



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ALTERNATIVNÍ PALIVA PRO ZÁŽEHOVÉ MOTORY

ALTERNATIVE FUELS FOR SI ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Balažovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Lukáš Balažovič**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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:

Alternativní paliva pro zážehové motory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z cest snižování emisí včetně CO₂ je používání alternativních paliv nebo jejich míchání s klasickými palivy. U menších motorových vozidel stále převládá použití zážehových motorů, které pro svůj provoz potřebují lehce odpařitelná paliva nebo plynná paliva. Pro použití jakéhokoliv paliva v zážehovém motoru je třeba znát jeho vlastnosti a to vždy ve srovnání s benzínem.

Cíle bakalářské práce:

Přehled možných alternativních paliv vhodných pro zážehové motory. Shrnutí vlastností paliv, které ovlivňují děje při spalování v zážehovém motoru a mají vliv na jeho konstrukční díly. Popsat výhody a nevýhody paliv a možnosti jejich přimíchávání nebo realizaci více palivových motorů. Pro vybrané alternativní palivo provést porovnání spalování s běžným benzínem. Provést diskusi nad získanými poznatky.

Seznam doporučené literatury:

MATĚJOVSKÝ, V. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.

STONE, R. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

BIERNAT, K. Alternative Fuels Technical and Environmental Conditions. 1. ExLi4EvA, 2016. ISBN 978-953-51-2269-2.

LEE, S., SPEIGHT J. G. a LOYALKA S. K. Handbook of alternative fuel technologies. 1. Boca Raton: CRC Press, c2007. ISBN 978-0-8247-4069-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou alternativních paliv pro zážehové motory. Nejprve je uveden stručný úvod do problematiky zážehových motorů, dále jsou popsána jednotlivá alternativní paliva. V práci jsou shrnuty nejdůležitější poznatky a je provedeno porovnání alternativ s konvenčním benzínem. Závěrem je každé palivo zhodnoceno z hlediska výhod, nevýhod a postavení na trhu.

KLÍČOVÁ SLOVA

benzín, LPG, metan, vodík, ethanol, emise, spalování

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topic of alternative fuels for petrol engines. The first is a brief introduction to the issue of petrol engines, followed by a description of each alternative fuel. The thesis summarizes the most important information and comparison of alternatives with conventional gasoline is made. Each fuel is evaluated in terms of advantages, disadvantages, and position on the market.

KEYWORDS

gasoline, LPG, methane, hydrogen, ethanol, emissions, combustion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BALAŽOVIČ, L. *Alternativní paliva pro zážehové motory* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132510>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 59 s. Vedoucí práce Josef Štětina.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Lukáš Balažovič

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za vypsání tématu a za rady k vypracování práce. Rovněž děkuji své rodině za podporu během studia.

OBSAH

Úvod.....	7
1 Zážehové motory.....	8
1.1 Základní rozdělení zážehových motorů podle používaných paliv.....	8
1.2 Základní parametry zážehových motorů a jejich paliv.....	8
1.3 Čtyřdobý zážehový motor.....	10
1.3.1 Ottův cyklus.....	10
1.4 Paliva zážehových motorů.....	12
1.4.1 Základní požadavky na paliva.....	12
1.4.2 Benzín a jeho vlastnosti.....	12
1.5 Spalování.....	13
1.5.1 Dokonalé spalování.....	14
1.5.2 Nedokonalé spalování.....	14
1.5.3 Detonační spalování.....	15
1.6 Emise zážehových motorů.....	16
1.6.1 Přehled emisí.....	16
1.6.2 Emisní normy.....	16
1.6.3 Metody vyhodnocování produkce emisí CO ₂	17
1.7 Důvody hledání alternativ.....	18
2 LPG.....	19
2.1 Zdroje, výroba a distribuce LPG.....	19
2.2 Vlastnosti LPG.....	20
2.3 Požadavky na kvalitu paliva.....	20
2.3.1 Tlak par.....	20
2.3.2 Oktanové číslo.....	21
2.3.3 Normované množství síry a odorizace.....	21
2.3.4 Olejovitý zbytek z LPG.....	21
2.4 Spalování a emise.....	22
2.5 Více palivová řešení.....	22
2.5.1 Moderní řešení přestavby na LPG.....	23
2.6 Problémy a omezení u vozidel na LPG.....	24
2.7 BioLPG.....	25
2.8 Zhodnocení.....	25
2.8.1 Shrnutí výhod a nevýhod.....	25
2.8.2 Aktuální situace na trhu.....	26
3 Paliva na bázi metanu.....	27
3.1 Zdroje zemního plynu.....	27
3.2 Vlastnosti zemního plynu.....	27
3.3 CNG.....	27
3.3.1 Vlastnosti CNG.....	28
3.3.2 Spalování a emise.....	28
3.3.3 Dvoupalivové systémy.....	29
3.3.4 Základní komponenty.....	29
3.4 Biometan.....	30
3.5 LNG.....	31

3.6	Čerpací stanice a spotřeba CNG, LNG, BIO-CNG v ČR.....	32
3.7	Zhodnocení.....	33
3.7.1	Shrnutí výhod a nevýhod metanu.....	33
3.7.2	Aktuální situace CNG, LNG a BioCNG na trhu.....	33
4	Vodík.....	34
4.1	Vlastnosti vodíku.....	34
4.2	Spalování vodíku.....	35
4.3	Výroba vodíku.....	36
4.3.1	Parní reformování zemního plynu.....	37
4.3.2	Zplyňování uhlí.....	37
4.3.3	Elektrolýza vody.....	38
4.4	Skladování, přeprava, čerpací stanice.....	39
4.4.1	Skladování vodíku.....	39
4.4.2	Čerpací stanice a přeprava.....	39
4.5	Zhodnocení.....	40
4.5.1	Shrnutí výhod a nevýhod vodíku.....	40
4.5.2	Aktuální situace vodíku na trhu.....	40
5	Ethanol.....	41
5.1	Vlastnosti ethanolu a etbe.....	41
5.2	Spalování a emise.....	42
5.3	Výroba bioethanolu.....	42
5.3.1	Bioethanol z biomasy obsahující jednoduché cukry – I. generace biopaliv.....	44
5.3.2	Bioethanol z biomasy obsahující škrob – i. generace biopaliv.....	44
5.3.3	Bioethanol z lignocelulózové biomasy – ii. generace biopaliv.....	44
5.4	Přímíchávání bioethanolu do benzínu.....	45
5.5	E85.....	45
5.5.1	Spalování E85.....	45
5.5.2	Přestavba vozidla na E85.....	46
5.6	Zhodnocení.....	46
5.6.1	Shrnutí výhod a nevýhod.....	46
5.6.2	Aktuální situace na trhu.....	46
6	Porovnání spalování benzínu, CNG a LPG.....	47
6.1	Výpočet a zhodnocení.....	48
Závěr.....		49
Seznam použitých zkratk a symbolů.....		55

ÚVOD

Lidská společnost je neodmyslitelně provázána s využíváním nejrůznějších zdrojů energie pro svou potřebu, ať už v průmyslu, dopravě či běžném životě. Řada našich nejvýznamnějších zdrojů energie je však fosilního původu, takže se jejich zásoby postupně zmenšují, přičemž poptávka po energii roste. V posledních dekáдах se navíc stále častěji objevuje i otázka vlivu spalování fosilních paliv na životní prostředí a lidské zdraví. Přirozeně tak vzniká snaha o hledání dalších zdrojů a nových technických přístupů.

V oblasti dopravy tak existuje například celá řada tzv. alternativních paliv, z nichž některé jsou rovněž fosilního původu, zatímco jiné jsou například vyráběny z biomasy, čistírenského kalu nebo dokonce zbytků jídla. Některá z těchto alternativních paliv jsou známá více jak 100 let, zatímco některé se objevují teprve dnes. Jedná se tak o dlouhodobý vývoj, který má jak validní výsledky, tak i slepé cesty. Zároveň je však důležité si uvědomovat, že alternativa neznamená kompletní náhradu. Použití alternativního paliva může odstranit či zmírnit jeden problém, ale zároveň může jiný způsobit či zhoršit. Při hledání nových cest je proto třeba pečlivě bilancovat výhody a nevýhody daného řešení.

1 ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Zážehové motory patří k nejrozšířenějším a nejvýznamnějším typům motorů. Nejdůležitější využití mají v dopravě, protože jsou používány v konstrukci většiny osobních aut, ale používají se také například u motocyklů, člunů, sekaček nebo motorových pil. Mají tak velmi důležitou roli v každodenním životě a celkově ve fungování moderní společnosti. Rozmach tohoto typu motorů začal ve druhé polovině 19. století, kdy v roce 1876 německý inženýr N. A. Otto vynalezl první čtyřdobý zážehový motor.

Z technického hlediska spadají mezi tepelné motory s vnitřním spalováním, konkrétně mezi pístové spalovací motory. Účelem každého motoru je přeměna dodané energie na mechanickou práci, přičemž tento proces probíhá s určitou účinností. U spalovacích motorů se jedná o přeměnu chemické energie paliva, která je uvolněna spalováním směsi paliva a vzduchu ve spalovacím prostoru, na mechanickou práci a teplo. Směs je zážehována elektrickou jiskrou od zapalovací svíčky, čímž se tento typ motoru liší od motoru vznětového, kde dochází k samovznícení paliva vlivem teploty a tlaku. U zážehových motorů se používají plynná a lehce odpařitelná kapalná paliva. Nejrozšířenějším palivem je benzín, avšak existuje k němu řada alternativ, jako zemní plyn, propan-butan či ethanol.

1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ PODLE POUŽÍVANÝCH PALIV

MOTORY NA KAPALNÁ PALIVA

Do této kategorie patří většina zážehových motorů. Využívají lehká odpařitelná paliva (benzín, methanol, ethanol).

PLYNOVÉ MOTORY

Do této kategorie patří motory, které spalují plynná paliva (propan-butan, zemní plyn, bioplyn atd.). Jedná se tak o alternativní řešení vůči rozšířenějším motorům na benzín.

VÍCE PALIVOVÉ MOTORY

Tyto motory umožňují používání plynných i kapalných paliv (benzín a zemní plyn, benzín a propan-butan atd.) [14].

1.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ A JEJICH PALIV

Kompresní poměr ε je poměr mezi objemem nasáté a stlačené směsi. Má významný vliv na účinnost motoru, ale také na produkci emisí a točivý moment. Účinnost spalovacích motorů narůstá s kompresním poměrem, ale u zážehových motorů zároveň zvyšuje riziko předčasného vznícení paliva [1].

Oktanové číslo je kritériem kvality paliva a vyjadřuje jeho odolnost vůči samozápalu, tedy předčasnému vznícení paliva bez zápalu od zapalovací svíčky, což vede k tzv. klepání motoru. Definicí jsou určeny oktanová čísla čistých alkanů n-heptanu a izooktanu jako 0 a 100, která následně slouží jako referenční hodnoty. Platí, že čím vyšší oktanové číslo, tím vyšší odolnost vůči samozápalu. Paliva mohou mít i vyšší oktanové číslo než čistý izooktan. Typické oktanové číslo benzínu je 95, což odpovídá směsi, která je z 95 % tvořena izooktanem a z 5 % n-heptanem. Vyšší oktanové číslo paliva umožňuje nastavit větší předstih zážehu a použití vyšších kompresních poměrů, a tak dosáhnout vyšší účinnosti motoru [1].

Pro stanovení oktanového čísla paliva se měří jeho vlastnosti v testovacím referenčním motoru a porovnávají se s chováním směsi n-heptanu a izooktanu. Používají se dvě základní měřicí metody. Výzkumná metoda (RON) určuje oktanové číslo při 600 otáčkách za minutu, motorová metoda (MON) při 900 otáčkách za minutu [4]. V průběhu zkoušení se mění kompresní poměr, čímž se lépe vyzkouší odolnost proti klepání. U motorové metody se rovněž používá přehřátá palivová směs na přibližně 149 °C [4] a zkouší se různé časy zapalování. Hodnoty oktanových čísel získaných výzkumnou metodou jsou běžně vyšší než hodnoty získané motorovou metodou, avšak mezi metodami není přímá korelace [1]. V praxi se běžně užívají oktanová čísla podle výzkumné metody, ale oktanová čísla podle motorové metody jsou součástí normy.

Součinitel přebytku vzduchu λ je poměr mezi množstvím přivedeného vzduchu do spalovací komory ku teoretickému množství vzduchu, které je potřeba pro dokonalé spálení 1 kg paliva. Tento poměr má vliv na produkci emisí, výkon, riziko klepání motoru či ekonomiku provozu. Složení směsi je řízeno řídicí jednotkou, která přepíná mezi různými režimy směsných poměrů na základě údajů z tzv. lambda sondy [4].

Pokud je $\lambda = 1$, tak se jedná o stechiometrickou směs, což značí, že směs vzduchu a paliva je v tzv. stechiometrickém poměru. Při tomto poměru dochází k dokonalému spalování paliva, kdy ve spalínách nezbude žádný zbytkový kyslík. V případě benzínu to znamená, že je potřeba přibližně 14,7 kg vzduchu ke spálení 1,0 kg benzínu. Směsi blízké té stechiometrické mají nejpříznivější emise, protože umožňují maximálně využít katalyzátor výfukových plynů. U zážehových motorů s třicestným katalyzátorem je běžné, že větší část provozu je směs paliva a vzduchu blízká stechiometrické směsi [4].

Pokud je $\lambda > 1$, tak se jedná o tzv. chudou směs. Znamená to, že ve směsi je více vzduchu než v případě stechiometrické směsi. Spalování chudé směsi je nedokonalé. Vzhledem k nižší spotřebě paliva lze dosáhnout lepší ekonomiky provozu. Snižují se emise oxidu uhličitého (CO_2), ale dochází k výraznému nárůstu emisí oxidů dusíku (NO_x) a pevných částic. Chudá směs je běžná u vznětových motorů [4].

Pokud je $\lambda < 1$, tak se jedná o tzv. bohatou směs. Znamená to, že ve směsi je méně vzduchu než v případě stechiometrické směsi. Spalování je nedokonalé, protože je ve směsi nedostatek vzduchu. Dochází k nárůstu emisí oxidu uhelnatého (CO) a nespálených uhlovodíků (HC). Vzhledem k vyšší spotřebě paliva narůstá i cena provozu. Bohatá směs hoří vyšší rychlostí, snižuje riziko klepání motoru a umožňuje vyšší výkon motoru. Mírně bohatá směs (přibližně $\lambda = 0,9$) se běžně používá u zážehových motorů při rozjezdu nebo předjíždění [1, 4].

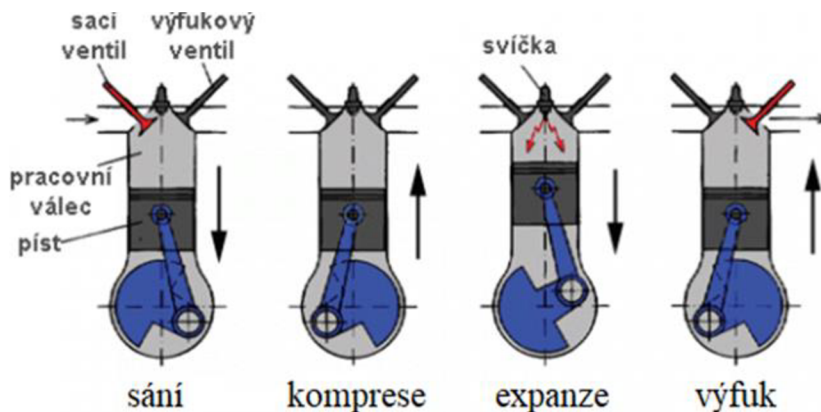
Výhřevnost udává, kolik energie se uvolní dokonalým spálením jednotky paliva (typicky 1 kg, 1 m³, 1 dm³). Voda je uvažována v plynném skupenství. Rozlišuje se na výhřevnost hmotnostní a výhřevnost objemovou [6].

1.3 ČTYŘDOBÝ ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Čtyřdobý zážehový motor je nejvýznamnějším ze skupiny zážehových motorů, protože je používán v konstrukci většiny osobních automobilů. Jedná se o tepelný stroj, který spaluje směs paliva a vzduchu za účelem získání mechanické práce.

Pracovní oběh probíhá během čtyř zdvihů pístu (obr. 1) [1]:

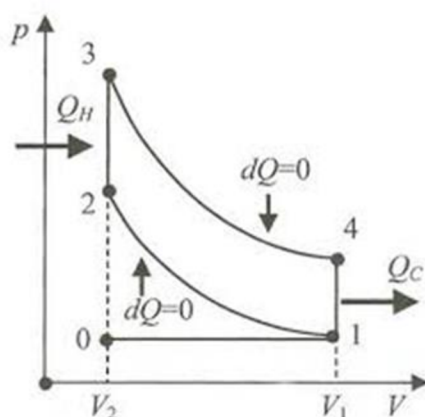
1. Sání – píst se pohybuje do dolní úvrati, sací ventil je otevřen a je nasávána spalovací směs (nebo vzduch).
2. Komprese (stlačení) – píst se pohybuje do horní úvrati, oba ventily jsou uzavřeny, zvyšuje se tlak a teplota, snižuje se objem. Před dosažením horní úvrati je směs zažehnuta elektrickou jiskrou od zapalovací svíčky a začne probíhat exotermická chemická reakce (hoření směsi).
3. Expanze – oba ventily uzavřeny, při spalování směsi se uvolňuje chemická energie paliva a přeměňuje se na teplo. Ve spalovacím prostoru narůstá tlak a teplota spalin, které expandují a tlačí píst do dolní úvrati. Přímočarý pohyb pístu je přes ojnici přeměněn na rotační pohyb klikové hřídele.
4. Výfuk – píst se pohybuje do horní úvrati, výfukový ventil je otevřen a píst vytlačuje spaliny do výfukového potrubí.



Obr. 1 Princip činnosti zážehového motoru [6]

1.3.1 OTTŮV CYKLUS

Ottův cyklus je přímý teoretický cyklus zážehových motorů. Je to nejjednodušší model, který slouží především pro základní teoretické výpočty, na jejichž základě je možno vytvořit si přibližnou představu o parametrech motoru, jako je termická účinnost, kompresní poměr nebo potřebný přívod tepla. Účinnost teoretických cyklů je vždy vyšší než účinnost skutečných cyklů, přičemž platí, že horní hranice účinnosti je dána účinností ideálního Carnotova cyklu [2]. Na obr. 2 je zobrazení Ottova cyklu v p-V diagramu. Je možno vidět, že Ottův cyklus se skládá ze dvou adiabat a dvou izochor.



Obr. 2 Ottův cyklus [2]

Děj 0-1 znázorňuje přívod směsi vzduchu a paliva. Děj 1-2 značí adiabatickou kompresi směsi na takový tlak, aby teplota v bodě 2 byla nižší, než je teplota vznícení směsi vzduchu a paliva, protože jinak by došlo k samozápalu a klepání motoru. Spalování paliva je nahrazeno izochorickým přívodem tepla Q_H (děj 2-3), následuje adiabatická expanze zplodin hoření (děj 3-4) a výfuk zplodin hoření je nahrazen izochorickým odvodem tepla Q_c (děj 4-1). Poslední děj 0-1 představuje výtlak zbytků zplodin hoření [2].

