. Elektronicky řízený vstřik dokáže pružně reagovat na potřeby motoru proměnným dávkováním objemu paliva i časem vstřiku [3], [31].

Nejlepším řešením vstřiku paliva je přímý vstřik. Vstřik paliva nastane ve vhodný okamžik při kompresním zdvihu do spalovacího prostoru válce. Odpadá tedy problém s předčasným vznícením a také riziko zpětného zášlehu. U přímého vstřiku je tlak v porovnání se zmíněnými metodami nejvyšší. Důraz je kladen na maximální homogenitu vzniklé směsi. Řešením může také být série vstřiků v krátkém časovém intervalu [3], [31].

K zažehnutí směsi postačují zapalovací svíčky užívané v benzínových motorech. Abychom ale dosáhli téměř nulových emisí, musíme v motoru spalovat velmi chudou směs. V tom případě nemusí být jedna svíčka dostačující. Doporučuje se motory spalující vodík vybavit dvěma svíčkami na každý válec [3], [31].

Zážehový motor pracuje na principu Ottova cyklu. Hodnota teoretické účinnosti dosahuje 42 %. V porovnání s motory spalující benzín dostáváme rozdíl okolo 10 %. Pokud se bavíme o bivalentních pohonech, celková účinnost leží mezi maximálními hodnotami účinností obou typů pohonů [3], [31].



### 3.1.1 AUTOMOBILY SPALUJÍCÍ VODÍK

Jak můžeme vidět, spalování vodíku v pístových motorech nepředstavuje přílišné obtíže. Automobily, které technologii HICE zastávají, ovšem není mnoho. Hlavními průkopníky jsou BMW, Ford a Mazda.

#### BMW

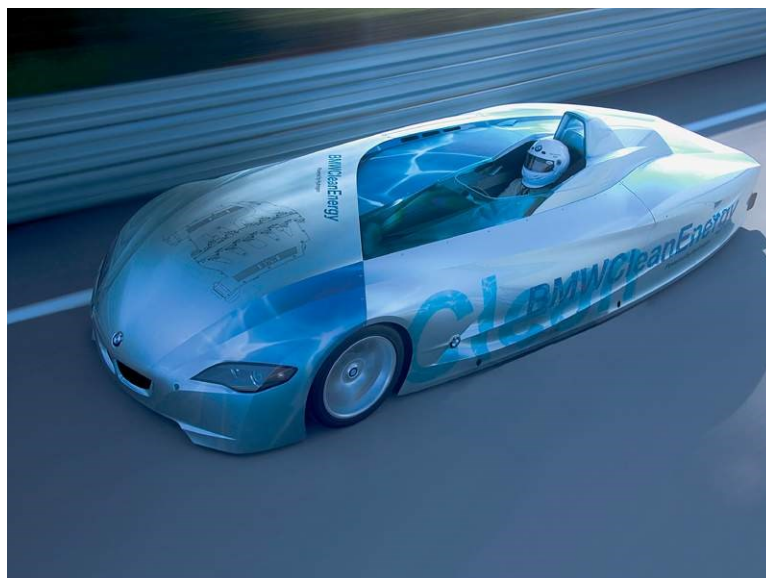
Automobilka pro vodíkovou technologii zvolila model řady sedm. Mimo konstrukční úpravy došlo také na řídicí jednotku. Představení veřejnosti proběhlo v roce 2006 a vozidlo neslo označení **BMW Hydrogen 7**. Pohon automobilu obstarával dvanácti válcový motor s písty uspořádanými do V. Výkon motoru 191 kW (260 koní) dokázalo rozpožhybovat vůz z nuly na sto kilometrů v hodině za pouhých 9,5 s. Maximální rychlost omezena na 230 km/h [4], [31], [32].

Automobil využívá bivalentní systém pohonu, který může řešit dočasnou absenci dostatečného počtu vodíkových stanic. Vodík je uložen v kryogenní nádobě v kapalném stavu. Během cesty palivovým potrubím přechází do plynné formy, vodíková směs se pak tvoří mimo válec. Benzinové palivo se naproti tomu vstříkuje přímo do válce. Akční rádius vozidla se pohybuje kolem hranice 700 km. Pouze na vodík dosáhneme dojezdové vzdálenosti 200 km [4], [31], [32].



obr. 12 - BMW Hydrogen 7 [33]

Mnichovská automobilka představila také ještě jeden zajímavý automobil tankující vodík. Vůz není nikterak krásný, ale přísně účelový. Jmenuje se **BMW H2R** a byl stvořen za účelem překonávání rekordů mezi vozy poháněných vodíkem. Vývoj a stavba prototypu zabrala jen necelý rok a karoserie vozu se pyšní velmi nízkým koeficientem odporu vzduchu. H2R pohání agregát o výkonu 210 kW (285 koní), který dokáže vyvinout rychlost přesahující třisetkilometrovou hranici. Automobil pokořil již devět rychlostních rekordů [4], [31], [32].



obr. 13 - BMW H2R [34]

## MAZDA

Mazda zahájila vývoj vodíkových pohonů už počátkem devadesátých let. Již roku 1991 futuristická karoserie prvního vodíkového automobilu Mazdy s názvem HR-X vzbudila na Tokijském autosalonu značnou pozornost. Jako jediná automobilka využívá principu tzv. Wankelova motoru v sériově vyráběných automobilech. Spalování vodíku ve Wankelově motoru se jeví jako výhodné. Při běhu motoru jsou sací, spalovací a výfukové komory odděleny, a tudíž se eliminuje riziko samozápalu. Zabudování přídavných trysek na vodík do bloku motoru je jednodušší než do hlavy válce. Mazda postupem času vyvinula dvoupalivový systém s přepínáním vodík/benzín, jenž úspěšně v roce 2003 aplikovala na čtyřmístné sportovní kupé RX-8 [31], [35].

Úpravou u **Mazdy RX-8 Hydrogen RE** prošly například sací a výfukové otvory, vstřikovače paliva (dva na spalovací prostor) a také bylo zapotřebí snížit hmotnost rotačních pístů. Problémem je ale výrazný rozdíl ve výkonu podle použitého paliva. Při spalování vodíku motor vykazoval jen poloviční výkon oproti benzínu. Dojezd na vodík je sto kilometrů, na benzín dalších pět set padesát [31], [35].

Zmíněný dvoupalivový systém firma použila ve voze **Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid**. Název napovídá, že se jedná o hybridní vozidlo. Dvoupalivový rotační motor slouží jen pro výrobu elektrické energie pro elektromotor. Tato koncepce vykazuje při spalování vodíku až dvojnásobný dojezd [31], [35].



obr. 14 - RX-8 Hydrogen RE a Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid [36]

### 3.1.2 HYTHANE®

Palivo Hythane® není prozatím pro veřejnost příliš známé. Bylo vyvinuto americkou společností Hythane Company, která si jej nechala patentovat. Jedná se o směs zemního plynu a vodíku v poměru čtyři ku jedné. Název je odvozen jako složenina jejich anglických ekvivalentů [37].

Záměrem bylo vytvořit co nejvíce efektivní a ekologické palivo. Slabiny jednoho doplní pozitiva druhého. Prvním pozitivem je například snížení emisí, zejména oxidů dusíku. Dále, metan obsažený v zemním plynu je stabilní molekula. Vodík vyžaduje dvacet pět krát nižší zápalnou energii, takže působí ve směsi jako iniciátor spalovacích reakcí. Dolní výhřevnost Hythane® je větší než je tomu u zemního plynu což vede k většímu využití obsahu motoru. Důležitým aspektem je také zvýšení účinnosti spalovacího procesu [37].

