

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**TECHNICKÁ FAKULTA**



## **Alternativní paliva v dopravě**

**Bakalářská práce**

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Jan Kovanda CSc.

**Autor práce:** Josef Tvardík

2011

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Josef Tvardík**

obor Obchod a podnikání s technikou

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Alternativní paliva v dopravě**

## Osnova bakalářské práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Literární rešerše
4. Vliv alternativních paliv na výkon, životnost a emise spalovacích motorů
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

Doporučené zdroje:

First: Zkoušení automobilů a motocyklů. SnT, 2008

Kalčík: Technická termomechanika

MACEK, J.-SUK, B.: Spalovací motory I, ČVUT Praha 1994

BEROUN, S.-SCHOLZ, C.: Základy teorie vozidel a pístových spalovacích motorů, Liberec, 1999

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jan Kovanda, CSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben 2011



Vedoucí katedry



  
Děkan

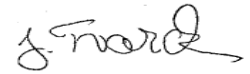
V Praze dne: 30. 11. 2009

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Alternativní paliva v dopravě“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

V Praze: 4. 4. 2011

Podpis autora: práce:

Handwritten signature in black ink, appearing to read "J. Novák".

## **Poděkování:**

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Janu Kovandovi CSc. za vedení bakalářské práce a cenné rady.

Velmi děkuji také Ing. Petrovi Dlouhému, který mi poskytl mnoho informací a náhled do problematiky TriHyBusu.

## OBSAH:

<b>1. Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Cíl práce a metodika.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Přehled a popis alternativních paliv a jejich výroby .....</b>	<b>4</b>
3.1. LPG.....	4
3.1.1. Výroba LPG.....	4
3.1.2. Požadavky na kvalitu LPG .....	5
3.2. Zemní plyn.....	6
3.2.1. Získávání zemního plynu.....	7
3.2.2. Požadovaná jakost zemního plynu.....	7
3.2.3. Současný stav CNG a LNG v dopravě .....	7
3.3. Syntetická ropa a paliva z ní vyrobené .....	8
3.4. Bioetanol.....	9
3.4.1. Výroba bioetanolu.....	9
3.5. Bionafta.....	10
3.5.1. Výroba bionafty .....	10
3.6. Bioplyn.....	12
3.6.1. Výroba bioplynu .....	12
3.7. Vodík .....	13
3.7.1. Výroba vodíku .....	13
3.7.1.1. Elektrolýza vody .....	13
3.7.1.2. Parní reformování .....	14
3.7.1.3. Parciální oxidace ropných frakcí .....	15
3.7.1.4. Zplyňování uhlí.....	15
3.7.1.5. Zplyňování biomasy .....	16
3.7.2. Vodíkové hospodářství .....	16
3.7.3. Palivový článek.....	16
3.7.3.1. Alkalický palivový článek (AFC).....	19
3.7.3.2. Palivový článek polymer – elektrolyt (PEMFC) .....	19
3.7.3.3. Palivové články s kyselinou. fosforečnou (PAFC).....	20
3.7.3.4. Palivové články (MCFC).....	20
3.7.3.5. Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC) .....	21
3.7.4. Bipolární svazky palivových článků.....	22
3.7.5. Systém pohonu palivovými články.....	22
3.7.6. Přímé spalování vodíku .....	23
3.7.6.1. BMW Hydrogen 7 .....	23
<b>4. Aspekty využití alternativních paliv v dopravě .....</b>	<b>24</b>
4.1. Vliv alternativních paliv na životní prostředí .....	24
4.1.1. Stručný přehled škodlivých emisí.....	25
4.2. Vliv alternativních paliv na emise spalovacích motorů.....	28
4.2.1. Katalyzátory .....	28
4.3. TriHyBus .....	29
4.3.1. Čerpací stanice na vodík .....	32
4.3.2. Smýšlení o TriHyBusu.....	33
<b>5. Závěr .....</b>	<b>33</b>

# ALTERNATIVNÍ PALIVA V DOPRAVĚ

## Alternative fuels in transport

### **Souhrn**

První část pojednává o různých druzích alternativních palivech, nejdeme zde vždy obecný popis paliva, jeho výrobu či způsob získávání, úsporu emisních plynů a výhody a nevýhody jeho použití. Pozornost je postupně věnována ropnému plynu (LPG), zemnímu plynu (CNG, LNG), syntetické ropě, bioetanolu, bionaftě, bioplynu a vodíku.

Vodík jako palivo je v práci prozkoumán velmi detailně, jsou zde popsány všechny dnes používané možnosti výroby. Dále následuje obecný popis palivového článku, a jak funguje, podrobné seznámení s pěti nejdůležitějšími typy palivových článků a jejich výhody a nevýhody. Závěr této části je věnován přímému spalování vodíku a projektu BMW Hydrogen 7.

Druhá část pojednává o vlivu těchto alternativních paliv na životní prostředí a složení výfukových plynů. Zmiňuji zde obecný přehled škodlivých plynů automobilové dopravy a jejich obecný popis.

Část samostatné práce je věnována podrobnému seznámení s prvním vodíkovým autobusem v ČR, popisu jeho principu fungování, jeho výhod, nevýhod a zatím zjištěných nedostatků. Pozornost jsem věnoval i první vodíkové čerpací stanici v ČR.

V závěru kvalitativně srovnávám aktuální alternativní paliva a snažím se nahlédnout do budoucnosti a snažím se odpovědět, jaké že by mohlo být palivo budoucnosti.

**Klíčová slova:** fosilní paliva, emise, LPG, zemní plyn, biopaliva, MEŘO, elektromobil, vodík, palivové články, TriHyBus

## **Summary**

Different kinds of alternative fuels are listed in the first part. Description, manufacturing or acquisition, engine exhaust emission, and advantages and disadvantages are also discussed there. I focused mainly on petroleum gas (LPG), natural gas (CNG, LNG), synthetic oil, bioethanol, bio-oil, bio-gas and hydrogen.

Hydrogen used as a fuel is well known in the work, and I described its manufacturing processes in detail. I continued with description of five most common types of fuel assemblies, and asses their advantages and disadvantages. Direct hydrogen combustion and project BMW Hydrogen 7 is discussed in conclusion of this part.

Impact of bio-fuels on environment, and composition of exhaust fumes are discussed in the second part of thesis. I list and describe common harmful gasses in motor-vehicle traffic there.

I pursued first hydrogen bus in Czech Republic in the individual part of this work. I described principles of function, advantages and disadvantages, and known drawbacks of hydrogen bus. I also gave attention to the first hydrogen fuel station in Czech Republic.

I compare existing alternative fuels, and try to predict how the fuel of future could look like in the conclusion of my work.

**Keywords:** fossil fuels, emissions, LPG, natural gas, biofuels, electric drive, hydrogen, fuel cells, TriHyBus.



## 1. Úvod

Současný stoupající trend provozu vozidel je velmi úzce spojen s emisemi škodlivých znečišťujících látek do ovzduší a negativně ovlivňuje jeho kvalitu. Tyto emise výfukových plynů mají nežádoucí účinek jak na přízemní vrstvu ovzduší, tak i na klimatické podmínky na Zemi a její ozónovou vrstvu. Problém škodlivých emisí je ve světovém měřítku hodnocen rozdílně, neboť v USA je podíl dopravy na globálním působení emisí oxidu uhličitého téměř dvojnásobný než v Evropě nebo Japonsku. Nicméně mezinárodní energetická agentura (IEA) v roce 2000 uvedla na veřejnost studii, že v roce 2020 dojde k 60% nárůstu emisí  $CO_2$ , což by jistě vedlo k urychlování již tak dramatického ohřevu klimatu a stoupaní hladiny moří. Nyní průměrná teplota povrchu Země stoupá o 0,1 až 0,4 stupně za 10 let.

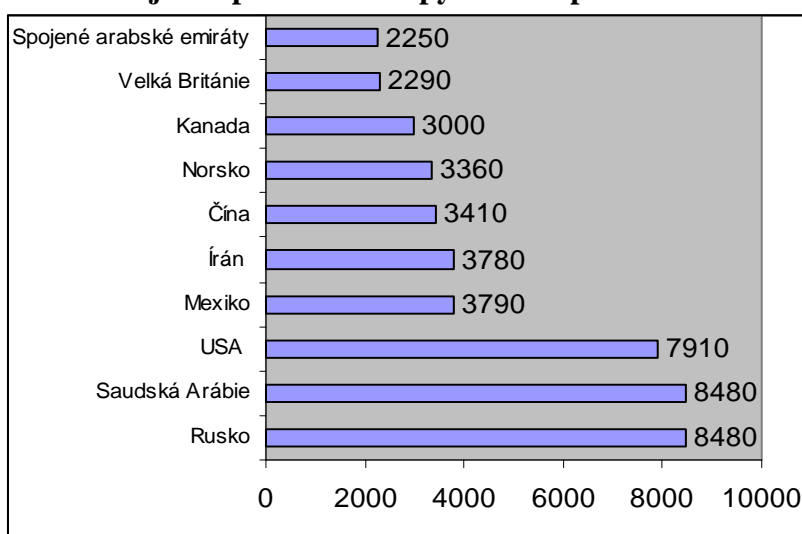
Alternativní paliva a pohony dopravních prostředků se vynalézají nejen kvůli již zmíněným emisím, ale také kvůli omezené zásobě ropy a fosilních paliv celkově. Ropa se podílí asi 40 % na světové spotřebě energie. V současnosti je nejdůležitějším nosičem energie celkového hospodářství. Celkový potenciál je podle mnoha průzkumů odhadován na 350 miliard tun. Zmíněné množství je ze 40 % již vyčerpáno, ze 40 % jsou to známá naleziště a 20 % připadá na ještě neobjevená naleziště. [1 a 4]

Mnoho evropských vrchních politiků a vědců si klade za prioritu omezení podílu  $CO_2$  způsobeného lidskou činností, neboť to považují za důležitý krok k ochraně životního prostředí. Podobný přístup v této problematice má v posledních letech i automobilový průmysl, který je nucen, prostřednictvím stále přísnějších legislativních norem EURO, vyvíjet nové koncepce pro snižování emisí výfukových plynů. Současný konvenční spalovací motor zpřísněné legislativní předpisy v budoucnu těžko splní. Dosáhnout vytyčeného cíle je možno zavedením alternativních paliv (vodík, zemní plyn, biopaliva) v současných spalovacích motorech, dále, zavedením jiných pohonů, z nichž se jako nejvýznamnější jeví pohon elektromotorem, zejména pro jeho výhodnou charakteristiku a bezemisní provoz. Jedním z alternativních pohonů je elektromotor napájený akumulátorem. Systémů akumulátorů je dnes celá řada, ale umožňují pouze krátký dojezd vozidla, a proto nejsou perspektivním řešením do budoucna. Dalším současným systémem je hybridní pohon, což znamená pohon dvěma, nebo více na sobě nezávislými zdroji energie. Nejvhodnější se jeví běžný spalovací motor a elektromotor, který postačuje na průjezd uzavřené oblasti např. města. Tento hybridní systém bývá doplněn o třetí zdroj energie – setrvačником pro rekuperaci energie při brzdění. Největší perspektivu poskytuje pohon elektromotorem se zdrojem proudu z palivového

článku, který mění energii obsaženou v palivu (vodík nebo metanol) přímo na elektrický proud.

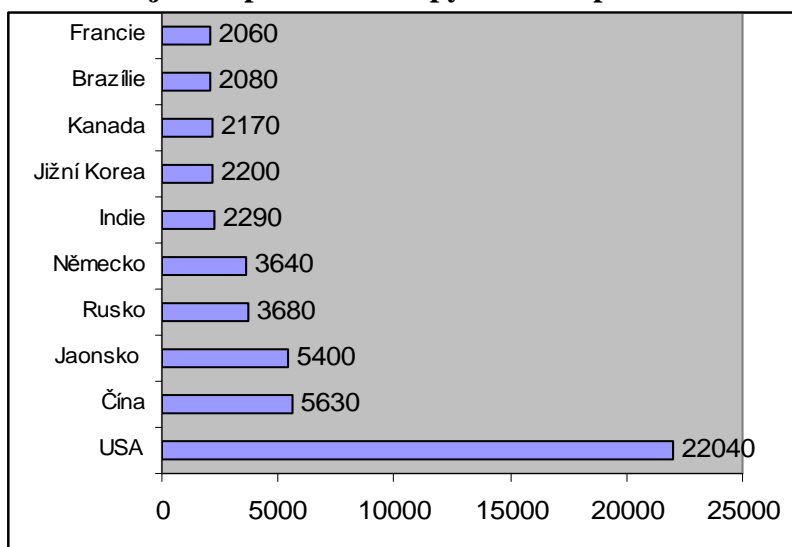
Již v roce 2000 řekl Bill Ford, že vodík ukončí 100 let panování motoru s vnitřním spalováním. [1] Určitě svou část pravdy na tom měl, ale konec motorů s vnitřním spalováním ještě není jistý. Různé prameny mluvící o budoucím palivu taktéž souhlasí s vodíkem, zde se nám však nabízí dvě možné cesty řešení, jak pomocí palivových článků, což leží v hlavě většině vývojářů, tak i spalování vodíku přímo uvnitř motoru, po této cestě se vydalo např. BMW.

**Obr. 1.: Největší producenti ropy – denní produkce v tisících barelech**



**Zdroj: IEA**

**Obr. 2.: Největší spotřebitelé ropy – denní spotřeba v tisících barelech**



**Zdroj: IEA**

## **2. Cíl práce a metodika**

Cílem bakalářské práce má být popis všech možných druhů alternativních paliv a jejich výroby a způsobu získávání. Podrobnější popis je věnován již zmíněnému vodíku a palivovým článkům, které dnes představují nejkonzultovanější téma v oboru vývoje alternativních paliv. Mezi stěžejní cíle patří zjištění informací o prvním vodíkovém autobusu v ČR, který nese název TriHyBus.