ÚČINNOST OTTOVA CYKLU

Termická účinnost Ottova cyklu je vyjádřena rovnicí [2]:

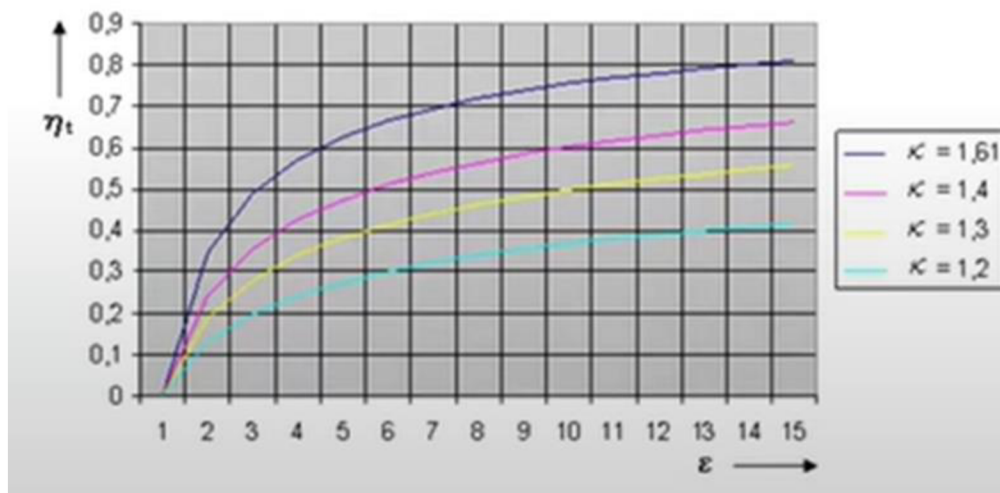
$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\varepsilon_k}\right)^\kappa \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad (2)$$

$$\varepsilon_k = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

kde κ je Poissonova konstanta; c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku; c_v měrná tepelná kapacita za konstantního objemu; ε_k je kompresní poměr; V_1 je objem nasáté směsi, V_2 objem stlačené směsi

Termická účinnost Ottova cyklu tedy narůstá se zvyšujícím se kompresním poměrem a s vyšší Poissonovou konstantou, nicméně u zážehových motorů se při zvyšování kompresního poměru zároveň zvyšuje riziko nežádoucího samovznícení směsi. Proto nelze zvyšovat kompresní poměr neomezeně, ale je nutné hledat kompromis. V diagramu na obr. 3 je znázorněna závislost účinnosti Ottova cyklu na jednotlivých parametrech.



Obr. 3 Závislost účinnosti Ottova cyklu na kompresním poměru ϵ a Poissonově konstantě κ [10]

1.4 PALIVA ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

Základní rozdělení paliv pro zážehové motory je na plynná a kapalná. Nejvýznamnějším z nich je benzín, který patří mezi kapalná paliva. K němu existuje řada alternativ, jako propan-butan, zemní plyn, ethanol nebo vodík. Většina vozidel na alternativní pohon je však pouze přestavěna z klasických benzínových vozidel, a proto mají i benzínovou nádrž. Jedná se tak o více palivové motory, které mohou fungovat jak na benzín, tak například na zemní plyn. Jednotlivé alternativy budou podrobně popsány v dalších kapitolách práce.

1.4.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA PALIVA

U paliv jsou vyžadovány tyto vlastnosti [4]:

- dobrá mísitelnost se vzduchem pro vytvoření zápalné směsi
- odolnost proti samovznícení (vysoké oktanové číslo)
- vysoká výhřevnost (objemová i hmotnostní)
- chemická stálost při různých podmínkách
- bezpečná manipulace
- nízký obsah nečistot (hlavně síry, olova)
- nekorozivnost
- zápalnost i při nízké teplotě okolí
- nízká cena

U kapalných paliv je nezbytným požadavkem, že musí být lehce odpařitelná (benzín, ethanol).

1.4.2 BENZÍN A JEHO VLASTNOSTI

Benzín je kapalně uhlovodíkové palivo, které je lehce odpařitelné. Je vyráběn frakční destilací ropy. Destilační rozmezí teplot je 30–210 °C. Je tvořen především uhlovodíky se 4–10 atomy uhlíku, vyšší uhlovodíky se vyskytují jen ve stopovém množství [4]. Surový benzín nespĺňuje požadavky na paliva, například nemá dostatečně vysoké oktanové číslo. Požadovaných vlastností se dosahuje aditivací benzínu. Pro zvýšení oktanového čísla se v současnosti do benzínu přimíchávají například alkoholy (ethanol, methanol). Proti zamrzání vody se do benzínu přidávají alkoholy a ketony (např. aceton). Benzín má relativně vysokou hmotnostní

výhřevnost a velkou hustotu, takže jeho objemová výhřevnost vztažená na litr paliva je pak lepší než u alternativních paliv, jak ukazuje graf na obr. 4 [9].



Obr. 4 Hustota energie vztažená na jeden litr paliva [9]

Vlastnosti benzínu, jako nejrozšířenějšího paliva, lze považovat za referenční pro porovnávání s každým alternativní palivem. Základní vlastnosti benzínu jsou uvedeny v tab.1.

Tab. 1 Vlastnosti benzínu [3],[13]

Parametr	Jednotka	Benzín
hustota	kg.dm ⁻³	≈ 0,755
tlak par při 37 °C	kPa	50-90
teplota varu	°C	30-210
oktanové číslo (MON)	-	85-87
oktanové číslo (RON)	-	95-97
výhřevnost hmotnostní	MJ.kg ⁻¹	44,03
výhřevnost objemová	MJ.dm ⁻³	32,3
stechiometrický poměr	kg.kg ⁻¹	14,7
produkce CO₂	gCO ₂ .kg ⁻¹	≈ 3135

1.5 SPALOVÁNÍ

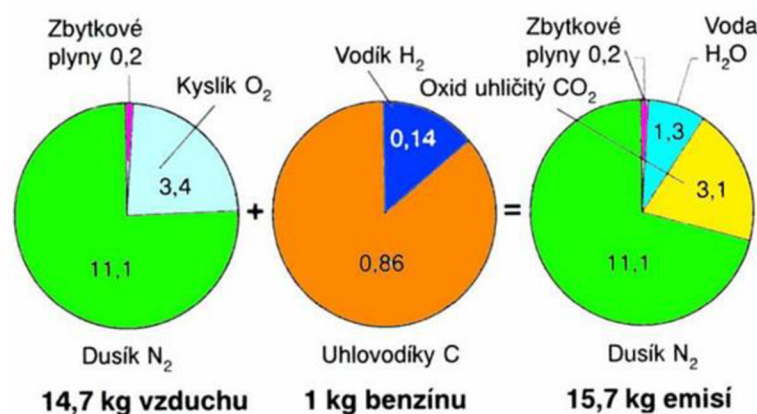
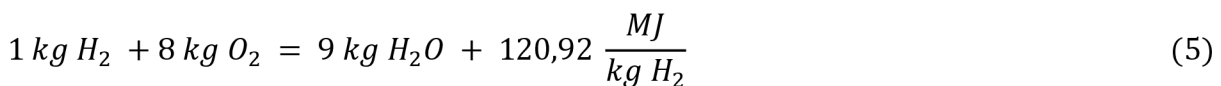
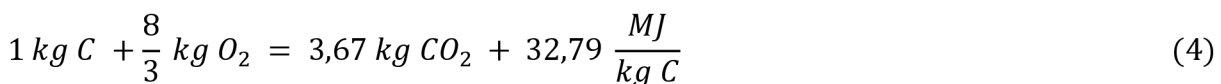
Spalování směsi vzduchu a paliva je exotermní chemická reakce, která probíhá ve spalovacím prostoru válce. Směs je zapálena elektrickou jiskrou od zapalovací svíčky. Jedná se o oxidační proces, při kterém se jednotlivé komponenty paliva slučují s kyslíkem, který je oxidantem. Chemická energie obsažená v palivu se mění na energii tepelnou za zvýšení tlaku ve válci.

Optimalizace procesu spalování má rozhodující vliv na celkovou účinnost motoru, emise, spotřebu paliva a životnost motoru.

1.5.1 DOKONALÉ SPALOVÁNÍ

Při dokonalém spalování dojde k úplnému shoření všech složek paliva a vůbec nedojde ke vzniku zdraví škodlivých látek. K takovému spalování dochází v případě, že je nasátá směs ve stechiometrickém poměru. Proto se toto spalování označuje také jako stechiometrické.

Na obr. 5 lze vidět, že v případě dokonalého spalování vznikají pouze skleníkové plyny vodní pára (H_2O) a oxid uhličitý (CO_2). Dusík (N_2) se v takovém případě reakce vůbec neúčastní, pouze chladí spalovací prostor. Dokonalé spalování je popsáno následujícími rovnicemi [11]:

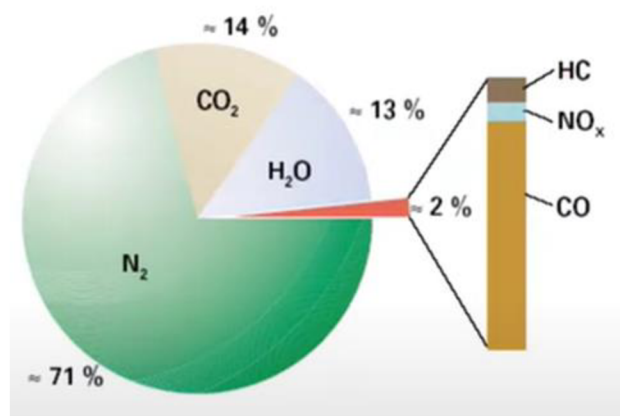


Obr. 5 Dokonalé spalování benzínu [9]

1.5.2 NEDOKONALÉ SPALOVÁNÍ

V praxi se nedaří dosáhnout dokonalého spalování, proto dochází ke vzniku nejrůznějších škodlivin. Pokud je součinitel přebytku vzduchu $\lambda < 1$ (bohatá směs), je ve směsi málo kyslíku, takže nedojde k dokonalé oxidaci uhlíku. Výsledkem je vznik jedovatého oxidu uhelnatého (CO). Rovněž dusík (N_2) se účastní reakce a vznikají tak zdravotně závadné oxidy dusíku (NO_x). Emise oxidů dusíku prudce narůstají při spalování chudé směsi, tedy jsou problémem spíše vznětových motorů. Dalším produktem nedokonalého spalování jsou nespálené uhlovodíky (HC) [1]. Graf na obr. 6 ukazuje množství jednotlivých složek spalin při nedokonalém spalování benzínu, přičemž je vidět, že oxid uhelnatý tvoří většinu škodlivin. Vznik CO je popsán rovnicí [6]:

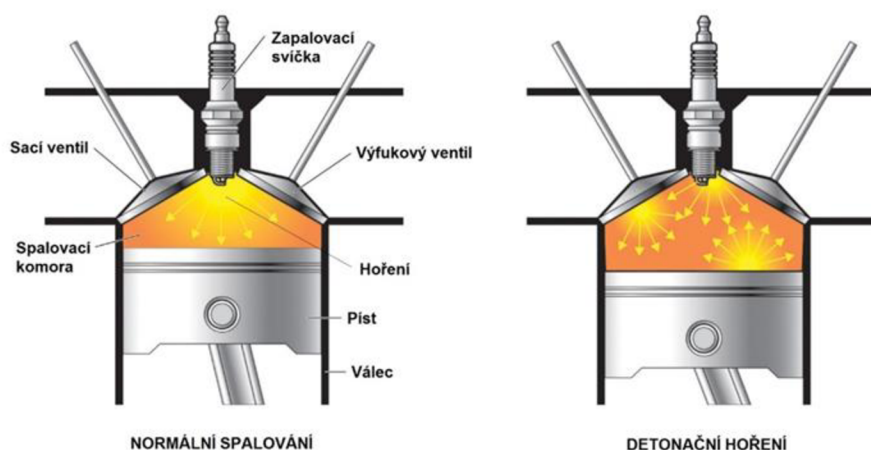




Obr. 6 Nedokonalé spalování benzínu [11]

1.5.3 DETONAČNÍ SPALOVÁNÍ

Jedná se nekontrolované samovznícení směsi v několika místech spalovacího prostoru (obr. 7). Rychlost šíření plamene je v těchto místech mnohem vyšší než rychlost plamene od zapalovací svíčky. Důvodem je to, že může dojít k překročení zápalné teploty v nespálené části směsi vlivem šíření tlakové vlny od svíčky, a to ještě před tím, než k této směsi dosáhne čelo plamenu. Dochází k nerovnoměrnému hoření směsi, které má explozivní charakter, což vede k prudkému nárůstu teploty a vzniku tlakových vln ve válci, které se šíří rychlostí až 2300 m/s [14]. To se projevuje výrazným kovovým zvukem, který je označován jako klepání motoru. Při závažnějším a dlouhodobém detonačním spalování může dojít k vážnému poškození dna pístu a hlavy válců [1]. Na vznik detonačního spalování má vliv řada faktorů. Riziko klesá s lepším chlazením spalovacího prostoru, s vyšším oktanovým číslem paliva, s vhodnou volbou spalovacího prostoru (nejčastější střechovitý), s použitím bohaté směsi, snížením předstihu zážehu nebo snížením kompresního poměru. Zároveň ale platí, že snížení rizika vzniku detonačního spalování může vést například ke snížení účinnosti nebo zvýšení emisí [1].



Obr. 7 Normální a detonační spalování [9]

1.6 EMISE ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

1.6.1 PŘEHLED EMISÍ

Oxid uhličitý (CO_2) je bezbarvý skleníkový plyn. Vzniká při dokonalém spalování, tedy u uhlovodíkových paliv je jeho produkce nevyhnutelná. Při běžných koncentracích je považován za zdravotně nezávadný. Podílí se na vzniku skleníkového efektu, proto v posledních dekádách existuje snaha o snižování jeho produkce [4].

Oxid uhelnatý (CO) je prudce jedovatý, bezbarvý plyn, který vzniká především při spalování bohatých směsí ($\lambda < 1$) [4]. Nedostatek kyslíku způsobuje nedokonalou oxidaci uhlíku obsaženého v palivu. Má velmi silnou afinitu na hemoglobin (krevní barvivo), se kterým vytváří karboxyhemoglobin, což vede kablokování přenosu kyslíku v krvi [3]. Rovněž se podílí na vzniku smogu. Zážehové motory produkují výrazně více CO než motory vznětové.

Oxidy dusíku (NO_x) zahrnují oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Oxid dusnatý je produktem nedokonalého spalování. Nejvyšší produkce NO_x je při spalování chudých směsí s přebytkem vzduchu ($\lambda = 1,05-1,1$), protože je ve směsi dostatek kyslíku [1]. Oxid dusičitý vzniká v největší míře až poté, co se oxid dusnatý dostane do atmosféry. Vliv na lidské zdraví mají až při vyšších koncentracích, přičemž NO_2 je nebezpečnější, protože se usazuje na stěnách sliznice, kde dochází ke vzniku kyseliny dusičné, což vyvolává záchvaty kašle a pocit dušení. Dále mají NO_x velký vliv na tvorbu letního smogu [4]. U zážehových motorů se daří NO_x dobře eliminovat v třicestném katalyzátoru.

Nespálené uhlovodíky (HC) zahrnují nejrůznější skupiny uhlovodíků, přičemž se škodlivost jednotlivých skupin významně liší. Jsou produktem nedokonalého spalování. Vznikají hlavně při spalování bohatých směsí, kdy je ve spalovacím prostoru nedostatek kyslíku, což vede k neúplné oxidaci uhlovodíkových molekul. Dále vznikají například na stěnách válce, kde vlivem ochlazení dojde k předčasnému zastavení hoření směsi. Nejvíce škodlivé jsou tzv. polycyklické aromatické sloučeniny, které jsou karcinogenní. Aldehydy zase působí dráždivě na sliznici a oči. Nespálené uhlovodíky se podílejí na tvorbě letního smogu [1],[4].

Pevné částice (PM) jsou primárně tvořeny uhlíkem a malým množstvím vody, dusíku a sulfátu. Jsou produktem nedokonalého spalování. Vznikají především při spalování chudých směsí, a to v případě, kdy je z uhlovodíkového paliva spálen pouze vodík, zatímco oxidace uhlíku vůbec neproběhne. Pevné částice mají různou velikost. Částice větší než jeden mikrometr lze vidět pouhým okem (černý kouř jdoucí z výfuku vozidla), ale v současnosti se pozornost upírá více na částice menší než jeden mikrometr, které nejsou okem viditelné. Ze zdravotního hlediska jsou nejnebezpečnější nejmenší pevné částice, protože je u nich nejvyšší pravděpodobnost, že se usadí v plicích [1]. Při dlouhodobé expozici mohou být karcinogenní. Dále dráždí oči, jícen či průdušky [3]. Problémové jsou hlavně u vznětových motorů a zážehových motorů s přímým vstřikem.

1.6.2 EMISNÍ NORMY

EURO 6, VI

Jedná se o aktuálně platnou emisní normu v rámci Evropské unie, která stanovuje maximální možné množství emisí škodlivých látek v gramech na ujetý kilometr. Nevztahuje se na produkci CO_2 ani oxidů síry. Pro osobní automobily a transity se norma značí arabskou číslicí (Euro 6), pro kamiony a autobusy pak římskou číslicí (Euro VI). Tab. 2 obsahuje emisní limity pro osobní automobily se zážehovými motory dle verze Euro 6 [12].

Tab. 2 Emisní limity stanovení normou EURO 6 [12]

Jednotka	Oxid uhelnatý CO	Oxidy dusíku NO _x	Nespálené uhlovodíky HC	Pevné částice (přímý vstřík)
g/km	1,0	0,060	0,01	0,005

SNIŽOVÁNÍ EMISÍ CO₂

V Evropské unii je přibližně 12 % emisí CO₂ vyprodukováno osobními automobily [15]. Proto existuje dlouhodobá snaha o postupné snižování těchto emisí. Legislativní požadavky jsou vždy vztaženy na flotilu automobilů (včetně elektromobilů a hybridních vozidel), tedy požadavek na maximální produkci CO₂ je vždy průměrem produkce všech vozidel flotily. Nejnovější regulace požaduje, aby nové osobní automobily průměrně produkovaly maximálně 95 gramů CO₂ na ujetý kilometr (gCO₂/km) [15]. Současné legislativní požadavky představují velký problém pro výrobce vozidel se spalovacími motory, především na klasická kapalná paliva (benzín, nafta) [16]. Oxid uhličitý je totiž produktem dokonalého spalování, takže jej ze spalin nelze odstranit, pokud jsou spalována paliva na bázi uhlíku. V současné době se proto pozornost obrací především k elektromobilům, ale znovu se objevuje i snaha o větší rozvoj automobilů na alternativní uhlovodíková paliva, protože mají příznivější emise.