První čerpací stanice byla otevřena v roce 1992 v Denveru ve státě Colorado. Postupem času se zprovoznily další, nacházející se nejen na území Spojených států amerických. Oblibu si palivo získalo, možná trochu nečekaně, také v Indii [37].

Čerpací stanice jsou obdobné těm na stlačený zemní plyn, doplněné komponenty na výrobu vodíku a přípravu výsledného paliva. Výroba vodíku je prováděna elektrolýzou nebo parním reformingem. U elektrolýzy probíhá výroba vodíku v elektrolyzátoru, do něhož musíme dodávat vodu. Vyroběný vodík putuje do směšovače, který zajistí konečnou podobu paliva. Pro parní reforming slouží jako surovina zemní plyn. Následný postup je totožný jako u předchozí metody. Obě varianty vyžadují velké množství energie. Na jednotku hmotnosti je cena Hythane® v porovnání se stlačeným zemním plynem asi o deset procent vyšší [37].

Hythane® je využíván především pro pohon autobusů. Z oblasti osobních automobilů stojí určitě za zmínku vozidlo **Volvo V70** s přívlakem **Multi-Fuel**. Jak už jméno naznačuje, jedná se o vozidlo, které dokáže spalovat více druhů paliv. V tomto případě konkrétně pět: bioetanol, zemní plyn, biometan, hytan (zde 10% vodíku, 90% zemního plynu) a samozřejmě také benzín. Vůz splňuje emisní normu Euro 5 [37].



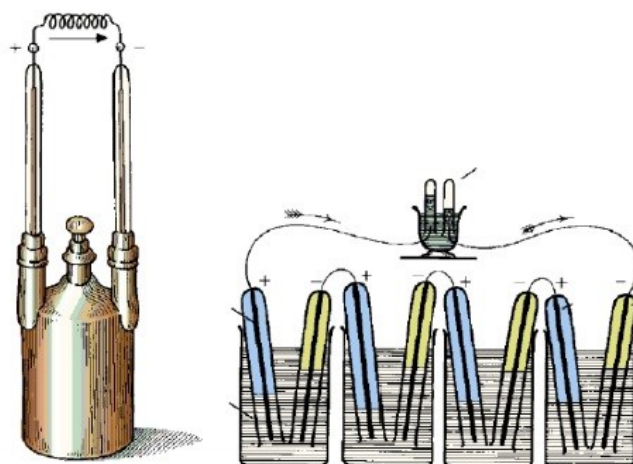
obr. 15 - Volvo V70 Multi-Fuel [38]

### 3.2 VYUŽITÍ V PALIVOVÝCH ČLÁNCÍCH

Žádný ze zmiňovaných pohonných systémů nemůže konkurovat požadavkům 21. století jako právě palivový článek. Spalovací motory povětšinou spalují fosilní paliva a všechny, i když různou měrou, zatěžují životní prostředí exhalacemi. Elektromobily nabízí vysokou účinnost, mají dobrou momentovou charakteristiku a jsou tiché. V kombinaci s palivovým článkem dostaneme navíc vozidlo, které v porovnání se spalovacími motory dosahuje výrazně vyšší účinnosti s nulovými emisemi.

#### 3.2.1 HISTORIE

První myšlenka na zařízení pro výrobu elektřiny inverzním postupem elektrolýzy se zrodila v mysli německého vědce Christiana Friedricha Schönbeima a svůj poznatek publikoval v tehdejší odborném časopise. Následujícího roku, tedy v roce 1839, Brit William Robert Grove sestavil první fungující koncepci. Ta sestávala z platinových elektrod ponořených do kyseliny sírové. Elektrody byly umístěny v skleněných trubičkách, jejichž horní uzavřený konec vyplňoval vodík s kyslíkem. Připojená nádoba, v níž probíhala elektrolýza vody, sloužila pro demonstraci správné funkce zařízení. Vzniklé napětí okolo jednoho voltu však bylo nepostačující, proto koncept nenašel uplatnění [3], [4], [39].



obr. 16 - Palivový článek sira Williama R. Grovea [40]



Přesně o padesát let později sestrojili Ludwig Mond a Charles Langer zařízení využívající vzduch a svítíplyn. Právě oni jako první použili pro název svého zařízení palivový článek [3], [4], [39].

O stavbu prvního palivového článku, který našel uplatnění, se zasadil anglický inženýr Francis Thomas Bacon. V roce 1959 spolu se svými spolupracovníky představil palivový článek, užitý pro pohon svářečského stroje, s výkonem 5 kW. Platinové elektrody nahradil niklovými a byly ponořeny v zásaditém elektrolytu hydroxidu draselného. Na podzim stejného roku představil Harry Karl Ihrig třikrát výkonnější alkalický palivový článek pohánějící traktor [3], [4], [39].



obr. 17 - Francis Thomas Bacon a jeho palivový článek [41]

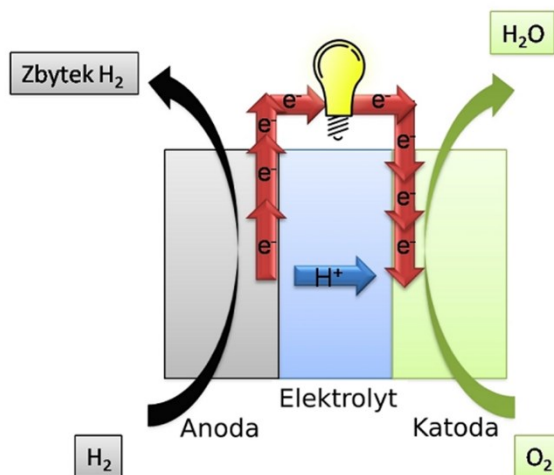
V šedesátých letech využil palivového článku americký národní letecký úřad pro letectví a kosmonautiku. Dodávaly elektrickou energii vesmírným plavidlům v programech Gemini a Apollo. Po prvním ropném šoku stoupl palivový článek na významu. Za zásadní posun ve vývoji této technologie může vznik aliance společností Daimler-Benz a Ballard Power Systems. Spolupráce započala roku 1997, později se připojil i Ford. Palivový článek v současnosti nenachází uplatnění pouze pro pohon dopravních prostředků, ale třeba i v elektrotechnice [3], [4], [39].

### 3.2.2 PRINCIP PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Palivový článek pracuje na principu elektrochemické přeměny. Energie paliva je konvertována přímo na elektřinu a odpadají tak mezikroky jako u spalovacích motorů. Proces se nazývá studeným spalováním. Aktivní chemické látky nejsou součástí elektrod jako u akumulátorů, takže k opotřebení téměř nedochází. Elektrody zastávají pouze funkce katalyzátorů reakcí [3], [4], [19].

Na anodu (někdy též označována jako palivová elektroda) přivádíme palivo. To zde zoxiduje, vzniknou ionty a elektrony uvolněné z valenčních sfér. Ionty prochází ke katodě elektrolytem, kdežto elektrony putují vnějším obvodem. Na katodě naopak probíhají redukční reakce. Zde dopravujeme oksyličovadlo, které přijímá volné elektrony a následně reaguje s kladnými ionty. Jakmile se přeruší přívod paliva či oksyličovadla, chemické reakce se okamžitě zastaví. Elektrolyt v systému funguje pouze jako izolátor a umožňuje vznik napětí [3], [4], [19].