V části „přehledu a popisu alternativních paliv a jejich výroby“ bylo cílem stručně popsat různé druhy alternativních paliv, ty které jsou dnes již používány, tak i ty, od kterých se již zas upouští nebo se teprve předpokládá jejich rozmach. Důležitá je i zmínka o procesu jejich výroby, jelikož tento proces spadá do uznávané analýzy Well to Wheel.

Další část práce je soustředěna čistě na vliv těchto paliv na životní prostředí, výkon motoru nebo ekonomickou situaci. V závěru práce jsem zmínil velmi povedený projekt TriHyBusu, který současně využívá 3 různé zdroje energie.

Metodika práce představovala výběr a vypůjčení vhodné literatury. Po prostudování hlavních problémů týkajících se zadaného tématu byl proveden popis všech možných alternativních paliv a jejich výroby. Ve vypracování samostatné části práce hrálo hlavní roli osobní setkání s projektantem 1. vodíkového autobusu v ČR. Závěr zachycuje mé subjektivní vnímání alternativních paliv a jejich zhodnocení.

### 3. Přehled a popis alternativních paliv a jejich výroby

#### 3.1. LPG

Dříve jsme si pod pojmem LPG mohli představit zkapalněné ropné plyny  $C_2-C_5$ . V Evropě se dnes tak označují směsi  $C_3$  a  $C_4$  uhlovodíků získané jejich zpracováním. Jedná se vlastně o vedlejší produkt při zpracování ropy nebo zemního plynu. Z toho se odvíjí dvě možné cesty výroby LPG. Buďto ze zemního plynu (zhruba 60 % celkové bilance LPG) a nebo v ropných rafinériích z primárního i sekundárního zpracování ropy. Jeho celkový potenciál je závislý na světových zásobách ropy (uvedené výše). Jako alternativní palivo ho je potřeba nějak porovnávat s ostatními palivy, k tomu poslouží energetický obsah. Energetický obsah LPG je možno vyjádřit formou ekvivalentního množství jiných paliv, což znázorňuje níže uvedená rovnice:

$$1 \text{ kg LPG} = 1,14 \text{ kg motorové nafty} = 1,3 \text{ m}^3 \text{ zemního plynu} = 10,8 \text{ kWh el. energie [9]}$$

Zkapalněné LPG je bezbarvá, snadno těkavá kapalina bez zápachu. Při velkém stlačení zmenšuje svůj objem až 260x. Kapalný se skladuje při tlaku až 1,4 MPa. Při případném nechtěném úniku se rychle vypaří do vzduchu a nedochází tak k znečištění podzemních vod. Automobil se zážehovým motorem produkuje až o 20,3 % více  $CO_2$  než vozidlo na LPG. Úspora oxidů dusíku je až 20krát vyšší oproti dieselovým motorům a až 120krát vyšší co se týče pevných částic. [8 a 16]

#### 3.1.1. Výroba LPG

##### V rámci ropných rafinériích

Vychází z destilace ropy, stabilizace benzínu, nebo z termického a katalytického krakování ropných frakcí, při kterých se uvolňují plyny obsahující uhlovodíky. Tyto plyny se nadále zpracovávají společně na jednotkách dělení rafinérských plynů. Na těchto jednotkách se různé uhlovodíkové plyny sebrané z jednotlivých procesů stlačí na tlak 1,4 MPa a následně jsou odvedeny do tzv. absorberu, ve kterém se za využití vhodné ropné frakce oddělí  $C_3-C_6$  uhlovodíky. V další části absorberu (stripovací část) se pomocí přivedení horké páry vyhání metan a etan, které odchází vrchní částí. Spodem pak odchází žádoucí směs  $C_3-C_6$  uhlovodíků (tzv. bohatý absorbent). Tato absorpční kapalina se vede do debutanizéru, ve kterém se vydestilují jen  $C_3$  a  $C_4$  uhlovodíky. Tyto plyny se ještě zkondenzují, odsíí a následně vedou do depropanizéru kde se rozdělují na propan a butany. Používají se buď

samostatně separované nebo jako směs – LPG. Celkový výtěžek bývají 2-3 % z hmotnosti zpracované ropy, kde hodně závisí na původu ropy a způsobu jejího zpracování.

### **V rámci zpracování zemního plynu**

Zemní plyn se skládá z mnoha složek, a jeho složení je vždy velmi rozdílné podle oblasti naleziště. Obsahuje kromě metanu i vyšší alkany, vodní páry, oxid uhličitý, sulfan, dusík, vodík a ve stopových množstvích i helium a neon. Ještě dříve než zemní plyn putuje do přepravního plynovodu (popř. před jeho použitím jako surovinu) se klade důraz na odstranění jeho nežádoucích složek, zejména vody, sulfanu, karbonylsulfidu, oxidu uhličitého,  $C_{2+}$  uhlovodíků a případně ještě dalších nečistot. Dnes už standardně technologické vybavení rafinerie zahrnuje zařízení na výrobu propanu,  $C_4$  frakce a  $C_{5+}$  frakce, což dříve nebyvalo a tudíž se získával jen zemní plyn určité kvality a kondenzát uhlovodíků. O již zmíněné oddělené uhlovodíky z kondenzátu je dnes stabilní vysoká poptávka, zejména pro výrobu směsi (LPG).

#### **3.1.2. Požadavky na kvalitu LPG**

Kvalita LPG pro pohon motorových vozidel musí v ČR odpovídat normě ČSN EN 589/2004. Hlavním kvalitativním parametrem LPG je odolnost vůči detonačnímu spalování, která je zachycena jako tzv. oktanové číslo. Na rozdíl od benzinových motorů, kde se oktanové číslo stanoví pomocí zkušebního motoru, se u LPG vypočítává ze samotného složení zkapalněných ropných plynů. Toto oktanové číslo obecně vypovídá o kvalitě motorového paliva během dynamických režimů (akcelerace či decelerace). Hodnoty pro jednotlivé složky LPG potřebné pro výpočet oktanového čísla jsou uvedeny v tabulce v příloze B normy ČSN EN 589. Minimální přípustné OČ je stanoveno na 89 jednotek, což je cca splněno při složení LPG z 40–60 % hm. propanu, 30–40 % hm. n-butanu a 10–20 % hm. izobutanu. [9]

Dalším parametrem, který je značně ovlivněn složením je tlak par. Je totiž velmi důležité, aby v celé plynové soustavě automobilu byl zajištěn stálý dostačující přetlak kvůli zajištění dopravy paliva do dávkovacího prvku v motorovém prostoru. Tento tlak v nádrži je určen jen tlakem nasycených par LPG a závisí jen na složení a teplotě LPG, nikoli na výšce hladiny v nádrži. Vhodného tlaku se dosahuje pomocí různých poměrů propanu a butanu, který mají rozdílné body varu. Propan má bod varu při  $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který zaručuje tlak 0,25 MPa i při venkovních  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Butan má bod varu při  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což v záporných venkovních teplotách

způsobuje menší než atmosférický tlak uvnitř nádrže. Z toho vyplývá, že se vyrábí různé směsi LPG pro jednotlivé roční období. Následující tabulka znázorňuje obvyklé složení letních a zimních směsí LPG v různých evropských zemích.

**Tab. 1: Složení LPG v zemích Evropy**

Země	Složení LPG (poměr propan/butan)	
	Letní směs	Zimní směs
Belgie	30/70	50/50
Německo	převaha propanu	převaha propanu
Finsko	propan	propan
Holandsko	30/70	70/30
Norsko	propan	propan
Rakouko	20/80	80/20
Švédsko	propan	propan

**Zdroj: [9]**

### 3.2. *Zemní plyn*

Zemní plyn lze rozdělovat podle formy uskladnění na CNG (stlačený zemní plyn) a na LNG (zkapalněný zemní plyn). Mimo metanu ( $CH_4$ ), hlavní složky, zemní plyn obsahuje také propan, butan, vyšší uhlovodíky, sirovodík,  $CO_2$  a další plyny. Samotný zemní plyn není jedovatý. Ze samotného složení lze ještě rozeznávat dva typy zemního plynu, jak **typ H** (high – vysoký energetický obsah), tak i **typ L** (low – nízký energetický obsah). Obecně má vynikající odolnost vůči klepání, jelikož jeho oktanové číslo je 130 jednotek. A proto i přes vysoký kompresní poměr (až 13 : 1) většiny zážehových motorů probíhá měkké spalování, takže hlučnost motoru je většinou nižší. Při použití zemního plynu může být zvolen vyšší stupeň přeplňování, proto je měrný výkon přeplňovaných motorů větší než u benzínových. Jelikož má zemní plyn poměrně malý obsah uhlíku, je tvorba  $CO_2$  podstatně menší než u srovnatelných fosilních paliv. Relativně malá je také produkce  $NO_x$ , tím se stává nejlepším fosilním palivem z hlediska emisí. Je komprimován do speciálních vysokotlakých nádrží na tlak 20 MPa. Jeho cenu nelze přímo srovnávat s cenou nafty za 1kg, neboť 1 kg zemního plynu má o 38 % vyšší energetický obsah než 1 litr nafty a o 47 % vyšší než litr benzínu. [1]

### **3.2.1. Získávání zemního plynu**

Zemní plyn se může rozdělovat na dva typy: naftový zemní plyn a karbonský zemní plyn. Oba dva typy se po samotné těžbě ještě musí dostatečně upravit na požadovanou kvalitu dopravního systému, aby se následně bez dalších úprav mohl spotřebovávat.

Naftový zemní plyn se většinou nachází v pórovitých horninách, kde se jako lehčí látka nastřádal během tisíců let nad vrstvami ropy nebo vody. Těžební vrty jsou vedeny přímo do pórovitých hornin a odčerpávají plyn z hloubky 3 – 8 km z pod povrchu země.

Karbonský zemní plyn se hromadil při přeměně prvohorních rostlin na černé uhlí. Buďto se přímo těží, nebo se jen odchyťává (jako tzv. degazační plyn) při těžbě uhlí.

### **3.2.2. Požadovaná jakost zemního plynu**

Tato jakost je splněna, jestliže CNG nebo LNG odpovídá české technické normě ČSN 386110, která je platná od 1. 1. 1992. Podle této normy musí zemní plyn obsahovat 85 % metanu a může obsahovat až 5 % etanu, 7 % propanu a pouze setiny procenta kyslíku. Zemní plyn dodávaný do spotřebitelské sítě musí být zbavený mechanických i kapalných nečistot. Objemová výhřevnost by měla být minimálně  $35,7 \text{ MJ}/\text{m}^3$  a zápalná teplota okolo  $540 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### **3.2.3. Současný stav CNG a LNG v dopravě**

V současné době je celosvětově poháněno zemním plynem přes 12 miliónů vozidel majících k dispozici bezmála 17 000 čerpacích stanic. Z toho je ale jen zlomek poháněn zkapalněným plynem. Proč tomu tak je? Na to snad odpoví výhody a nevýhody CNG oproti LNG.

- 1) LNG má větší hustotu energie a to má za přímý následek větší dojezd vozidel s tímto palivem
- 2) LNG má 2,5x menší objem a hmotnost nádrže, neboť nádrž na LNG může být konstruována jen na tlaky 0,8 – 1,6 MPa, zatímco nádrže na CNG potřebují vydržet tlak až 25 MPa
- 3) Doba plnění LNG nádrží je srovnatelná s běžnými fosilními palivy, oproti CNG kde potřebný čas je mnohonásobně delší
- 4) CNG se snáze uchovává, jelikož oproti LNG není potřeba velmi nízkých teplot
- 5) LNG se však bohužel samovolně odpařuje z nádrže při delší odstávce vozidla
- 6) CNG je snadno dostupný díky již vybudované infrastruktuře čerpacích stanic!!!

### 3.3. Syntetická ropa a paliva z ní vyrobené

Syntetické kapalné hmoty lze vyrobit, stejně jako několik dalších cenných chemikálií, ze zemního plynu, uhlí nebo biomasy. Výroba těchto paliv ze zemního plynu je již v technologické praxi ověřenou variantou výroby, ale využití biomasy pro tyto účely je považováno za perspektivní a v posledních letech je intenzivně zkoumáno. Zatímco se u biomasy k její konverzi na paliva můžeme dopracovat buď přímo, nebo nepřímo. U uhlí a zemního plynu se vždy jedná o cestu nepřímou. Mezi přímé metody se řadí „mžiková pyrolýza“ ze které je výstupem bio-olej. Další přímý způsob je označován HTU (Hydro Thermal Upgrading) ze kterého vystupuje bio-ropa. Nepřímý postup výroby kapalných paliv ze zemního plynu, resp. biomasy zahrnuje v prvním kroku výrobu syntézního plynu, což je vlastně směs oxidu uhelnatého a vodíku s příměsí oxidu uhličitého, metanu, vody a dusíku. Vyčištěný plyn lze pak následně použít pro výrobu motorových paliv, resp. syntetické ropy Fischer – Tropschovu syntézou a dále i pro výrobu metanolu, dimethyléru, čpavku, případně lehkých alkenů. Fischer – Tropschova syntéza se provádí za teploty 200 – 250 °C, při použití Fe nebo Co jako katalyzátorů a při tlaku 2,5 - 6 MPa. Proces výroby syntetické ropy, kdy pro výrobu syntézního plynu je použita biomasa, je označován jako BTL proces (Biomass to Liquids). Na rozdíl od procesu GTL (Gas to Liquids), při kterém se jako výchozí surovina používá zemní plyn. V následující tabulce se nachází porovnání syntetického paliva metanolu a z něj odvozeného metyl-terc.-butyléru (MTBE). [9]

**Tab. 2: Porovnání vybraných vlastností metanolu, MTBE a klasického benzínu**

Vlastnosti paliva	Metanol	MTBE	Benzin
Rel. molekulová hmotnost (g/mol)	32	88	111
Oktanové číslo (RON)	110	116	97
Oktanové číslo (MON)	92	100	86
Cetanové číslo	5	-	8
Tlak par podle Reida (kPa)	31,7	57,0	75,0
Hustota 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,79	0,74	0,75
Výhřevnost (MJ/kg)	19,8	35,2	41,3
Výhřevnost (MJ/l)	15,6	26,0	31,0
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	6,5	-	14,7
Bod varu (°C)	65	55,3	30–190

Zdroj: [9]



### **3.4. Bioetanol**

Bioetanol, jako motorové palivo, je bezvodý etylalkohol, vyrobený z přírodních obnovitelných surovin. Má vysoké oktanové číslo (107) a proto je zejména vhodné pro zážehové motory. Kvůli jeho nižší výhřevnosti, která je cca 1,6krát menší než u benzínu, je jeho spotřeba při provozu motorů vyšší. Dá se vyrobit prakticky ze všech surovin, které obsahují škrob nebo sacharosu. Jeho výroba jako motorového paliva v posledních letech velice rychle roste. Před rokem 2000 se spotřebovalo 41 % celkové produkce lihu na výrobu nápojů a kosmetiky, avšak již po jednom desetiletí se tento poměr velice snížil a v roce 2008 už na motorová paliva připadá 84 % celkové produkce lihu a 16 % se spotřebovává v odvětví kosmetiky a nápojů.