1.6.3 METODY VYHODNOCOVÁNÍ PRODUKCE EMISÍ CO₂

ANALÝZA TANK-TO-WHEEL (TTW)

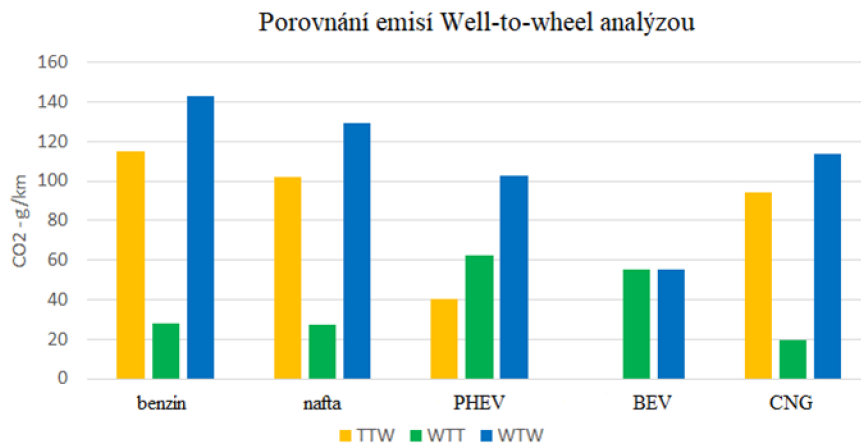
Název této analýzy v překladu znamená „z nádrže ke kolu“, což znamená, že tato metodika zohledňuje pouze produkci emisí při samotném spalování paliva v motoru. Určujícím faktorem je pak produkce CO₂ na kilometr jízdy (gCO₂/km). Nezohledňuje emise CO₂ z výroby paliva, přepravy paliva ani třeba výrobu či likvidaci samotných vozidel. Tento přístup poskytuje značně nepřesný pohled na problematiku emisí [3]. Například emise CO₂ elektromobilů jsou optikou TTW vyhodnoceny jako nulové, přičemž ale není zohledněna výroba elektrické energie.

ANALÝZA WELL-TO-WHEEL (WTW)

Tento přístup, v překladu „od zdroje ke kolu“, k vyhodnocování produkce CO₂ je komplexnější a přesnější, protože na problematiku pohlíží širěji. K tank-to-wheel totiž přidává ještě analýzu well-to-tank („od zdroje do nádrže“, WTT), která zohledňuje produkci emisí a energetickou náročnost těžby a přepravy základních surovin (např. ropa, zemní plyn), výroby a přepravy paliva. Souhrnně pak tyto dvě analýzy tvoří analýzu well-to-wheel [3]. Na obr. 8 je uveden graf, který analýzou WTW porovnává produkci emisí CO₂ u automobilů na benzín, naftu, CNG, a také u elektromobilů (BEV) a plug-in hybridů (PHEV).

ANALÝZA CRADLE-TO-GRAVE

Tato analýza, v překladu „od kolébky do hrobu“, problematiku emisí CO₂ vyhodnocuje v nejširší míře. Na rozdíl od WTW analýzy zohledňuje také ekologický aspekt výroby a likvidace (recyklace) vozidla [18].



Obr. 8 Porovnání emisí CO₂ analýzou WTW [17]

1.7 DŮVODY HLEDÁNÍ ALTERNATIV

Nejdůležitější důvody lze shrnout v několika bodech:

- velký tlak na snižování emisí oxidu uhličitého
- snižování závislosti na fosilních palivech (především ropného původu), ať už z důvodu jejich vyčerpatelnosti a škodlivosti spalování, nebo z politických důvodů
- snaha využít i vedlejší či odpadní produkty, které by jinak zůstaly nevyužity
- snižování škodlivých emisí, které představují zdravotní riziko nebo mají negativní vliv na životní prostředí (typicky smog či kyselá deště)
- v dřívějších dobách býval z různých důvodů nedostatek benzínu či nafty
- ekonomické důvody (cena alternativních paliv je zpravidla nižší)

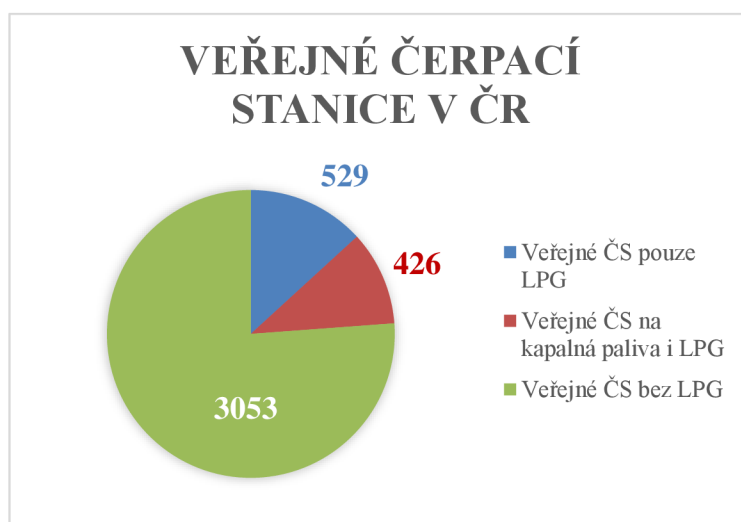
2 LPG

LPG je zkratkou anglického Liquefied Petroleum Gas, což v překladu znamená zkapalněný ropný plyn. Patří do kategorie plyných alternativních paliv fosilního původu. Z chemické podstaty se jedná o směs uhlovodíků, především alkanů propanu a butanu. Propan-butan se běžně užívá při vaření či vytápění, ale zároveň je nejvýznamnějším alternativním palivem pro zážehové motory. Využití nalézá jak u osobních automobilů, tak u dopravních prostředků. Továrních automobilů s pohonem na LPG není mnoho, ale běžné automobily na benzín se zpravidla dají přestavět na LPG. Při spalování LPG se produkuje méně CO₂, než při spalování benzínu, proto je toto palivo považováno za šetrnější k životnímu prostředí. LPG je také levnější, protože jeho výroba je méně nákladná [5] a prodej je zatížen nižší spotřební daní.

2.1 ZDROJE, VÝROBA A DISTRIBUCE LPG

Zkapalněný ropný plyn je vedlejším produktem jak při zpracování ropy, tak při zpracovávání zemního plynu. Přibližně 60 % LPG je získáváno úpravou zemního plynu [19]. Vytěžený zemní plyn je nutné ještě před přepravou zbavit nežádoucích složek, ke kterým patří i propan a butan. V rafineriích se oddělují vyšší uhlovodíky vícestupňovou rafinací a dochází k výrobě propanu a butanu. Zbylých 40 % je získáváno v ropných rafineriích pomocí frakční destilace surové ropy, přičemž surová ropa obsahuje přibližně 1–4 % frakce LPG, a také se LPG získává stabilizací benzínů [5]. Transport paliva nejčastěji probíhá po železnici (až 50 tun na železniční cisternu [22]) a následně automobilovými cisternami, které mohou převážet i 28 tun zkapalněného plynu [23]. Při přepravě se využívá dvou příznivých vlastností LPG. První vlastností je malý objem plynu ve zkapalněném stavu, druhou je pak vysoké množství energie obsažené v jednom litru či kilogramu.

V ČR existuje poměrně rozsáhlá síť veřejných čerpacích stanic na LPG. Graf na obr. 9 ukazuje, že čerpacích stanic, kde je možno načerpat LPG, bylo v první polovině roku 2020 už přes 950 [21]. Na základě odhadu České asociace LPG jezdí v ČR přes 170 000 automobilů na LPG [24], což znamená, že na jednu čerpací stanici připadá v ČR asi 178 automobilů.



Obr. 9 – Množství veřejných čerpacích stanic na LPG k 17. 2. 2020 [21]

2.2 VLASTNOSTI LPG

LPG je podle definice vysoce těkavá uhlovodíková kapalina s výrazným zápachem, která se zpravidla uchovává pod tlakem. V plynném stavu tvoří se vzduchem výbušnou směs. Je těžší než vzduch, takže se zdržuje u země a v dutinách [25]. V kapalném stavu může způsobit omrzliny. Objem zkapalnělého LPG je asi 260x menší než v plynném stavu [22]. Kilogram LPG je tvořen přibližně 82,3 % uhlíku, zatímco benzín přibližně 85,5 %, což při spalování vede k úspoře emisí CO₂ [13]. Jak už bylo napsáno, LPG je primárně složeno z propanu a butanu, přičemž ten se dále rozděluje na n-butan a izobutan. Pro všechny alkany je společné, že dobře reagují s kyslíkem, což při spalování vede ke vzniku oxidu uhličitého či uhelnatého.

Tab. 3 ukazuje základní vlastnosti propanu a butanu ve srovnání s benzínem. Hmotnostní výhřevnost je u LPG vyšší, avšak z důvodu nižší hustoty je nižší i objemová výhřevnost jednoho litru paliva. Proto mají vozidla na LPG vyšší spotřebu [3].

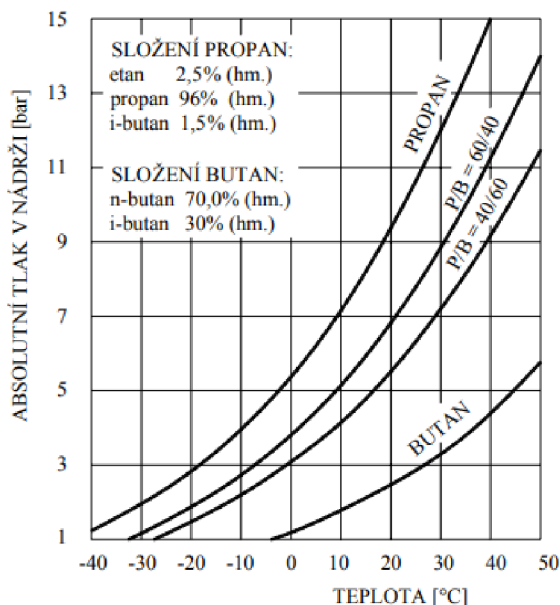
Tab. 3 Vlastnosti propanu, butanu a benzínu [3],[13]

Parametr	Jednotka	Propan	Butan	Benzín
hustota při 15 °C	[kg.dm ⁻³]	0,508	0,584	0,755
tlak par při 37 °C	[kPa]	1210	260	50-90
teplota varu	[°C]	-42,6	-0,6	30-225
oktanové číslo (MON)	-	97	89	85-87
výhřevnost hmotnostní	[MJ.kg ⁻¹]	46,37	45,78	44,03
výhřevnost objemová	[MJ.dm ⁻³]	23,28	26,51	32,3
stechiometrický poměr	kg.kg ⁻¹	15,7	15,44	14,7

2.3 POŽADAVKY NA KVALITU PALIVA

2.3.1 TLAK PAR

Složení směsi LPG není pevně dáno. Liší se v závislosti na způsobu výroby i podle norem jednotlivých států, ale především se mění poměr propanu a butanu podle ročního období. V zimních měsících je poměr propanu a butanu přibližně 60/40, jelikož propan má nižší teplotu varu, takže dochází ke snadnějšímu odpaření. Právě tlak par v palivové nádrži je podstatný, jelikož tlačí zkapalněné palivo do výparníku. U starších palivových systémů bez čerpadla je to jediný způsob, jak zajistit spolehlivou funkci motoru i v zimě. Negativním důsledkem je zvýšení spotřeby LPG, jelikož propan má nižší objemovou výhřevnost. V letních měsících lze naopak dosáhnout velmi vysokých tlaků par, takže se běžně používá poměr opačný, tedy 40/60, avšak konkrétní poměr se liší stát od státu [4]. Diagram na obr. 10 pak ukazuje závislost absolutního tlaku v nádrži na teplotě okolí. Je možno vidět, že tlak par butanu je pod teplotou 0 °C nižší než tlak atmosférický [22].



Obr. 10 Závislost tlaku v nádrži na složení a teplotě [22]

2.3.2 OKTANOVÉ ČÍSLO

Oktanové číslo LPG vypočtené motorovou metodou je součástí normy ČSN EN 589, která také stanovuje, že jeho minimální hodnota je 89 jednotek [25]. Oktanová čísla podle výzkumné metody jsou zhruba o 10 jednotek vyšší než spočtená motorovou metodou a jsou více používána v praxi. Podle této metody pak oktanové číslo LPG dosahuje hodnot 105-110 jednotek, zatímco oktanové číslo benzínu dosahuje 95-97. Vliv na výsledné oktanové číslo má poměr propanu a butanu, ale také klesá s množstvím přítomných alkenů [4].

2.3.3 NORMOVANÉ MNOŽSTVÍ SÍRY A ODORIZACE

Další normovaný požadavek se týká obsahu síry v palivu. Platí, že přítomnost síry je nežádoucí a cílem je její obsah co nejvíce snižovat, jelikož při spalování vzniká oxid siřičitý SO_2 , který má negativní vliv jednak na životní prostředí, jednak snižuje účinnost katalyzátoru při odvodu spalin do výfuku, což se při větším obsahu síry v palivu může projevit zvýšením emisí dalších škodlivých látek. Jednoznačně nežádoucím je pak přítomnost sulfanu (sirovodíku) H_2S , který je silně korozivní. Sirné sloučeniny v LPG způsobují velmi rychlou korozi měděných částí palivové soustavy. Dochází tak ke vzniku sulfidů, které se postupně usazují v palivovém filtru [4]. Nejnovější aktualizace normy ČSN EN 589 (2019) stanovuje, že palivo LPG má být zcela nekorozivní, a proto sulfan nesmí být vůbec přítomný a celkový obsah síry nesmí převýšit 30 mg/kg [25].

ODORIZACE LPG

Z důvodu výbušnosti směsi LPG a vzduchu dochází k tzv. odorizaci, což je přidání malého množství silně zapáchající látky s obsahem síry. Tento proces patří k základním požadavkům na bezpečnost paliva, protože výrazně zjednodušuje indikaci úniku plynu [4].

2.3.4 OLEJOVITÝ ZBYTEK Z LPG

Další problémovou složkou LPG jsou tzv. vysoko vroucí látky, typicky vyšší uhlovodíky, ať už areny (aromatické uhlovodíky) nebo alkeny (nenasycené uhlovodíky). Kvůli jejich vysoké teplotě varu nedochází k jejich úplnému odpaření, takže se hromadí v odpařovači a při vyšším

množství narušují funkci regulačních členů plynové soustavy, například regulačních systémů elektronického řízení bohatosti směsi. Rovněž se usazováním neodpařených zbytků postupně zmenšuje průtočný profil plynových trubek. Ve výsledku tak dojde k problémům se seřazením motoru, a tak i ke snížení výkonu a zhoršení emisí [4]. U dřívějších vozidel na LPG se muselo pravidelně přistupovat po ujetí 2000 km k odkalení odpařovače a čištění palivové soustavy. Norma ČSN EN 589 postupně snižuje maximální povolené množství nečistot, takže paliva jsou stále kvalitnější, proto se i snížila frekvence servisních prohlídek [22].

2.4 SPALOVÁNÍ A EMISE

LPG je uhlovodíkové palivo, tedy proces spalování směsi se vzduchem v zážehovém motoru je velmi podobný, jako je v případě spalování benzínu. Znovu platí, že v případě dokonalého spalování vzniká pouze voda a CO₂. V případě nedokonalého spalování pak NO_x, CO, HC a oxidy síry. Pevné částice jsou zastoupeny ve velmi malém množství [5]. Množství emisí ze spalování LPG je celkově nižší než při spalování benzínu, takže LPG je v každém ohledu ekologičtější varianta. Složení nespálených uhlovodíků z LPG se liší od těch benzínových, protože LPG je tvořeno především nižšími uhlovodíky, hlavně propanem a butanem. Emise HC ze spalování LPG tak obsahují méně škodlivin [35]. Při spalování LPG je produkováno přibližně 73,6 gCO₂/MJ, zatímco v případě benzínu je to 85,8 gCO₂/MJ [5]. Moderní vozidla, jako například Dacia Duster 1.0 TCe, udávají 11% úsporu produkce CO₂ [13].

Ukazuje se, že příznivý vliv na spalovací proces má přidávání vody, ať už ve formě páry nebo emulze s palivem. Dochází jednak ke snížení emisí a spotřeby, jednak ke zvýšení termické účinnosti, přičemž míra zlepšení roste s hmotnostním poměrem vody a paliva. Voda ochlazuje směs paliva a vzduchu, takže snižuje rychlost hoření a teplotu ve spalovacím prostoru, což vede ke snížení emisí NO_x (nejvýraznější u chudých směsí) a celkovému ochlazení spalin. Přítomná voda má příznivý efekt na lepší a úplnější průběh spalování, takže dochází ke snížení emisí CO (především u bohatých směsí) [5]. Tab. 4 obsahuje údaje z měření vlivu přidávání vody na spalovací proces LPG. Testován byl osobní automobil Daewoo Lanos vyrobený v roce 2000. Nejprve bylo zkoušeno spalování čistého LPG, posléze LPG s 2,22 hm% vodní páry. Výsledky jsou vyhodnoceny metodikou NEDC. Ukazuje se, že i malé množství vodní páry dokáže výrazně snížit emise a spotřebu [5].

Tab. 4 Rozdíly emisí při spalování čistého LPG a LPG s přidanou vodou [5]

	Jednotka	CO	CO ₂	NO _x	HC
LPG	g/km	4,86	144,46	0,16	1,42
LPG + voda	g/km	3,15	136,41	0,15	1,21

2.5 VÍCE PALIVOVÁ ŘEŠENÍ

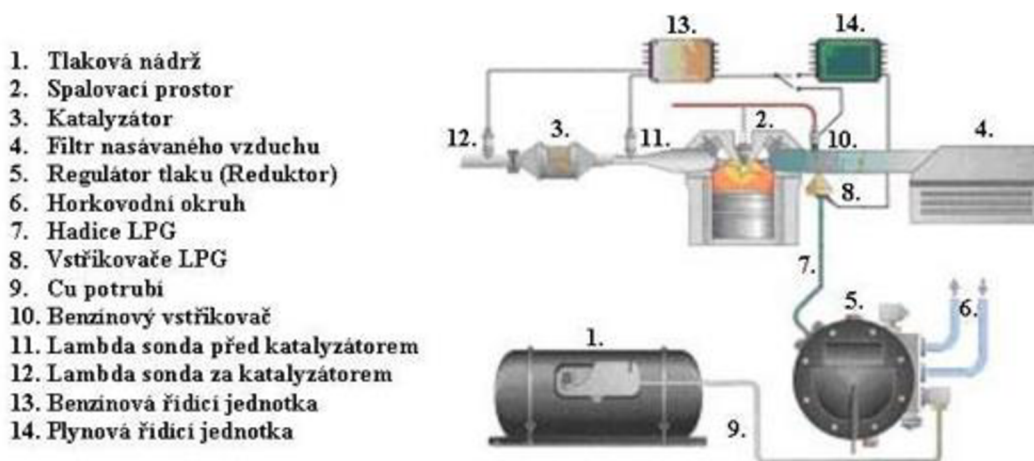
Možnost přestavby původně benzínových automobilů je pro rozvoj LPG stěžejní, protože továrních automobilů s plynovým zážehovým motorem není mnoho. Nespornou výhodou více palivových řešení je fakt, že mají dvě nádrže, tudíž větší dojezd. Nevýhodou je cena samotné přestavby.