Abychom dosáhli požadovaného výkonu, slučujeme vícero palivových článků do takzvaných palivových svazků. Články jsou odděleny bipolárními deskami. Ty umožňují vést elektrický proud, palivové kanálky zajišťují přívod paliva, odvod vedlejších produktů reakcí a odvádí teplo [3], [4], [19].



obr. 18 - Princip palivového článku [42]

### 3.2.3 ROZDĚLENÍ A POPIS

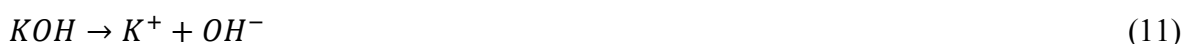
Faktorů, podle nichž můžeme rozdělit palivové články, je mnoho. Za vhodné a nejvíce přehledné považují dvě kritéria, kterými jsou druh elektrolytu spolu s provozní teplotou. Provozní teplota se rozděluje na dva intervaly, které řadí jednotlivé palivové články do kategorie nízko a vysokoteplotních.

Za nízkoteplotní články považuje ty, které pracují do teploty 250 °C. Jsou dominantně využívány v dopravě, mobilních aplikacích k výrobě elektrické energie. Vysokoteplotní články naopak převládají v kombinované výrobě tepla a elektrické energie v aplikacích stacionárních.

#### ALKALICKÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK (AFC)

Hovoříme o nejlépe prozkoumaném a nejvíce používaném palivovém článku. Řadíme jej mezi nízkoteplotní, neboť pracovní teplota se pohybuje od 65 do 220 °C. Nejčastěji používaným elektrolytem je hydroxid draselný, protože má velkou iontovou vodivost, v koncentracích 3 až 50 % hm. Elektrody jsou zpravidla vyrobeny ze spékaného práškového niklu s přísadou uhlíku a opatřené vrstvou katalyzátoru. Povrch tvořený vzácnými kovy článek značně prodražuje. Palivem je čistý vodík [3], [4], [19].

Proces začíná disociací elektrolytu:



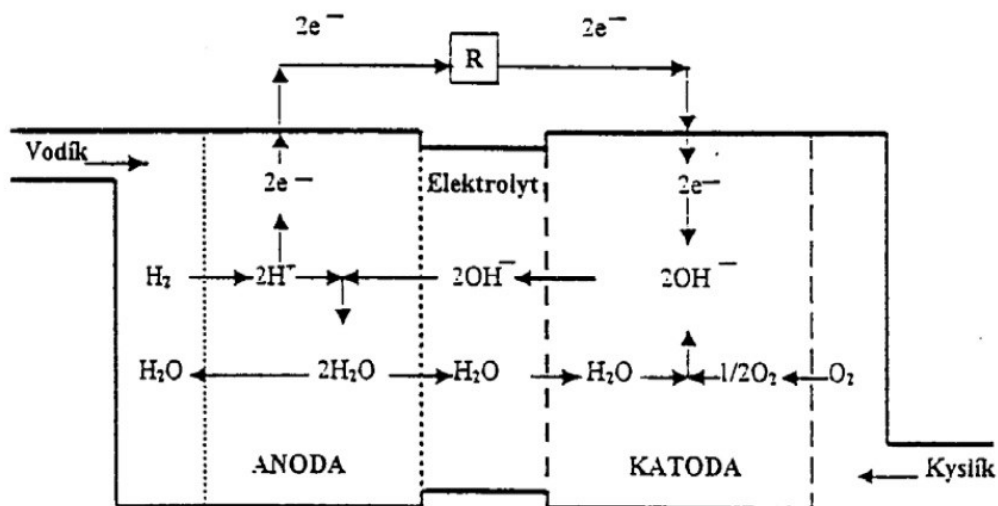
Na anodě reaguje přiváděný vodík se vzniklými anionty:



Na katodě pak okysličovadlo přijímá elektrony a reaguje s vodou:



Jako okysličovadlo je zapotřebí použít čistý kyslík. Oxid uhličitý, přítomný ve vzduchu, totiž reaguje s hydroxidem draselným za vzniku uhličitanu draselného. To vede k degradaci zařízení. Tento fakt vytváří překážku pro využití alkalického článku v automobilech. Z kladných vlastností můžeme zmínit kompaktnost systému a účinnost až 70 % [3], [4], [19].



obr. 19 - Schéma alkalického palivového článku [19]

### PALIVOVÝ ČLÁNEK S POLYMERNÍ ELEKTROLYTICKOU MEMBRÁNOU (PEMFC)

Palivové články s elektrolytickou membránou jsou dalším zástupcem nízkoteplotních zařízení. Provozní teplota se pohybuje mezi 70 a 90 °C. Anoda i katoda jsou vyrobeny z porézního grafitického papíru s povlakem platinové černi, opatřené teflonovou úpravou proti zvlhnutí. Elektrolytem je tenká polymerová membrána. Materiál membrány je polymer na bázi uhlíku a fluoru. Elektrody s membránou jsou za zvýšené teploty a tlaku spojeny v celek s tloušťkou méně než jeden milimetr [3], [4], [19].

Na stranu anody přivádíme vodík, který uvolní elektrony a vzniknou vodíkové ionty:



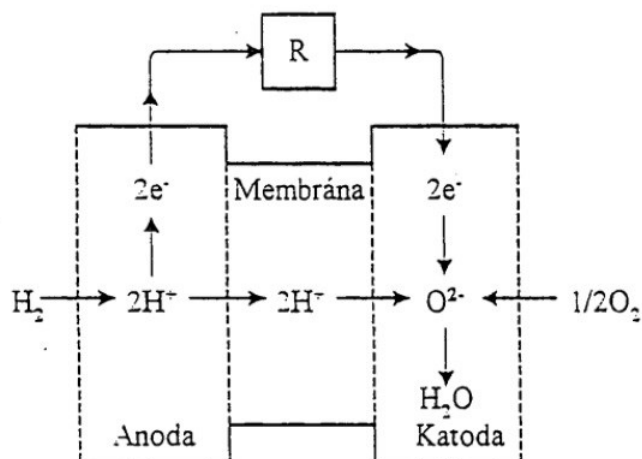
Ke katodě přivádíme okysličovadlo za vzniku vody:



Okysličovadlem může být i vzduch, neboť membráně ani samotnému procesu nevádí přítomnost oxidu uhličitého. Problémem je spíše výskyt oxidu uhelnatého v palivu, protože se váže na platinu a tak degraduje článek. Řešením může být katalytická oxidace na oxid uhličitý. Polymerní membrána pro správnou funkci vyžaduje přítomnost vody, proto ji musíme vlhčit [3], [4], [19].