#### **3.4.1. Výroba bioetanolu**

Jedná se o tzv. fermentační způsob výroby z biomasy. To znamená působení enzymů (bílkovinných katalyzátorů) mikrobních buněk některých kvasinek, které se také nazývají kvašení. Zásadně se provádí v prostředí bez přístupu vzduchu, při čemž se provzdušňuje jen na začátku procesu pro nárůst aktivních buněk.[19]

##### **Výroba bioetanolu z obilí:**

Celková výroba je rozdělena na několik jednotlivých procesů. Prvním je mletí nebo drcení obilí, kdy se zbavujeme slupek. Dalším stupněm výroby je zcukernatění, ve kterém se působením enzymů za vyšší teploty a tlaku převede všechny obsažený škrob v obilí na zkvasitelný sacharid (převážně glukózu). Do 3. stupně výroby vstupují kvasinky, které fermentorech při teplotě 27 – 32 °C a pH 4 – 6 dávají vzniku etanolu a oxidu uhličitého, který se ale z procesu odvádí, čistí a popřípadě zkapalňuje k dalšímu prodeji. Zkvašená zápara se dále podléhá destilaci, ze které vystupuje destilát surového etanolu a destilačních zbytků. Pro použití bioetanolu jako motorového paliva se ještě dále čistí od vedlejších látek jako jsou kyseliny, aldehydy nebo ketony. Tzv. výpalky se dále zužitkovávají buď jako sušený granulát nebo pro výrobu bioplynu. Posledním procesem před dokončením výroby paliva je nutné odvodnění bioetanolu, což se provádí pomocí azeotropickou destilací, nebo s použitím molekulárních sít, anebo membránových procesů. [19]

### 3.5. Bionafta

Pojem bionafta byl zaveden pro metylestery mastných kyselin – FAME. Pod pojmem bionafta se u nás v ČR většinou schovává metylester řepkového oleje (MEŘO). Ten se používá jako palivo naftových motorů buď samotný, nebo s příměsí motorové nafty (minimálně 30 % hmotnostních), to je poté označováno jako směsná motorová nafta. Biodiesel byl poprvé použit v Jižní Africe během 2. světové války k pohonu těžkých vozidel. Metylestery jsou vhodným palivem pro vznětové motory, protože jejich viskozita a cetanové číslo jsou skoro totožné jako u běžné minerální motorové nafty. Složení konečných produktů vychází ze složení výchozího oleje. Obecně, vysoké cetanové číslo bionafty poukazuje na dobré spalování i s použitím menšího množství vzduchu, nevýhodou je však její specifický zápach při spalování. Nevýhodou je taktéž i menší energetický obsah na jednotku objemu, což má za následek vyšší spotřebu. [9 a 19]

**Tab. 3: Porovnání některých vlastností MEŘO a klasické motorové nafty**

Vlastnosti paliva	Bionafta (FAME)	Motorová nafta
Rel. molekulová hmotnost (g/mol)	~300	170–200
Cetanové číslo	~54	51
Hustota při 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	0,88	0,84
Výhřevnost (MJ/kg)	37,3	42,7
Výhřevnost (MJ/l)	32,0	35,7
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	12,3	14,53
Obsah kyslíku (% hm.)	9–11	<0,6
Kinematická viskozita při 20°C (mm <sup>2</sup> /s)	7,4	4,0
Bod vzplanutí (°C)	91-135	77

Zdroj: [9]

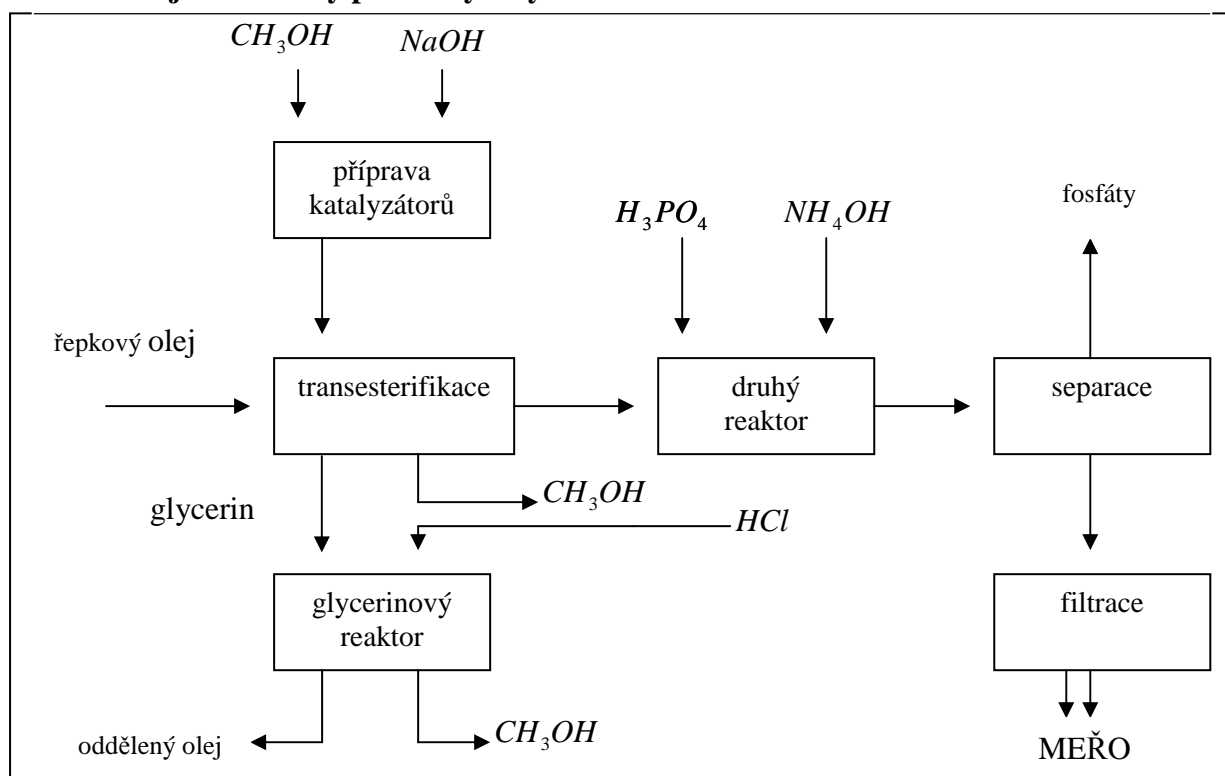
#### 3.5.1. Výroba bionafty

Výroba bionafty dnes patří již k zavedeným technologiím a usuzuje se, že už nepříjde přelomové řešení. Základem výroby je transesterifikace v surovině přítomných triglyceridů dosažená pomocí vhodného katalyzátoru. Vstupující látky jsou rostlinný olej získaný z olejnatých rostlin (sója, řepka olejná, slunečnice) nebo živočišný tuk (vepřový tuk, hovězí sádlo, rybí tuk) a metanol. V dnešní době je 80 % celkové světové produkce bionafty vyrobeno na bázi řepkového oleje. Základní reakční transesterifikační rovnice:



Během první fáze se v metanolu rozpustí použitý katalyzátor, kterým bývá hydroxid draselný nebo sodný a tato směs obou látek je převáděna do transesterifikačních reaktorů. Musí se kontrolovat obsah vody a volných mastných kyselin, jejichž velké množství je příčinou tvorby mýdel (saponifikace). Transesterifikace probíhá při 50 – 80 °C, pro zajištění takto poměrně malých pracovních teplot se přidávají výše zmíněné katalyzátory. Po této fázi následuje oddělení glycerolu od metylesterů. Protože jak bionafta, tak glycerol obsahují metanol, je dalším krokem jeho oddestilování. Oba oddělené prvky je před destilací potřeba zneutralizovat přidáním minerální kyseliny. Po odstranění metanolu je potřeba ještě bionaftu důkladně promýt teplou vodou a zbavit se tak zbytků katalyzátoru nebo mýdel a úplně nakonec zbavit vody. [9]

**Obr. 3.: Zjednodušený proces výroby MEŘO**



**Zdroj: [6]**

### 3.6. Bioplyn

Název bioplyn dnes označuje plynnou směs metanu a oxidu uhličitého, další důležitou složkou je také sirovodík ( $H_2S$ ), jehož obsah ovlivňuje korozi technologického zařízení. Kromě těchto složek se v bioplynu vyskytují amoniak, dusík, vodík a kyslík, jejichž celkový podíl se uvádí mezi 6 – 8 %. Kvalita bioplynu je určena poměrem hlavních složek, tedy metanu a oxidu uhličitého. Z ekonomického hlediska skladování je dobré se snažit o co nejvyšší podíl metanu, obecně se v literatuře uvádí jeho optimální obsah mezi 50 – 75 %. Bioplyn je produkt jen lokálního významu, používá se zejména k pohonu stacionárních motorů kogeneračních jednotek, které vyrábí teplo a elektřinu, mimo nejčastější kogeneraci se též využívá k pohonu dopravních prostředků. Ukázkovým případem je švédský vlak Linköping z roku 2006, který je poháněn pouze bioplynem. [21]

#### 3.6.1. Výroba bioplynu

Bioplyn získáváme zejména kvašením odpadků živočišné i rostlinné výroby. K vyhnívání neboli fermentaci, dochází bez přístupu vzduchu ve vlhkém prostředí a za působení metanových bakterií – metanogenů. Z vyhnívajících nádrží přibližně za 40 dní kvašení 1 kilogramu sušiny exkrementů z chovu prasat při teplotě 40 °C lze získat 0,4  $dm^3$  přírodního bioplynu. Z těchto kvasných nádrží se plyn odčerpává a skladuje v plynojemech pod tlakem 1,5 kPa. Cestou se zbavuje nežádoucích sirných složek např. oxidací na mokřích železných pilinách a případně dalšími pochody i nadbytečného obsahu  $CO_2$ , čímž se dosáhne srovnatelné výhřevnosti se zemním plynem. Při výrobě bioplynu z jiných zvířecích exkrementů jsou doby kvašení kratší (hovězí ~ 25 dní, drůbeží ~ 15 dní). Toto kvašení lze také urychlovat vyhříváním nádrží odpadním teplem motoru. [3]

**Tab. 4: Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti bioplynu**

Parametr	Rozměr	Druh bioplynu		
		Skládkový plyn (Dolní Chabry)	Bioplyn z ČOV	Bioplyn (60% $CH_4$ , 38% $CO_2$ , 2% ost.)
Hustota	( $kg/Nm^3$ )	1,18	1,12	1,21
Hutnost (vzduch = 1)		0,913	0,866	
Spalné teplo	( $MJ/Nm^3$ )	24,7	26,6	
Výhřevnost <sup>1)</sup>	( $MJ/Nm^3$ )	22,2	23,9	21,5
Max. rychlost hoření	(m/s)			0,25
Rosný bod	(°C)			60–160
Teor. spotřeba pro spal. • kyslík • vzduch	( $m^3/m^3$ )	1,24 5,90	1,32 6,27	5,71

Zdroj: [9]

### **3.7. Vodík**

Vodíku jako palivu přikládám v mé bakalářské práci velký význam a prostor, neboť není pochyb, že se jedná o palivo budoucnosti. Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a třetím nejrozšířenějším prvkem na Zemi, hned po kyslíku a křemíku. Je to bezbarvý plyn, bez chuti, bez zápachu, není jedovatý. Je lehčí než vzduch, při případném úniku je jen minimální riziko exploze, neboť ihned uniká do atmosféry. Byl objeven již v 18. století. Jeho největší výhodou je výrazné snížení emisí (oproti benzínu jsou všechny jeho emisní prvky sníženy o 99 %) a velká výhřevnost na kilogram vodíku (v přepočtu na hmotnost je dokonce nejvyšší).