2.5.1 MODERNÍ ŘEŠENÍ PŘESTAVBY NA LPG

SEKVENČNÍ VSTŘIKOVÁNÍ PLYNNÉ FÁZE PRO MOTORY S NEPŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM

System tzv. sekvenčního vstřikování LPG se začal používat počátkem 21. století. Označuje se za tzv. IV generaci. Započal tak novou éru řešení vstřikování, neboť do značné míry vyřešil problém snížení výkonu zážehové motoru při použití LPG [29].

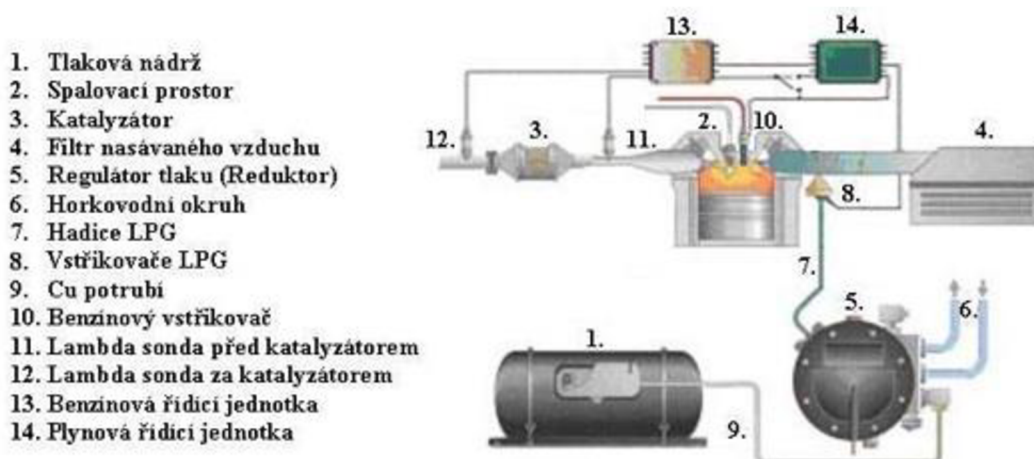
Princip spočívá v tom, že systém je vybaven samostatnými vstřikovači pro každý z válců motoru, takže je i palivo dávkováno pro každý válec zvlášť. Dávkování plynu za sací ventil je řízeno elektronicky, což umožňuje velmi přesnou regulaci doby vstřiku. Řídící jednotky jsou zapojeny sériově (obr. 11), plynová řídící jednotka tak pouze koriguje signály z benzínové řídící jednotky, aby došlo k co nejoptimálnějšímu provozu [28]. Právě přesné řízení vstřikování umožňuje dosáhnout minimálních emisí a je důvodem dosažení příznivých parametrů provozu, jako jsou spotřeba a výkon, který je srovnatelný s provozem na benzín. Těchto parametrů je však dosaženo za cenu vyšší komplikovanosti systému, což se projevuje na ceně přestavby, ale také například v požadavcích na kvalitu paliva. Platí totiž, že čím komplikovanější systém, tím větší nároky na čistou a kvalitu paliva [4]. Nevýhodou je, že motor startuje na benzín a řídící jednotka přepíná na režim LPG až po zahřátí motoru a reduktoru. Tento systém je často používán u továrních modelů [32].



Obr. 11 – Systém sekvenčního vstřikování plynné fáze LPG [28]

SEKVENČNÍ VSTŘIKOVÁNÍ PLYNNÉ FÁZE LPG PRO MOTORY S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM

Tento systém vstřikování (obr. 12) se začal používat v roce 2009 a předcházela mu řada pokusů o montáže běžných systémů IV. generace do vozidel s motory s přímým vstřikem. Konstrukční řešení systémů sekvenčního vstřikování je u motorů s přímým vstřikem složitější. Největším problémem je tepelné namáhání vstřikovačů benzínu, které zasahují přímo do spalovacího prostoru. Princip tohoto systému vstřikování je stejný jako u sekvenčního vstřikování plynu, ale v tomto případě dochází i k pravidelnému vstřikování benzínu, kterým se chladí vstřikovač, jenž by bez tohoto chlazení uhořel a nebyl by tak možný provoz na benzín [28]. Celý proces je ovládán softwarem řídící jednotky, který je vytvořen speciálně pro daný typ motoru. Spotřeba benzínu dříve tvořila v závislosti na stylu jízdy 10 až 30 % celkové spotřeby, avšak nejmodernější řešení, například ALEX IDEA Direct Injection od firmy ALEX, garantuje spotřebu benzínu do 5 % celkové spotřeby, čímž se prakticky dostává na úroveň motorů s nepřímým vstřikem [27].



Obr. 12 Sekvenční vstřikování plynné fáze pro motory s přímým vstřikováním [28]

SEKVENČNÍ VSTŘIKOVÁNÍ KAPALNÉ FÁZE LPG

V principu se jedná o velmi podobné řešení, jako je u vstřikování plynné fáze. Kapalně LPG je vstřikováno do sacího potrubí. V plynové nádrži je umístěno výkonné čerpadlo, které kapalně LPG dopravuje ke vstřikovačům. Součástí je i zpětné vedení přebytečného LPG zpátky do nádrže. Nasávaný vzduch se vstřikováním kapalného LPG ochlazuje, takže zaujímá menší objem a je tak možno nasát do motoru více směsi vzduchu a paliva. Tento systém umožňuje po nastartování na benzín velmi rychlé přepnutí na režim LPG. Přestavba je náročná a komplikovaná. Správná činnost systému vyžaduje perfektní seřízení a vysokou kvalitu paliva i jednotlivých součástí [29],[32].

VSTŘIKOVÁNÍ KAPALNÉ FÁZE LPG ORIGINÁLNÍ PALIVOVOU SOUSTAVOU

Jedná se o jeden z nejnovějších přístupů k řešení přestaveb na LPG, především pro motory s přímým vstřikem. Systém vstřikuje kapalně LPG originálními benzinovými vstřikovači a je ovládán originální řídicí jednotkou benzinového motoru [29]. U tohoto řešení se používají speciální sady, které jsou dělány na míru pro daný typ vozidla a motoru. Výhodou je, že při provozu nedochází k poškození vstřikovačů, které nemusí být chlazeny přístřikem benzínu. Tento systém má deklarovanou schopnost startování na plyn. Umožňuje tak dosáhnout plného provozu na LPG a nejvyššího výkonu a efektivity. Příkladem mohou být systémy firmy Prins [33]. Zároveň se objevuje i kritika, konkrétně systému Prins LiquiMax, podle které systém při studeném startu přimíchává benzín, dále při nižším objemu LPG v nádrži (5-7 litrů) automaticky přepíná na benzín a má vícero problémů souvisejících s tankováním. V závěru tak systém nijak výrazně nezvyšuje výkon oproti jiným variantám, ani nedochází k výrazné úspoře benzínu [27].

2.6 PROBLÉMY A OMEZENÍ U VOZIDEL NA LPG

PARKOVÁNÍ V UZAVŘENÝCH PROSTORECH

LPG je těžší než vzduch, takže se v případě úniku do okolí drží při zemi pod automobilem. Zažehnutí uniklého plynu pak způsobuje explozi. Proto zpravidla není možno parkovat v podzemních garážích a dalších uzavřených prostorech. Rovněž existuje riziko, že uniklý plyn bude klesat do kanalizace nebo nižších pater. Problém s parkováním se částečně řeší lepším odvětráváním garáží a instalací detektorů plynu. V ČR se zatím nejedná o standard, avšak v sousedním Německu už je většina garáží připravena na tento typ automobilů.

V aktuální verzi Národního akčního plánu čisté mobility z 6. 5. 2020 se počítá s uzpůsobením nových a renovovaných podzemních parkovišť pro vozidla na alternativní pohony [20]. Netechnickým řešením problému je pak zřizování parkovacích míst speciálně pro vozidla na LPG.

TANKOVÁNÍ PALIVA

V Evropě se používá vícero druhů plnicích hrdel (koncovek) pro tankování LPG, které se liší průměrem vnitřního závitu, což může při cestě do zahraničí způsobit potíže s kompatibilitou. Řešením může být výměna koncovky na automobilu nebo pořízení tzv. redukce. V ČR se používá hrdlo tzv. italského typu, takže při cestě do Belgie, kde se používá belgický typ, je nutné pořídit vhodnou redukci tankování. Zároveň platí, že plnicí přípojku by měla připojovat a odpojovat pouze obsluha čerpacích stanic. Další nevýhodou při tankování je, že v ne každé zemi je rozšířená síť čerpacích stanic, případně nemají k dispozici palivo odpovídající kvality [26],[29].

SERVISNÍ PROHLÍDKY

U vozidel na LPG jsou povinné každoroční placené revize systému. Po ujetí 20 000 km se provádí servisní prohlídka. Je také vhodné po této době měnit filtr plynné fáze a provést seřízení tlaku plynu. Rovněž je po deseti letech třeba zapotřebí měnit nádrž na LPG [34].

2.7 BioLPG

V posledních letech se začíná více mluvit o tzv. bioLPG, což je chemicky ekvivalentní obdoba klasického LPG. BioLPG se stejně jako fosilní LPG dá považovat za vedlejší produkt. Například ze zbytků jídla a cukrové třtiny, které byly použity na výrobu bioethanolu. Do budoucna se ale počítá s přímou výrobou z dřevěného odpadu či smíšeného odpadu, aby se bioLPG mohlo stát relevantnějším zdrojem [31].

Hlavní výhodou je bezproblémová mísitelnost s klasickým LPG, takže není třeba budovat novou infrastrukturu nebo vymýšlet jiné technické řešení přestavby vozidel. V některých zemích už běžně dochází k přimíchávání bioLPG do propan-butanových láhví nebo do cisteren při přepravě LPG. Do ČR byla první dodávka přivezena v červenci 2020 [31].

Při vyhodnocování uhlíkové stopy optikou well-to-wheel se uvádí, že bioLPG má uhlíkovou stopu o 70 % nižší oproti klasickému LPG, přičemž tato hodnota závisí na technologii a zdrojích výroby, tedy může být ještě vyšší. Úspora vzniká ve fázi well-to-tank, nikoliv při spalování. Oproti naftě se může jednat až o 90% snížení emisí CO₂ [30],[31].

2.8 ZHODNOCENÍ

2.8.1 SHRNUÍ VÝHOD A NEVÝHOD

Výhody:

- nízká cena paliva (zhruba poloviční oproti benzínu)
- možnost přestavby většiny automobilů na LPG a posléze mít dvě nádrže
- snížení škodlivých emisí a emisí CO₂
- velká síť čerpacích stanic (v rámci Evropské unie)
- tlak na snižování emisí CO₂ se vozidel na LPG zatím tolik nedotýká
- vysoká kvalita a čistota paliva [13]

Nevýhody:

- nedostatek továrních modelů
- cena přestavby
- vyšší spotřeba (cena LPG je ale natolik nízká, že vyšší spotřeba nehraje takovou roli)
- omezení ve vjezdu do podzemních garáží
- zmenšení zavazadlového prostoru kvůli nádrži
- každoroční revize, výměna nádrže po 10 letech

2.8.2 AKTUÁLNÍ SITUACE NA TRHU

Navzdory velmi příznivé ekonomice provozu se automobilům na LPG nedaří narušit dominantní postavení aut na benzín či naftu. Důvodů je několik, ale mezi ty hlavní určitě patří příliš malá nabídka nových vozidel, která navíc v průběhu let klesala. Nyní se nicméně začíná mluvit o renesanci tohoto typu aut, protože se začaly objevovat nové modely (značky Dacia nebo Renault). Druhým důvodem je, že v posledních dekadách jsou nejvíce vyráběny přeplňované motory s přímým vstřikem, jejichž přestavba na LPG je komplikovaná a drahá. Třetím důvodem může být nedostatečná propagace, například v České republice nebylo LPG dlouhou dobu považováno za alternativu a změnila to až aktualizace Národního plánu čisté mobility [13]. Mezi další důvody pak patří cena přestavby, nutnost servisních prohlídek a různá omezení, které u automobilů na benzín nejsou. Roli nepochybně hraje i určitá skepse řidičů vůči LPG, mnohdy založená na důvodech, které již nejsou aktuální (výrazný pokles výkonu, nekvalita paliva).

Přestože zatím nedošlo k výraznému rozšíření LPG, tak je to pořád nejpoužívanější alternativní palivo. Postupně se rozšiřuje i mimo osobní automobily, takže lze nalézt například autobusy na LPG. Používáno je už prakticky na celém světě. Začíná se používat také bioLPG, avšak jeho větší rozšíření je otázkou ještě mnoha let [30].

Kvůli malému rozšíření tak LPG nemůže ani plnohodnotně plnit roli ekologičtějšího paliva, proto je v současnosti upozaděno za hojně propagovanými elektromobily. Nicméně je LPG v tomto ohledu stále v lepší pozici než automobily na benzín nebo naftu. Většímu rozšíření LPG tak může v závěru pomoci tlak na zavádění elektromobilů, protože mohou plnit roli určitého přechodného řešení mezi auty na benzín a elektromobily, každopádně to nelze předvídat.

3 PALIVA NA BÁZI METANU

Metan (CH_4) je hlavní složkou zemního plynu, který se řadí do kategorie fosilních a neobnovitelných zdrojů energie. Zemní plyn je tedy z chemické podstaty směs uhlovodíků, hlavně alkanů. Používá se například jako palivo v energetice nebo pro vaření a vytápění. Ve stlačené formě se jedná o důležité alternativní palivo pro zážehové motory.

3.1 ZDROJE ZEMNÍHO PLYNU

Zemní plyn vznikl před mnoha miliony let. Existuje více teorií, z čeho přesně zemní plyn vznikl, ale za velmi pravděpodobnou je považována tzv. organická teorie, podle které zemní plyn vznikl rozkladem organických materiálů (zbytky rostlin a živočichů). Za působení vysokého tlaku a teploty se tyto organické zbytky rozložily na uhlovodíky, hlavně metan. Této teorii nahrává fakt, že zemní plyn se často nachází v ložiskách ropy a uhlí, zároveň ale existují i samostatná ložiska [36]. Zásoby zemního plynu jsou větší než zásoby ropy, takže může být považován za stabilní zdroj ještě na mnoho desítek let dopředu, navíc se stále objevují další ložiska. Největší zásoby se nacházejí v Rusku, v oblasti Středního východu a v USA [22].

Složení zemního plynu je poměrně jednoduché. Kromě dominantního metanu obsahuje také v malém množství vyšší alkany, jako etan, propan, butan či pentan. Může obsahovat také oxid uhličitý, dusík, vodu, hélium nebo nežádoucí sulfan. Složení plynů se nicméně značně liší mezi různými regiony těžby. Takto se zemní plyn rozděluje na suchý (obsah metanu 95-98 %), vlhký (vyšší obsah vyšších uhlovodíků), kyselý (vyšší obsah sulfanu) a zemní plyn s vyšším obsahem nehořlavých plynů (dusík, oxid uhličitý). Další rozdělení je pak na naftový zemní plyn (zpravidla vlhký), který se nachází v ložiskách spolu s ropou, a karbonský zemní plyn (zpravidla suchý), který se nachází v ložiskách spolu s černým uhlím [22], [36].

Obvykle hned na místě těžby dochází k úpravám v rafineriích. Cílem je získání co nejčistšího metanu, takže se odlučují korozivní sirné sloučeniny, voda, inertní plyny nebo třeba propan a butan, které mohou být dále využity například jako palivo LPG. Transport zemního plynu je realizován pomocí rozsáhlé soustavy plynovodů (povrchových a podmořských), případně je možno převážet zkapalněný plyn ve speciálních tankerech.

3.2 VLASTNOSTI ZEMNÍHO PLYNU

Zemní plyn je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Je hořlavý, nejedovatý a nedýchateľný. Je lehčí než vzduch, se kterým tvoří výbušnou směs. Při spalování produkuje nejméně CO_2 ze všech fosilních paliv, protože metan obsahuje nejméně uhlíku ze všech alkanů. Poměr uhlíku ku vodíku je 1:4. Má velmi vysoké oktanové číslo a vysokou hmotnostní výhřevnost. Platí, že kvalitní zemní plyn je suchý (obsahuje přibližně 98 % metanu), čistý a nekorozivní [4]. Podobně jako u LPG dochází k odorizaci, tedy přidání silně zapáchající látky s obsahem síry, aby mohlo dojít k snadné indikaci úniku plynu.

3.3 CNG

CNG je zkratkou anglického Compressed Natural Gas, což v překladu znamená stlačený zemní plyn. Po LPG se jedná o druhé nejrozšířenější alternativní palivo v ČR i v řadě dalších částí světa. Využití nalézá jak u osobních automobilů, tak u dopravních prostředků. Při spalování CNG se produkuje méně CO_2 , než při spalování benzínu či LPG, proto je toto palivo považováno za nejekologičtější z fosilních paliv. Z tohoto důvodu je v České republice

CNG součástí Národního akčního plánu čisté mobility [20]. Ačkoliv je nabídka vozidel na CNG vyšší než v případě LPG, tak ji nelze srovnávat se širokou nabídkou vozidel na benzín. CNG je také levnější než benzín, protože jeho výroba je méně nákladná [5] a prodej je zatížen nižší spotřební daní. V ČR jezdí na CNG přes 27 700 vozidel všech kategorií, přičemž je v ČR zaregistrováno přibližně 8,3 milionu vozidel [38]. Vozidla na CNG tak představují pouze lehce přes 0,3 % všech vozidel. V roce 2018 bylo celosvětově registrovaných skoro 27,75 milionů vozidel na CNG.auta s pohonem na CNG rovněž patří k těm nejbezpečnějším. Čerpací stanice se mohou stavět poblíž plynovodů, čímž odpadá nutnost kamionové či železniční přepravy.

3.3.1 VLASTNOSTI CNG

CNG je skladuje v tlakových nádobách pod tlakem 20-25 MPa, objem stlačeného plynu je asi 200x menší než v nestlačeném plynném stavu [22]. Kilogram CNG je tvořen přibližně 74,25 % uhlíku, zatímco kilogram benzínu přibližně z 85,5 %, což při spalování vede k úspoře emisí CO₂ [13]. Má velmi vysoké oktanové číslo (běžně 128-130), takže i vysokou teplotu samovznícení (až 600 °C), což výrazně snižuje riziko detonačního spalování a klepání motoru [22]. CNG je sušší než benzín a lehčí než vzduch, takže se při úniku velmi rychle rozptýlí [3].