Palivový článek nabízí také řadu výhod. Je kompaktní, obsahuje nekorozivní elektrolyt, umožňuje rychlý start a také provoz za nižších teplot nevyvolává problémy. V porovnání

s ostatními typy má nejvyšší proudovou hustotu. Z výčtu pozitiv lze usoudit, že se hodí pro použití v automobilech. Výrobci vozů většinou volí tento typ článku. Účinnost dosahuje až 60 % [3], [4], [19].



obr. 20 - Schéma palivového článku s elektrolytickou membránou [19]

### PALIVOVÝ ČLÁNEK S KYSELINOU FOSFOREČNOU (PAFC)

Elektrolytem je koncentrovaná kyselina fosforečná v podobě gelu v pletivu teflonu vázaného karbidem křemíku. Článek je velký a těžký. Když k tomu připočteme, že vhodná provozní teplota se pohybuje okolo 200 °C, ideální uplatnění nalezne v energetickém průmyslu. Elektrody jsou vyrobeny z pórovitého uhlíku, povlak z platiny [3], [4], [19].

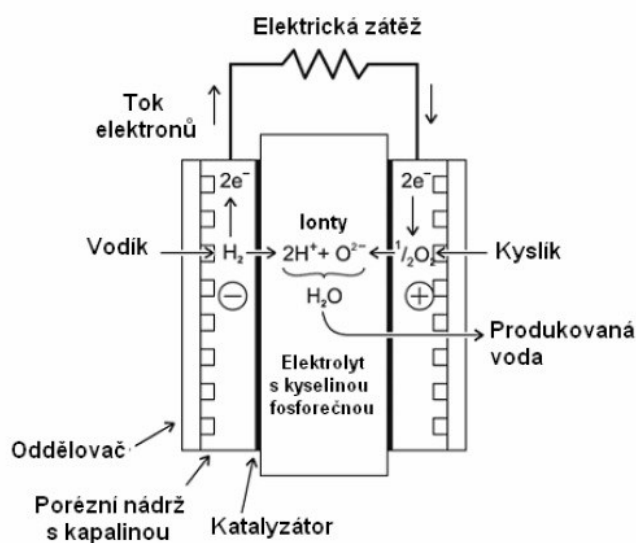
Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Článek musí pracovat v malém rozsahu ideálních teplot, obsahuje korozivní elektrolyt, je citlivý na síru obsaženou v palivu a před spuštěním vyžaduje předehřev. Výhodou je vysoká životnost. Elektrická účinnost se udává okolo 40 %, při použití v kogeneračních jednotkách lze dosáhnout celkové účinnosti až 85 % [3], [4], [19].



obr. 21 - Schéma palivového článku s kyselinou fosforečnou [43]

### PŘÍMOMETANOLOVÝ PALIVOVÝ ČLÁNEK (DMFC)

Jedná se o jistou modifikaci polymerního membránového palivového článku. Vodíkové palivo nahradil metanol smíchaný buď s vodou, nebo vodní parou. Metanol je kapalina o vysoké energetické hustotě, s níž se snadněji manipuluje. Další obrovskou výhodou je možnost získávání z obnovitelných zdrojů s vysokou účinností (až 60 %). Pracovní teplota leží pod hranicí 100 °C. Jako elektrolytu je užito folie polymeru či roztoku vody [3], [4].

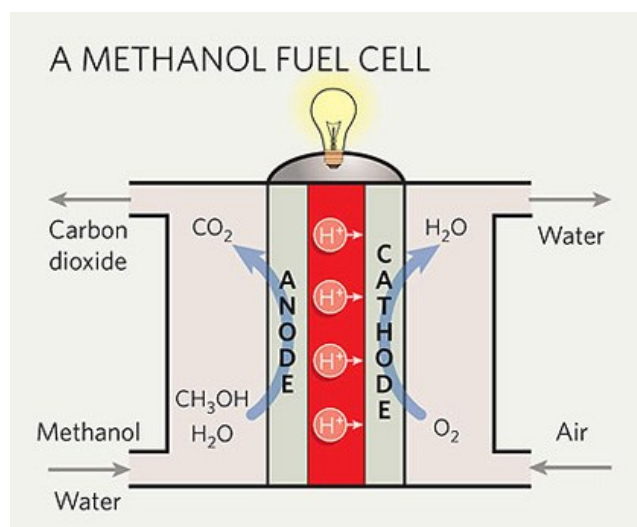
Reakce na anodě je pomalejší, protože probíhá ve více krocích:



Reakce na katodě:



Využití metanolu jako paliva v člancích je prozatím ve stádiu vývoje. Elektrická účinnost článku dosahuje 40 %, tedy až o třetinu menší než membránového článku s vodíkovým palivem. Zařízení taktéž produkuje emise oxidu uhličitého a vykazuje nižší životnost [3], [4].



obr. 22 - Schéma přímometanolového palivového článku [44]

### PALIVOVÝ ČLÁNEK S ROZTAVENÝMI UHLIČITANY (MCFC)

V minulosti nazývaný také uhlíkový palivový článek, protože zde byla snaha užít uhlí jako paliva. Elektrolytem je směs roztavených uhličitánů v pórovité keramické matrici sestávající ze směsi oxidů lithia a hliníku. Vysoká teplota provozu okolo 650 °C umožní absenci drahých katalyzátorů a zajistí vysokou iontovou vodivost elektrolytu. Anoda je vysoce porézní a vyrábí se spékáním práškového niklu s přísadou chrómu. Katodu tvoří oxid nikelnatý dopovaný lithiem. Zařízení pro provoz vyžaduje přítomnost vodíku, ten je vyzískán rozkladem zemního plynu přímo uvnitř článku [3], [4], [19].

Anoda:

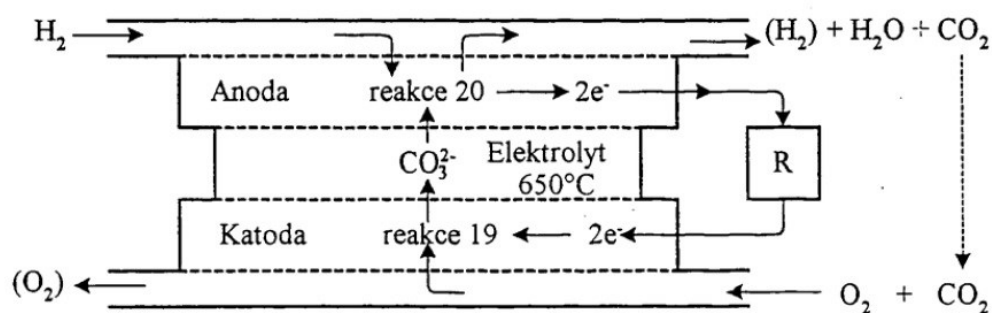


Katoda:



Vyloučený oxid uhličitý z anody dopravujeme ke katodě.

Roztavené uhličitany jsou vysoce korozivní. Provozní teplota nenahrává využití této technologie v automobilech. Uplatnění nalézá především v energetice. Pracuje s účinností 45 - 60 % [3], [4], [19].



obr. 23 - Schéma palivového článku s roztavenými uhličitany [19]

### PALIVOVÝ ČLÁNEK S TUHÝMI OXIDY (SOFC)

Provozní teplota, pohybující se okolo hranice až 1000 °C, zajišťuje vhodnou tepelnou vodivost. Dovoluje také absenci katalyzátorů z drahých materiálů. Obě elektrody jsou porézní. Anoda se vyrábí z niklu a oxidu zirkoničitého, stabilizována oxidem yttritým. Katodu vyrobíme ze slitiny lanthanu a oxidu manganového dopovanou stronciem. Keramický elektrolyt nezpůsobuje korozi. Nejčastěji se jedná o pevnou směs oxidů yttria a zirkonu. Palivový článek využívá vnitřního reformingu vstupních surovin, palivem jsou pak směsi plynů. Okysličovadlem je vzduch, výsledným produktem kromě elektrické energie přehřátá vodní pára [3], [4], [19].