Pro pohon pozemní dopravy se bude ubírat dvěma směry: buď přímým spalováním v pístových spalovacích motorech, nebo může sloužit jako nosič energie do palivových článků, které následně vyrobí elektrickou energii. [8]

#### **3.7.1. Výroba vodíku**

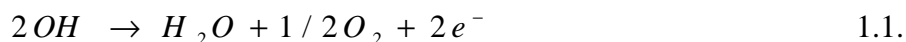
Prakticky nevyčerpatelné zásoby vodíku jsou ve vodě, ze které se vyrábí elektrolýzou. Významně je zastoupen i ve fosilních palivech, ze kterých se dostává pomocí parním reformováním a parciální oxidací zemního plynu. Za perspektivní surovinu pro výrobu vodíku je považována i biomasa. Ekonomika jednotlivých způsobů výroby se značně liší a obecně se dá říci, že náklady na výrobu jsou hlavní překážkou v rozšíření vodíku jako paliva. V současné době se za nejvýhodnější způsob výroby považuje parní reformování zemního plynu, kterým se vyrábí cca 44 % celkové produkce vodíku. [9]

Při parním reformingu dostaneme z jednoho kubíku zemního plynu tři kubíky vodíku. Vedlejším produktem je ale  $CO_2$ , což tuto metodu značně diskriminuje. Očekává se, že se v budoucnu vodík bude vyrábět elektrolýzou vody. Kde je obrovskou výhodou, že spalováním vodíku vzniká zpět vodní pára, takže vlastně půjde o uzavřený cyklus. [5]

##### **3.7.1.1. Elektrolýza vody**

Zde dochází k disociaci vody účinkem elektrického stejnosměrného proudu, který prochází dvěma kovovými elektrodami ponořenými do elektrolytu (vody). Potřebujeme zde napětí minimálně 1,24 V při teplotě 25 °C a tlaku 0,1 MPa. Výsledkem tohoto rozkladu vody jsou ionty  $H^+$  a  $OH^-$ , které jsou přitahovány k opačně nabitým elektrodám.

Záporně nabité ionty  $OH^-$  směřují k anodě (kladně nabité elektrodě), kde oxidují podle rovnice 1.1.



Vodíkové protony  $H^+$  putují k záporné elektrodě, katodě, kde se redukují podle rovnice 1.2.

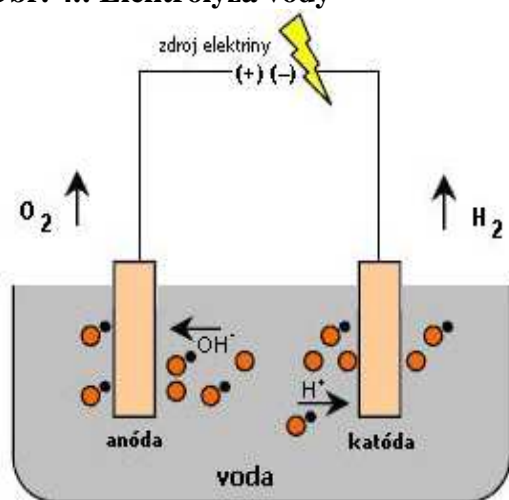


Souhrnně se tedy může elektrolýza označovat jako rozklad určitého množství vody elektrickým proudem na plynný vodík a plynný kyslík podle rovnice 1.3.



Výrobu vodíku touto elektrolýzou lze také provádět za použití elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů (solární, větrné nebo vodní energie) a tak snížit velmi konzultované náklady. [9]

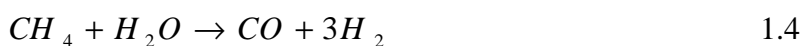
**Obr. 4.: Elektrolýza vody**



**Zdroj:** [17]

### 3.7.1.2. Parní reformování

Jak jsem již zmiňoval, jedná se o zatím hlavní způsob výroby vodíků. Z pohledu složení uhlovodíkových sloučenin je pro výrobu vodíku nejvhodnější zemní plyn, a to díky jeho hlavní složce metanu, který obsahuje ze všech uhlovodíků nejvíce vázaného vodíku. Navíc, při parním reformingu vznikají z jednoho objemu metanu tři objemy vodíku, ale přitom 1/3 vodíku pochází z obnovitelného zdroje (vody), což je jedna z hlavních výhod. Vše dostatečně znázorňuje reakce 1.4.



Při parním reformování zemního plynu probíhají dvě konkurenční reakce. Při teplotě vyšší než 800 °C dominantně probíhá endotermní reakce (1.4). Při teplotě nižší než 550 °C reaguje vzniklý oxid uhelnatý s vodní parou exotermně podle rovnice 1.5



Je nutno říci, že pro konverzi zemního plynu na plyn bohatý vodíkem přichází v úvahu také pyrolýza metanu na uhlík a vodík. Tato reakce je pro výrobu čistého vodíku neobyčejně výhodná, jelikož probíhá za nepřítomnosti kyslíku a tak nevznikají žádné oxidy uhlíku, proto odpadá velmi nákladné čištění výsledného produktu. Vedlejším produktem jsou akorát saze, které jsou cenné pro další odvětví průmyslu. Tato pyrolýza metanu za nízkých teplot se však v poslední době teprve začíná laboratorně studovat. [9]

### **3.7.1.3. Parciální oxidace ropných frakcí**

Jedná se o poměrně rozšířený způsob výroby syntézního plynu (více v kapitole 3.3) a vodíku. Vstupující prvky mohou být použity kapalné i plynné suroviny z primárního nebo sekundárního zpracování ropy, nejčastěji se však zplyňují těžké ropné frakce (mazuty, asfalty), které se těžko prodávají dále. Proces zplyňování vodní parou nebo čistým kyslíkem probíhá při tlaku 3 – 8 MPa a za poměrně vysokých teplot v rozmezí 1300 – 1500 °C. Mezi hlavní výhodu tohoto nekatalytického procesu lze uvést, že je možno zpracovávat těžké suroviny, které nelze odpařit, a že dochází k úplné destrukci vazby C-C. Má však jednu velkou nevýhodu – k provedení procesu je potřeba mít kyslík o čistotě 95 – 99 %, který se získává nákladnou destilací vzduchu, což velmi znevýhodňuje ekonomickou stránku tohoto jinak efektivního způsobu výroby. [2]

### **3.7.1.4. Zplyňování uhlí**

Jedná se o podobný způsob výroby vodíku jako výše zmíněná parciální oxidace ropných zbytků. Nejdříve se zplyněním uhlí kyslíkem vyrobí syntézní plyn. Existují čtyři typy zplyňovacích generátorů (s pevným, pohyblivým, fluidním nebo unášeným ložem pevné fáze). K výrobě vodíku se nejvíce používá generátor s unášeným ložem pevné části, neboť je vhodný pro více druhů uhlí. Proces probíhá za vysokých teplot, okolo 1300 °C, a za krátkých reakčních časů. Horký syntézní plyn se ochladí a filtrací se odstraní popel a pevné částice. Dále se ještě zbavuje chlorných sloučenin v tzv. pračce. Poté je v plynu obsažený CO konvertován vodní parou a vyrobený vodík je oddělen. Tato technologie je poměrně osvědčenou metodou, ale výrobní cena vodíku je vyšší než u vodíku vyráběného parním reformováním zemního plynu. [9]

### 3.7.1.5. Zplyňování biomasy

Základem výroby vodíku termochemickou konverzí biomasy je její zplynění, které již bylo popsáno jako proces BTL (v kapitole 3.3) při výrobě syntetických paliv. Postupy jsou odlišné jen v reakčních podmínkách, nebo se také může lišit předúpravou biomasy, což se provádí buď sušením, nebo pyrolýzou. Proces zplynění lze provádět při vysokých, středních nebo nízkých teplotách.

Při výrobě vodíku je následný syntézní plyn potřeba dále upravit. Nejdříve je vždy potřeba zvýšit obsah vodíku reakcí vodního plynu, tj. reakcí synplynu s vodní parou za vzniku vodíku a  $CO_2$ . A pokud jsou obsaženy uhlovodíky  $C_1 - C_4$ , je potřeba je konvertovat parciální oxidací nebo parním reformováním na  $H_2$  a CO.

Při vysokých teplotách ( $\geq 1250^\circ C$ ) zplynění je biomasa kompletně konvertována na syntézní plyn ( $H_2, CO, CO_2, H_2O$ ). Při nižší teplotě zplynění ( $750-950^\circ C$ ) probíhá nižší konverze uhlíku a výsledným produktem je směs synplynu a  $C_1 - C_4$  uhlovodíků. Potřebné teplo pro zplynění biomasy je v obou případech získáváno neúplným spálováním části surovin. Nízkoteplotní zplynění biomasy ( $500 - 700^\circ C$ ) probíhá za přítomnosti vody při tlaku 20 – 40 MPa. Tento proces je vhodný pro zpracování mokré biomasy. [9]

### 3.7.2. Vodíkové hospodářství

Hned na úvod by se mělo říci, že v současné době vodík není klasické palivo, ale nosič energie. V praxi to znamená, že jej nelze levně a energeticky efektivně těžít (už proto, že se vodík v elementární formě na zemi prakticky nevyskytuje) a využívat k produkci primární energie, ale naopak jej musíme pracně a s nemalými ztrátami energie vyrábět. Nejperspektivnější využití vodíku je pravděpodobně doprava. Nalezení alternativního konceptu ke spalování fosilních paliv je motivováno více požadavky, a to zejména snížit produkci látek poškozující zdraví člověka a životní prostředí a snížit závislost na dodávkách ropy z politicky nestabilních oblastí. K vyhovění těmto požadavkům lze postupovat dvěma cestami, buďto přes přímé spalování vodíku ve spalovacích motorech, nebo přes technologii palivového článku, který je zdrojem elektrické energie, pro dnes již vyspělý elektrický pohon. Obě dvě tyto možnosti řešení důkladně popíši a vysvětlím v následujících kapitolách. [10]

### 3.7.3. Palivový článek

Principem palivového článku je přeměna obsažené energie v palivu (ve vodíku) přímo na elektrický proud. Už v roce 1839 anglický fyzik Sir William Grove sestrojil první palivový článek, ten však v té době byl považován spíše za kuriozitu. Zájem a nadšení z této



technologie oživil až v polovině 20. století anglický vědec Francis Thomas Bacon, který se svými spolupracovníky vytvořil 5 kW alkalický článek schopný pohonu svářečského stroje. Další vývoj šel přes vesmírné odvětví, kde palivový článek sloužil jako zdroj elektrické energie pro palubní účely a také jako zdroj pitné vody. V dnešní době už každá větší automobilka vlastní svůj prototyp automobilu s palivovými články. Můžeme tedy tvrdit, že se jedná o poměrně vyspělou technologii.

Palivový článek může být sestaven z různých materiálů elektrod i elektrolytu (nejčastěji se jedná o elektrody se slabou vrstvou uhlíku obsahující malé množství platiny jako katalyzátoru). Tyto různé pracovní materiály určují i jeho pracovní teploty. Dnes jsou palivové články vyvíjeny v rozsahu teploty od okolního prostředí až po 1000 °C. [4]

Tím, že v palivových článcích dochází k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou, se mohou zdát podobné článkům primárním či sekundárním (bateriím). Jsou tady však značné rozdíly. Základním je, že aktivní chemické látky jsou v případě palivového článku přiváděny průběžně z vnějšku, zatímco u baterií jsou součástí anody nebo katody. U palivového článku obě elektrody působí výhradně jako katalyzátor chemických přeměn a během činnosti článku se neopotřebovávají ani nemění své chemické složení. Pokud se zajistí trvalý přívod aktivních látek, může pracovat neustále a odpadá zde pojem „kapacita článku“.

Princi činnosti je jednoduchý. Na zápornou elektrodu, které se říká palivová (anoda) se přivádí aktivní látka (palivo). Ta zde oxiduje, její atomy se zbavují jednoho nebo více elektronů z valenční vrstvy – tyto uvolněné elektrony se pohybují vnějším obvodem ke kladné elektrodě (katodě) a tím představují elektrický proud. Na kladné elektrodě kam se přivádí okysličovadlo, naopak probíhá redukce. Atomy okysličovadla přijímají volné elektrony, za současné reakce s kladnými ionty, které k ní pronikají elektrolytem. Pokud se vnější obvod zátěží přeruší, probíhající chemické reakce se z důvodu nedostatku elektronů okamžitě zastaví. [1]

V palivovém článku je chemická energie měněna, bez termického expanzního procesu, v elektrickou energii (tzv. studené spalování). Plynné palivo např. plynný vodík a rovněž plynný oxidační prostředek např. kyslík jsou přiváděny k elektrodám opatřeným katalyzátorem. Mezi oběma elektrodami se nachází elektrolyt např. ze speciální polymerové fólie v kyselém nebo alkalickém roztoku. Jehož úkolem je zabránit přímému styku obou plynů. Elektrolyt je izolační vrstva sloužící o to, aby byly elektrony vyměňovány jen přes vnější proudový okruh. Tak vzniká rozdíl elektrického napětí mezi oběma elektrodami, které je v případě palivového článku vodík-kyslík asi 1,23 V. To vede – v případě kyselého roztoku

nebo folie polymeru jako elektrolytu – za pomoci platinového katalyzátoru k následující anodové reakci: molekuly vodíku tvoří ze dvou kladně nabitých iontů vodíku dva elektrony na elektrodě.



Tyto  $H^+$  ionty jsou v poloze, kdy difundují elektrolytem ke katodě. a elektrony procházejí cestou přes vnější proudový okruh. Na katodě reagují  $H^+$  ionty s elektrony a kyslíkem za vzniku vody.