Tab. 5 Vlastnosti CNG a benzínu [4],[13]

Parametr	Jednotka	CNG	benzín
hustota	[kg.m ⁻³]	0,693	≈755
teplota varu	[°C]	-162	30-225
oktanové číslo (RON)	-	128 - 130	95-97
výhřevnost hmotnostní	[MJ.kg ⁻¹]	50	44,03
výhřevnost objemová	[MJ.m ⁻³]	min. 35,7	32 300
stechiometrický poměr	kg.kg ⁻¹	17,2	14,7
produkce CO₂	gCO ₂ .kg ⁻¹	2723	3135

3.3.2 SPALOVÁNÍ A EMISE

Spalování CNG je v principu obdobné jako spalování jiných uhlovodíkových paliv. Metan je nejjednodušší uhlovodík, takže při jeho spalování vzniká nejméně CO₂ a rovněž emise škodlivin jsou příznivější než u benzínu. Díky vysokému oktanovému číslu je možno používat větší kompresní poměr, čímž dochází ke zvýšení účinnosti, nicméně se tím také zvyšuje teplota ve spalovacím prostoru, z čeho plyne požadavek na větší chlazení motoru [39]. Jedním z rozdílů oproti benzínu a LPG je, že CNG je i v nádrži pořád v plynném stavu, takže do motoru vstupuje ve stavu, v jakém bylo natankováno. Jelikož nemusí dojít ke zplynění, tak je umožněn studený start na CNG, nicméně spolehlivost studeného startu se může lišit podle počasí, konkrétního typu motoru nebo technickou úroveň přestavby [39]. Kvůli vysokému oktanovému číslu je k zážehu směsi třeba použít jiskru s vyšší energií. Podobně jako u

ostatních uhlovodíkových paliv platí, že při dokonalém spalování vzniká pouze voda a CO_2 . Dokonalé spalování metanu je popsáno rovnicí [40]:



3.3.3 DVOUPALIVOVÉ SYSTÉMY

Řada výrobců má v nabídce dvoupalivové modely, přičemž hlavní výhodou továrního řešení je lepší optimalizace (např. spalovacího cyklu), úprava jednotlivých konstrukčních dílů a záruka. V současnosti je u továrních modelů standardem přepínaný motor na CNG. Automobily na CNG jsou zpravidla dražší než jejich benzínové alternativy. K továrním modelům patří například Škoda Octavia G-Tec z roku 2018 (viz obr. 13) [41].

Druhou možností je pak dodatečná přestavba, při které je v servisu přidána palivová soustava pro CNG do běžného automobilu na benzín. Podobně jako u LPG platí, že je náročnější přestavět motory s přímým vstřikováním, které však tvoří většinu současných automobilů. Typickým problémem je tepelné namáhání vstřikovačů u motorů s přímým vstřikem, které se při přestavbě řeší jen velmi obtížně. CNG je navíc uchováváno pod tlakem přibližně 20 MPa, což rovněž představuje problém, proto je přestavba na CNG drahá a technicky náročná [22].



Obr. 13 Skoda Octavia G-Tec (2018) [41]

3.3.4 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY

TLAKOVÁ NÁDRŽ

Silnostěnné tlakové nádrže na CNG mají válcový tvar a jsou vyrobeny nejčastěji z vysokopevnostní oceli nebo lehčích a dražších kompozitních materiálů (kevlaru). Existují také varianty nádrží, ve kterých je skořepina vyrobena z hliníkové slitiny nebo vysokopevnostní oceli a jejich povrch je vyztužen kompozitem. Vzhledem k vysokému tlaku, při kterém je palivo skladováno (přibližně 20 MPa), jsou nádrže velmi pečlivě testovány. Je u nich zkoušena odolnost proti zvýšení tlaku (zhruba 30 MPa), rázu či požáru. Z těchto důvodů jsou tyto nádrže bezpečnější než nádrže na benzín nebo naftu, avšak jejich nevýhodou je vysoká hmotnost. Velikosti nádrží jsou různé. Např. ocelová nádrž o objemu 70 litrů váží 70 kg,

zatímco kompozitní nádrž o objemu 71 litrů váží pouze 23,5 kg a pojme 18 m³ CNG [42]. V automobilech je běžně umístěno více tlakových nádrží pro zvýšení dojezdu.

V případě továrních modelů může být tlaková nádrž nainstalována pod vozidlem. Na obr. 13 je ukázáno umístění tlakových nádrží v automobilu Škoda Octavia G-Tec, přičemž žlutě jsou znázorněny dvě kompozitní nádrže, které jsou instalovány pod zavazadlovým prostorem, modře pak je znázorněna ocelová nádrž, která je umístěna před zadní nápravou [41]. Při dodatečné přestavbě se tlaková nádrž umísťuje do zavazadlového prostoru. V případě autobusů se pak nádrže mohou umístit na střechu. Na obr. 14 je detailněji ukázáno umístění nádrží v automobilu Volkswagen Polo TGI z roku 2018.



Obr. 14 Nádrže v automobilu VW Polo TGI z roku 2018 [43]

MULTIVENTIL

Multiventil má zásadní bezpečnostní a regulační význam. Je jím vybavena tlaková nádrž. Reguluje množství odebíraného plynu. Po vypnutí zapalování, přechodu na benzín nebo poruše automaticky uzavírá tlakovou nádrž. V případě zvýšení tlaku v nádrži nebo při požáru automaticky odpustí plyn do ovzduší, kde se rychle rozptýlí [22].

REGULÁTOR TLAKU PLYNU

Udržuje tlak plynu na požadované hodnotě. Plyn v regulátoru expanduje odebráním tepla z chladicího okruhu, na nějž je regulátor napojen, čímž dochází k poklesu tlaku plynu [22].

3.4 BIOMETAN

Biometan je získáván úpravou bioplynu. Při použití v dopravě se označuje jako bioCNG nebo bioLNG. Bioplyn může být vyráběn z biomasy, komunálního a biologického odpadu, čistírenských kalů a z mnoha dalších zdrojů. Běžně obsahuje zhruba 55 % metanu a přibližně třetina je tvořena CO₂, takže musí docházet k úpravám [44]. První úpravou je čištění, při kterém se odstraňuje voda, sirné látky nebo amoniak. Druhou fází úprav je zušlechťování, při které dochází k separování metanu a CO₂. Biometan by měl obsahovat aspoň 95 % metanu a neměl by obsahovat více než 2,5 % CO₂ [44]. Existuje řada způsobů úpravy bioplynu, jako

chemická vypírka, vysokotlaká vodní vypírka nebo membránová separace. Biometan je chemicky ekvivalentní zemnímu plynu, tak je možné jej míchat s fosilním CNG, stejně tak je k jeho distribuci možno využívat stávající infrastrukturu pro zemní plyn, takže rozvoji biometanu v dlouhodobém horizontu nic nebrání [46]. V současnosti je nicméně dražší než zemní plyn [44]. Biometan aktuálně patří k těm nejperspektivnějším palivům, dokonce bývá řazen k tzv. palivům budoucnosti, protože má nejnižší uhlíkovou stopu za celý životní cyklus ze všech paliv pro spalovací motory. Emise CO₂ mohou být nižší až o 80 % oproti konvenčním palivům a až o 60 % oproti CNG (úspora vzniká ve fázi well-to-tank) [45]. Konkrétní hodnoty úspory nicméně závisí na způsobu výroby a použitých surovinách. V Evropské unii by v roce 2030 mohlo bioCNG nahradit až 40 % fosilního CNG používaného v dopravě [46]. V roce 2018 bylo v EU 483 biometanových stanic, v roce 2020 pak už 729, z čehož je patrné, že dochází k rychlému rozšiřování tohoto paliva [46].

3.5 LNG

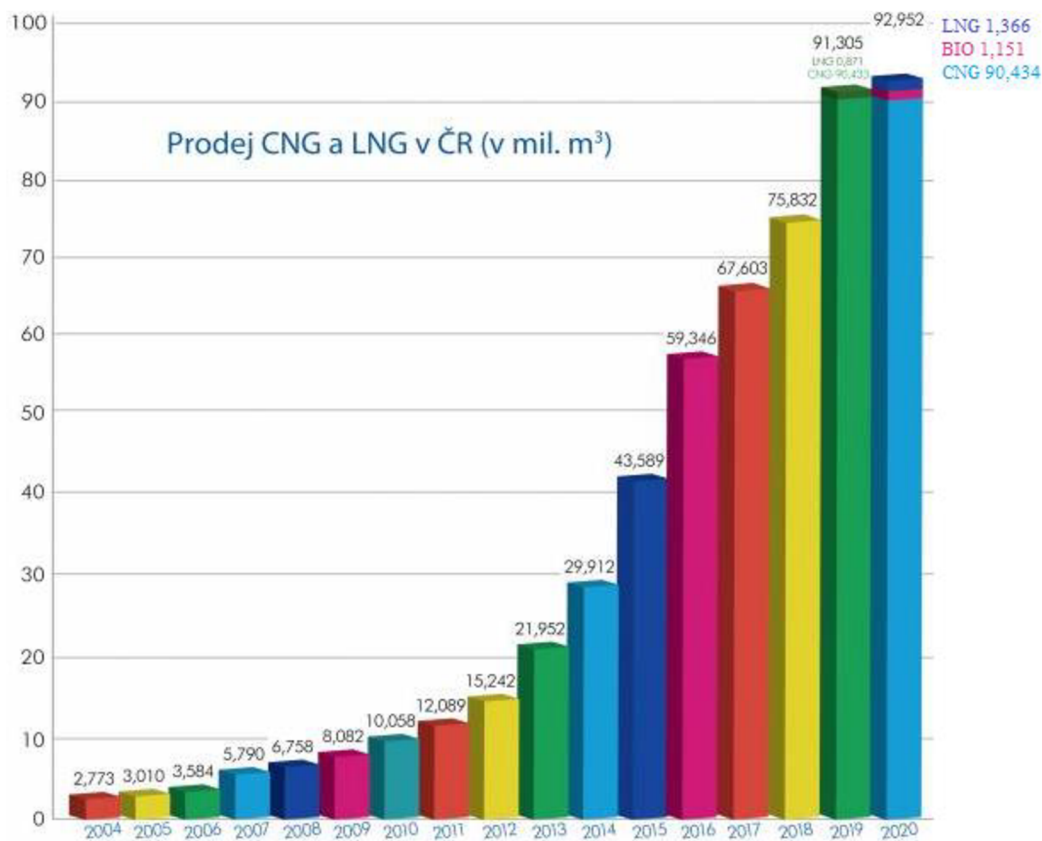
LNG je zkratkou anglického Liquefied Natural Gas, což v překladu znamená zkapalněný zemní plyn. Na rozdíl od CNG není LNG po celou dobu uchováváno v plynné fázi, ale zkapalňuje se při teplotě -162 °C (objem se zmenší asi 600x), což značně komplikuje jeho využití. Objem je tedy přibližně třikrát menší než v případě stlačeného zemního plynu, takže při použití stejně velké nádrže by vozidlo na LNG mohlo teoreticky ujet až trojnásobnou vzdálenost. LNG má namodralou barvu a minimální viskozitu [47]. Z důvodu extrémně nízkých teplot je uchovávaní LNG na čerpacích stanicích komplikované a energeticky náročné, neboť LNG musí být skladováno v dobře izolovaných kryogenních láhvích, které musí být chlazeny tekutým dusíkem. I přes dobrou izolaci láhví dochází k postupnému odpařování, což dále komplikuje skladovací proces. Jedná se tak o málo významné alternativní palivo, které se nicméně pomalu rozšiřuje především v oblastech mimo osobní dopravu. Větší význam má LNG u kamionové dopravy, jednak kvůli snadnějšímu umístění kryogenních nádrží, jednak kvůli velkému dojezdu. Na velké vzdálenosti je možno LNG přepravovat v tankerech, na krátké pak cisternami. Při spalování LNG se produkuje méně CO₂, než při spalování benzínu či LPG, takže z hlediska spalování je považováno za jedno z nejvíce ekologických paliv, nicméně je třeba brát v úvahu energetickou náročnost zkapalňování a skladování [22].

Tab. 6 Vlastnosti LNG a benzínu [4],[22]

Parametr	Jednotka	LNG	Benzín
hustota při 15 °C	[kg.dm ⁻³]	0,42	0,755
teplota varu	[°C]	-162	30-225
oktanové číslo (RON)	-	130	95-97
výhřevnost hmotnostní	[MJ.kg ⁻¹]	54,8	44,03
výhřevnost objemová	[MJ.dm ⁻³]	22,2	32,3
stechiometrický poměr	kg.kg ⁻¹	17,2	14,7

3.6 ČERPACÍ STANICE A SPOTŘEBA CNG, LNG, BIO CNG V ČR

V ČR dosud není rozsáhlá síť veřejných čerpacích stanic na CNG, což představuje jednu z překážek pro větší rozšíření vozidel na toto palivo, nicméně počet čerpacích stanic postupně narůstá. V roce 2020 bylo v ČR možno natankovat CNG na 219 čerpacích stanicích [37]. Existují dva druhy stanic – pro rychlé plnění (typicky veřejné čerpací stanice) a pro pomalé plnění (v domácnostech či menších firmách) [22]. Podle Českého plynárenského svazu jezdilo v ČR v roce 2020 přes 25 000 osobních automobilů na CNG, což znamená, že na jednu čerpací stanici připadá v ČR přibližně 115 osobních automobilů, nicméně je nutno brát v úvahu nízkou hustotu čerpacích stanic mimo větší města. V případě LNG bylo v ČR v roce 2020 pouze 36 vozidel (z toho 26 nákladních) s tímto pohonem, a dvě čerpací stanice. Graf na obr. 15 ukazuje vývoj výtoče paliv na bázi zemního plynu v průběhu let, přičemž je zahrnuta také výtoč biometanu, avšak CNG tvoří zcela dominantní složku (90,434 milionů kubíků z celkových 92,952 milionů kubíků) [37]. Je rovněž patrné, že v ČR se s používáním bioCNG teprve začíná, ale dá se předpokládat rychlý nárůst, jako je tomu v západní Evropě.



Obr. 15 Vývoj výtoče CNG, LNG, biometanu v ČR [37]

3.7 ZHODNOCENÍ

3.7.1 SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD METANU

Výhody:

- výrazné snížení škodlivých emisí a emisí CO₂ oproti benzínu
- bezpečný provoz
- možnost přestavby vozidel a používání dvou paliv
- snížení hlučnosti motoru
- s rozvojem CNG (LNG) se počítá nejméně na dalších 10 let
- perspektivní využití biometanu

Nevýhody:

- stále malá nabídka továrních modelů
- dražší tovární modely i poměrně drahá přestavba
- malá síť čerpacích stanic
- zvýšení hmotnosti kvůli nádržím

3.7.2 AKTUÁLNÍ SITUACE CNG, LNG A BIO CNG NA TRHU

CNG bylo dlouhodobě považováno za nejperspektivnější alternativní palivo, které mělo nahradit LPG na pozici jedničky trhu, nicméně k tomu stále nedošlo. Rozvoj je brzděn nedostatečnou infrastrukturou, malou nabídkou vozů a jejich vyšší cenou. V současnosti ale dochází ke stále větší snaze razantně snižovat produkci CO₂, takže EU plánuje v této dekádě výrazně zvýšit množství automobilů na stlačený zemní plyn. V současnosti jezdí v EU přibližně 1,5 milionu osobních automobilů na CNG, v roce 2030 už by to mělo být přes 12 milionů [37]. V případě LNG se počítá s výrazným rozšířením do kamionové dopravy, v roce 2030 by mělo jezdit 280 000 kamionů na LNG, přičemž dnes to je zhruba 2500 [37].

Velký potenciál má používání biometanu, protože se jedná o nejčistší palivo pro spalovací motory a z hlediska celkových emisí CO₂ s přehledem překonává i CNG. Navíc nevyžaduje speciální infrastrukturu. V zemích západní Evropy proto už dochází k rychlému nárůstu používání tohoto paliva, stejně tak probíhají snahy co nejvíce zefektivnit výrobu. ČR zatím zaostává, ale s velkým nárůstem využívání biometanu se počítá, a to nejen v dopravě, ale i v energetice a teplárenství. Větší využívání biometanu navíc může přispět k plnění stále přísnějších emisních limitů a závazků [48].

Kvůli malému rozšíření tak zatím tato paliva ani nemohou plnohodnotně plnit roli ekologičtějších paliv, ale do budoucna mají určitě neoptimističtější vyhlídky ze všech alternativ pro zážehové motory, navíc mohou plnit roli určitého přechodného řešení mezi benzinem a elektromobily. Každopádně v dlouhodobějším horizontu neexistuje záruka, že po roce 2030 nebudou tato paliva také nahrazena.

4 VODÍK

Vodík je nejjednodušší, nejlehčí a nejrozšířenější chemický prvek ve vesmíru. Je na prvním místě periodické tabulky prvků (obsahuje pouze jeden proton), ve které se značí písmenem H (z latinského Hydrogenium). Atomární vodík se na Zemi vyskytuje jen velmi zřídka, častější je stabilnější plynný vodík ve formě dvouatomových molekul H_2 .

Využití vodíku je velmi rozsáhlé. Používá se ve spotřebitelském průmyslu, v metalurgii, energetice nebo stále častěji v nejrůznějších dopravních odvětvích. Vodík nicméně nelze považovat za zdroj energie v klasickém pojetí, protože se v přírodě prakticky nevyskytuje a musí se průmyslově vyrábět. Vodík tak slouží k uložení energie a jejímu následnému využití. Z hlediska použití v osobní dopravě patří vodík do kategorie plynných paliv pro pístové spalovací motory. Poprvé byl vodík ve spalovacím motoru použit už na počátku 19. století. Princip vodíkového spalovacího motoru je pak stejný jako benzínového motoru. Vodík může být použit jako samostatné palivo pro spalovací motory, nebo v kombinaci s benzínem či jinými palivy. Existuje řada způsobů výroby, avšak nejčastěji je vodík vyráběn z fosilních paliv, což snižuje jeho význam z hlediska ekologie. Problémem je rovněž energetická náročnost výroby. Z hlediska rozšíření se jedná o málo významné palivo. Vyšší pozornost je v současnosti věnována využití vodíku v tzv. palivových článcích, avšak v tomto případě se nejedná o palivo pro spalovací motory, nýbrž dochází k přeměně chemické energie paliva na elektrickou energii pro pohon elektromotoru [22],[58].

4.1 VLASTNOSTI VODÍKU

Jedná se o bezbarvý, hořlavý plyn bez chuti či zápachu. Je přibližně 14,4x lehčí než vzduch [22]. Je reaktivní a je schopen se slučovat se všemi ostatními prvky s výjimkou vzácných plynů. Nejvýznamnější sloučeniny tvoří s kyslíkem (voda) a uhlíkem (uhlovodíky). Manipulace s vodíkem je nebezpečná, protože ve velmi širokém rozmezí koncentrace tvoří výbušnou směs se vzduchem (4–77 % objemu vodíku) a kyslíkem (4–95 % objemu vodíku), dále pak tvoří výbušnou směs i s chlorem a fluorem [22]. Může tvořit speciální chemickou vazbu (vodíkový můstek), která je zodpovědná například za anomálie vody. Kvůli své velikosti velmi snadno difunduje. Do kapalného stavu přechází při teplotě přibližně $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ [58], tedy proces zkapalnění je značně energeticky náročný. Kapalný vodík má ze všech látek nejlepší poměr obsahu energie na jednotku hmotnosti (hmotnostní výhřevnost), avšak plynný vodík má velmi nízkou hustotu a má tak nejnížší objemovou výhřevnost ze všech paliv. Při dokonalém spalování směsi vodíku a vzduchu vzniká pouze voda a nevznikají oxid uhličitý, oxid uhelnatý ani nespálené uhlovodíky, nicméně ekologický přínos ze spalování je kompenzován jednak energetickou náročností výroby, jednak výrobou vodíku z fosilních paliv [22]. Základní vlastnosti vodíku ve srovnání s benzínem jsou shrnuty v tab. 7.