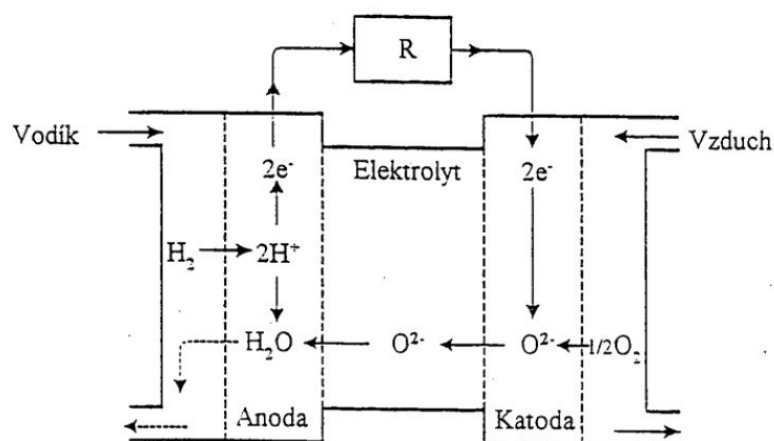
Reakce na anodě:



Reakce na katodě:



Článek se může pochlubit dlouhou životností a elektrickou účinností až 65 %. Využití nalezne rovněž v energetice [3], [4], [19].



obr. 24 - Schéma palivového článku s tuhými oxidy [19]

### REGENERATIVNÍ PALIVOVÝ ČLÁNEK

Palivový článek je zařízení pracující pouze v jednom směru. Výzkumníci se dnes pokouší vynaleznout takový, jež by byl schopen i provozu v obráceném směru, tedy aby byl schopen zpětně vyrobit palivo za pomoci přivedené energie. Největším úskalím se prozatím jeví katalyzátory, které jsou schopny fungovat jen v jednom směru. Technologie regenerativních palivových článků je poměrně mladá. V budoucnu se snad podaří odstranit problémy provozuschopnosti [3].

Tabulka 2 - Porovnání palivových článků

Typ článku:	Pracovní teplota:	Použité palivo:	Účinnost:	Aplikace:
<b>AFC</b>	65-220 °C	vodík	až 70 %	kosmický průmysl, pohon ponorek
<b>PEMFC</b>	70-90 °C	vodík	až 60 %	všestranné využití
<b>PAFC</b>	≈ 200 °C	vodík	38-45 %	výroba energií
<b>DMFC</b>	< 100 °C	metanol, etanol	až 40 %	mobilní využití
<b>MCFC</b>	≈ 650 °C	vodík, oxid uhelnatý	45-60 %	výroba energií
<b>SOFC</b>	≈ 1000 °C	směs plynů	až 65 %	výroba energií



### 3.2.4 ZROD VYUŽITÍ PALIVOVÉHO ČLÁNKU V AUTOMOBILU

V roce 1994 představila společnost Daimler-Chrysler první automobil poháněný palivovým článkem s výměňikovou protonovou membránou nesoucí označení **NECAR 1**. Vůz byl postaven na modelu vozu Mercedes-Benz 100 van. Jednalo se spíše o výzkumné vozidlo či mobilní laboratoř, nežli vůz pro každodenní použití. Palivový článek s veškerým přídatným zařízením a nádrží na vodík zabraly prakticky celý prostor vozu. Výkon dvanácti svazků palivových článků od firmy Ballard Power Systems Inc. byl 50 kW. Nádrž pojala 150 l plynu stlačeného na 30 MPa. Jízdní dosah vozidla odpovídal 130 km, maximální rychlost automobilu byla 90 km/h [45], [46].

Po dvou letech výzkumů se firma chlubila dalším přírůstkem. Tentokrát tvořil základ vozu **NECAR 2** víceúčelový Mercedes-Benz třídy V. Objem pohonného ústrojí se podařilo výrazně zredukovat, proto automobil dokázal přepravit šest pasažérů. Místo jedné nádrže výrobce použil dvě, výkon i maximální rychlost lehce vzrostly a akční rádius vozu se dvojnásobil [45], [46].

Následující rok přinesl hned dvě novinky. Osobní automobil **NECAR 3** s městským autobusem zvaným **NEBUS**. Vodík pro palivový článek, užitý v modelu třídy A, nebyl skladován v nádržích, nýbrž vyráběn přímo v automobilu předřazeným reformerem z metanolu. Nádrž na metanol o objemu 38 litrů zajistila dojezd přes 300 km. Veškerá technika pro provoz palivového článku byla vestavěna do sendvičové podlahy vozu. **NEBUS** mohl svým dojezdem konkurovat běžně používaným autobusům. Jeho deset palivových svazků dosahovalo výkonu 150 kW, maximální rychlost korelovala okolo 80 km/h [45], [46].

V březnu 1999 byl veřejnosti prezentován automobil **NECAR 4**. Základ vozu byl stejný jako u předešlé generace. Nabízel místo pro pět osob i zavazadlový prostor. **NECAR 4** disponuje o 40 % vyšším výkonem než jeho předchůdce. Jízdní dosah přesahuje 450 km, maximální rychlost stoupla na 145 km/h [45], [46].

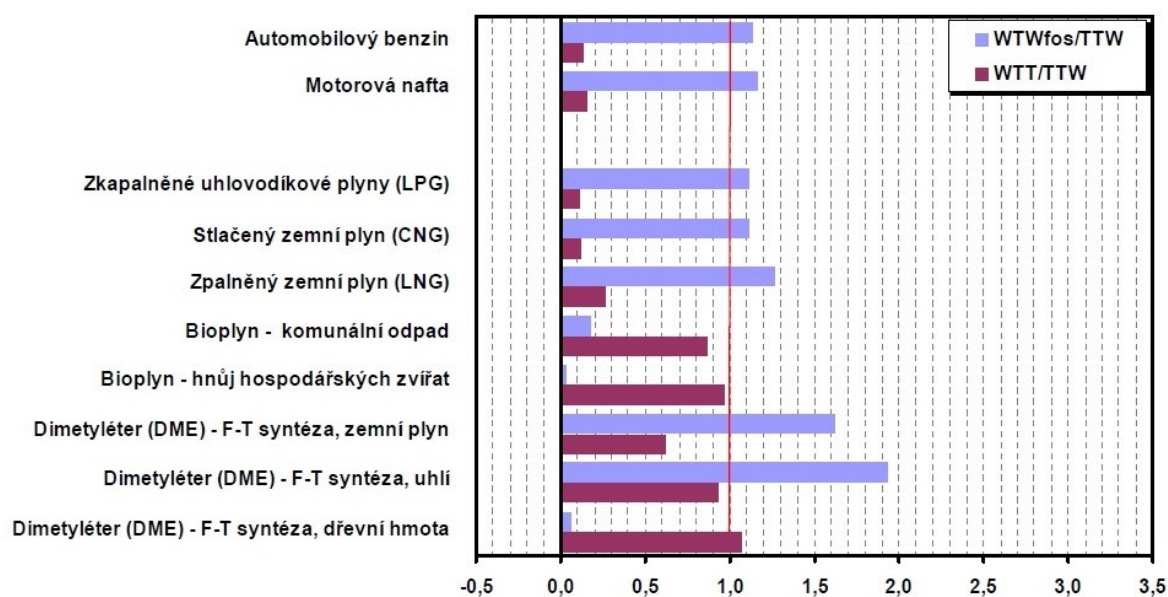
**NECAR 5**, představený v roce 2000, je dalším vylepšením předešlých modelů. Vodík je zde stejně jako u třetí generace schopen výroby vodíku z metanolu. Celá palivová soustava včetně reformeru je zabudována v podlaze vozu. Na plnou nádrž o objemu 45 litrů je schopen urazit vzdálenost více jak 400 km [45], [46].