V případě alkalického elektrolytu se na katodě tvoří ionty hydroxidu,

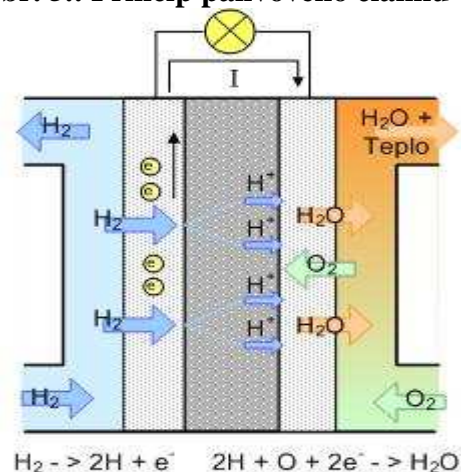


kteřé putují elektrolytem k anodě. Tam vytváří vodu



Také v tomto případě proudí elektrony přes vnější proudový obvod od anody ke katodě. Bude-li přívod produktů ukončen nebo vnější proudový okruh přerušen, reakce skončí. Technologie palivových článků je v dnešní době velmi vyspělá. V současné době rozeznáváme následujících pět typů palivových článků, které se dělí především podle typu elektrolytu. [1]

**Obr. 5.: Princip palivového článku**



Zdroj: [10]

### 3.7.3.1. Alkalický palivový článek (AFC)

Alkalické palivové články jsou nejlépe prozkoumané a nejvíce používané typy. Elektrolytem zpravidla bývá hydroxid draselný (KOH). Pro palivové články pracující při teplotách okolo 250 °C se používá 85% roztok KOH a pro články pracující v nižších teplotách (<120 °C) je použit 35 – 50% roztok hydroxidu draselného. Elektrolyt je udržován v porézním materiálu, kterým je ve většině případů azbest. Jako palivo je použit čistý vodík a jako redukční prostředek smí být použit pouze čistý kyslík, neboť ve vzduchu obsažený oxid uhličitý by s KOH tvořil karbonát ( $K_2CO_3$ ), který by se usazoval na elektrodách a bránil tak difúzi. Největším problémem u této technologie je tedy potřeba čistoty reakčních plynů (vodík, kyslík), což se v praxi velmi prodražuje. Alkalické články se osvědčil i v kosmickém výzkumu (na projektech Gemini, Apollo). Mají totiž energetický výnos a k tomu ještě značné množství vody, která je vedlejším produktem a lze ji dobře recyklovat. [10]

### 3.7.3.2. Palivový článek polymer – elektrolyt (PEMFC)

První palivový článek s polymerní membránou byl vyroben v roce 1963 společností General Motors pro vesmírný projekt Gemini. Modul pro Gemini měl výkon 1kW při 25 V a obsahoval 32 článků, pracoval s čistým vodíkem a kyslíkem za tlaku 140 – 200 kPa.

Jako elektrolyt u dnešních PEMFC slouží iontoměničová polymerní membrána (většinou na bázi kyselých fluorovaných polymerů), která je výborným protonovým vodičem. Membrány v PEMFC snadno propouštějí ionty  $H^+$ , ale jsou nepřekonatelnou bariérou pro průnik reakčních plynů. Je však zjištěna jedna podstatná nevýhoda a to, že membrána propouští vlivem elektroosmotického tlaku i molekuly vody. Při 100 °C s každým protonem  $H^+$  pronikají přes membránu až 4 molekuly vody, proto se musí dodržovat tzv. vodní režim. Podmínky musejí být nastaveny tak, aby se voda neodpařovala rychleji, než se produkuje, jinak by se anodová strana membrány dehydrovala, čímž se snižuje protonová vodivost a tím i výkon článku. Řešení nabízí např. vlhčení vodíku přiváděného k anodě. Voda produkovaná u katody musí být odváděna tak rychle, aby se zabránilo zatopení katody.

Operační teplota je limitována použitým polymerem, většinou je nižší než 120 °C. Nízká reakční teplota se kompenzuje zvýšenými dávkami platiny jak u anody, tak i u katody. Díky svým charakteristickým vlastnostem lze tento typ, jako jediný, využívat pro pohon automobilů. Výhodou také je, že jedinou kapalinou v článku je produkovaná voda, čímž odpadají problémy s korozí. Účinnost konverze chemické energie vodíku na elektrickou

energii se obvykle pohybuje okolo 59 %. Přiváděný vodík musí být čistý, nesmí obsahovat žádné CO, který by na platinu v elektrodách působil jako katalytický jed. [9]

### 3.7.3.3. Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Tyto palivové články obsahují vysoce koncentrovanou kyselinu fosforečnou, podobě v gelu v pletivu teflonu vázaného karbidem křemíku. Požadavky na reakční plyny jsou podstatně menší než u zatím dvou zmiňovaných typů, jelikož daný elektrolyt nereaguje s oxidem uhličitým. Jako palivo může být použit zemní plyn nebo metanol. Předřazený reformek rozkládá tyto výchozí látky v několika krocích v teplotním rozmezí 220 – 850 °C a tím zvyšuje obsah vodíku cca na 75 %. Na straně katody proudí normální vnější vzduch a elektrodový katalyzátor je platina jako u předešlých typů.

Pracovní teplota článku s kyselinou fosforečnou je okolo 200 °C. Na základě této poměrně vysoké teploty se tyto články hodí pro tepelné ohřívací zařízení, nikterak pro pohon elektrovozidel, neboť požadovaná teplota (200 °C) je pro studené starty velmi nevýhodná. Dokonce teplota nesmí klesnout pod 45 °C, kdy kyselina fosforečná začíná tuhnout a mohla by poškodit svazek. Elektrická účinnost se pohybuje okolo 40 % a to i při současné termické účinnosti dosahující k 45 °C. Energie shromážděna v zemním plynu je tímto způsobem výborně využita. [1]

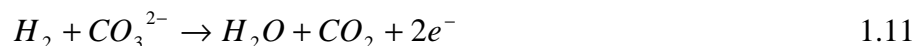
### 3.7.3.4. Palivové články (MCFC)

V názvu MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) se skrývá český název „palivové články s roztaveným karbonátovým elektrolytem“. Elektrolytem u těchto palivových článků je roztavená směs alkalických uhličitů, obvykle  $LiCO_3$  a  $K_2CO_3$ . Tavenina těchto uhličitů je mezi elektrodami zachycena v porézní, keramické matraci. Pracovní teplota MCFC je mezi 600 – 700 °C, kdy alkalické karbonáty tvoří dobře vodivou taveninu, ve které elektrický náboj přenášejí karbonátové ionty  $CO_3^{2-}$ . Díky vysokým pracovním teplotám, které zaručují dostatečnou rychlost elektrodových reakcí, není potřeba používat jako katalyzátory vzácné, drahé kovy. Anody se obvykle zhotovují z porézního niklu a katody z oxidu nikelnatého (NiO) s příměsí Lithia.

Z chemické podstaty elektrolytu MCFC vyplývá, že provozu článku samozřejmě nevádí přítomnost  $CO_2$ . Naopak je nutné, aby na katodu byl přiváděn současně s kyslíkem i oxid uhličitý, ze kterého se elektrochemicky generují ionty  $CO_3^{2-}$ , který přenášejí v elektrolytu elektrický náboj, znázorněné v rovnici 1.10



a vodík přiváděn do anody pak s těmito karbonátovými ionty reaguje podle reakce 1.11:

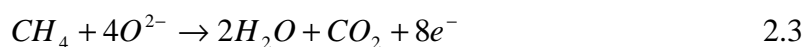


Při tom se uvolňují dva elektrony do vnějšího obvodu článku. Vzniklý  $CO_2$  se z odfukovaného anodového plynu odděluje a recykluje se zpět do proudu oxidovadla přiváděného ke katodě. Hlavními přednostmi těchto článků jsou necitlivost k oxidu uhlíku, relativně levný materiál elektrod a vysoká pracovní teplota. Nevýhodou je však problém s ochranou proti korozi. [9]

### 3.7.3.5. Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC)

Tento typ je výjimečný tím, že jeho elektrolyt je pevný. Elektrolytem nejčastěji bývá tuhá směs oxidů yttria a zirkonu. Má to své výhody (nezpůsobuje korozi, dobrá manipulace) Avšak přiměřené vodivosti lze dosáhnout až při teplotě 1000 °C. Proto nemusí být používán katalyzátor a jako palivo nemusí být použit jen čistý vodík.

Anoda sestává z niklu a oxidu zirkoničitého (s přísadou chromu), jedná se o látky, které zabraňují spékání částic niklu. Poréznost anodoy se pohybuje mezi 20 – 40 %. Katoda má také porézní strukturu a skládá se ze slitiny lanthanu a oxidu manganového dopovaného menším množstvím stroncia. Palivem jsou obvyklé plynné látky získané zpracováním uhlí, které mohou obsahovat jak čistý vodík  $H_2$ , oxid uhelnatý  $CO$ , tak i metan  $CH_4$ . Na anodě pak dochází k reakcím mezi těmito složkami a dvojmocnými anionty kyslíku, podle následujících rovnic (2.1, 2.2, 2.3, 2.4):



na katodě pak anionty kyslíku vznikají podle rovnice



Tyto palivové články z tuhých oxidů dodávají vysoké hustoty proudu jako palivové články z roztavených uhličitanů, avšak mají menší odpor elektrolytu.

Podnik BMW zkouší zavedení této technologie palivových článků pro napájení proudem palubních přístrojů. To však zatím troskotá na poměrně dlouhém zahřátí na provozní teplotu, kdy se pro ohřátí spotřebují dva litry benzínu. Pro praktické zavedení je proto ještě další optimalizace. [1]

### **3.7.4. Bipolární svazky palivových článků**

Většina palivových článků nemá dostatečné napětí pro pohon, který dnes bývá až několik set potřebných voltů. Proto musí být určitý počet článků zapojen do série ve svazku. Tyto svazky se poté řadí do série nebo paralelně, podle potřeby hnacího systému. Vzájemným bipolárním řazením palivových článků vznikne svazek. Jednotlivé články v sérii jsou spojeny bipolárními deskami.

#### **Bipolární desky:**

Nachází se mezi jednotlivými složenými svazky. Plní více funkcí:

- umožňují elektrický kontakt mezi články a vedou proud
- rozděluje plyn do článků a uvnitř článků, kde jsou na zadní straně porézní elektrody vytvořeny kanály, které odvádí produkovanou vodu
- ve vnitřku se nachází chladicí kanálky vyplněné kapalinou, která odvádí teplo
- plynotěsně odděluje články

Hmotnost těchto desek ovlivňuje výkonovou hustotu (kW / kg) jednoho svazku. U palivových článků polymer-elektrolyt se obvykle vyrábí z grafitu. Tento materiál neoxiduje a nevznikají žádné napěťové ztráty na kontaktních plochách. Oddělovací desky svazku nemohou být v žádném případě položeny jako bipolární. V případě monopolárního uspořádání není proud veden od jednoho článku přímo k druhému, ale je odváděn na kraj desek, kde je sbírán příslušným sběracím zařízením. Výhodou je, že v případě poruchy se nefunkční článek jednoduše přemostí a svazek je dále funkční. [1 a 4]

### **3.7.5. Systém pohonu palivovými články**

Hlavním rozdílem mezi akumulátorem a palivovým článkem je, že u článku odpadá funkce zásobníku energie. Tudiž je palivový článek jen měničem a výkonová hustota se mění přímo s výkonem soustavy, proto má množství přivedeného paliva do svazku obrovský význam. Svazek palivových článků ještě potřebuje vedlejší systémy, které umožní jeho provoz. Máme na mysli systém chlazení vzduchu nebo vlhčení plynu. Hlavním komponentem hnacího ústrojí je elektromotor a příslušná elektronika. Všechny tyto hlavní i vedlejší „spotřebiče“ způsobují ve výkonové bilanci ztráty. Ale i přesto se zdají být palivové články nadějným zařízením do budoucna. [4]

### **3.7.6. Přímé spalování vodíku**

Vodík lze využít nejen skrz palivové články, ale je možné ho i přímo spalovat podobně jako fosilní paliva. Při spalování vodíku je konečným produktem jen voda a minimální množství dusíku vázaného v oxidech. V roce 1970 si nechal Paul Dieges patentovat úpravu běžných spalovacích motorů tak, aby mohly spalovat vodík. Přestavba na spalování vodíku už musí být v primárním sektoru, nelze tak přestavovat současný agregát na fosilní paliva co je již v provozu. Vodík hoří velmi rychlou řetězovou reakcí a díky vysoké výhřevnosti je jeho plamen velmi stálý i při spalování chudé směsi. Mezi výhody se řadí i výborná zápalnost vodíkovzdušných par z pohledu spotřeby měrné energie. Výborná zápalnost par sice vede k nebezpečí zpětnému zášlehu plamene do sání nebo k zapálení směsi cirkulujícími spaliny uvnitř motoru, ale tyto rizika se v současné době už podařilo vymeziť. Nevýhodou je však jeho malá výhřevnost, která je dána nízkou hustotou prvku. Proto se často požaduje přeplňování a při použití chudé směsi vstřík do válce až koncem sacího zdvihu.

Automobilka BMW, která se jako jedna z mála vydala po cestě přímého spalování vodíku v motorech, uvedla na trh již několik vozů s touto technologií. Nejkonzultovanější byl v roce 2005 model BMW Hydrogen 7. [10]

#### **3.7.6.1. BMW Hydrogen 7**

Tento projekt má pod vedením Clear Energy od BMW. Jedná se o automobil s hybridním pohonem spalující jak benzín, tak i vodík. Vývojáři vypracovali kompletní prostředí HIL pro hybridní pohony. Kombinace spalovacího motoru a kapalného vodíku se jeví jako velmi efektivní z pohledu dynamiky, spolehlivosti, dojezdu i výrobních nákladů. BMW Hydrogen 7 má pod kapotou dvanáctiválcový spalovací motor do písmene V o objemu  $5972 \text{ cm}^3$  s dvojitým palivovým systémem a celkový výkon dosahuje 190 kW. Proměnné sání a nastavitelné vačkové hřídele pro sání a výfuk na obou blocích motoru umožňují využít bezklapkové plnění válců valvetronic. Směs vodíku jako paliva je připravována mimo válec, zatímco při chodu na benzín je palivo vstříkováno přímo do válce. Vodík je skladován v nádržích o objemu 168 litrů v kapalném stavu a během cesty ke vstříkovacím ventilům je zahříván a přechází tak do plynného stavu. Objem nádrže na benzín postačí na dojezd 500 km, který tak eliminuje nedostatky malé hustoty čerpacích vodíkových stanic. Na vodík vozidlo ujede cca 200 km. Vodíková nádrž je sice ochlazována, ale i přesto teplo z okolí ovlivňuje tlak v nádrži během jízdy. Konstantní tlak se udržuje pomocí odpařování vodíku, celý tento

system je řízen kontrolérem nádrže Clear Energy. Při dosáhnutí kritických hodnot je řidič ihned informován. System řízení motoru je tvořen ze dvou kontrolérů a každý z nich řídí a ovládá jeden blok motoru. Kontroléry jsou propojeny s ostatními ve vozidle, aby vše fungovalo tak jak má. Maximální rychlost je 230 km/h a rychlost 100 km/h nabere za 9,5 s. Automobil jako takový je neprodejný, avšak ve speciálním programu BMW si ho můžeme zapůjčit do pronájmu a veřejně používat. [11]

## **4. Aspekty využití alternativních paliv v dopravě**

### **4.1. Vliv alternativních paliv na životní prostředí**

Alternativní paliva se vyvíjí hlavně kvůli nedostatku fosilních paliv v budoucnu, a také aby se snižovaly emise výfukových plynů, které mají negativní dopad na životní prostředí. Vyčerpávání kvalitních druhů fosilních paliv, má za následek snahu používat jejich ušlechtilé druhy s vyšším obsahem škodlivých látek. Různé výzkumy potvrdily neustále se zvyšující koncentraci oxidu uhličitého v ovzduší. Za posledních 1000 let do začátku 20. století se množství  $CO_2$  v ovzduší pohyboval mezi 0,027 – 0,029 % obj., avšak za poslední století, po strmém růstu, už dosáhla hodnoty 0,037 % obj. [20]

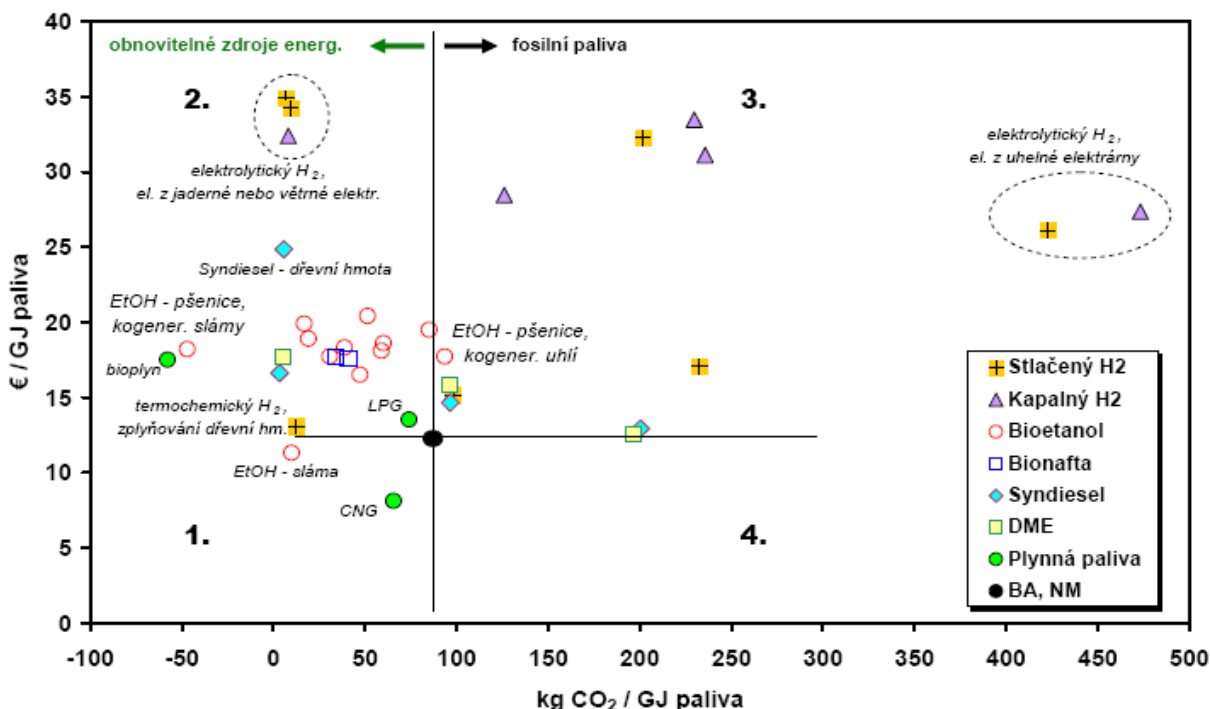
Při posuzování ekologické výhodnosti je nutno hodnotit celý proces paliva až po jeho spotřebu, zahrnující jak výrobu, distribuci tak i finální spotřebu uživatelem. Natolik objektivní analýza potom může s určitostí poukázat na celkovou neefektivitu paliva, i když jeho vlastní spotřeba ve stroji se zdá být velmi výhodná. Máme na mysli vodík, který zatím lidstvo neumí vyrobit energeticky šetrně. Tyto celkové analýzy vlivu paliva na životní prostředí se nazývají LCA (Life Cycle Assessment), jsou to analýzy velmi složité, neboť potřebují vstupní data z mnoha odvětví. Za současně nejlepší LCA analýzu se považuje tzv. Well to Wheel analýza („od zdroje na kola“), která se dělí na dvě části. Část Well to Tank („od zdroje do nádrže“) se věnuje energetické náročnosti a skleníkovým plynům tvořeným ještě před konečnou spotřebou. Druhá část tzv. Tank to Wheel („z nádrže na kola“) pak zohledňuje samotnou spotřebu paliva v automobilu z pohledu tvorby škodlivin. [9]

Existuje mnoho vytvořených grafů, ze kterých vyplývá jaké palivo je nejvýhodnější z pohledu emisí  $CO_2$  či NO, nebo jaké palivo lze vyrábět nejlevněji, existují i grafy znázorňující efektivitu celkového procesu výroby a distribuce paliva. Je toho již mnoho, ale podle mého je nejpřehlednější, a bohatě dostačující graf 4.1, ze kterého vyplývá značná finanční náročnost úspory skleníkových plynů v porovnání s klasickými kapalnými palivy na ropné bázi. Zmíněný graf je rozdělen do 4 kvadrantů, kde nejideálnější se jeví 1. kvadrant



zahrnující paliva s nižší produkcí škodlivých plynů a zároveň nižší výrobní cenou než u běžných fosilních paliv. Do 1. kvadrantu v současné době spadá jen velmi malé procento alternativních paliv, najdeme zde zatím jen zemní plyn, bioetanol z odpadní slámy a vodík vyrobený termochemickým zplyňováním dřevní hmoty. S nevyhnutelným zvýšením ceny ropy se však vodorovná osa křížce bude posouvat směrem nahoru a do prvního kvadrantu se tak přesunou i další kapalná i plynná paliva (bionafta, syntetická ropa...) Ve střednědobém horizontu reálného použití se pravděpodobně nedá počítat s elektrolytickou výrobou vodíku. [1]

**Obr. 6.: Porovnání výrobní ceny paliv a emisí  $CO_2$  (cena ropy 60 USD/barel)**



Zdroj: [9]

#### 4.1.1. Stručný přehled škodlivých emisí

##### Oxid uhelnatý ( $CO$ )

Je škodlivý plyn, který vzniká nedokonalým spalováním v motoru. Negativně ovlivňuje orgány závislé na přísunu kyslíku, neboť blokuje právě přístup kyslíku ke tkáním. Pro otravu tímto plynem jsou charakteristické bolesti hlavy, malátnost a závratě. Jsou známy případy, kdy při vysoké koncentraci došlo k usmrcení osoby.

##### Oxid uhličitý ( $CO_2$ )

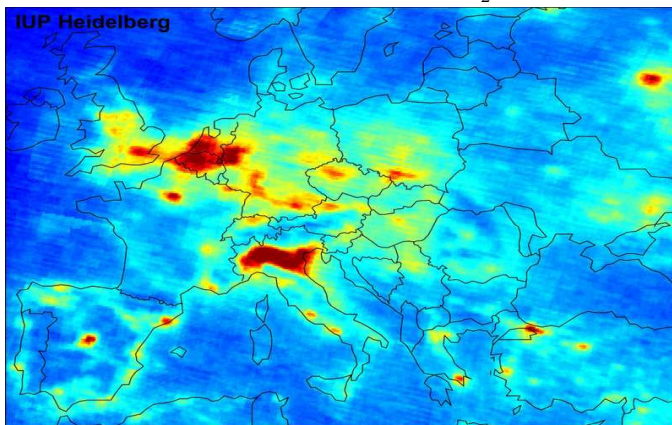
Ten plyn je zdraví neškodlivý, ale považuje se za jeden z hlavních skleníkových plynů. Skleníkový efekt má podle vědců za následek globální oteplování planety. Současné oteplování planety se stabilně zvyšuje o 0,1 – 0,4 °C za 10 let.

## Oxidy dusíku ( $NO_x$ )

Až 55 % celkové produkce  $NO_x$  vychází ze sektoru dopravy. Jeho vznik je způsoben obsahem dusíku ve vzduchu, který se účastní procesu spalování v motoru. Dusík je sice biogenní prvek, což znamená, že v přiměřeném množství je nezbytný pro růst rostlin, do půd se dokonce přidává v podobách hnojiv. Oxidy dusíku  $NO$  a  $NO_2$  jsou však ve vyšších koncentracích škodlivé i rostlinám. Oxid dusičitý ( $NO_2$ ) společně s oxidy síry tvoří tzv. kyselé deště, které okyselují vodní plochy a škodí vegetaci.

Oxidy dusíku na zdraví člověka působí až ve vyšších koncentracích, které se v ovzduší běžně nevyskytují. Při běžných koncentracích způsobují maximálně mírné záněty průdušek a plic. Negativněji na člověka působí samotný oxid dusičitý ( $NO_2$ ) jako dráždivý plyn, který je z 80 – 90 % pohlcován hlenem dýchacích cest. [6]

**Obr. 7: Rozložení koncentrace  $NO_2$  v ovzduší nad Evropou**



**Zdroj: [13]**

## Oxid siřičitý ( $SO_2$ )

Jako zdroj oxidu siřičitého lze uvést spalování paliv s obsahem síry nebo únik tohoto oxidu z průmyslu. V automobilových emisích je obsaženo jen malé množství oxidu siřičitého. Avšak lidstvo spotřebovává velká množství různých paliv obsahující síru, například při výrobě elektrické energie, ropy, tepelné energie. Velké množství oxidu siřičitého je používáno při výrobě kyseliny sírové, kde hrozí jeho únik.

Po kontaktu s oxidem siřičitým dochází u exponované osoby k následujícím projevům

- dráždění a poškození očí
- poškození dýchacích orgánů
- při velmi vysokých koncentracích se tvoří voda na plicích (edém) [14]

## **Těkavé organické látky (VOCs)**

„Těkavé organické látky“ bývají synonymem pro častěji používané uhlovodíky ( $C_xH_y$ ).

Při dokonalém spalování uhlovodíkových paliv (benzin, nafta) by vznikal jen oxid uhličitý a voda. Tohoto spalování není v běžných reálných podmínkách možno dosáhnout. a při nedokonalém spalování je ve spalinách obsažen oxid uhelnatý, vodík a také nespálené uhlovodíky. Benzinové motory vylučují mnohem větší množství těchto látek než vznětové motory odpovídajícího výkonu.

Za nejvíce škodlivý uhlovodík je považován toxický benzen, kterého absorbujeme až 50 % z vdechovaného vzduchu. Poškozuje nervovou soustavu a negativně ovlivňuje játra a celkovou imunitu. Trvalý vliv benzenu u lidí může vést k poškození kostní dřevě. Způsobuje zejména leukémii a rakovinu, a proto je zařazen mezi velmi nebezpečné rakovinotvorné sloučeniny. [6]

## **Aldehydy**

Mezi nejdůležitější a nejznámější patří formaldehyd. Všechny aldehydy jsou vstřebávány v respiračním a trávicím traktu. Následně jsou metabolizovány a většina metabolitů je hned vylučována. Mezi negativní účinky aldehydů spadá dráždění očí, sliznic dýchacích cest až kašel, riziko rakoviny (zejména plic a močového měchýře. [6 a 15]

## **Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)**

Látky vznikající při nedokonalém spalování automobilových paliv. Dnes vznikají i při výrobě koksu, topení uhlím, ale jsou obsazeny i v cigaretovém kouři. Vstřebávány jsou ve střevech a plicích. Při dlouhodobém vystavení látkám PAU se u jedince zvyšuje riziko plicní rakoviny. Působení těchto látek může snižovat porodní hmotnost novorozence. [15]

## **Pevné částice**

Jedná se o různorodé částice o různých velikostech (tisíciny milimetru), které mohou obsahovat různé nebezpečné těžké kovy. Zdrojem těchto částic jsou převážně automobily se vznětovými motory, u nichž se instalují filtry pevných částic, které tyto částice zachycují. Výzkumy o vlivu pevných částic na lidské zdraví prokázaly zvýšení zánětlivých onemocnění plic, zvýšení počtu hospitalizací, zvýšení úmrtnosti. [15]

## **Přízemní ozon**

Vznikají chemickou reakcí mezi výfukovými plyny (převážně oxidy dusíku a těkavými látkami) za působení slunečního záření. V lidském organismu negativně působí hlavně na plíce. Nejvýznamnějšími symptomy vlivu přízemního ozónu jsou například: tlak na hrudi, překrvení nosní sliznice, bolest hlavy, nespavost ... [6 a 15]

## 4.2. *Vliv alternativních paliv na emise spalovacích motorů*

Snad každé současné alternativní palivo má blahodárny vliv na složení výfukových plynů. Jedním z mnoha zmíněných důvodů pro zavádění alternativních paliv dopravních prostředků je snaha o snižování skleníkových (zejména  $CO_2$ ) plynů, neboť podíl dopravy na emisích škodlivého plynu  $CO_2$  rapidně stoupá. Největší nárůst v letech 1990 – 2002 byl zaznamenán v silniční nákladní dopravě, kde emise vzrostly o 160 %. Oxid uhličitý zaujímá 86,1 % z celkových emisí skleníkových plynů, druhé místo drží metan se 7,2 % a na třetím místě je oxid dusný ( $N_2O$ ) 5,8 %. Poslední zmíněný, oxid dusný však narůstá nejdramatičtěji ze všech znečišťujících látek dopravy. Důvodem je skutečnost, že nová vozidla vybavená katalyzátorem jej emitují více než vozidla bez katalyzátoru.

### 4.2.1. **Katalyzátory**

Katalyzátory jsou technické prostředky snižující oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky a oxid dusíku ( $NO_x$ ). Dlouhodobé studie dokázaly, že třicestný katalyzátor snižuje produkci oxidu uhelnatého až 15krát a oxidy dusíku až 10krát. Podobné snížení těchto škodlivých plynů se prokázalo i u diesellového motoru s oxidačním katalyzátorem. Tento efekt je způsoben zvýšením účinnosti oxidace těchto látek za přítomnosti platinových kovů jako je rhodium (Rh), platina (Pt) a palladium (Pd). Je potřeba si však uvědomit, že se CO a uhlovodíky (HC) ve velké míře oxidují na další skleníkový plyn  $CO_2$ . Takže i přes pozitivní vliv katalyzátorů na složení výfukových plynů, se s jejich použitím stále produkují tři ze šesti skleníkových plynů uvedených v Kjótském protokolu a sice  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ . Dokonce, oxid dusný způsobuje skleníkový efekt 310krát silněji než oxid uhličitý. Množství emisí  $CO_2$  je v podstatě určeno spotřebou paliva. Každá snaha a opatření o snížení měrné spotřeby paliva vede i k pozitivnímu snížení emisí  $CO_2$ . u automobilů vybavenými katalyzátory se, při zvyšování rychlostí nad 60 km/h, měrná spotřeba paliva zvyšuje intenzivněji než u automobilů bez katalyzátorů. Při snižování rychlosti pod 60 km/h se naopak spotřeba paliva zvyšuje intenzivněji u automobilů bez katalyzátorů. Zvýšení podílu automobilů s katalyzátory na vozovém parku benzinových osobních automobilů má za následek podstatné zvýšení emisí  $CO_2$  v dálničním režimu jízdy. Proto, zvýšení maximální povolené rychlosti jízdy na dálnici a její snížení v obci vede k celkovému zvýšení emisí  $CO_2$  benzinových osobních automobilů.

[18]

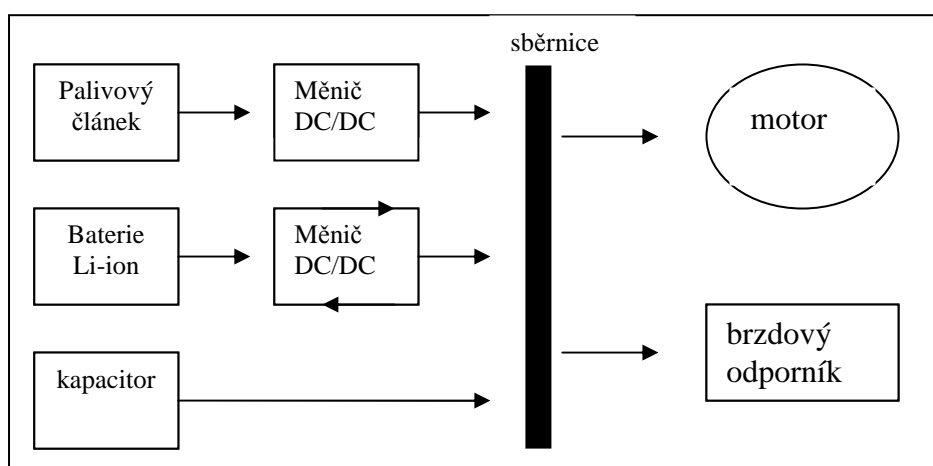
### 4.3. *TriHyBus*

Název TriHyBus v sobě skrývá slovní spojení „Triple Hybrid Bus“, trojitě hybridní autobus. Jedná se o zcela unikátní projekt, hlavně díky použití tří energetických zdrojů současně v rámci pohonu autobusu. Já jsem měl to štěstí a mohl si osobně promluvit a získat informace a cenné názory od Ing. Petra Dlouhého, který stál u zrodu myšlenky TriHyBusu. Kolem celého projektu působilo nespočet lidí, ale dá se říci, že za hlavního koordinátora je považován pan Luděk Janík a jeho kolektiv působící v Ústavu jaderného výzkumu Řež a.s.. Je potřeba říci, že od myšlenky až po konečnou výrobu autobusu uběhly jen 4 roky a z toho se ještě jeden rok čekalo na finance. Samotné financování potřebných bezmála 80 miliónů korun proběhlo z 25 % vlastními zdroji a 75 % se získalo pomocí dotací, kdy 25% z dotací přispěl náš stát a zbývajících 75 % bylo obstaráno z fondu ERDF (European Regional Development Fund).

V západní Evropě a v ostatních vyspělých státech byly již podobné projekty úspěšně realizovány, ale i přes to je tento projekt technicky unikátní, neboť jsou do hybridního pohonu zapojeny jak tradiční baterie, tak i řada ultrakapacitorů. Podvozek, karoserie a výkonová elektronika TriHyBusu vychází z koncepce trolejbusu Škoda Electric. Pohon má na starosti třífázový asynchronní elektromotor, který je ovládán tzv. vektorovým řízením. Hlavním zdrojem elektrické energie je vodíkový palivový článek PEMFC (popsaný v kapitole 3.7.3.2.) od výrobce Proton Motor o výkonu až 50 kW. Jako sekundární zdroje (akumulátory) jsou využity lithium-iontové baterie Li-ion a ultrakapacity od firmy Maxwell.

Pro spolupráci všech zdrojů energie byl vyvinut speciální řídicí systém, který optimalizuje tok energií v systému napájení trakčního motoru. Tento systém umožňuje rekuperaci energie do sekundárních zdrojů (například při jízdě z kopce, deceleraci atd.) a její opětovné využití v energeticky náročných režimech (např. akcelerace). Všechny tři zdroje energie jsou zapojeny na jednu sběrnici, ze které motor odebírá výkon. Pro lepší představu jsem vytvořil stručné znázornění uspořádání všech tří zdrojů na obr. 5.

**Obr. 8.: Uspořádání technických prvků TriHyBusu**



**Zdroj: vlastní tvorba**

Principem úspěšného fungování jako celku je doplňování výkonů zdrojů energie.

Palivový článek, který dnes vydává napětí 390 V bude, podle Petra Dlouhého, v budoucnu vyměněn za novější generaci. Hlavní změnou oproti stávající generaci je jiný materiál polymerní membrány a odlišná geometrie cely. Dojde k navýšení počtu cel v rámci stacku, počet stacků zůstane zachován. Podle předběžných testů vykazuje nové uspořádání vyšší stabilitu vodního režimu článku a vyšší maximální výkon článku. Jak jsem již zmiňoval v kapitole 3.7.3.2., v tomhle typu článků se musí udržovat neustále správná vlhkost membrány. Samotný palivový článek má kolem sebe ještě mnoho potřebných součástí tzv. housing (primární chladicí okruh, vzduchový kompresor, filtry, sekundární chladicí okruh) bez kterých by nemohl správně pracovat. Za palivovým článkem je zapojen stejnosměrný měnič (zvyšovač - DC/DC) napětí, který zvyšuje napětí dodávané do sběrnice. Palivový článek má výkon 50 kW, ale většinu času dodává výkon 30 – 40 kW, až podle potřeby zvyšuje či snižuje svůj výkon. Avšak, i když energie není nutně potřebná, musí neustále pracovat na minimální výkon 12 kW, to je hraniční hodnota pod kterou nesmí výkon upadnout.

Pro ukládání zpětně získávané energie z brzdění nebo jízdy z kopce slouží baterie nebo ultrakapacitor. Při brzdění motor funguje jako generátor a vzniklou energii žene zpět do systému. Akumulační prvky jsou také dobíjeny z rozdílu výkonu palivového článku a motoru – tedy například při stání v zastávkách či na křižovatce. Podle definovaných pravidel je vzniklá energie rozdělována do akumulacních prvků. Baterie, která má velkou kapacitu ale malý povolený nabíjecí výkon, se nabíjí maximálně 15 kW. Zbytek energie se ukládá do ultrakapacitoru, který zase má obrovský nabíjecí výkon, ale nízkou kapacitu. Kapacitor jsou fyzicky vlastně 4 bedny, každá s elektrickou kapacitou 18 farad a napětím 390 V. Zapojeny

jsou vždy dvě do série a tyto dvě dvojice v sérii jsou zapojeny paralelně, což celkově dává napětí 780 V a kapacitu 18 farad. Tato energie z akumulčních prvků se využívá nejprve z kapacitoru, odkud je možno odebírat velké množství, ale jen poměrně krátkou dobu. Po vybití kapacitoru pod 390 V se odebírá energie z baterie (například při jízdě do kopce). Pořadí využívání těchto dvou akumulčních zařízení je určeno jejich charakteristickými vlastnostmi a uspořádáním pohonného systému. Baterie vydrží řádově tisíc nabíjecích cyklů, a proto jí vyhovuje využívání až na druhém místě. Zatímco kapacitor vydrží řádově až miliony cyklů, a proto mu nevádí vysoká frekvence jeho využívání. Pro případ, že by rekuperace energie dosáhla takové hodnoty, kdy ji už nikam nelze ukládat, tak je na střeše zapojen tzv. odporník, který se přebytečné energie zbavuje ve formě tepla. Tento jev se však v reálném provozu téměř nevyskytuje. Brzdění, při stlačení brzdového pedálu do cca 60 %, probíhá prostřednictvím elektromotoru. Až při nadměrném sešlápnutí brzdového pedálu se využívají klasické brzdy.

Jako palivo pro palivový článek se v tomto autobuse používá vodík v plynném stavu při tlaku 35 MPa. Je uskladněn na střeše ve čtyřech vysokotlakých kompozitních lahvích. Celkově pojmu 20 kg vodíku. Zde se muselo hodně přemýšlet o hmotnosti, neboť na 1 kg vodíku připadá cca 20 kg materiálu na jeho uskladnění, takže jen samotné lahve s vodíkem váží přes 400 kg. Na střeše jsou umístěny ještě kapacitory o hmotnosti 600 kg a další technologie, které střešou zatěžují. Proto se i po roce úspěšného provozu autobusu plánuje měření vlivu zvýšené hmotnosti na životnost karoserie. Celý autobus váží přes 14 tun. České silniční zákony však přikazují maximální povolenou hmotnost dvounápravového vozu do 18 tun, tudíž musela být snížena kapacita sedících cestujících.

Nominální výkon motoru je 120 kW. Maximální rychlost je omezena na 65 km/h. Průměrná spotřeba se udává 8 kg vodíku na 100 km, takže na plnou nádrž (20 kg) autobus ujede 250 km. Náklady na 1 km provozu jsou tak srovnatelné s běžným naftovým autobusem, na rozdíl od nich je tu však obrovská výhoda nulových emisí, neboť z výfuku vychází jen čistá vodní pára. Pro lepší kontrolu a přehlednost proudění energií bylo vyvinuto nové vizuální rozhraní MMI, které znázorňuje aktuální tok energií v rámci hybridního systému. Jedna obrazovka s tímto přehledem je nainstalována přímo mezi cestujícími. Autobus je také vybaven moderní GPS navigací, který zaznamenává přesnou polohu autobusu, která je společně s ostatními provozními hodnotami ukládána pro následnou analýzu a případnou optimalizaci systému.

Jako zajímavost bych dodal, že autobus je po odstavce schopen jízdy do jedné minuty na baterie, které vystačí cca na 15 km. Mezitím se zahřívá palivový článek na svoji provozní

teplotu 80 °C. Zahřátí trvá okolo 10 minut a článek je potom schopen vydávat maximální výkon. Po dosažení 80 °C na palivovém článku se rozbíhají všechny řízené koloběhy energie přesně tak, jak je to popsáno výše.

#### 4.3.1. Čerpací stanice na vodík

V Neratovicích, kde autobus pravidelně jezdí svoji trasu a také tam parkuje, byla postavena první čerpací stanice na vodík v ČR. Hlavním partnerem pro realizaci vodíkové čerpací stanice byla společnost Linde Gas, která má bohaté zkušenosti s výstavbou vodíkových čerpacích stanic na celém světě. Vodík je skladován ve velkoobjemové nádrži pod tlakem 40 bar. Z důvodu bezpečnosti je tato nádrž vzdálena od čerpací stanice a ještě obehnána betonovou zdí. Vnitřní prostor stanice je také z bezpečnostních důvodů rozdělen na dvě části: na část s řídicí elektronikou, hydraulickým kompresorem a ostatní elektroinstalací a na část se zařízením pro kompresi, rozvod a regulaci průtoku stlačeného vodíku. U čerpací stanice si povšimnete červených tlakových lahví, což jsou tlakové zásobníky vodíku, které se dělí na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. Tyto zásobníky slouží pro dotankování části nádrže bez nutnosti sepnutí kompresorů. Kompresor se sepíná až ve chvíli kdy dojde tlak v zásobnících, to však nastává jen při tanková úplně prázdné nádrže. Maximální plnicí tlak je zde 350 bar (35 MPa). Měření množství odebraného vodíkového paliva je zajištěno hmotnostním průtokoměrem. Maximální rychlost plnění je asi 4 kg/min. Při plnění prázdné nádrže vozidla je tlak regulován na 250 bar (25 MPa), aby nedošlo k překročení maximálního průtoku při velkém tlakovém rozdílu. Vodík je do stanice dovážen přibližně v týdenních intervalech firmou Linde Gas, která jej vyrábí ze zemního plynu

Obr. 9.: Celkový pohled na vodíkovou čerpací stanici



Zdroj: [12]



### **4.3.2. Smýšlení o TriHyBusu**

Tento světový unikát byl představen 25. června 2009. Pro běžného cestujícího vypadá autobus zcela obvykle, podobně jako běžné autobusy. Pozornější cestující si však ihned musí povšimnout jeho tiché jízdy bez vibrací, připomínající spíše trolejbus. Své obvyklé trasy objíždí po městě Neratovice, kde už se za rok svého úspěšného provozu stal velmi oblíbeným prostředkem. Přesto, že se jedná o velmi zásadní projekt v městské dopravě, v krátkodobém hledisku se nepočítá s další výrobou obdobných dopravních prostředků. Ani sami tvůrci nijak neplánovali jeho rozmach, měl zejména ukázat směr, jakým by se měla městská doprava pohybovat do budoucna. Já, osobně si myslím, že to je vykročení správným směrem a souhlasím s výrokem Billa Forda, že vodík je palivo budoucnosti. Zároveň je potřeba získávat všechnu možnou nevyužitou energii zpět do systému, což tvůrci TriHyBusu vyřešili s kombinací ultrakapacitorů a baterií dokonale. Projekt působí jako finální dílo, ale Ing. Petr Dlouhý však jedním dechem dodává, že autobus a celou technologii čeká ještě mnoho analýz, optimalizací, zlepšování a případných odstraňování chyb. Já osobně jsem velmi zvědav, co a jak moc ještě do budoucna projde změnami. O tom jak testy na zatížení střechy dopadly, bych vás rád informoval v moji diplomové práci.

## **5. Závěr**

Snažil jsem se přijít na to, která z alternativních paliv jsou nejproduktivnější. Mnoho mnou přečtených odkazů a textů na toto téma popisují, co to jednotlivá alternativní paliva jsou a jak se chovají při různých procesech. Mnohem důležitější však je posoudit jejich ekonomickou nákladnost a celkovou efektivitu. Proto jsem se v části mé literární rešerše detailně věnoval popisu výroby či získávání těchto paliv.

Mezi mnou prozkoumané alternativní paliva spadají LPG, zemní plyn, syntetická motorová nafta, bioetanol, bionafta, bioplyn a vodík LPG je zkratka pro zkapalněný ropný plyn užívaný jako alternativní palivo. Dopracoval jsem se k závěru, že se jedná o vedlejší produkt při zpracování zemního plynu nebo ropy, při čemž na bázi zemního plynu se dnes vyrábí okolo 60 % celkové produkce LPG.

Po důkladném prozkoumání jsem zjistil, že v poslední době se ve světovém měřítku mezi nejvýznamnější a nejužívanější paliva dostává stlačený zemní plyn CNG, který má přibližně o třetinu vyšší výhřevnost než běžná fosilní paliva a získává se pomocí hloubkových vrtů. Jako dobré střednědobé řešení se mi jeví bioetanol vyráběný z obilí. Podle mého to však není řešení do vzdálené budoucnosti, neboť si snad ani nejde představit to ohromné množství biomasy potřebné k výrobě paliv pro větší podíl dopravních prostředků.

Vodík, bezesporu palivo budoucnosti! Je však potřeba snížit náklady na jeho výrobu. V kapitole „výroba vodíku“ jsem popsal pět zatím nejvyužívanějších způsobů výroby vodíku. Dnes nejvyužívanější metoda výroby parním reformingem má sice obrovskou výhodu v tom, že z jednoho objemu metanu vznikají tři objemy vodíku a z toho dokonce jedna třetina vzniká z vody, jakož to obnovitelného zdroje. Do budoucna vědci však mluví o žádanější elektrolýze vody, kde vzniká pouze čistý vodík a kyslík. Vodík spalovaný přímo v motoru, též poskytuje jisté možnosti, ale tenhle typ koncepce motoru je teprve v začátcích.

To, že elektromobily jsou velmi výhodné, díky své výkonové charakteristice je už známé. Jde však o to, zajistit jim efektivní způsob dodávání elektrické energie do systému. Proto jsem se v další kapitole věnoval výhradně palivovým článkům, které mění chemickou energii paliva na elektrickou. Prostudoval a popsal jsem pět nejvýznamnějších typů článků, kde každý z nich má své konkrétní výhody a nevýhody. Nelze jednoznačně říci, který z nich je nejlepší či nejhorší. Ze svého pohledu se mi jeví jako nejméně užitečný palivový článek s pevnými oxidy, který má provozní teplotu až okolo 1000 °C a tudíž se dlouhou dobu zahřívá. Zatímco palivový článek typu polymer – elektrolyt (jako jediný použitelný pro automobily) pracuje při teplotách 80 °C a jako jediná produkovaná kapalina je voda, jeho účinnost přeměny energie se pohybuje přes 50 %.

Svoji praktickou část jsem věnoval projektu vodíkového autobusu pod názvem TriHyBus, který využívá současně tři různé zdroje energie. Měl jsem tu čest získávat informace a cenné rady od Ing. Petra Dlouhého, který stál už u zrodu samotné myšlenky. Autobus využívá palivové články polymer-elektrolyt, hlavně pro svoji nízkou pracovní teplotu (80 °C). Dále je vybaven ultrakapacitory a běžnými akumulátory, do kterých se ukládá zpětně získaná či přebytečná energie. Byl jsem informován, že již v současné době jsou provozní náklady srovnatelné s běžnými autobusy. A to jsme v době, kdy největší překážkou rozmachu vodíku jako paliva jsou finanční náklady na jeho výrobu. Tímto projektem jsem byl velmi nadšen a věřím, že technologie palivových článků spojená s akumulátory zpětně získávané energie je vykročením po správné cestě.

Ze všech mnou zjištěných poznatků vyplývá, že aplikace jakýchkoli alternativních paliv bude strastiplná ale nutná. Závěr této práce utvrzuje můj názor, že nejperspektivnějším palivem budoucnosti se stává vodík. Vodík jako palivo, které snižuje všechny emisní prvky až o 99 %. Vodík jako palivo, při jehož spalování vzniká jen vodní pára. A z vodní páry lze přece vyrábět znovu vodík. Dočkáme se v budoucnu takto touženého energeticky uzavřeného kruhu?

## **Použitá literatura:**

- [1] Kameš, J.: Alternativní pohony automobilů. Praha 2004. ISBN 80 – 7300 – 127 – 6, 231 s.
- [2] Blažek, J., Rábl, V.: Základy zpracování a využití ropy 2. vydání. Praha 2006, VŠCHT. ISBN 80 – 7080 – 619 - 2
- [3] Macek, J., Suk, B.: Spalovací motory I. Praha 2003. ISBN 80 – 01 – 02085 – 1, 244 s
- [4] Kameš, J., Alternativní pohony automobilů, AutoEXPERT, červen 2002, číslo 6, 40 s.
- [5] Brada, Zbyněk. Vodík je tu! Auto Tip, prosinec 2007, číslo 24, 60 s.
- [6] Bouška, M.: Alternativní paliva spalovacích motorů, diplomová práce, katedra vozidel a pozemní dopravy, technická fakulta, ČZU, Praha 2006, 60 s.
- [7] Němeček J.: Pohon silničních vozidel na alternativní paliva, absolventská práce. Diagnostika silničních vozidel, VOŠ dopravní, Praha 2005, 45 s.
- [8] Horský, M.: Budoucí paliva pro silniční prostředky, diplomová práce, katedra vozidel a pozemní dopravy, technická fakulta, ČZU, Praha 2008, 76 s.

## **Internet:**

- [9] Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě, Šebor, G., Pospíšil, M., Žákovec, J., [online]. [citace 2011-02-20]. Dostupné z: <[http://www.mdcz.cz/cs/Strategie/Zivotni\\_prostredi/Alternativni\\_paliva.htm](http://www.mdcz.cz/cs/Strategie/Zivotni_prostredi/Alternativni_paliva.htm)>
- [10] Vodíkové technologie [online]. [citace 2011-02-20]. Dostupné z: <<http://hytep.cz/?loc=text&id=18>>
- [11] BMW Hydrogen 7 [online]. [citace 2011-03-2]. Dostupné z: <<http://www.carmotor.cz/magazin/pages/BMW-Hydrogen-7,719.html>>
- [12] TriHyBus – vodíkový autobus [online]. [citace 2011-03-16]. Dostupné z: <<http://trihybus.cz>>
- [13] Oxidy dusíku [online]. [citace 2011-03-17]. Dostupné z: <[http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy\\_dusiku.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf)>
- [14] Oxidy síry [online]. [citace 2011-03-17]. Dostupné z: <[http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy\\_siry.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_siry.pdf)>
- [15] Výfukové plyny aut – vliv na zdraví [online]. [citace 2011-03-17]. Dostupné z: <<http://www.rodina-finance.cz/zdravi.206/vyfukove-plyny-aut-vliv-na-zdravi.21579.html>>

- [16] Výhody LPG [online]. [citace 2011-03-17]. Dostupné z:  
<<http://www.lpg.cz/vyhodylpg/index.php>>
- [17] Elektrolytické metody [online]. [citace 2011-03-17]. Dostupné z:  
<<http://sinice.webnode.sk/metody-na-zneskodnovanie-sinic/elektrolyticke-metody>>
- [18] Vliv katalyzátorů na produkci emisí  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$  [online]. [citace 2011-03-07].  
Dostupné z: <[http://www.cdv.cz/text/szp/ovzdusi/vliv\\_katalyzatoru.pdf](http://www.cdv.cz/text/szp/ovzdusi/vliv_katalyzatoru.pdf)>
- [19] Výroba a užití kapalných biopaliv [online]. [citace 2011-02-12]. Dostupné z:  
<[www.scienceshop.cz/attachments/HOL-Texty\\_biopal.doc](http://www.scienceshop.cz/attachments/HOL-Texty_biopal.doc)>
- [20] Alternativní pohony v dopravě a jejich vliv na životní prostředí. [citace 2011-02-12]  
Dostupné z: <[http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/27\\_SP\\_05.PDF](http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/27_SP_05.PDF)>
- [21] Bioplyn – energie ze zemědělství [online]. [citace 2011-02-12]. Dostupné z:  
<[http://www.agronavigator.cz/attachments/Studie\\_bioplyn.pdf](http://www.agronavigator.cz/attachments/Studie_bioplyn.pdf)>

## Seznam použitých zkratk:

AFC.....	Alkalický palivový článek (alkaline fuel cell)
BTL.....	Zkapalnění biomasy (biomass to liquid)
$CH_4$ .....	metan
CNG.....	stlačený zemní plyn (compressed natural gas)
CO.....	oxid uhelnatý
$CO_2$ .....	oxid uhličitý
ČSN.....	česká státní norma
DC/DC .....	měníč stejnosměrného proudu
FAME .....	bionafta (metyl-ester mastných kyselin)
GTL.....	zkapalnění plynu (gas to liquid)
$H_2O$ .....	voda
$H_3PO_4$ .....	kyselina fosforečná
$HCl$ .....	chlorovodík
HTU .....	hydro thermal upgrading
IEA.....	mezinárodní energetická agentura
KOH.....	hydroxid draselný
kW.....	jednotka výkonu (kilowatt)
LCA .....	analýza životního cyklu (life cycle assesment)
LPG.....	zkapalněný ropný plyn (liquid petrol gas)
LNG .....	zkapalněný zemní plyn (liquid natural gas)
MCFC .....	palivové články s roztaveným karbonátovým elektrolytem
MEŘO.....	metyl-ester řepkového oleje
MPa.....	jednotka tlaku (megapascal)
MTBE .....	metyl-terc.-butyléter
$NH_4OH$ .....	hydroxid amonný
$N_2O$ .....	oxid dusný
$NO_x$ .....	oxidy dusíku
PAFC .....	palivové články s kyselinou fosforečnou
PEMFC .....	palivový článek typu polymer - elektrolyt

SOFC .....	palivový článek s tuhými oxidy
$SO_2$ .....	oxid siřičitý
VOCs .....	pevné částice (volatile organic compounds)
% obj.....	objemová procenta

## Seznam obrázků a tabulek:

Obr. 1: Největší producenti ropy – denní produkce v tisících barelech .....	2
Obr. 2: Největší spotřebitelé ropy – denní spotřeba v tisících barelech .....	2
Obr. 3: Zjednodušený proces výroby MEŘO .....	11
Obr. 4: Elektrolýza vody .....	14
Obr. 5: Princip palivového článku .....	18
Obr. 6: Porovnání výrobní ceny paliv a emisí $CO_2$ (cena ropy 60 USD/barel).....	25
Obr. 7: Rozložení koncentrace $NO_2$ v ovzduší nad Evropou .....	26
Obr. 8: Uspořádání technických prvků TriHyBusu .....	29
Obr. 9: Celkový pohled na vodíkovou čerpací stanici .....	32
Obr. 10: TriHyBus zepředu .....	příloha I
Obr. 11: TriHybus zezadu .....	příloha I
Obr. 12: Soustava akumulátorů .....	příloha II
Obr. 13: Pohled do zadní části autobusu .....	příloha II
Tab. 1: Složení LPG v zemích Evropy .....	6
Tab. 2: Porovnání vybraných vlastností metanolu, MTBE a klasického benzínu.....	8
Tab. 3: Porovnání některých vlastností MEŘO a klasické motorové nafty .....	10
Tab. 4: Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti bioplynu .....	12

## Příloha I

Obr. 10.: TriHyBus ze předu



Zdroj: [12]

Obr. 11.: TriHyBus ze zadu



Zdroj: [12]

## Příloha II

Obr. 12.: soustava akumulátorů



Zdroj: [12]

Obr. 13.: Pohled do zadní části TriHyBusu



Zdroj: [12]