Tab. 7 Vlastnosti vodíku a benzínu [22],[58]

Parametr	Jednotka	vodík	benzín
hustota plynné fáze při normálních fyz. podmínkách	[kg.m ⁻³]	0,0899	-
hustota kapalné fáze při normálních fyz. podmínkách	[kg.m ⁻³]	70,8	≈755
teplota tání	[°C]	-259,16	-
teplota varu	[°C]	-252,879	30 - 225
oktanové číslo (RON)	-	> 130	95 - 97
výhřevnost hmotnostní (kapalná fáze)	[MJ.kg ⁻¹]	120,05	44,03
výhřevnost objemová	[MJ.m ⁻³]	10,79 (plynná fáze)	32 300 (kapalná fáze)
stechiometrický poměr	[kg.kg ⁻¹]	34,3	14,7

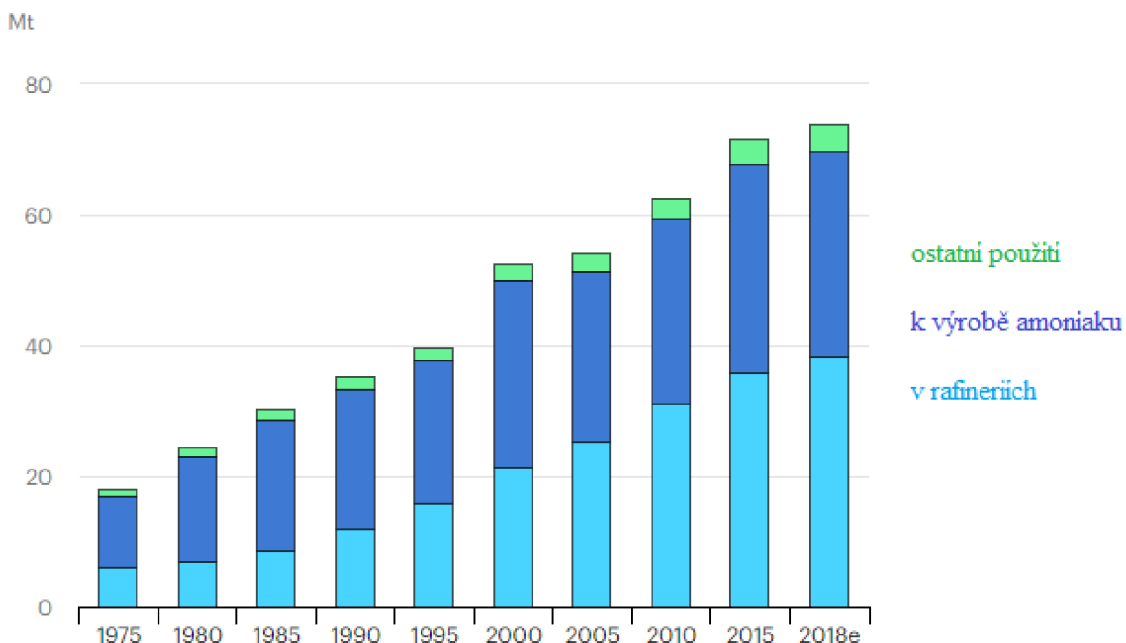
4.2 SPALOVÁNÍ VODÍKU

Vodík je extrémně hořlavý a jeho směs se vzduchem lze velmi snadno zapálit v širokém rozmezí koncentrace vodíku ve vzduchu (k iniciaci exploze směsi vodíku stačí cca 12x nižší energie, než v případě směsi benzínu a vzduchu). Vyznačuje se rovněž velmi vysokou rychlostí hoření [22]. Objem stechiometrické směsi je tvořen přibližně z 30 % vodíkem, což je dáno velmi nízkou hustotou plynného vodíku. Nízká potřebná energie k zapálení a široký rozsah zápalnosti umožňují spalování velmi chudých směsí, proto ke stechiometrickému spalování dochází zřídka. Vysoká rychlost hoření a snadná zápalnost zvyšují riziko detonačního spalování, proto je potřeba používat nižší kompresní poměr. Z hlediska emisí už bylo zmíněno, že při spalování prakticky nevzniká CO, CO₂ ani HC, nicméně dochází ke vzniku NO_x. Množství produkovaného NO_x se snižuje spalováním chudé směsi, protože tak lze docílit nižší teploty ve spalovacím prostoru. Použití chudé směsi se ale negativně projevuje snížením výkonu motoru. Snížení výkonu se zpravidla kompenzuje pomocí technologie přeplňování motoru a vyšším zdvihovým objemem. Při dokonalém spalování vzniká pouze voda, což je popsáno rovnicí [22]:



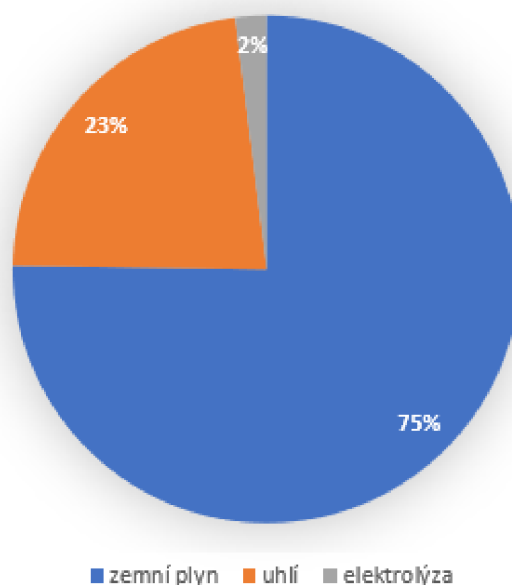
4.3 VÝROBA VODÍKU

Způsobů výroby vodíku existuje celá řada, přičemž se jednotlivé způsoby liší z hlediska dostupnosti zdrojů, energetické náročnosti, ceny či ekologie výroby. V každém případě platí, že energetická náročnost na výrobu převyšuje energetický obsah výsledného vodíku. V současnosti je největší část vodíku vyráběna z fosilních zdrojů, přičemž platí, že tento způsob výroby je zároveň nejlevnější. V dlouhodobé perspektivě se počítá se zvyšováním produkce vodíku z obnovitelných zdrojů (elektrolýza vody, výroba z biomasy), aby byla zaručena udržitelnost [22]. Graf na obr. 16 ukazuje narůst poptávky po čistém vodíku v letech 1975–2018. V roce 2018 bylo vyrobeno přibližně 73,9 milionů tun vodíku, avšak z toho 69,7 Mt bylo použito v rafineriích nebo na výrobu amoniaku, zbylé 4,2 Mt pak tvoří veškeré další použití vodíku včetně automobilových paliv. Při produkci takového množství vodíku dojde k uvolnění přibližně 830 milionů tun CO₂ ročně [49].



Obr. 16 – Globální poptávka po čistém vodíku v letech 1975 – 2018 v milionech tun [49]

Graf na obr. 17 ukazuje procentuální podíl jednotlivých zdrojů na výrobě vodíku v roce 2019. Zhruba 98 % celkové produkce vodíku pochází z fosilních zdrojů, elektrolýza se na produkci podílí přibližně 2 % [50]. Je odhadováno, že pokud by současná produkce vodíku (cca 74 Mt) měla být vyráběna pomocí elektrolýzy, tak by ročně muselo být spotřebováno 3600 TWh elektrické energie, což je více, než spotřebuje celá EU [50].



Obr. 17 Podíl jednotlivých zdrojů a technologií na výrobě vodíku v roce 2019

4.3.1 PARNÍ REFORMOVÁNÍ ZEMNÍHO PLYNU

Parní reformování je nejvýznamnějším způsobem výroby vodíku. Má nejnižší výrobní náklady a vysokou účinnost výroby (70–85 %). Zemní plyn je obecně vhodný pro výrobu vodíku, neboť je tvořen především metanem (CH₄), jehož molekuly obsahují nejvíce vodíku na jeden uhlík ze všech uhlovodíků. Výroba je dvoufázová. V první fázi se metan se ohřívá na teplotu 700–1100 °C [53] a mísí se s vodní parou za přítomnosti niklového katalyzátoru. Endotermní reakcí dojde ke vzniku vodíku a oxidu uhelnatého (rce 10) [22]. Ve druhé fázi pak dochází k exotermní reakci (rce 11) vzniklého oxidu uhelnatého s vodní parou, čímž jednak dojde ke snížení koncentrace škodlivého CO, jednak k produkci vodíku a CO₂ [22]. Právě velká produkce CO₂ patří k největším problémům této technologie, nicméně je v současnosti možné používat technologie CCS (zachytávání a ukládání CO₂). Vodík vyrobený bez zachytávání CO₂ se označuje jako šedý, zatímco vodík vyrobený s použitím CCS se označuje jako modrý [53].



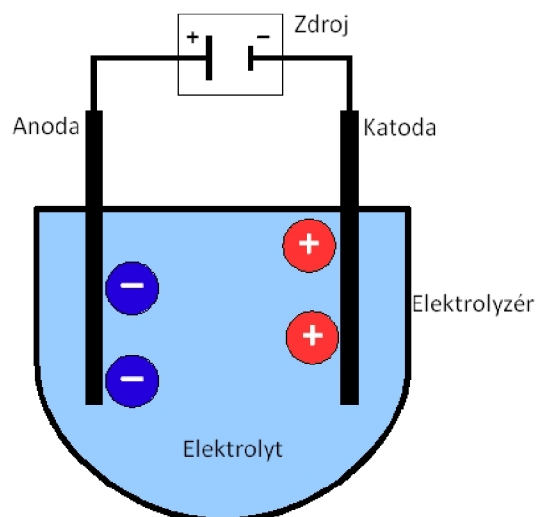
4.3.2 ZPLYŇOVÁNÍ UHLÍ

Zplyňování uhlí patří ke konvenčním způsobům výroby vodíku, přičemž hlavní výhodou je snadná dostupnost uhlí a jeho velké zásoby. Z ekonomického hlediska se jedná o méně výhodný způsob výroby, než je parní reformování zemního plynu. Ke zplyňování uhlí dochází za vysokých teplot ve zplyňovacím generátoru (existuje vícero typů). Uhlí se zplyňuje vzduchem a vodní parou a výsledkem je vznik tzv. syntézního plynu, který je složen z CO₂, CO, vody a vodíku. Dalšími úpravami pak dochází k oddělení vodíku, zbylé složky syntézního plynu se rovněž využívají. Produkce CO₂ je v tomto případě vyšší jak u parního reformování, ale znovu je možno používat technologie zachytávání a ukládání CO₂ [22].

4.3.3 ELEKTROLÝZA VODY

Elektrolýza patří k zavedeným způsobům výroby vodíku. Jedná se o nejvýznamnější z technologií výroby vodíku, které nepoužívají fosilní paliva, ale celkově jsou takto vyráběny pouze jednotky procent z celosvětové produkce vodíku. Výhodou této technologie je její jednoduchost, vysoká účinnost (70–80 %, postupně se zvyšuje) a fakt, že voda je na rozdíl od fosilních zdrojů prakticky nevyčerpatelná. Na vyrobení 1 kg vodíku (přibližně 40 kWh) se spotřebuje přibližně 50–55 kWh elektrické energie, přičemž v současnosti většina elektrické energie stále pochází z neobnovitelných zdrojů [56]. Pokud je k elektrolýze použita elektřina z obnovitelných zdrojů, tak je takto vyrobený vodík označován jako zelený, a přestože je v současnosti přibližně 2x dražší než vodík vyrobený z fosilních zdrojů, tak by v horizontu deseti let mělo v důsledku většího rozmachu obnovitelných zdrojů energie dojít ke snížení ceny ekologicky čistého vodíku až o 70 % [51].

Princip spočívá v disociaci vody pomocí stejnosměrného proudu, jenž prochází dvěma elektrodami, které jsou umístěny ve vodě. Dochází tak k narušení vazeb mezi vodíkem a kyslíkem, čímž dochází ke vzniku iontů OH^- , které jsou přitahovány ke kladné elektrodě, kde ztrácejí elektrony (rce 12), a iontů H^+ , které jsou přitahovány k záporné elektrodě, kde přijímají elektron (rce 13). Rozklad vody na plynný vodík a kyslík pak popisuje rovnice (14) [22]. Na obr. 18 je jednoduché schéma elektrolýzy.



Obr. 18 Základní schéma elektrolýzy [52]

4.4 SKLADOVÁNÍ, PŘEPRAVA, ČERPACÍ STANICE

4.4.1 SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Jednou z překážek většího rozvoje automobilů na vodík je problematické skladování vodíku ve vozidle. Plyný vodík má velmi nízkou hustotu, je snadno zápalný a extrémně hořlavý. Aby mělo použití vodíku smysl, tak musí být skladován pod velmi vysokým tlakem nebo v kapalně formě.

STLAČENÝ VODÍK

Stlačený vodík se podobně jako jiná plynná paliva skladuje v tlakových nádobách či zásobnících. Nádoby musí být odolné vůči působení vodíku, vysokým tlakům a rázům. Rovněž musí zamezit difundování vodíku. Z těchto důvodů musí být nádoby velmi pečlivě zkoušeny. U osobních automobilů standardní provozní tlak dosahuje 700 bar, což je více než trojnásobek běžného tlaku u CNG. U nákladních automobilů či autobusů je to 350 bar. Energie potřebná ke stlačení plynného vodíku na 350 bar odpovídá přibližně třetině energetického obsahu stlačovaného paliva. Kvůli snížení hmotnosti se používají kompozitní tlakové láhve válcového tvaru. V současnosti se jedná o tenkostěnné hliníkové nádoby, které jsou obaleny kompozitním materiálem. Stokilová nádrž pojme zhruba 5 kg vodíku [54]. Nádoby mají odvětrávací systémy, které v případě náhlého zvýšení tlaku či úniku plynu odpustí vodík do vzduchu, přičemž vodík je výrazně lehčí než vzduch, takže rychle stoupá vzhůru, což je příznivé, pokud dojde k požáru, protože pak hoření probíhá mimo vozidlo [55].

ZKAPALNĚNÝ VODÍK

Zkapalňování vodíku probíhá za teploty -253 °C . Energie potřebná na zkapalnění odpovídá přibližně 40 % energetického obsahu paliva, je to tedy náročnější proces než stlačování. K uskladnění se používají speciální kryogenní nádoby. Zkapalněný vodík se sice nemusí uchovávat pod vysokým tlakem (přetlak dosahuje přibližně 5 bar), ale materiál nádob musí vydržet extrémně nízké teploty a nádoba musí zároveň perfektně izolovat, aby se vodík co nejméně odpařoval. Nicméně i tak dochází k postupnému odpařování, což vede ke zvyšování tlaku v nádobě, proto se musí vodík odpouštět (až 3 % obsahu za den). Z těchto důvodů je použití zkapalněného vodíku u osobních automobilů značně limitováno. Větší smysl mají velkoobjemové zásobníky [22],[54].

4.4.2 ČERPACÍ STANICE A PŘEPRAVA

Většina vyrobeného vodíku je zpracována poblíž místa výroby, nicméně plyný vodík lze nejsnadněji přepravovat potrubními systémy, kapalný vodík pak může být přepravován tankery. Na kratší vzdálenost je možno využít železniční a silniční přepravu.

V rámci celého světa existuje jen velmi malá síť čerpacích stanic na vodík, což je další z řady překážek ve větším rozvoji vodíkové technologie. V rámci ČR byl v roce 2020 ohlášen vznik prvních tří veřejných vodíkových stanic. Od roku 2009 fungovala v ČR jedna neveřejná stanice. V sousedním Německu se nachází už přes 80 vodíkových stanic, celosvětově pak přibližně 500 [57]. Stlačený vodík je zde uchovávan v velkých nádržích, přičemž část je kompresorem vtačována do láhví o různém tlaku (nízko, středně a vysokotlaké), kde je vodík připraven k natankování. Tankování vodíku je v principu stejné jako u CNG. Plnička kontroluje přetlak v nádrži auta a následně dochází k vyrovnání tlaku v obou nádržích.

4.5 ZHODNOCENÍ

4.5.1 SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD VODÍKU

Výhody:

- při spalování se produkuje především voda
- v případě kompletně ekologické výroby vodíku dojde k úspoře emisí CO₂
- snížení hlučnosti motoru
- teoreticky nevyčerpatelné palivo

Nevýhody:

- malá síť čerpacích stanic
- energetická náročnost výroby vodíku
- ekologický přínos závisí na způsobu výroby paliva
- ekologičtější způsoby výroby jsou dražší a energeticky náročnější
- malá nabídka vozidel
- problematické a energeticky náročné skladování
- nebezpečí úniku či výbuchu
- spalování vodíku není považováno za dostatečně perspektivní

4.5.2 AKTUÁLNÍ SITUACE VODÍKU NA TRHU

Ačkoliv je využívání vodíku ve spalovacích motorech dlouhodobě známo, tak doposud nedošlo k nějakému většímu rozvoji. V posledních letech se o vodíku více mluví kvůli celosvětové snaze snižovat emise CO₂ a kvůli hledání alternativ ke klasickým fosilním palivům. Výroba vodíku není levná a zatím se neobejde bez fosilních paliv a ani v dlouhodobějším horizontu tomu nebude jinak. Tím je značně snížen ekologický význam vodíku a zcela odpadá možnost náhrady fosilních paliv. Rozvoj je dále brzděn nedostatečnou infrastrukturou a malou nabídkou vozů.

Výrazně větší pozornost je navíc věnována využití vodíku v palivových článcích. Tato technologie je vedle klasických elektromobilů považována za jednu z možností, jak nahradit automobily na fosilní paliva. Vodíková technologie nicméně v současnosti za elektromobily zaostává.

Nelze předvídat dlouhodobý vývoj vodíkových technologií, nicméně zatím nic nenasvědčuje tomu, že by se z vodíku mělo stát významné palivo pro spalovací motory. Vodík lze přimíchávat k jiným palivům, takže v tomto může být potenciál dalšího využití vodíku ve spalovacích motorech.