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PALIV

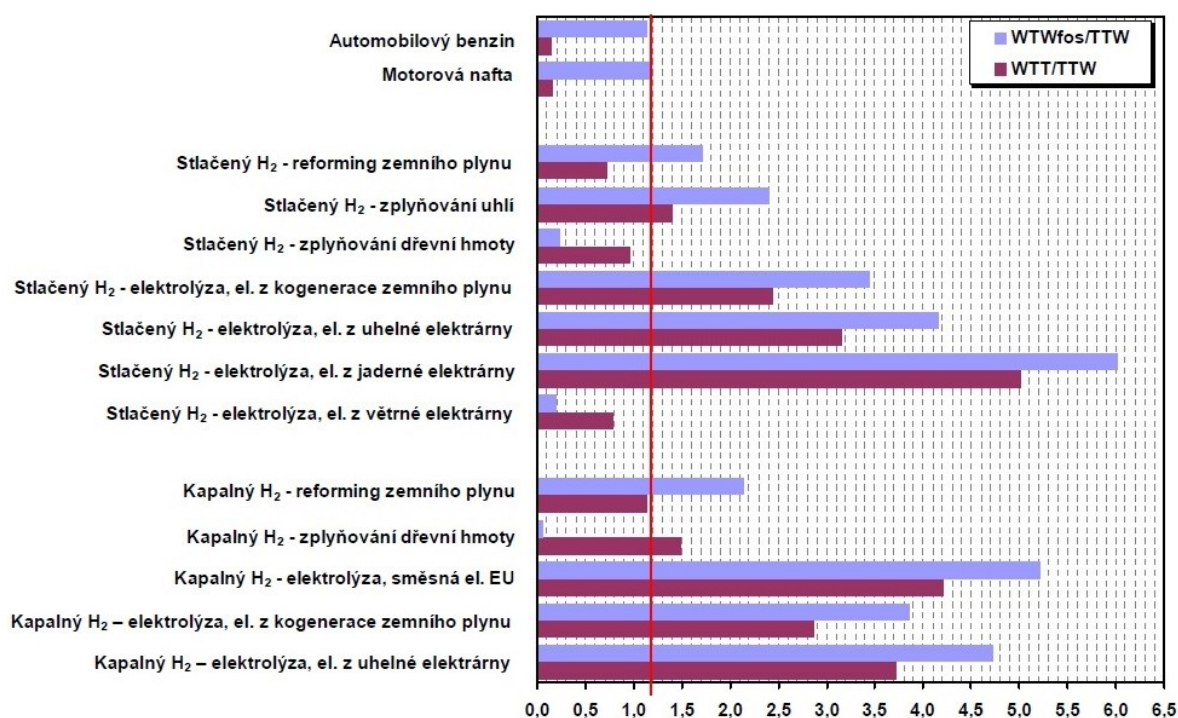
Cílem této kapitoly je nalézt odpověď na otázku, které palivo a způsob jeho využití je nejvíce přínosné. Paliva se musí vyznačovat nízkou hodnotou produkovaných emisí, ale také efektivním způsobem výroby a zužitkováním. Pro objektivní posouzení ekologické i ekonomické výhodnosti jednotlivých paliv je tedy nutno vzít v potaz celý „životní cyklus“. Jedná se tedy o komplexní analýzu, jež zpracovává velké množství dat z řady odvětví. Mezi nejlepší současné analýzy tohoto typu se považuje studie Well to Wheel (od zdroje ke kolu), kterou zde aplikujeme.

Analýza se skládá ze dvou částí. První část, nazývaná Well to Tank (od zdroje do nádrže), vyhodnocuje, jak efektivní je řetězec procesů před samotným využitím paliva v automobilu. Část druhá, pojmenovaná Tank to Wheels (od nádrže ke kolům), pak hodnotí zužitkování paliva dopravním prostředkem. Tedy účinnost pohonné jednotky [4], [19].

Autory asi nejlepší studie tohoto typu jsou sdružení EUCAR (the European Council for Automotive R & D), CONCAWE (the Oil Companies European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution) a JRC (the Joint Research Centre of the EU Commission). Analýza byla vypracována v roce 2003, od té doby je průběžně revidována [19].

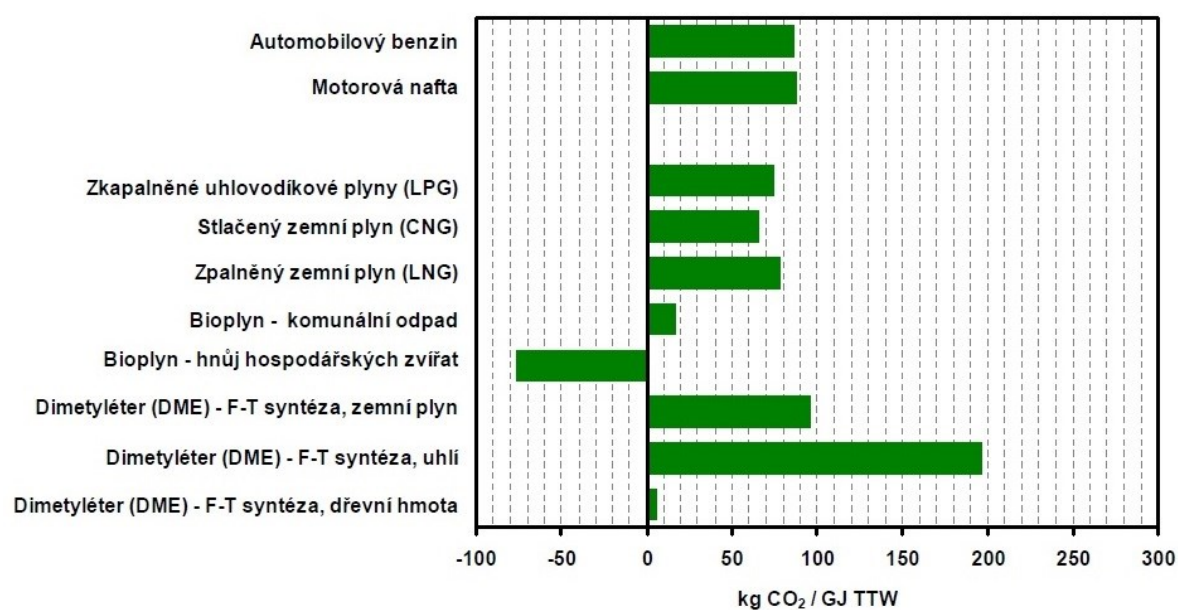


obr. 25 - Relativní porovnání spotřeby celkové energie z fosilních zdrojů ( $WtW_{fos}$ ) a energie potřebné pro výrobu a distribuci alternativních plyných i konvenčních paliv ( $WtT$ ), vztahované na obsah využitelné energie v palivu ( $TtW$ ) [19]



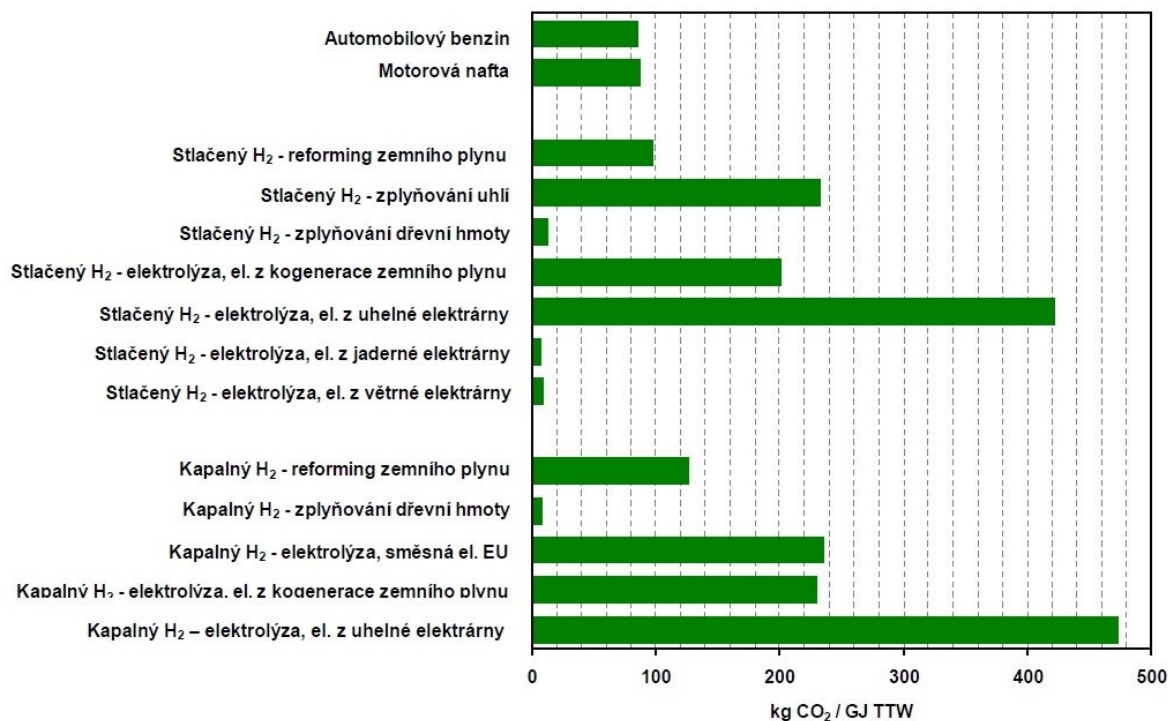
obr. 26 - Relativní porovnání spotřeby celkové energie z fosilních zdrojů ( $WtW_{fos}$ ) a energie potřebné pro výrobu a distribuci vodíku a konvenčních paliv ( $WtT$ ), vztážené na obsah využitelné energie v palivu ( $TtW$ ) [19]

Z obrázků je patrné, že alternativní paliva obnovitelných zdrojů se nevyznačují příznivou energetickou bilancí. Jinak řečeno, energetická spotřeba pro výrobu, distribuci a uskladnění je tak vysoká, že většinou i několikanásobně překračuje využitelný energetický obsah paliva.



obr. 27 - Porovnání celkových emisí oxidu uhličitého vztážené na využitelný obsah energie [19]

Potřebná energie pro výrobu bioplynu fermentací je získávána z kogenerační jednotky. Měrné emise tím pádem vykazují zápornou hodnotu.



obr. 28 - Porovnání celkových emisí oxidu uhličitého spojené s využitím vodíku vztážené na využitelný obsah energie [19]

Pozn. Množství oxidu uhličitého vyjadřuje souhrn všech složek emisí, jež způsobují skleníkový efekt, přepočítaných na jeden polutant.

Z hlediska vypouštěných emisí již tak jednoznačné výsledky nedostáváme. Použitím běžně využívaných plyných paliv snížíme (CNG, LPG) dosáhneme sice snížení emisí oxidu uhličitého, ale o výrazné snížení se nejedná. Pokud se bavíme o vodíku, zde dostáváme značně rozdílné výsledky. Jestliže pečlivě vybereme vhodný způsob výroby, lze srazit hodnoty emisí na minimum.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit ucelený přehled možností využití vodíku k pohonu automobilu a následně vyhodnotit jednotlivé systémy. Aby bylo možno objektivně zhodnotit využití vodíku jako paliva pro osobní automobily, je v práci kladen důraz také metody výroby, současné možnosti skladování a distribuce vodíku včetně nástinu pravděpodobného směřování dalšího vývoje. Třetí kapitola již ukazuje možnosti využití vodíkového paliva v automobilu.

Obě uvedené varianty se jeví jako velmi vhodné. Vozidla se v porovnání s běžnými spalovacími motory prezentují vyšší účinností i téměř nulovými exhalacemi. Situace už není tak jednoznačná, pokud vezmeme v úvahu celý „životní cyklus“ vodíku jako paliva. Výsledky analýzy ukazují, že energie potřebná už jen pro výrobu často převyšuje výsledný využitelný energetický obsah. Taktéž s emisemi je to v globálním měřítku trochu jinak. Není výjimkou, že množství vyprodukovaných emisí při výrobě vodíku způsobuje vyšší znečištění skleníkovými plyny než provoz benzínových a naftových motorů. Dle mého názoru, odborná veřejnost označila vodík jako palivo budoucnosti zcela trefně. Vodík má podle všeho značnou perspektivu, je ale zapotřebí ujít ve vývoji spoustu kroků kupředu. Sériová produkce vozidel jezdících na vodík se v současnosti nejeví jako ekonomická ani ekologická.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STONE, Richard. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.
- [2] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily (3): Motory*. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009, 179 s. ISBN 978-80-87143-15-5.
- [3] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohon automobilů*. 1. vyd. Praha: BEN, 2004, 231 s. ISBN 80-730-0127-6.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] FRYBERT, Jan. *Alternativní pohony*. Brno: Integrovaná střední škola automobilní, [2015], 125 s. ISBN 978-80-260-7548-6.
- [6] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004, 234 s. ISBN 80-239-1602-5.
- [7] POKORNÝ, Zdeněk. *Bionafta: ekologické alternativní palivo do vznětových motorů*. Vyd. 1. V Praze: Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství ČR, 1998, 43 s. Ekologie. ISBN 80-710-5173-X.
- [8] *The Henry Ford: Take it Forward* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [https://www.thehenryford.org/exhibits/hf/The\\_Innovator\\_and\\_Ford\\_Motor\\_Company.asp](https://www.thehenryford.org/exhibits/hf/The_Innovator_and_Ford_Motor_Company.asp)
- [9] *Ford: Go Further* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.ford.cz/AboutFord/Corporateinformation/Heritage/StartingtheFordMotorCompany>
- [10] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Ropn%C3%BD\\_%C5%A1ok](http://cs.wikipedia.org/wiki/Ropn%C3%BD_%C5%A1ok)
- [11] *LPG: Vše o LPG* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.lpg.cz/vyhodylpg/index.php>
- [12] *Šlápmi na plyn* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://lpg-cng.ochranamotoru.cz/auta-jizda-slapni-na-plyn-ropny-lpg-propan-butan.htm>
- [13] *Šlápmi na plyn* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://lpg-cng.ochranamotoru.cz/auto-autobus-jizda-na-plyn-palivo-zemni-cng.htm>
- [14] *CNG* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/statiska-cr-evropa-svet/>
- [15] *Univerzita Pardubice: Katedra fyzikální chemie* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://kfch.upce.cz/htmls/vedecka\\_cinnost\\_bionafta.htm](http://kfch.upce.cz/htmls/vedecka_cinnost_bionafta.htm)

- [16] *BIOM* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bionafta-a-smesna-motorova-nafta>
- [17] *Methanol: Methanol Institute* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.methanol.org/Technical-Information/Properties-of-Methanol.aspx>
- [18] *Methanol: Methanol Institute* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.methanol.org/Methanol-Basics/Methanol-Applications.aspx>
- [19] *Ministerstvo dopravy* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka\\_analyza\\_vhodnych\\_alternativnich\\_paliv\\_v\\_dopravecast\\_1.pdf](http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_1.pdf)
- [20] *Ministerstvo dopravy* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/EC931276-ACFB-4C02-B4B0-6CBB103381D/0/Technickoekonomicka\\_analyza\\_vhodnych\\_alternativnich\\_paliv\\_v\\_dopravecast\\_2.pdf](http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/EC931276-ACFB-4C02-B4B0-6CBB103381D/0/Technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_2.pdf)
- [21] *Consumer Energy Center: California Energy Commission* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.consumerenergycenter.org/transportation/afvs/ethanol.html>
- [22] *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Camille\\_Jenatzy](http://en.wikipedia.org/wiki/Camille_Jenatzy)
- [23] *Elektrické vozy* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://elektrickevozy.cz/clanky/cervnove-prodeje-hybridu-a-ev-v-usa-vedou-toyota-prius-a-chevrolet-volt/>
- [24] KULVEITOVÁ, Hana. *Chemie II: (chemie prvků)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, 151 s. ISBN 978-80-248-1322-6.
- [25] TUČEK, Ing. Vít, Ing. Ludmila DVOŘÁKOVÁ a Jiří HANZAL. ČESKÁ ASOCIACE TECHNICKÝCH PLYNŮ. *Vodík*. Praha, 2004. Dostupné také z: <http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>.
- [26] BIČÁKOVÁ, Olga. *Možnosti výroby vodíku biologickými procesy* [online]. Praha, 2010, 10 s. [cit. 2015-05-26]. Dostupné také z: <http://www.paliva.vscht.cz/download.php?id=29>
- [27] MAREK, J. *Možnosti skladování vodíku pro jeho využití v dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 52 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Juraj Kizlink, CSc.
- [28] *Hytep: Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/414-skladovani-vodiku-ii>
- [29] *World car fans* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.worldcarfans.com/10806061055/bmw-develops-new-generation-of-hydrogen-storage-tanks>



- [30] *H2bus* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.h2bus.cz/cerpaci-stance>
- [31] FORBELSKÝ, A. *Spalování vodíku v pístových spalovacích motorech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [32] *BMW Group* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.bmwgroup.com/e/0\\_0\\_www\\_bmwgroup\\_com/forschung\\_entwicklung/innovation\\_netzwerke/effiziente\\_dynamik/cleanenergy.html](http://www.bmwgroup.com/e/0_0_www_bmwgroup_com/forschung_entwicklung/innovation_netzwerke/effiziente_dynamik/cleanenergy.html)
- [33] *Wallpapers 111* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://wallpapers111.com/bmw-hydrogen-7-images/>
- [34] *Diesel station* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.dieselstation.com/BMW/H2R-Hydrogen-Racecar-2004/BMW-H2R-Hydrogen-Racecar-2004-widescreen-wallpaper-ds19-i3034.html>
- [35] *Česká televize: Auto Moto Revue* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/1170433294-auto-moto-revue/206562235600007/3880-zajimavosti/?clanek=178>
- [36] *Japanese sport cars* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.japanesesportcars.com/photos/desktop-wallpapers/mazda/2008-mazda-rx-8-hydrogen-re/2008-mazda-rx-8-hydrogen-re+\\_2\\_.jpg.html](http://www.japanesesportcars.com/photos/desktop-wallpapers/mazda/2008-mazda-rx-8-hydrogen-re/2008-mazda-rx-8-hydrogen-re+_2_.jpg.html)
- [37] ŽÍDEK, T. *Alternativní paliva pro spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc..
- [38] *They should do that* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: [http://www.theysoulddothat.com/2006/10/volvo\\_multifuel\\_5\\_fuels\\_1\\_car.html](http://www.theysoulddothat.com/2006/10/volvo_multifuel_5_fuels_1_car.html)
- [39] *Fuel Cell Today: The leading authority on fuel cells* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/history>
- [40] ZLÁMAL, J. *Palivové články a automobil*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- [41] *Machine-history* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.machine-history.com/node/938?size=original>
- [42] *Skupina fyziky povrchů* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/povrchy/metoda/fc-principy>
- [43] Pokálený, J. *Trakční pohon elektromobilu napájený vodíkovým palivovým článkem*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 56 s.
- [44] *Machine-history* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.machine-history.com/Direct%20Methanol%20Fuel%20Cell>

- [45] *Daimler* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/dcmmedia/0-921-882477-1-884208-1-0-0-884427-0-0-11702-614318-0-1-0-0-0-0-0.html>
- [46] *Daimler: Fuel Cell Drive Technology* [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.daimler.com/dccom/0-5-1228969-1-1401029-1-0-0-1401206-0-0-135-0-0-0-0-0-0-0-0.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries	Organizace zemí vyvážejících ropu
LPG	Liquefied Petroleum Gas	zkapalněný ropný plyn
CNG	Compressed Natural Gas	stlačený zemní plyn
LNG	Liquefied Natural Gas	zkapalněný zemní plyn
MEŘO		methylester řepkového oleje
D <sub>2</sub> O	Heavy water	Těžká voda
CO	Carbon monoxide	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Carbon dioxide	Oxid uhličitý
LH <sub>2</sub>	Liquid hydrogen	tekutý vodík
MOF	Metal-Organic Framework	Kovo-organické rámy
HICE	Hydrogen internal combustion engine	vodíkový motor s vnitřním spalováním
AFC	Alkaline Fuel Cell	alkalický palivový článek
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell	palivový článek s polymerní elektrolytickou membránou
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	palivový článek s kyselinou fosforečnou
DMFC	Direct-methanol fuel cell	přímometanolový palivový článek
MCFC	Molten carbonate fuel cell	palivový článek s roztavenými uhličitany
SOFC	Solid oxide fuel cell	palivový článek s tuhými oxidy
WtT	Well to Tank	od zdroje do nádrže
TtW	Tank to Wheel	od nádrže na kolo
WtW	Well to Wheel	od zdroje na kolo
WtWfos	Well to Wheel fossil	energie z fosilních zdrojů