5 ETHANOL

Ethanol je nejvýznamnější z alkoholových paliv. Patří do kategorie kapalných paliv pro zážehové motory. K použití ethanolu ve spalovacích motorech došlo už v 19. století. V současnosti pak patří k nejdiskutovanějším alternativám, především v souvislosti s přimícháváním do benzínu. Právě možnost přimíchávání do benzínu patří k největším výhodám alkoholových paliv a zvyšuje jejich významnost. Ethanol, který je vyroben z biomasy (obiloviny, cukrová třtina, kukuřice atd.), se označuje jako bioethanol a patří do kategorie biopaliv. Bioethanol je v současnosti používán po celém světě, ale nejvíce rozšířen je v Brazílii a USA. V řadě zemí je pak povinné přimíchávat bioethanol do benzínu, přičemž při malém obsahu ethanolu (do 15 %) není nutno provádět technické úpravy motoru. Pro použití směsí s vysokým obsahem ethanolu (typicky 85 %) je nutný speciálně upravený motor [22]. Reakcí ethanolu s isobutylenem vzniká tzv. ETBE (ethyl-tert. butyl ether), které je rovněž možno přimíchávat do benzínu.

Ekologický význam bioethanolu je předmětem diskusí, především skrze to, že problematika není omezena pouze na produkci emisí, ale je nutné zohledňovat i dopady rozsáhlého pěstování energetických plodin, jako je zábor půdy, používání pesticidů a hnojiv, což navíc vede k uvolňování skleníkového plynu oxidu dusného. Energeticky náročné je i samotné pěstování, sklizení, stejně tak následná výroba a distribuce [65].

5.1 VLASTNOSTI ETHANOLU A ETBE

Ethanol je z chemického hlediska druhý nejnižší alkohol s charakteristickým zápachem. Je hořlavý a lehce zápalný. Má vyšší oktanové číslo než benzín, takže jeho přimíchání do benzínu zvyšuje antidetonační vlastnosti směsi. Velkým problémem ethanolu je schopnost vázat vodu, což může ke korozi motoru. Tento problém musí být řešen přidáním antikoročních aditiv do paliva. Samotný ethanol není korozivní [54]. Čistý ethanol má velmi nízký tlak par, avšak ve směsi s vodou či benzínem dochází ke vzniku tzv. azeotropní směsi (tyto směsi nelze destilací rozdělit na původní složky), která má nízkou teplotu varu, a tudíž vysoký tlak par [22]. Například při 10% obsahu ethanolu dochází ke zvýšení tlaku o 7,76 kPa [62]. Ethanol je sušší než benzín, má vyšší hustotu, ale také poměrně nízkou hmotnostní výhřevnost, takže z hlediska výhřevnosti na jeden litr paliva je přibližně o třetinu horší než benzín, což vede k vyšší spotřebě. Požadavky na ethanol jako složku pro přimíchávání do benzínu stanovuje norma ČSN EN 15 376. Norma dále stanovuje maximální obsah vody, vyšších alkoholů, methanolu, a dále například maximální kyselost ethanolu [4].

ETBE má vyšší oktanové číslo i výhřevnost než ethanol. S benzínem se dá mísit bez omezení a vzniklá směs je stabilní, takže nedochází ke zvýšení tlaku par. Z hlediska použití v benzínu je tak ETBE méně problematické [62]. Vlastnosti ethanolu a ETBE ve srovnání s benzínem jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Vlastnosti ethanolu, ETBE a benzínu [3],[22]

Parametr	Jednotka	ethanol	ETBE	benzín
hustota při 15 °C	[kg.dm ⁻³]	0,8	0,74	0,755
tlak par	[kPa]	16,5	28	50-90
teplota varu	[°C]	78	72	30–225
oktanové číslo (RON)	-	109	118	95–97
výhřevnost hmotnostní	[MJ.kg ⁻¹]	26,4	36	44,03
výhřevnost objemová	[MJ.dm ⁻³]	21,2	26,7	32,3
stechiometrický poměr	[kg.kg ⁻¹]	9	-	14,7

5.2 SPALOVÁNÍ A EMISE

Ke spalování čistého ethanolu ve spalovacích motorech prakticky nedochází, protože jsou spalovány jeho směsi s benzínem. V současnosti je navíc bioethanol přimícháván do benzínu povinně, takže ke spalování směsi ethanolu a benzínu dochází v každém benzínovém motoru, a to bez větších problémů. V molekule ethanolu je obsažen kyslík, takže při spalování je potřeba méně vzduchu než při spalování benzínu. Z důvodu vyššího oktanového čísla je možno použít vyšší kompresní poměr, nicméně v případě benzínu s malým obsahem ethanolu je rozdíl velmi malý. Většího efektu lze dosáhnout například při použití paliva E85.

Při spalování bioethanolu dochází k produkci CO₂, ale je nutné brát v úvahu, že pěstováním biomasy se zároveň CO₂ spotřebovává. Například v USA je tak bioethanol z hlediska spalování považován za uhlíkově neutrální [65].

5.3 VÝROBA BIOETHANOLU

Bioethanol je vyráběn alkoholovým kvašením (fermentací) jednoduchých cukrů obsažených v biomase. Surovinou pro výrobu jsou nejrůznější zemědělské plodiny či energetické plodiny. Fermentace může přímo proběhnout jen u surovin, který obsahují jednoduché cukry (např. cukrová řepa a třtina). V případě, že plodiny obsahují škrob (brambory, kukuřice, obiloviny), musí nejprve dojít k enzymatické přeměně na cukry. Suroviny se proto rozdělují do tří základních kategorií [3],[22]:

- biomasa obsahující jednoduché cukry
- biomasa obsahující škrob
- lignocelulózní biomasa (rychle rostoucí dřeviny, piliny, biologický odpad, papír atd.)

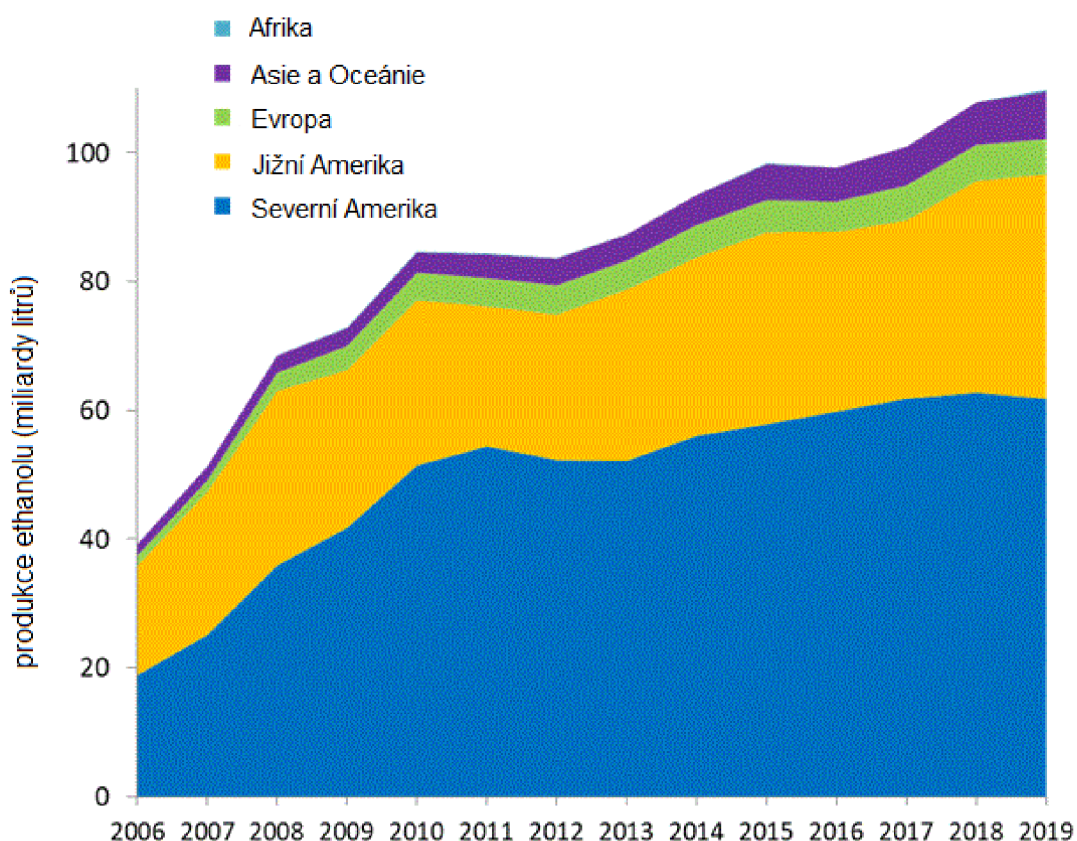
Při samotném kvašení je vznik CO₂ nevyhnutelný (rce 15), ale ekologický význam bioethanolu se značně odvíjí od způsobu a náročnosti výroby. Při procesu výroby jsou často pro získání potřebného tepla spalována fosilní paliva (uhlí nebo zemní plyn). Další možností je spalování paliv biologického původu, u kterých je náročnější určit jejich ekologické dopady, nicméně existují k nim stejné výhody jako v případě pěstování surovin pro

bioethanol – velký zábor půdy, obrovské množství hnojiv a celková energetická náročnost pěstování, sklizně a distribuce. V současnosti se nejvíce pozornosti upírá směrem k produkci ethanolu z celulóznové biomasy, protože pěstování dřevin nevyžaduje tolik hnojiv a pesticidů, jako pěstování zemědělských plodin. Navíc je možno použít i odpadní suroviny [65]. V tab. 9 je uvedeno, kolik litrů bioethanolu je možno získat z jedné tuny suroviny.

Tab. 9 Produkční potenciál bioethanolu z jednotlivých surovin [3]

jednotka	cukrová řepa	cukrová třtina	kukuřice	ječmen	pšenice	celulóznová biomasa
[l/t]	110	70	360	250	340	280

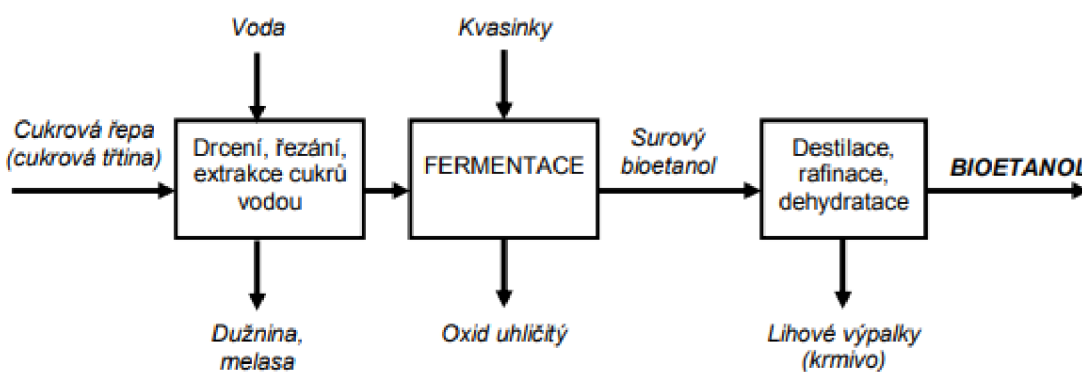
V současnosti je zhruba 84 % bioethanolu vyráběno v USA a Brazílii, přičemž produkce narůstá po celém světě [61]. Je to dáno stále častějším přimícháváním ethanolu do benzínu. Graf na obr. 19 ukazuje, jak v průběhu let 2006-2019 narůstala produkce bioethanolu.



Obr. 19 Vývoj produkce bioethanolu v letech 2006-2019 v miliardách tun [61]

5.3.1 BIOETHANOL Z BIOMASY OBSAHUJÍCÍ JEDNODUCHÉ CUKRY – I. GENERACE BIOPALIV

Jedná se o nejjednodušší proces výroby, protože dochází k přímému kvašení bez nutnosti enzymatické přeměny. Před začátkem kvašení je surovina rozmělněna a cukry jsou odděleny vodou. Fermentace probíhá ve fermentoru za teplot 27-32 °C. Následuje destilace, aby došlo k oddělení ethanolu od destilačního zbytku, nicméně destilací nelze oddělit přebytečná voda. Poslední procesem je rafinace, při které dojde k odstranění nežádoucích látek. Přítomnou vodu je pak nutno odstranit jinými způsoby. Na obr. 20 je jednoduché blokové schéma výroby. Fermentaci popisuje rovnice (15), ze které je patrné, že na jednu vzniklou molekulu ethanolu připadá jedna vzniklá molekula CO₂ [3].



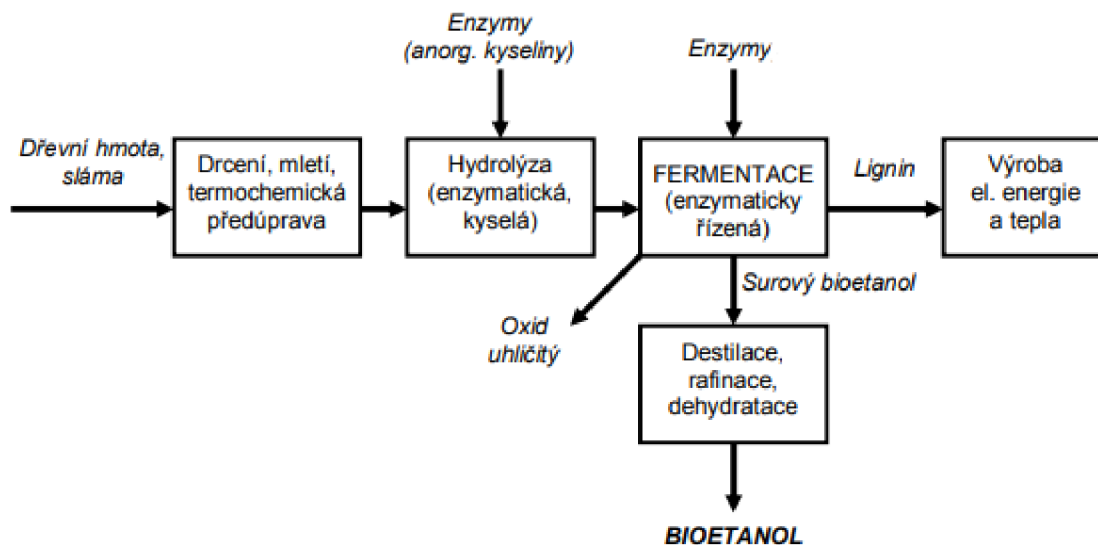
Obr. 20 Schéma výroby bioethanolu z cukrové řepy [22]

5.3.2 BIOETHANOL Z BIOMASY OBSAHUJÍCÍ ŠKROB – I. GENERACE BIOPALIV

Tento způsob výroby se týká především obilovin a kukuřice. Škrob je obsažen pouze v zrnech. Proto musí být vstupní surovina nejprve rozemleta, aby došlo k uvolnění zrn a odstranění stébel a slupek. Zrna jsou poté za tepla vystavena působení enzymů, které škrob přeměňují na jednoduché cukry. Samotný proces kvašení a destilace je pak obdobný jako v předchozím případě, liší se pouze destilačním zbytkem [3],[22].

5.3.3 BIOETHANOL Z LIGNOCELULÓZOVÉ BIOMASY – II. GENERACE BIOPALIV

Tato technologie patří k nejnovějším, nejperspektivnějším, ale také nejkomplikovanějším způsobům výroby bioethanolu. Tento typ biomasy obsahuje polymery cukrů celulózu a hemicelulózu, a také aromatický polymer lignin, který nelze fermentovat a musí být oddělen. Aby vůbec mohlo dojít ke kvašení, tak nejprve musí proběhnout obtížný proces hydrolýzy lignocelulózové biomasy na jednoduché cukry. Nejčastěji se používá hydrolýza pomocí enzymů nebo kyselá hydrolýza [3],[22]. Následný proces kvašení, destilace a rafinace je obdobný jako v předcházejících případech. Na obr. 21 je jednoduché schéma výrobního postupu.



Obr. 21 Schéma výroby bioethanolu ze dřeva [22]

5.4 PŘIMÍCHÁVÁNÍ BIOETHANOLU DO BENZÍNU

V rámci EU i USA je přimíchávání biosložek do benzínu povinné. V ČR je přimíchávání biosložky do benzínu povinné od roku 2008. V současnosti musí benzín obsahovat nejméně 4,1 % bioethanolu, přičemž toto procento má dále narůstat [60]. Přimíchávání je předmětem sporů, protože v současnosti je primárně užíván bioethanol z obilnin, cukrové řepy/třtiny nebo kukuřice, jejichž pěstování má negativní vliv na půdu a biodiverzitu. S nástupem tzv. biopaliv II. generace, které jsou vyráběny z lignocelulóзовé biomasy, by mělo dojít k omezení používání hnojiv a pesticidů, takže i zásah do přírody by se měl snížit.

5.5 E85

Jedná se o palivo, které je v základu tvořeno z 85 % ethanolem a z 15 % benzínem, nicméně složení se liší v závislosti na ročním období. V zimních měsících je obsah ethanolu snížen na 75 % [59], protože benzín se snadněji odpařuje. Právě pomalé odpařování ethanolu je jedním z důležitých důvodů, proč je pro používání E85 nutná úprava motoru. Musí být zajištěno delší otevření vstřikovacích ventilů a větší průtok těmito ventily. Existují jednak tovární modely, jednak je možnost přestavby z benzínových automobilů. U továrních modelů je vyřešen problém s odpařováním za chladného počasí, protože mají systém dodatečného vyhřívání motoru. Z důvodu suchosti ethanolu dochází k většímu namáhání sedel ventilů, ale tovární modely na E85 mají sedla ventilů z tvrdších materiálů [59]. Vozidla na E85 mají vyšší spotřebu, ale také vyšší výkon [64].

5.5.1 SPALOVÁNÍ E85

Základní podmínkou pro dobré spalování E85 je přizpůsobený motor. E85 hoří pomaleji než benzín, takže všechny součásti jsou vystaveny menšímu tepelnému namáhání [63]. E85 má vyšší oktánové číslo než benzín, tedy se používá vyšší kompresní poměr. Dále ve spalovacím prostoru vzniká méně horkých karbonových usazenin, které způsobují detonační spalování. Ethanol má navíc čistící vlastnosti, takže udržuje čisté trysky. Z hlediska emisí CO₂ se při spalování E85 hovoří až o 80% snížení [59].

5.5.2 PŘESTAVBA VOZIDLA NA E85

Přestavba z benzínového motoru spočívá především v montáži řídicí jednotky, která následně řídí složení palivové směsi a prodlužuje vstřikovací dobu. E85 nevyžaduje speciální nádrž nebo jiné vstřikovače. Celkově je přestavba na E85 jednodušší a levnější než v případě CNG či LPG. Obdobně platí, že snadněji lze přestavět automobily s nepřímým vstřikem [59],[64].

5.6 ZHODNOCENÍ

5.6.1 SHRNUTÍ VÝHOD A NEVÝHOD

Výhody:

- možnost přimíchávání ethanolu do benzínu
- snížení podílu fosilních paliv
- možnost levné přestavby na E85
- E85 poskytuje zvýšení výkonu
- nižší produkce CO₂ a škodlivin při spalování

Nevýhody:

- ekologický přínos je závislý na způsobu výroby bioethanolu
- používání hnojiv a pesticidů při pěstování surovin
- malá síť čerpacích stanic pro E85
- malá nabídka továrních modelů na E85
- vyšší spotřeba při používání E85

5.6.2 AKTUÁLNÍ SITUACE NA TRHU

Důležitost ethanolu jako paliva je jeho přimíchávání do benzínu, což umožňuje snížit spotřebu fosilních paliv. To je největší přidaná hodnota tohoto paliva, protože samostatně je málo významné. Přimíchávání biosložek do benzínu je ale zároveň zdrojem kontroverze, neboť má řadu odpůrců. Často je zpochybňován ekologický význam biopaliv, což je ale v realitě poměrně náročné rozhodnout. Pěstování energetických plodin je každopádně problémové z mnoha různých důvodů. V současnosti už je zřejmé, že snaha tímto způsobem nahrazovat fosilní paliva patří ke slepým cestám vývoje.

Automobily na E85 jsou na trhu už léta, přesto nedošlo k jejich velkému rozšíření. Rozvoj brzdí nedostatečná infrastruktura a malá nabídka továrních vozů. Ani do budoucna se nedá předpokládat nějaký výrazný vzestup.

V posledních letech se stále častěji mluví o nahrazení fosilních paliv u osobních automobilů, takže je otázka, jak moc by se to projevilo na trhu s bioethanolem a zda by to neznamenal jeho likvidaci, protože v současnosti je většina bioethanolu používána jako příměs do benzínu.

6 POROVNÁNÍ SPALOVÁNÍ BENZÍNU, CNG A LPG

V této části práce budou shrnuty výsledky výpočtu čtyřdobého zážehového motoru v prostředí MATLAB. K výpočtu byl použit tzv. livescript, který byl poskytnut vedoucím práce.

Výpočet probíhá na základě ideálního Ottova cyklu. Parametry počítaného motoru a vlastnosti pracovních tekutin jsou uvedeny v tab. 10. Jednotlivá paliva se zadávají počtem atomů uhlíku a vodíku, program je tedy vhodný jen pro uhlovodíková paliva. Dále je možno měnit poměr vzduchu a paliva.

Tab. 10 Parametry počítaného motoru

Parametr	Jednotka	Hodnota
zdvihový objem	[l]	1
počet válců	[-]	4
otáčky motoru	[min ⁻¹]	4000
kompresní poměr	[-]	10,5
poměr vrtání/zdvih	[-]	0,9
mechanická účinnost	[-]	0,86
vnitřní recirkulace spalin	[-]	4
Poissonova konstanta	[-]	1,35
měrná plynová konstanta vzduchu	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,287
měrná tepelná kapacita při konstantním objemu (mezi dvěma extrémny)	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,821
měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku (mezi dvěma extrémny)	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1,108
barometrický tlak	[kPa]	100
teplota na začátku komprese	[°C]	60
hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]	1,188
poměr vzduchu a paliva	[-]	14,56
účinnost spalování	[-]	0,9

6.1 VÝPOČET A ZHODNOCENÍ

Porovnáno bylo spalování benzínu, CNG (nahrazeno čistým metanem) a LPG, přičemž LPG se standardně používá ve dvou variantách, které se v závislosti na ročním období liší poměrem propanu a butanu. V zimní variantě je poměr propanu a butanu 60/40, v letní je to naopak. Výpočet je však nutné brát s rezervou, protože některé z uvedených parametrů motoru (např. kompresní poměr) jsou vhodné pouze pro benzínový motor. Pro reálnější obraz by bylo nutné parametry více přizpůsobit jednotlivým palivům, nicméně cílem bylo porovnat spalování v daném motoru a za daných parametrů.

Výsledky výpočtu jsou uvedeny v tab. 11. Hodnoty výhřevností spadají do běžně udávaných rozsahů. Z výsledků je patrné, že CNG dosahuje nejvyššího výkonu, točivého momentu i středního efektivního tlaku, a benzín naopak dosahuje nejmenších hodnot. Nicméně v realitě mají vozidla na CNG často nižší výkon, zvláště přestavená vozidla. V případě dvou variant LPG má dle očekávání vyšší výhřevnost zimní varianta, protože obsahuje více propanu, který má vyšší hmotnostní výhřevnost.

Tab. 11 Porovnání spalování

Parametr	Jednotka	benzín	CNG	LPG zimní	LPG letní
množství atomů uhlíku	[-]	8	1	3,4	3,6
množství atomů vodíku	[-]	14,96	4	8,8	9,2
střední efektivní tlak	[kPa]	1374,6	1612,8	1462,7	1526,7
točivý moment	[Nm]	109,4	128,3	116,4	121,5
efektivní výkon	[kW]	45,82	53,76	48,76	50,89
výhřevnost hmotnostní	[MJ.kg ⁻¹]	42,602	49,986	45,333	45,215

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo udělat rešerši na téma alternativních paliv pro zážehové motory. Práce by měla poskytnout aspoň základní vhled do této problematiky, a to v poměrně široké míře, byť na úkor hlubšího vhledu. Každopádně to je dáno charakterem práce.

Alternativní paliva pro zážehové motory mají dlouhodobě velký potenciál, nicméně žádnému z nich se nepodařilo významně proniknout na trh automobilů. Většímu rozšíření prakticky všech alternativ (s výjimkou LPG) brání nedostatečná infrastruktura, ale i řada dalších faktorů. Například ve srovnání s elektromobily se jim věnuje velmi málo pozornosti ze strany politiků i výrobců, což vede k malé nabídce továrních automobilů. Nedostatek originálních vozů se dá řešit přestavbou benzínových vozidel. Bez této možnosti by trh s alternativami prakticky nemohl existovat, každopádně z hlediska vývoje nelze stavět budoucnost alternativ na přestavbách benzínových automobilů. V současnosti existuje prakticky celosvětová snaha snižovat emise CO₂, takže v tomto ohledu se otvírá příležitost pro větší rozšíření alternativních paliv, nicméně většina alternativních paliv nemá potenciál dosáhnout tzv. uhlíkové neutrality, takže z tohoto hlediska se nedá očekávat, že by měly dlouhodobou budoucnost, ačkoliv je to těžké předvídat.

Velkou pozornost si zaslouží tzv. druhá generace bioethanolu, která by už neměla být vyráběna z energetických plodin. Přimíchávání do benzínu pak bude mít větší smysl, stejně tak by to mohlo přispět k většímu zastoupení automobilů na E85.

Alternativním palivem s největším potenciálem je dlouhodobě metan, ať už ve formě CNG, LNG nebo biometanu. Právě biometan představuje to nejlepší z alternativních paliv a dá se očekávat jeho prudký rozvoj.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STONE, R. *Introduction to Internal Combustion Engines*. Fourth Edition. Basingstoke: Palgrave Macmillan, 2012. ISBN 978-1-137-02829-5.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [4] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.
- [5] BIERNAT, Krzysztof. *Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions*. IntechOpen, 2016. ISBN 978-953-51-2269-2.
- [6] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Vyd. 3., přeprac. / v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2409-5.
- [7] KRÁLOVÁ, Magda. Čtyřdobý zážehový motor. *Techmania.cz* [online]. Plzeň: Techmania.cz, c2011-2020, 18. 10. 2019 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/plyny/tepelne-motory/ctyrdoby-zazehovy-motor>
- [8] AB Engine Fuel Efficiency. *AB Engine* [online]. 2016 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <http://www.abengine.com/fuel-efficiency.htm>
- [9] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů QTS 2020/21 4. přednáška. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 19. 10. 2020 [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <https://youtu.be/yJM10mmokg4?list=PLNcrSbs7DEH7ROVCk5Zb5dQwf63qL8yGr&t=6641>
- [10] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů QTS 2020/21 2. přednáška. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 6. 10. 2020 [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <https://youtu.be/d-prqh26s2g?t=9292>
- [11] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů QTS 2020/21 5. přednáška. In: *Youtube* [online]. Zveřejněno 26. 10. 2020 [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <https://youtu.be/tfSazLr2eb8?list=PLNcrSbs7DEH7ROVCk5Zb5dQwf63qL8yGr&t=7218>
- [12] WILLIAMS, Martin., MINJARES, Ray. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. In: *The ICCT* [online]. Washington, 2016 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
- [13] VACULÍK, Martin. Vše kolem pohonu aut na LPG. *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER a.s, 2020 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vse-kolem-pohonu-aut-na-lpg-proc-jej-vzit-na-milost-136597>

- [14] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [15] Reducing CO2 emissions. In: *European Commission* [online]. Brusel: European Union, c1995-2021, 2019 [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en
- [16] How manufacturers are failing to meet 2021's 95g/km target. *Carmagazine* [online]. Londýn: Bauer Media Group, c1962-2021, 2020 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <https://www.carmagazine.co.uk/car-news/industry-news/co2-emissions-limits-europe/>
- [17] Well-to-wheel. In: *Gmobility* [online]. 2019 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://gmobility.eu/what-is-well-to-wheel/>
- [18] Life-cycle assessment: Cradle-to-grave. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-02-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Life-cycle_assessment
- [19] HAHN, Eric. LPG Gas Manufacturing Process. *ELGAS* [online]. Australia: Elgas, 2019, 23. 10. 2019 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.elgas.com.au/blog/1682-where-does-lpg-come-from-lpg-production-process>
- [20] Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: MPO, c2005-2020, 2020 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>
- [21] *Zpráva o aktualizaci a stavu Evidence čerpacích stanic pohonných hmot v ČR k 17. 2. 2020* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2020 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/statistika-cerpacich-stanic-pohonnych-hmot/zprava-o-aktualizaci-a-stavu-evidence-cerpacich-stanic-pohonnych-hmot-v-cr-k-17-2--2020--252995/>
- [22] ŠEBOR, Gustav., POSPÍŠIL, Milan., ŽÁKOVEC, Jan. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě* [online]. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/knihovna/technicko-ekonomicka-analyza-vhodnych-alternativnich-paliv-v-doprave>
- [23] Autocisterny na LPG. *VPSR* [online]. Rosice u Chrásti: Východočeské plynárenské strojírný, c2021 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.vpsr.cz/autocisterny-pro-prepravu-lpg>
- [24] POLOLÁNÍK, Lukáš. LPG je stále alternativním palivem číslo jedna. *Česká asociace LPG* [online]. Praha: Česká asociace LPG, c2020, 2020 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <https://calpg.cz/autogasday-2020/>
- [25] ČSN EN 589. *Motorová paliva – Zkapalněné ropné plyny (LPG) – Technické požadavky a metody zkoušení*. 7. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

- [26] Redukce tankování. *LPG PROFI* [online]. Praha: Gasinsight s.r.o., 2018 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.lpgprofi.cz/redukce-tankovani-lpg>
- [27] Přímé vstřikování LPG. *Přestavba na LPG* [online]. Praha: Gasinsight, c2021 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.prestavbanalpg.cz/prestavba-lpg/typy-systemu-lpg/prime-vstrikovani-lpg/>
- [28] Generace plynových systémů. *HAVEL plyn* [online]. Studenec: HAVEL plyn, c2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <http://autanaplyn.com/lpg/generace-plynovych-systemu/>
- [29] SAJDL, Jan. LPG. *Autolexicon* [online]. autolexicon.net, c2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/lpg-liquefied-petroleum-gas/>
- [30] *The role of LPG and bioLPG in Europe* [online]. Neuilly-sur-Seine: The World LPG Association, c2019 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.wlpga.org/publication/the-role-of-lpg-biolpg-in-europe/>
- [31] POLOLÁNIK, Lukáš. BioLPG. *Finance.cz* [online]. Praha: Internet Info, 2020 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.finance.cz/533710-biolpg-palivo-budoucnosti/>
- [32] ŽÁK, Dalibor. Typy přestaveb na plyn. *Garáž.cz* [online]. Praha: Seznam.cz, c1996-2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/serial-o-lpg-dil-ii-ty-py-prestaveb-na-plyn-21004698>
- [33] Přímé vstřikování LPG. *Levnevozeni.cz* [online]. Púchov: LevneVozeni.cz - All4car, c2021 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.levnevozeni.cz/prime-vstrikovani-lpg/>
- [34] Servis vozidel na LPG. *Autogas* [online]. Strakonice: AUTOGAS CENTRUM PLUS, c2013-2021 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://lpg-agcplus.cz/cs/blog/servis-a-udrzba-vozu-s-lpg>
- [35] LPG Emissions. *Nett Technologies Inc.* [online]. Toronto: Nett Technologies, c2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-are-lpg-emissions>
- [36] BUDÍN, Jan. Spotřeba CNG a LNG. *Oenergetice.cz* [online]. Praha: OM Solutions, 12. duben 2015 [cit. 2021-3-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni>
- [37] Statistiky CNG. *CNG4you* [online]. Praha: Český plynárenský svaz, c2021, 2021 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/cng-info/statistiky.html>
- [38] Spotřeba CNG a LNG. *Oenergetice.cz* [online]. Praha: ČTK, c2018, 2021 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/spotreba-cng-a-lng-loni-v-cr-i-pres-pandemii-vzrostla>
- [39] DUSIL, Tomáš. Přestavby vozidel na CNG. *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER a.s, 2019, 14. 5. 2019 [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/prestavby-vozidel-na-cng-proc-jsou-mene-popularni-kdyz-davaji-smysl-129215>

- [40] Methane. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2021 [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Methane>
- [41] Škoda Octavia G-TEC. *Škoda Storyboard* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, c2021, 2018 [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/octavia-g-tec-06/>
- [42] Nádrže na CNG. *FEDOR Auto* [online]. Prostějov: Robert Bosch odbytová, c2021 [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://www.fedorauto.cz/nadrze-cng.html>
- [43] VW Polo na CNG. *Hybrid.cz* [online]. Praha: Chamanne, 2018, 26. únor 2018 [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/volkswagen-nabizi-cenove-zvyhodneni-modelu-polo-golf-s-pohonem-na-cng>
- [44] BŘEZINOVÁ, Jana. Biometan: Jak se vyrábí. *Plyn.cz* [online]. Praha: Ušetřeno.cz, c2021, 30. dubna 2020 [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: <https://www.plyn.cz/biometan-jak-se-vyrabi>
- [45] BioCNG. *EnviWeb* [online]. Brno: Enviweb, 2020, 23.09.2020 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/117230>
- [46] HOLUBEC, Jiří. Biometan: Další palivo budoucnosti? *Byznys-energie* [online]. E.ON Energie, 2020, 14. 9. 2020 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.byznys-energie.cz/clanek/biometan-dalsi-palivo-budoucnosti2>
- [47] LNG vs CNG. *CNG +* [online]. ČR: cngplus, 2013, 12. července 2013 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/lng-vs-cng.html>
- [48] ZACHOVÁ, Aneta. Biometan v ČR. *EURACTIV* [online]. Praha: EURACTIV.cz, 2021, 29. 4. 2021 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://euractiv.cz/section/energetika/news/ceskou-dopravu-zacne-pohanet-biometan-pomoci-by-mohl-i-s-dekarbonizaci-prumyslu/>
- [49] Demand for hydrogen. *Iea.org* [online]. Paříž: IEA, c2021 [cit. 2021-3-28]. Dostupné z: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>
- [50] Future of hydrogen. *Iea.org* [online]. Paříž: IEA, c2021, 2019 [cit. 2021-3-28]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [51] PURTILL, James. Green hydrogen. *ABC Science* [online]. Sydney: ABC, c2021, 2021 [cit. 2021-3-28]. Dostupné z: <https://www.abc.net.au/news/science/2021-01-23/green-hydrogen-renewable-energy-climate-emissions-explainer/13081872>
- [52] Elektrolýza. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BDza>
- [53] Steam reforming. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2021 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_reforming

- [54] Skladování vodíku. *DEVINN* [online]. Jablonec nad Nisou: DEVINN s.r.o., c2021 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/skladovani-vodiku/>
- [55] Bezpečnost vodíku. *DEVINN* [online]. Jablonec nad Nisou: DEVINN s.r.o., c2021 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/bezpecnost-vodiku/>
- [56] Hydrogen Production from Electrolysis. *Energy.gov* [online]. Washington: Energy.gov, 2011 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-hydrogen-production-electrolysis>
- [57] Vodíkové stanice v ČR. *Auto.cz* [online]. Praha: ČTK, 2020 [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/v-cesku-konecne-vzniknou-prvni-vodikove-stanice-k-dispozici-budou-v-praze-litvinove-i-brne-136132>
- [58] Hydrogen. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2021 [cit. 2021-3-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen>
- [59] DUSIL, Tomáš. Palivo E85. *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER a.s., 2017 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/palivo-e85-setreni-na-spravnem-miste-na-zimu-se-nehodi-a-pozor-na-ventily-103995>
- [60] Přimíchávání biosložky. *ČAPPO* [online]. Praha: ČAPPO, 12. října 2017 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/aktuality-a-media/aktuality/primichavani-bioslozky-do-automobilovych-benzinu>
- [61] Biofuels in the road transport. *IFPEN* [online]. Paris: IFP Energies nouvelles, 16. 09. 2020 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.ifpennergiesnouvelles.com/article/biofuels-dashboard-2020>
- [62] TŘEBICKÝ, Vladimír. Vlastnosti paliv s obsahem biosložek. *BIOM* [online]. Praha: České sdružení pro biomasu, c2001-2018 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vlastnosti-paliv-s-obsahem-bioslozek>
- [63] Mýty o E85. *Přestavby a servis LPG, CNG, E85* [online]. Praha: Automotokout, 2012 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://www.magicacoustic.cz/wordpress/prestavby-lpg-cng-e85/prestavby-na-e85/myty-a-lzi-o-e85/>
- [64] Vše o ethanolu. *Přestavby FLEXCAR* [online]. Praha: FLEXCAR.cz, c2008-2012 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <http://www.flexcar.cz/vse-o-ethanolu-e85>
- [65] Ethanol and the environment. *EIA* [online]. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/biofuels/ethanol-and-the-environment.php>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>C</i>		Uhlík
<i>C₂H₅OH</i>		Ethanol
<i>C₆H₁₂O₆</i>		Jednoduchý sacharid
<i>CNG</i>		Compressed natural gas, stlačený zemní plyn
<i>CO</i>		Oxid uhelnatý
<i>CO₂</i>		Oxid uhličitý
<i>H₂</i>		Vodík
<i>H₂O</i>		Voda
<i>HC</i>		Nespálené uhlovodíky
<i>CH₄</i>		Metan
<i>LNG</i>		Liquefied natural gas, zkapalněný zemní plyn
<i>LPG</i>		Liquefied petroleum gas, zkapalněný ropný plyn
<i>MON</i>		Oktanové číslo určené motorovou metodou
<i>NO</i>		Oxid dusnatý
<i>NO₂</i>		Oxid dusičitý
<i>NO_x</i>		Oxidy dusíku
<i>O₂</i>		Kyslík
<i>PM</i>		Pevné částice
<i>RON</i>		Oktanové číslo určené výzkumnou metodou
<i>TTW</i>		Tank-to-wheel analýza
<i>WTT</i>		Well-to-tank analýza
<i>WTW</i>		Well-to-wheel analýza
ε_k	[-]	Kompresní poměr
η_t	[-]	Termická účinnost
κ	[-]	Poissonova konstanta
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu