

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: B2341 strojírenství

Studijní obor: 2302R022 dopravní stroje a zařízení

Alternativní paliva pro zážehové motory

Alternative fuels for spark-ignition engines

Bakalářská práce

Autor:

Luboš Hromádko

Vedoucí práce:

doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant:

Ing. Martin Pechout

V Liberci dne 23. 5. 2013

Prázdný list pro originál zadání

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

23. 5. 2013



Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za mnoho užitečných rad a připomínek, které napomohly řádnému dokončení této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za zájem a podporu při celém studiu.

Anotace

Protože konvenční paliva používaná k pohonu spalovacích motorů jsou získávána z neobnovitelných zdrojů, neustále narůstá podíl alternativních paliv získávaných ze zdrojů obnovitelných nebo dlouhodoběji využitelných. Tato práce se věnuje problematice alternativních paliv pro zážehové motory a cílem je porovnání provozních a ekonomických parametrů při provozu konkrétního zážehového motoru na tato paliva.

Klíčová slova

Alternativní paliva, zážehové motory, výhřevnost, oktanové číslo, metanové číslo, zkapalněné ropné plyny, zemní plyn, bioplyn, generátorový plyn, vodík, alkoholy.

Annotation

Because conventional fuels used to power combustion engines are obtained from non-renewable resources, is constantly growing share of alternative fuels derived from renewable sources or long term usable. This thesis deals with the issue of alternative fuels for spark-ignition engines and compares the operating and economic parameters of these fuels during a power of the specific spark-ignition engine.

Key words

Alternative fuels, spark-ignition engines, heating value, octane number, methane number, liquefied petroleum gases, natural gas, biogas, producer gas, hydrogen, alcohols.

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Anotace.....	5
Klíčová slova.....	5
Obsah.....	6
Seznam tabulek	10
Seznam grafů.....	11
Seznam obrázků	12
Seznam použitých symbolů a zkratek	13
Úvod.....	15
Stručný přehled	15
1 Zkapalněné ropné plyny (LPG).....	16
1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti LPG	16
Tab. 1.1: Vlastnosti propanu, n-butanu a i-butanu.....	16
Tab. 1.2: Antidetonační odolnost propanu, butanu a benzínu	17
1.2 Výroba LPG.....	17
1.3 Distribuce LPG	18
1.3.1 Přeprava LPG.....	18
1.3.2 Čerpací stanice LPG v ČR	18
1.4 Použití LPG v zážehových motorech	19
1.4.1 Způsoby seřízení a provozu LPG motorů	19
1.4.2 Přestavba motoru a palivového příslušenství na LPG pohon	19
1.5 Palivové příslušenství LPG	22
Tab. 1.3: Složení a vlastnosti letního a zimního druhu LPG vyhovujících ČSN EN 589	23
1.6 Vliv provozu na LPG na motor a ostatní komponenty vozidel	24
1.6.1 Více namáhané součásti vozidla	24
1.6.2 Méně namáhané součásti vozidla.....	25
2 Zemní plyn	26
2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti zemního plynu.....	26
Tab. 2.1: Vybrané vlastnosti tranzitního zemního plynu ($t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101,3\text{ kPa}$)	26
Tab. 2.2: Složení vybraných zemních plynů (% mol) používaných v zemích EU a zemního plynu těženého v ČR (jižní Morava)	27

2.2 Zdroje zemního plynu.....	27
2.3 Distribuce zemního plynu.....	28
2.3.1 Přeprava zemního plynu	28
2.3.2 Plnicí stanice CNG v ČR	30
2.3.3 Plnicí stanice LNG.....	31
2.3.3 Plnicí stanice LCNG	31
2.4 Použití zemního plynu ve vozidlech se zážehovými motory	31
2.4.1 Použití CNG v zážehových motorech a palivové příslušenství	32
2.4.2 Použití LNG v zážehových motorech a palivové příslušenství	34
3 Bioplyn	36
3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti bioplynu	36
Tab. 3.1: Složení a výhřevnost vybraných druhů bioplynu (teplota 15°C, tlak 101,3 kPa)	
.....	36
3.2 Výroba bioplynu	36
3.3 Distribuce a použití bioplynu ve vozidlech se zážehovými motory	38
4 Generátorový plyn.....	40
4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti generátorového plynu.....	40
Tab. 4.1: složení a vlastnosti generátorového plynu	40
4.2 Výroba generátorového plynu	41
4.3 Distribuce generátorového plynu.....	42
4.4 Použití generátorového plynu v zážehových motorech	43
4.5 Palivové příslušenství generátorového plynu	44
5 Vodík.....	45
5.1 Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku.....	45
Tab. 5.1: Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti vodíku.....	45
5.2 Výroba vodíku	46
5.3 Distribuce vodíku	50
5.3.1 Skladování vodíku	51
Tab. 5.2: vybrané parametry nejčastějších metalhydridů	52
5.3.2 Plnicí stanice s vodíkem.....	54
5.4 Použití vodíku v zážehových motorech a palivové příslušenství	55
5.4.1 Zážehové motory spalující vodík	55
5.4.2 Skladování vodíku ve vozidle	56
6 Alkoholy.....	59

6.1 Etanol.....	59
6.1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti etanolu	59
Tab. 6.1: Vybrané vlastnosti etanolu, ETBE a klasického automobilového benzínu.....	60
6.1.2 Výroba etanolu.....	60
6.1.3 E85	61
6.1.4 Přeprava a čerpací stanice E85.....	61
6.1.5 Použití E85 v zážehových motorech.....	62
6.1.6 Palivové příslušenství E85	64
6.2 Metanol.....	64
6.2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti metanolu	65
Tab. 6.2: Vybrané vlastnosti metanolu, MTBE a klasického automobilového benzínu...	65
6.2.2 Výroba metanolu.....	66
6.2.3 Distribuce metanolu	66
6.2.4 Možnost použití metanolu v zážehových motorech.....	67
6.3 Butanol.....	67
6.3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti butanolu	67
Tab. 6.3: Vybrané vlastnosti butanolu, etanolu a benzínu	67
6.3.2 Výroba butanolu.....	68
6.3.3 Distribuce	68
6.3.4 Možnost použití butanolu v zážehových motorech	68
6.3.5 Vliv butanolu na palivové příslušenství automobilu	69
7 Použití vybraných alternativních paliv v benzínovém motoru Škoda-Auto 1,2 HTP.....	70
Tab. 7.1: Hlavní konstrukční a provozní parametry motoru.....	70
Tab 7.2: Hodnoty vnější otáčkové charakteristiky motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW.....	70
7.1 Použití vybraných alternativních paliv v motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW	71
Tab. 7.3: Hodnoty vybraných paliv	72
Tab. 7.4: Hodnoty celkové účinnosti a měrné spotřeby benzínu	73
7.1.1 Použití LPG.....	74
Tab. 7.5: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG	74
Tab. 7.6: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG po úpravách.....	76
7.1.2 Použití zemního plynu	77
Tab. 7.7: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG	77
Tab. 7.8: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG po úpravách.....	78

7.1.3 Použití bioplynu	80
Tab. 7.9: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn.....	80
Tab. 7.10: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn po úpravě.....	81
7.1.4 Použití generátorového plynu	83
Tab. 7.11: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP	83
Tab. 7.12: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP po úpravě.....	84
7.1.5 Použití vodíku	86
Tab. 7.13: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík.....	86
Tab. 7.14: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík po úpravách	87
7.1.6 Použití E85	89
Tab. 7.15: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85	89
Tab. 7.16: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85 po úpravě.....	90
7.1.7 Použití butanolu	92
Tab. 7.17: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na butanol.....	92
7.2 Porovnání provozních a ekonomických parametrů motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW na benzín a na jednotlivá alternativní paliva.....	93
Tab. 7.18: Porovnání provozních a ekonomických parametrů motoru ŠA 1,2 HTP 40kW	94
Závěr.....	95
Seznam použitých zdrojů	97

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Vlastnosti propanu, n-butanu a i-butanu	16
Tab. 1.2: Antidetonační odolnost propanu, butanů a benzínu.....	17
Tab. 1.3: Složení a vlastnosti letního a zimního druhu LPG vyhovujících ČSN EN 589.....	23
Tab. 2.1: Vybrané vlastnosti tranzitního zemního plynu ($t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101,3\text{ kPa}$).....	26
Tab. 2.2: Složení vybraných zemních plynů (% mol) používaných v zemích EU a zemního plynu těženého v ČR (jižní Morava)	27
Tab. 3.1: Složení a výhřevnost vybraných druhů bioplynu (teplota 15°C , tlak $101,3\text{ kPa}$).....	36
Tab. 4.1: složení a vlastnosti generátorového plynu	40
Tab. 5.1: Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti vodíku	45
Tab. 5.2: vybrané parametry nejčastějších metalhydridů.....	52
Tab. 6.1: Vybrané vlastnosti etanolu, ETBE a klasického automobilového benzínu	60
Tab. 6.2: Vybrané vlastnosti metanolu, MTBE a klasického automobilového benzínu	65
Tab. 6.3: Vybrané vlastnosti butanolu, etanolu a benzínu	67
Tab. 7.1: Hlavní konstrukční a provozní parametry motoru	70
Tab 7.2: Hodnoty vnější otáčkové charakteristiky motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW	70
Tab. 7.3: Hodnoty vybraných paliv.....	72
Tab. 7.4: Hodnoty celkové účinnosti a měrné spotřeby benzínu	73
Tab. 7.5: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG.....	74
Tab. 7.6: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG po úpravách	76
Tab. 7.7: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG	77
Tab. 7.8: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG po úpravách.....	78
Tab. 7.9: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn	80
Tab. 7.10: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn po úpravě	81
Tab. 7.11: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP	83
Tab. 7.12: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP po úpravě	84
Tab. 7.13: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík	86
Tab. 7.14: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík po úpravách	87
Tab. 7.15: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85.....	89
Tab. 7.16: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85 po úpravě.....	90
Tab. 7.17: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na butanol	92
Tab. 7.18: Porovnání provozních a ekonomických parametrů motoru ŠA 1,2 HTP 40kW.....	94

Seznam grafů

Graf 1.1: Tlak nasycených par propanu a butanů v závislosti na teplotě.....	24
Graf 7.1: Vnější otáčková charakteristika motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW	71
Graf 7.2: Otáčková charakteristika celkové účinnosti a měrné spotřeby BA95 motoru ŠA 1,2 HTP 40kW.....	73
Graf 7.3: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu LPG a benzínu	74
Graf 7.4: Porovnání průběhu měrné spotřeby LPG a benzínu	75
Graf 7.5: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby LPG po úpravě a benzínu ...	76
Graf 7.6: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu NG a benzínu	77
Graf 7.7: Porovnání průběhu měrné spotřeby NG a benzínu	78
Graf 7.8: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu NG po úpravě a benzínu	79
Graf 7.9: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby NG po úpravě a benzínu	79
Graf 7.10: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu bioplynu a benzínu	80
Graf 7.11: Porovnání průběhu měrné spotřeby bioplynu a benzínu.....	81
Graf 7.12: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu bioplynu po úpravě a benzínu	82
Graf 7.13: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby bioplynu po úpravě a benzínu	82
Graf 7.14: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu GP a benzínu.....	83
Graf 7.15: Porovnání průběhu měrné spotřeby GP a benzínu.....	84
Graf 7.16: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu GP po úpravě a benzínu	85
Graf 7.17: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby GP po úpravě a benzínu....	85
Graf 7.18: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu vodíku a benzínu ...	86
Graf 7.19: Porovnání průběhu měrné spotřeby vodíku a benzínu.....	87
Graf 7.20: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu vodíku po úpravě a benzínu	88
Graf 7.21: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby vodíku po úpravě a benzínu	88
Graf 7.22: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu E85 a benzínu	89
Graf 7.23: Porovnání průběhu měrné spotřeby E85 a benzínu	90
Graf 7.24: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu E85 po úpravě a benzínu	91
Graf 7.25: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby E85 po úpravě a benzínu ..	91

Graf 7.26: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu butanolu a benzínu.	92
Graf 7.27: Porovnání průběhu měrné spotřeby butanolu a benzínu.....	93
Graf 7.28: Porovnání průběhů nákladů na provoz 1 kWh pro benzín a sledovaná alternativní paliva v motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW	94

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Mapa čerpacích stanic LPG v ČR.....	19
Obr. 1.2: Schéma zástavby LPG ve vozidle.....	22
Obr. 2.1: Tanker pro dálkovou přepravu LNG.....	29
Obr. 2.2: Síť plynovodů se zemním plynem v ČR.....	29
Obr. 2.3: Mapa plnicích stanic s CNG v ČR.....	30
Obr. 2.4: Schéma dvou-palivového vozidla poháněného CNG	32
Obr. 2.5: Kryogenní nádrž na LNG.....	34
Obr. 3.1: Schéma bioplynové stanice.....	38
Obr. 3.2: Mapa bioplynových stanic v ČR.....	38
Obr. 3.3: Bioplynová plnicí stanice ve Švýcarsku	39
Obr. 4.1: Schéma zplyňování	41
Obr. 4.2: Rozdíl mezi autotermním a alotermním zplyňováním.....	42
Obr. 5.1: Zastoupení hlavních zdrojů výroby vodíku	46
Obr. 5.2: Schematické znázornění S-I cyklu.....	49
Obr. 5.3: Řez kompozitní tlakovou lahví	51
Obr. 5.4: Vodíková plnicí stanice v ČR	55
Obr. 5.5: Únik paliva a následné vznícení vodíku (vlevo) a benzínu (vpravo).....	57
Obr. 6.1: Mapa čerpacích stanic s E85.....	62
Obr. 6.2: Schematické uspořádání motoru pro FFV	64

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Význam/veličina
α	[%]	zatížení (poloha škrticí klapky)
ε	[-]	kompresní poměr
H_u	[MJ/kg]	výhřevnost
κ	[-]	adiabatický exponent
L_v	[MJ/kg]	výparné teplo
L_{VT}	[kg/kg]	stechiometrické množství vzduchu pro 1 kg paliva
λ	[-]	bohatost směsi (součinitel přebytku vzduchu)
$\dot{m}_{pal}$	[g/s]	hmotnostní tok paliva
m_{pe}	[g/kWh]	měrná spotřeba paliva 1 kWh
M_t	[Nm]	točivý moment
n	[ot/min]	otáčky
n	[-]	polytropický exponent
η_{celk}	[-]	celková účinnost
η_d	[-]	dopravní účinnost
η_t	[-]	teoretická účinnost
CČ	[-]	cetanové číslo
OČ	[-]	oktanové číslo
OČMM	[-]	oktanové číslo stanovené motorovou metodou
OČVM	[-]	oktanové číslo stanovené výzkumnou metodou
P_e	[kW]	efektivní výkon
p_{pl}	[MPa]	plnicí tlak
r	[J/kg.K]	individuální plynová konstanta
$T_{DÚ}$	[K]	teplota na dolní úvrati
V_z	[cm ³]	zdvihový objem

Zkratka

Význam

BA	Benzín automobilový
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion - exploze par expandující vroucí kapaliny
BP	Bioplyn
BPS	Bioplynová stanice
ČOV	Čistírna odpadních vod
CNG	Compressed Natural Gas - stlačený zemní plyn
CBM	Coal Bed Methan - metan z černouhelných slojí
DGi	Direct Gasoline injection - přímé vstřikování benzínu
E85	Směs 85 % etanolu a 15% benzínu (min. 70 % etanolu)
EOBD	European On-Board Diagnostics – evropská palubní diagnostika

Zkratka	Význam
ETBE	Etyl-Tercier-ButylEter
FFV	Flexible fuel vehicles – vozidlo přizpůsobené pro více paliv
FSi	Fuel Stratified injection - přímé vstřikování paliva
GP	Generátorový plyn
GH2	Gaseous Hydrogen - stlačený vodík
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition – homogenní naplnění spalovacího prostoru
LH2	Liquefied Hydrogen - zkapalněný vodík
LNG	Liquefied Natural Gas - zkapalněný zemní plyn
LPG	Liquefied Natural Gases - zkapalněné ropné plyny
LPdi	Liquid Propane direct injection - přímé vstřikování kapalného LPG
LPi	Liquid Propane injection - vstřikování kapalného LPG
MM	Motorová metoda
MTBE	Metyl-Tercier-ButylEter
NG	Natural Gas - zemní plyn
NGV	Natural Gas Vehicle - vozidlo na zemní plyn
OBD	On-Board Diagnostics - palubní diagnostika
OEM	Original Equipment Manufacturer - Originální příslušenství od výrobce
pH	potential of hydrogen - vodíkový exponent
THP	Turbo High Pressure - přeplňovaný motor s vysokým tlakem
TTW	Tank To Wheel - od nádrže ke kolu
TWC	Three Way Catalyst - trojcestný katalyzátor
VM	Výzkumná metoda
WTT	Well to Tank - od zdroje k nádrži
WTW	Well To Wheel - od zdroje ke kolu

Úvod

Potřeba neustálého zvyšování podílu alternativních paliv použitelných v zážehových motorech má několik důvodů. Nejpodstatnější je skutečnost, že světové zásoby ropy, která je hlavní surovinou pro výrobu současných komerčních paliv, jsou omezené a za několik desítek let budou vyčerpány. Přesto, že existují i jiné nekonvenční zdroje ropy (např. ropné břidlice, dehtové písky apod.), výhodnost jejich využití k výrobě ropy je ve srovnání s alternativními palivy z hlediska energetické tedy i ekonomické náročnosti spekulativní.

Jedním z nejhlavnějších aspektů pro výběr motorového paliva je tzv. proces WTT (Well To Tank) – tedy cesta paliva od těžby základní suroviny až po tankování koncovým spotřebitelem, týká se energetické, s tím související ekonomické náročnosti a také účinnosti s jakou je palivo produkováno. Současná konvenční fosilní paliva mají před některými alternativními palivy značný náskok, ale s rozvíjejícími se technologiemi se tento náskok snižuje. Velkou úlohu zastává také proces TTW (Tank To Wheel) - tedy cesta paliva od natankování do nádrže vozidla až k pohonu vozidla týkající se nákladů na palivo za ujetou vzdálenost a také účinnosti s jakou je ve vozidle využito. Celý cyklus paliva se nazývá WTW (Well To Wheel) - což je cesta paliva od těžby základní suroviny až po pohonu vozidla, který sleduje celkovou účinnost životního cyklu paliva.

Dalším důvodem pro užívání alternativních paliv je ekologie, protože i přes neustálé snižování spotřeby komerčních paliv a s tím úzce související snižování emisí stále dochází k navyšování spotřeby energie a zároveň emisí, což má neblahý vliv pro živé organismy na povrchu Země i na její celkové klima, avšak emisními parametry výfukových zplodin se tato práce nezabývá.

Stručný přehled

Zkapalněné ropné plyny označovány **LPG** jsou směsí převážně propanu a butanu.

Zemní plyn je přírodní směs plyných uhlovodíků s převahou metanu.

Bioplyn je plynná pohonná látka vyrobená z biomasy, kterou lze vyčistit na kvalitu zemního plynu.

Skládkový plyn je bioplyn vyrobený z biodegradabilního podílu odpadů.

Generátorový plyn syntetický plyn, který se získává v generátorech reakcí rozžhavených tuhých paliv se vzduchem, vodní parou nebo jejich směsí.

Vodík je nejjednodušší, nejlehčí a nejrozšířenější prvek.

Alkoholy jsou kapalné uhlovodíky s molekulou OH nahrazující jeden atom vodíku.

1 Zkapalněné ropné plyny (LPG)

Pod zkapalněnými ropnými plyny rozumíme směsi zkapalněných uhlovodíků převážně se třemi až čtyřmi atomy uhlíku v molekule, a to jak nasycených, tak nenasyčených. Jako kapaliny se zkapalněné ropné plyny uchovávají pod tlakem v tlakových nádobách. Často se můžeme také setkat s názvem LPG (z anglického „Liquefied Petroleum Gases“), naznačujícím původ těchto produktů [39]. V dnešní době se pod termínem LPG myslí propan, butan nebo směs propanu a butanu.

1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti LPG

LPG lze popsat jako bezbarvou, silně těkavou kapalinu charakteristického zápachu, který vzniká důsledkem odorizace sirnými látkami [47]. Je to hořlavá a výbušná kapalina s bodem vzplanutí pod 0 °C [47]. Není jedovatá, ale může dráždit oči, dýchací cesty a způsobovat bolesti hlavy. V závislosti na složení může být až 2krát těžší [47] než vzduch, tzn. má „snahu“ hromadit se v prohlubních, kde může vytvářet nebezpečnou výbušnou směs se vzduchem (z tohoto plynu některé zásady ohledně skladování). Zkapalněním LPG se jeho objem zmenší asi 260krát neboli z 1 m³ plynu získáme kompresí necelé 4 litry kapalné fáze o poměrně vysokém energetickém obsahu. Při volné expanzi z tlakové lahve se plyn prudce ochlazuje a vzniká riziko vzniku omrzlin, i proto je třeba při zacházení s LPG (např. při tankování) dbát všech bezpečnostních předpisů. Jak již bylo zmíněno, LPG je směsí plynů. Výsledné vlastnosti, zejména oktanové číslo a tlak par v nádrži, jsou tedy závislé na obsahu jednotlivých složek této směsi. Hlavními složkami LPG jsou propan, n-butan a i-butan. Vybrané vlastnosti těchto složek jsou uvedeny v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Vlastnosti propanu, n-butanu a i-butanu [33]

	Jednotka	Propan	N-butan	I-butan
Hustota plynné fáze (0°C, 101,3kPa)	kg/m ³	2,01	2,64	2,64
Hustota kapalné fáze (20°C, 101,3kPa)	kg/m ³	501	578	558
Výhřevnost	MJ/kg	46,2	45,9	45,9
Bod varu (101,08kPa)	°C	- 42,6	- 0,6	- 12,6
Bod tání (101,08kPa)	°C	-190	- 135	- 145
Výparné teplo	kJ/kg	441,1	396,5	386,6
Stechiometrické množství vzduchu	m ³ /m ³	23,9	31,1	31,1
Výhřevnost stochiometrické směsi	MJ/m ³	3,73	3,78	3,78

Z uvedených hodnot v tabulce 1.1 je zřejmé, že složení LPG nemá na výhřevnost stechiometrické palivové směsi významnější vliv. V motorech se spaluje buď stechiometrická palivová směs, nebo chudá palivová směs [33].

Antidetonační odolnost kapalných paliv pro zážehové motory bývá vyjadřována pomocí OČVM nebo OČMM. ČSN EN 589 přiřazuje uhlovodíkům oktanový faktor MM sloužící k výpočtu OČMM LPG.

U plynných paliv, z nichž mnohým lze přiřadit OČVM vyšší než 100, je vhodnější vyjadřovat antidetonační odolnost pomocí metanového čísla. Metanová i oktanová čísla propanu, n-butanu, i-butanu a oktanová čísla benzínu BA95 jsou uvedena v tabulce 1.2. Antidetonační odolnost LPG je podle OČVM uváděných v literatuře poměrně vysoká. OČVM i-butanu převyšuje OČVM benzínu BA95 a OČVM propanu je výrazně vyšší než OČVM benzínu BA95. [33]

Tab. 1.2: Antidetonační odolnost propanu, butanů a benzínu [33]

	Propan	N-butan	I-butan	Benzín BA95
Oktanové číslo VM	112	94	99	95
Metanové číslo	34	10	14	-
Oktanové číslo MM	96	89	97	85

1.2 Výroba LPG

Propan a butan jsou získávány zpracováním ropných plynů. Pro výrobu těchto plynů se využívala například nízkoteplotní karbonizace nebo hydrogenizace hnědého uhlí. V současnosti se však získává asi 60 % [47] ropných plynů rafinací zemního plynu a asi 40 % [47] při zpracování ropy, přičemž je počítáno zvyšování podílu celkové produkce LPG ze zemního plynu poroste, protože výroba LPG z ropy je omezená jejími zásobami, které jsou podstatně menší než zásoby zemního plynu.

Při výrobě LPG ze zemního plynu má značný význam jeho složení, které se většinou liší od naleziště k nalezišti. Zemní plyn kromě metanu obvykle obsahuje vyšší alkany, vodní páru, oxid uhličitý, sulfan, dusík, vodík, hélium a neon [47]. Rafinací se od sebe oddělí jednotlivé plyny.

Výroba LPG z ropy probíhá tak, že se smísí a následně stlačí všechny posbírané plyny, které vznikly v průběhu jednotlivých fází zpracování ropy. V absorbéru se pak od sebe jednotlivé složky oddělí. Množství propanu a butanu, které lze během tohoto procesu, získat

odpovídá asi 2–3 % [47] hmotnosti zpracovávané ropy. Z toho je butanu asi 2krát více [47] než propanu.

1.3 Distribuce LPG

LPG na cestě z místa svého vzniku (rafinérie, ložisko zemního plynu nebo ropy) k místu finální spotřeby prochází distribučním řetězcem, kde vedle skladování je v kapalně formě i různým způsobem přepravován. Využívá se při tom výhodná vlastnost LPG, tj. že v malém objemu zkapalněného plynu je obsaženo velké množství energie (zkapalněním LPG zmenšuje cca 260krát svůj objem). Účelná, rychlá a racionální přeprava přispívá i ke konkurenční schopnosti v porovnání s ostatními palivy.

1.3.1 Přeprava LPG

K přepravě většího množství LPG po pevnině se převážně používají železniční cisterny s kapacitou 10–50 t. Železniční přeprava nachází využití zejména v případě dovozů ze zahraničí, případně přepravy z rafinérií, do plnění nebo zařízení, vybavených vlečkou a dostatečnými skladovacími kapacitami. Pokud je vybudována hustá kolejová síť, je železniční přeprava v cisternách nejhospodárnějším způsobem přepravy. Železniční doprava LPG se uskutečňuje a řídí řádem pro mezinárodní přepravu nebezpečných nákladů RID [47].

Pro přepravu LPG po pozemních komunikacích se používají různé typy autocisteren, cisternových návěsů nebo autocisteren s přívěsem. Užitečná kapacita autocisteren se pohybuje v rozmezí 8–16 t, jejich akční rádius je hospodárností omezen na cca 200 km. Přeprava LPG na pozemních silničních komunikacích se řídí předpisy přepravy nebezpečných nákladů ADR [47].

1.3.2 Čerpací stanice LPG v ČR

LPG je současným nejrozšířenějším alternativním palivem, protože síť čerpacích stanic LPG v ČR je v dnes poměrně hustá. Počet čerpacích stanic je cca 800 a stále roste [29], mapa těchto stanic je na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Mapa čerpacích stanic LPG v ČR [24]

1.4 Použití LPG v zážehových motorech

Použití LPG jako paliva do zážehového motoru je realizováno poměrně jednoduchou přestavbou tohoto motoru, který pak pracuje jako dvoupalivový plynový zážehový motor a může tedy spalovat LPG i benzín.

1.4.1 Způsoby seřízení a provozu LPG motorů

Pro současné zážehové motory je používáno seřízení a provoz plynového LPG motoru na směs o stechiometrickém složení, tj. se součinitelem přebytku vzduchu λ (lambda) = 1 ve všech provozních režimech – Regulaci bohatosti směsi zajišťuje elektronický systém, velmi nízké výfukové emise jsou zabezpečeny TWC katalyzátorem ve výfukovém systému motoru. Pro starší vozidla vybavená motory s mechanickým karburátorem se pak nabízí řešení s jednoduchou mechanickou podtlakovou regulací bohatosti směsi. Pro tuto koncepci je LPG velmi vhodným alternativním palivem, které může velmi dobře nahradit benzin a lze je použít pro nepřepínávané i přepínávané motory. [47]

1.4.2 Přestavba motoru a palivového příslušenství na LPG pohon

V případě použití LPG pohonu u osobních a vozidel nacházejí největší uplatnění následující technická řešení, ať se již jedná o dodatečnou formu přestavby původního benzinového motoru nebo vozidla s prvovýroby (tzv. OEM vozidla):

Mechanicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem – nejstarší, nejjednodušší a zároveň nejrozšířenější systém, který je určen pro zážehové motory s karburátorem bez katalyzátoru a bez elektronické regulace bohatosti směsi. Systém pracuje na principu mechanické (membránové) regulace bohatosti směsi vzduch / palivo na základě podtlaku v sacím potrubí automobilu. Spojení motorové části vozu a nádrže zajišťuje oplastované měděné potrubí, vedené pod vozem. V motoru přichází kapalný LPG k uzavíracímu elektro-ventilu s filtrem paliva. Ventil je spojen s regulátorem a zplynovačem (reduktorem), kde dochází ke změně stavu paliva z kapalné fáze na plynnou. Reduktor je vyhříván chladicí kapalinou z okruhu chlazení motoru. Plynná fáze LPG postupuje přes pevně nastavený škrticí prvek do centrálního směšovače, který je vložen mezi vzduchovým filtrem a přívěrou vzduchu (škrticí klapkou). Zde dochází ke správnému míchání směsi vzduch-LPG. Přepínačem na přístrojové desce lze přepínat mezi oběma palivy – BA a LPG. Systém je v ČR využíván převážně u karburátorových vozidel. [47]

Elektronicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem – systém určený pro vozidla vybavená katalyzátorem a elektronicky řízenou přípravou stechiometrické směsi vzduch-palivo (elektronicky řízený karburátor nebo vstřik paliva), který je určen pro zážehové motory s karburátorem bez katalyzátoru a bez elektronické regulace bohatosti směsi. Systém opět využívá regulátor – zplynovač (reduktor) s regulací přítoku kapalného LPG na základě podtlaku v sacím potrubí automobilu, ale množství plynu proudícího do centrálního směšovače je dále kontinuálně regulováno ventilem s krokovým motůrkem, který je spojen s řídicí jednotkou LPG. Ta ovládá celý systém provozu na LPG. Pro řízení správné dávky paliva mohou být využívána rovněž i některá data z benzinové řídicí jednotky (poloha škrticí klapky, teplota v chladicím okruhu, podtlak v sacím potrubí). Přepínačem na přístrojové desce lze opět přepínat mezi oběma palivy – BA a LPG. Systém je v ČR opět značně rozšířen a je využíván u většiny starších vozidel s jednobodovým či vícebodovým vstřikováním. [47]

Systém s elektronicky řízeným vícebodovým kontinuálním vstřikováním plynu – vstřikování plynné fáze LPG do sacího potrubí těsně před sací ventil je dnes jediným možným řešením pro přestavbu současných vozidel na LPG. Ve své nabídce má tento systém již většina výrobců. Příprava plynu před jeho mísením do nasávaného vzduchu je v principu shodná jako u klasického podtlakového systému, tj. je využíván zplynovač s redukcí tlaku. Dále plyn proudí z reduktoru do tzv. distributoru, odkud je rozváděn k jednotlivým tryskám, které pouze zajišťují vstřik plynu do sacího potrubí. Veškeré dávkovací a regulační funkce obstarává

distributor. Trysky mohou být opatřeny beztlakými ventilkami, které zlepšují přechodovou fázi z volnoběžného režimu do jízdního režimu. Množství dávkovaného LPG je řízeno samostatnou elektronickou řídicí jednotkou na základě signálu lambda sondy katalyzátoru výfukových plynů, přičemž jsou využívány i některé další provozní informace z benzinové řídicí jednotky (tlak v sacím potrubí, otáčky motoru, poloha škrticí klapky, teplota chladicí kapaliny, datové pole předstihu). Tento systém plynové zástavby nelze použít u vozidel nejmodernější konstrukce vyrobených v Evropě po r. 2001, které jsou povinně vybaveny tzv. OBD diagnostikou monitorující, registrující a řídící veškeré funkce pohonné jednotky a elektronických systémů vozidla. U těchto vozidel není přípustné při alternativním pohonu na LPG systém OBD vyřadit z provozu, např. elektronickou emulací náhradního signálu indikující bezchybnou činnost všech provozních a řídicích systémů vozidla. [47]

Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním plynu – zatím nejrozšířenějším systémem, který je určený pro moderní automobily, je systém sekvenčního vstřikování plynu. Tento systém pracuje obdobně jako systém s elektronicky řízeným vícebodovým kontinuálním vstřikováním, ale je schopen bez následných problémů pracovat ve vozech s řídicími systémy OBDII (USA, Kanada – všechny vozy od roku výroby 2000), či EOBD (Evropa – všechny vozy od roku výroby 2001) [47]. U tohoto systému je spotřeba i výkon motoru při provozu na plyn nejbližší provozu na benzín. Cena za montáž LPG tohoto systému se pohybuje od 26 000 Kč [4].

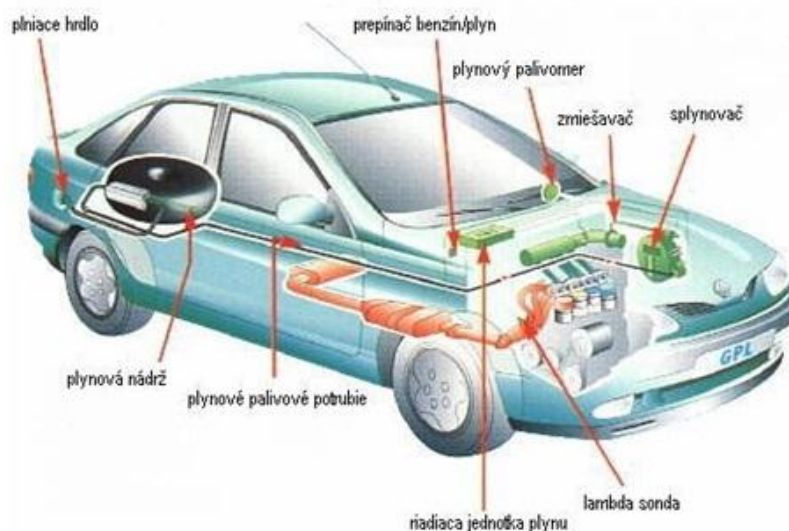
Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním plynu pro motory s přímým vstřikováním – jedná se o systém určený pro motory s přímým vstřikováním benzínu do hlavy válců. Zařízení pracuje na stejném principu jako sekvenční vstřikování plynu, jen software řídicí jednotky je vytvořený přímo od výrobce a nastaven přímo pro daný typ a kód motoru. Systém funguje tak, že vstřikuje kombinovaně benzín-plyn v poměru tak, že např. po každém sedmém vstříknutí paliva LPG následuje vstříknutí benzínu. Děje se tak z důvodu chlazení vstřikovače benzínu umístěného v hlavě válců. Nevýhodou je, že při provozu na LPG spotřebovává i benzín a to podle stylu jízdy od 10 do 30%. Je to ale pořád lepší než jezdit na drahý benzín. Cena za montáž LPG tohoto systému se pohybuje od 35 000 Kč. [4]

Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním kapalně fáze – LPI – systém vstřikování kapalně fáze LPG, který využívá vlastních vstřikovačů, které vstřikují kapalně LPG palivo do sacího potrubí motoru. Funguje stejně jako sekvenční vstřikování

plynu, jen se nepoužívá předehřevu LPG, ale palivo je dopravováno do motoru pomocí čerpadla umístěného v plynové nádrži. Velkou nevýhodou je cena, která se pohybuje v rozmezí od 60000 do 70000 Kč. Systém je také více než jiné citlivý na kvalitu paliva LPG. [4]

Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním přímým vstřikováním kapalné fáze

- **LPdi** – zatím nejnovější, nejmodernější a na dlouhou dobu poslední systém vstřikování kapalné fáze LPG, kterým se kapalné LPG palivo dopravuje do motoru přes originální benzínové vstřikovače motoru. Celý systém řídí originální benzínová řídicí jednotka motoru. Tento systém je určen především pro motory se přímým vstřikováním benzínu do hlavy válců (označení FSi, DGi, THP, apod.). Cena se zatím pohybuje v rozmezí od 65000 do 75000 Kč. [4]



Obr. 1.2: Schéma zástavby LPG ve vozidle [27]

1.5 Palivové příslušenství LPG

Nádrže na LPG jsou obvykle umístěny v zavazadlovém prostoru a mají válcový tvar nebo v prostoru pro rezervní pneumatiku, kde mají tvar toroidu. Tyto nádrže lze plnit pouze na 80 % a musí splňovat určité podmínky pro bezpečný provoz. Nádrž je zkoušena tlakovou zkouškou při 67 bar (tlak při čerpání je 10 bar) [20]. Životnost nádrže je stanovena legislativou ČR na 10 let a po té musí být vyměněna. Součástí nádrže je také tzv. multiventil, který plní funkce provozní (uzavírá nádrž při vypnutí zapalování, odebírá pohonné hmoty z nádrže, ukazuje stav paliva v nádrži [51]) a bezpečnostní (plnění nádrže do max. 80 % obsahu, zastavení toku paliva při poruše potrubí, vypuštění plynu při přetlaku nad 27 bar,

ruční uzavření přívodu plynu do nádrže a k přípojce dálkového plnění, tepelná pojistka odpustí v případě požáru plyn z nádrže [51]). Z nádrže putuje kapalné palivo vysokotlakým (měděným oplastovaným) potrubím do výparníku (reduktoru).

Pro správnou funkci plynového palivového příslušenství je nutné, aby tlak LPG v palivových nádržích neklesl ani za nízkých teplot pod hodnotu potřebnou jednak k zajištění průtoku paliva z nádrže do regulátoru tlaku plynu, jednak ke správné činnosti regulátoru tlaku plynu u studeného motoru. Správná činnost většiny současných uspořádání plynových palivových příslušenství se směšovačem v sání motoru vyžaduje, aby přetlak LPG v nádrži neklesal pod přibližně 50 kPa. ČSN EN 589 předepisuje, aby manometrický tlak (přetlak) nasycených par LPG dodávaných jako zimní druh neklesl při teplotě -5 °C pod 150 kPa. Pro letní druh LPG není minimální hodnota tlaku v ČSN EN 589 stanovena.

Za výše uvedeného předpokladu by byl letní druh LPG při mezním obsahu 100 % n-butanu povoleném normou použitelný při teplotách vyšších než 10 °C. Jako zimní druh LPG, jehož složení je limitováno přetlakem 150 kPa při teplotě -5 °C, by v krajním případě vyhovovala směs min. 44,5 % propanu a max. 55,5 % n-butanu, která by byla s ohledem na potřebný přetlak, alespoň 50 kPa, použitelná do nejnižších teplot -19°C.

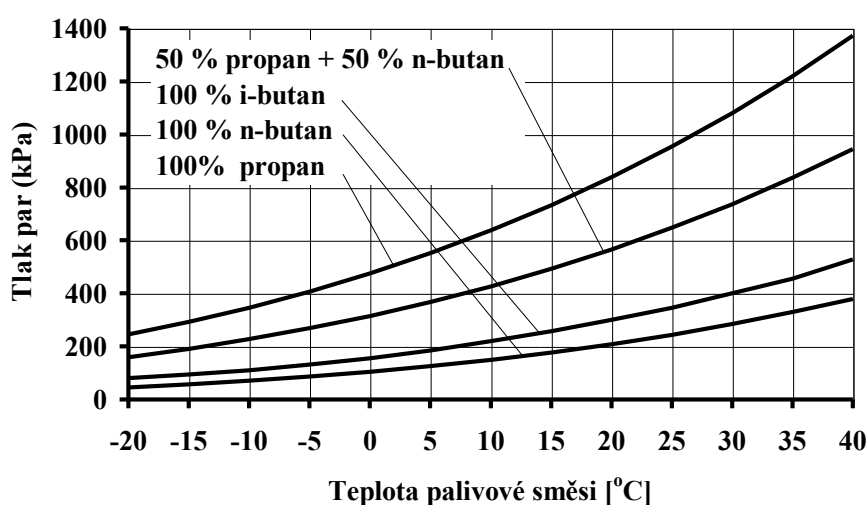
Při použití zjednodušujícího předpokladu, že by LPG byly směsí pouze dvou nejvýznamnějších složek, tj. propanu a n-butanu, jsou v tabulce 1.3 uvedena rozmezí složení letních a zimních druhů LPG, která vyhovují požadavkům ČSN EN 589. Tabulka uvádí též výhřevnosti LPG a minimální teploty LPG v palivové nádrži, za kterých je možný provoz motoru vybaveného směšovačem v sání.

Složení LPG se může podle ČSN EN 589 pohybovat ve velmi širokém rozmezí, od 100 % propanu během celého roku, do 100 % n-butanu v období od 1.6 do 30.9. Rozdílná složení LPG se vedle jejich použitelnosti v určitém rozmezí teplot projeví ve výhřevnosti paliva a v jeho antidetonační odolnosti. Výhřevnost n-butanu je o 14 % vyšší než výhřevnost propanu. Propan má OČVM 112, n-butan pouze 94. [33]

Tab. 1.3: Složení a vlastnosti letního a zimního druhu LPG vyhovujících ČSN EN 589 [33]

	Jednotka	LPG letní druh	LPG zimní druh
Obsah propanu	% hmot.	0 až 100	44,5 až 100
Obsah n-butanu	% hmot.	100 až 0	55,5 až 0
Výhřevnost kapaliny	MJ/l	26,5 až 23,1	25 až 23,1
Oktanové číslo VM	-	94 až 112	102 až 112
Min. teplota při přetlaku par 50kPa	°C	10 až -33	-19 až -33

Požadovaného tlaku v nádrži se dosahuje složením LPG a danou teplotou (viz graf 1.3). Tlak par LPG totiž nezávisí na naplnění nádrže, ale pouze na složení LPG a na teplotě. Teplota varu propanu je $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při okolní teplotě např. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vytváří v nádrži přetlak $0,25\text{ MPa}$, zatímco butan má bod varu kolem $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při teplotě pod bodem mrazu mají jeho páry nižší tlak než tlak atmosférický [47]. Z tohoto důvodu LPG v zimních měsících obsahuje obvykle více propanu. Dostatečný tlak par v nádrži zajišťuje bezproblémové nepřetržité dodávání kapalného LPG z nádrže do regulátoru (výparníku) zejména v těch palivových systémech, které nemají nádrž vybavenou palivovým čerpadlem.



Graf 1.1: Tlak nasycených par propanu a butanů v závislosti na teplotě [33]

1.6 Vliv provozu na LPG na motor a ostatní komponenty vozidel

U vozidel přestavěných na LPG dochází ke změnám v namáhání určitých komponentů pohonné jednotky, výfukového systému i podvozkových částí vozidla.

1.6.1 Více namáhané součásti vozidla

Zapalovací soustava – vysokonapěťový obvod (zejména zapalovací svíčky a kabely) musí být nepoškozený, životnost svíček při provozu na LPG je max. 15 000 km.

Výfuková soustava – výfukové plyny mají obecně vyšší teplotu a prakticky neobsahují pevné částice a aerosoly uhlíkového a uhlovodíkového charakteru, které se usazují na vnitřních plochách výfukového systému a částečně jej tak chrání proti korozi. Při výlučném nebo převážném provozu na LPG výfuk dříve koroduje.

Chladicí soustava – pokud není v dobrém stavu a již při provozu na klasické kapalné palivo (benzin, motorovou naftu) pracuje na hranici možností, může vzhledem k vyšší teplotě spalování docházet k přehřívání motoru. Chlazení je však při provozu na LPG podporováno značným úbytkem tepla při zplynování kapalného PB v reduktoru, který je začleněn do chladicí soustavy motoru. Tímto je u vozidel v dobrém technickém stavu zvýšená teplota spalování zcela eliminována.

Nápravy vozidel – u některých vozidel, zvláště při použití větší plynové nádrže, dochází ke změně rozložení hmotnosti a stabilně vyššímu zatížení zadní nápravy. Z toho vyplývá nižší světlá výška vozu v zadní části a tím snížená průchodnost při jízdě na nerovnostech.

1.6.2 Méně namáhané součásti vozidla

Klíkový mechanismus motoru – oktanové číslo LPG je vyšší než u automobilového benzinu. Chod motoru je proto znatelně měkčí a tišší s pozitivním vlivem na výrazně nižší rázové namáhání všech mechanických dílů motoru.

Stěny válců, písty a pístní kroužky – LPG nekondenzuje na stěnách válce a nenarušuje mazací olejový film. Ten je na stěnách válců benzinem částečně smýván, a to nejvíce při studených startech, kdy musí být pro klidný běh motoru nasávaná směs obohacena benzinem např. sytičem, a také při režimu plného výkonu. Toto při provozu na LPG nenastává.

Další třecí plochy motoru – motorový olej je méně znečišťován pevnými karbonovými úsadami, které se při provozu na LPG tvoří zcela minimálně, a tím se prodlužuje potřebná mazací schopnost oleje během jeho životnosti.

[47]

2 Zemní plyn

Zemní plyn (také NG – natural gas) je směs plynných uhlovodíků s převahou metanu. Je fosilního původu, takže patří mezi neobnovitelné zdroje energie, avšak jeho zásoby jsou odhadovány přibližně na 200 let, což je v porovnání s ropou podstatně déle. Vzhledem k neustálému rozšiřování dostupnosti se stává zemní plyn jedním z nejrozšířenějších alternativních paliv. V zemích EU by podle plánu do roku 2020 měl zemní plyn pohánět až 10 % vozidel [47].

2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti zemního plynu

Z chemického hlediska je zemní plyn směs plynných uhlovodíků s proměnnou příměsí neuhlovodíkových plynů. Jeho charakteristickým znakem je vysoký obsah metanu – CH_4 . Zemní plyn je hořlavý, výbušný plyn, bez barvy, bez zápachu a bez chuti. Je nejedovatý, má zanedbatelné toxické vlastnosti a je lehčí než vzduch. Vybrané vlastnosti tranzitního zemního plynu užívaného v ČR jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Vybrané vlastnosti tranzitního zemního plynu ($t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 101,3\text{ kPa}$) [36], [40]

	Jednotka	Hodnota
Výhřevnost	MJ/m^3	34,08
Spalné teplo	MJ/m^3	37,82
Hustota	kg/m^3	0,69
Meze výbušnosti	%	5 - 15
Zápalná teplota	$^{\circ}\text{C}$	650
Stechiometrické množství vzduchu	m^3/m^3	9,56
Teplota plamene	$^{\circ}\text{C}$	1 957

Složení zemního plynu je rozdílné v závislosti na nalezišti a podle toho se odvíjejí některé vlastnosti a nejvýznamnější je spalné teplo, podle kterého se dělí na zemní plyny typu H (high – vysoký energetický obsah), které mají spalné teplo při 0°C a 101,3 kPa v rozmezí $40\text{--}46\text{ MJ.m}^{-3}$, jsou využívány ve většině evropských zemí včetně České republiky, obsahují zpravidla méně než 5 % objemu nehořlavých látek, a zemní plyny typu L (low – nízký energetický obsah), které mají spalné teplo při 0°C a 101,3 kPa v rozmezí $33\text{--}38\text{ MJ.m}^{-3}$, podíl nehořlavých složek je obvykle vyšší než 10 % objemu. [47] Složení zemního plynu pocházejícího z vybraných lokalit je uvedeno v tabulce 2.2.

Tab. 2.2: Složení vybraných zemních plynů (% mol) používaných v zemích EU a zemního plynu těženého v ČR (jižní Morava) [47]

Složka zemního plynu	Tranzitní	Norský	Alžírský	Český	Nizozemský
Metan CH ₄	98,39	85,80	86,90	97,70	81,31
Etan C ₂ H ₆	0,44	8,49	9,00	1,20	2,85
Propan C ₃ H ₈	0,16	2,30	2,60	0,50	0,37
Butan C ₄ H ₁₀	0,07	0,70	1,20	-	0,14
Pentan C ₅ H ₁₂	0,03	0,25	-	-	0,09
Dusík N ₂	0,84	0,96	0,30	0,60	14,35
Oxid uhličitý CO ₂	0,07	1,50	-	-	0,89

Zemní plyn je v zásadě používán ve dvou formách. **CNG** (Compressed Natural Gas), což je stlačený zemní plyn při tlaku 200 barů. S velkou výhodou je zemní plyn stlačován v blízkosti plynovodů. A **LNG** (Liquefied Natural Gas), zkapalněný zemní plyn při teplotě - 162 °C a tlaku 0,1 MPa. [18] Výhodou LNG je, že zemní plyn při zkapalnění zmenší svůj objem přibližně 600 krát [45].

2.2 Zdroje zemního plynu

Zemní plyn je v současné době získáván přímou těžbou, existují však nekonvenční zdroje, ze kterých lze získat zemní plyn jejich úpravou. Na základě těchto skutečností lze zásoby zemního plynu členit na prokázané (prověřené), pravděpodobné a potenciální.

Prokázané zásoby zemního plynu jsou ekonomicky těžitelné při současné technické úrovni, dosáhly na konci dvacátého století objemu $1,64 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$ a vydrží při současné těžbě asi do roku 2060. Zhruba 72 % těchto zásob se nachází na pevnině a 28 % v mořských šelfech.

Pravděpodobné zásoby (dosahují $3,47 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$) jsou zásoby objevené na ložiscích, vykazujících velmi vysokou pravděpodobnost, že budou vytěžitelné za ekonomických a technických podmínek podobných těm, které jsou u prověřených zásob. Ložiska nejsou dosud technicky vybavena. Přesun objemu zásob z této do první kategorie v důsledku pokračujícího osvojování ložisek je důvodem stále se zvyšujícího objemu prokazatelných zásob zemního

plynu a jejich životnosti. Pro Evropu i Českou republiku je příznivé geografické rozdělení obou kategorií zásob.

Potenciální zásoby jsou tzv. nekonvenční zdroje. Mezi tyto zdroje patří především hydráty metanu, což je pevná substance podobná sněhu, tvořená 20 % metanu s některými vyššími uhlovodíky (etan, propan) a 80 % vody za vysokých tlaků a nízkých teplot. Hydráty se nacházejí v zemské kůře pod dnem oceánů. Tyto velmi významné zásoby jsou již dlouho známy, problémem je však jejich těžba. Jednou z možností, jejíž výzkum intenzivně probíhá, je tepelný rozklad hydrátů a jejich odtlačování. Moderní metody geologického průzkumu umožňují stále zpřesňovat odhady těchto zásob. V současné době se předpokládá, že zásoby zemního plynu v podobě hydrátů činí cca $2,1 \cdot 10^{16} \text{ m}^3$, přičemž jejich zásoby jenom na severní polokouli jsou několikanásobně vyšší než v současné době těžitelné zásoby zemního plynu v ropných ložiscích na celém světě. Dalším zdrojem metanu je tzv. Coal Bed Methan (CBM), což je metan, jehož původ je spojován se vznikem černouhelných slojí. Plyn je absorbován v uhelných slojích a je vázán v mikroporézní struktuře uhlé hmoty. Efektivnost získání plynu je odvislá od stupně prouhelnění uhlé hmoty a její dostatečné propustnosti. Těžba CBM je ve většině uhelných pánví světa na úrovni průzkumu a prvotních projektů. Průzkumné práce probíhají i v ČR v severomoravském regionu (důlní a povrchová degazace), kde bylo zjištěno, že uhlé hmoty naváže až $12,5 \text{ m}^3$ zemního plynu na 1 t uhlí a ekonomicky zajímavé zásoby se pohybují v rozsahu $0,7\text{--}3,7 \cdot 10^{11} \text{ m}^3$ plynu.

[47]

2.3 Distribuce zemního plynu

I přesto, že má Česká republika vlastní zdroj zemního plynu na Jižní Moravě, tak celková spotřeba je mnohem vyšší než potenciál domácího zdroje. Proto je nutné zásobování zemním plynem z nalezišť mimo naše území např. z Ruska či Severního moře.

2.3.1 Přeprava zemního plynu

Zemní plyn musí být před přepravou z místa těžby zabaven nečistot, zejména sirných látek, vlhkosti a prachu, pokud jich obsahuje větší podíl. Tyto nežádoucí příměsi přispívají ke korozi nebo nesprávné funkci distribučního systému. K dálkové přepravě se používají dva způsoby. Prvním je přeprava potrubím, plynovody vedoucí po souši i mořském dně. Druhá varianta je přeprava tankery, kterými je zemní plyn přepravován ve zkapalněné formě (LNG).

V Evropě je vybudovaná hustá síť dálkových plynovodů. Provozní tlaky zemního plynu v těchto potrubích dosahují až k 10 MPa a průměry často přesahují 1 m, např. v ČR je 400 km o průměru 1,4 m. Plynovody jsou vedeny po souši, např. tranzitní z Ruska do ČR, i po mořském dně, např. z nalezišť v Severním moři.

Přepravu tankery je vhodné využít na dopravu zemního plynu přes moře na velké vzdálenosti, kde je ekonomicky výhodnější zemní plyn zkapalnit a následně přepravovat tankery, které používají jako palivo odpařený plyn, než výstavba dalších plynovodů. Tento druh přepravy je používán např. pro zásobování přímořských zemí Evropy z Alžírsko, Nigérie nebo Austrálie. Zemní plyn je na místě těžby zkapalňován a čerpán do tankerů, ze kterých je po dopravě do pobřežních LNG terminálů přečerpáván do kryogenních zásobníků. Odtud může být přímo spotřebován nebo dále rozvážen silniční přepravou prostřednictvím LNG cisteren.

[47]



Obr. 2.1: Tanker pro dálkovou přepravu LNG [47]



Obr. 2.2: Síť plynovodů se zemním plynem v ČR [19]

2.3.2 Plnicí stanice CNG v ČR

V ČR je v současné době necelých 50 [23] plnicích stanic s CNG (viz Obrázek 2.2 s mapou rozmístění), které jsou většinou umístěny poblíž plynovodů.



Obr. 2.3: Mapa plnicích stanic s CNG v ČR [23]

V plnicích stanicích s CNG se používá rychlé a pomalé plnění. U rychlého plnění je zemní plyn z plynovodní sítě v CNG plnicích stanicích vysušován v sušičkách plynu a pomocí kompresoru stlačován na tlak 20–30 MPa. CNG plnicí stanice mají výkon kompresoru vyšší než 20 m³/hod. CNG je poté skladován v soustavě tlakových zásobníků, vzájemně propojených. Při vlastním plnění CNG do vozidel se přepouští stlačený zemní plyn z tlakových zásobníků prostřednictvím výdejního stojanu do tlakových nádob ve vozidle. Plnicí pistole na hadici výdejního stojanu se připojí pomocí rychloupínacího systému na plnicí koncovku vozidla. Doba plnění CNG vozidla je srovnatelná s čerpáním kapalných pohonných hmot (3–5 minut). [44]

Pomalé plnění CNG do vozidel se provádí přímo pomocí plnicího zařízení (bez tlakových zásobníků). Hlavní součásti plnicího zařízení jsou kompresor, výdejní zařízení, měření a regulace. Výkon kompresoru je do 20 m³/hod. Plnění probíhá zpravidla několik hodin v době, kdy vozidlo není v provozu – v nočních hodinách nebo v přestávkách jízdy. Tento způsob plnění CNG je vhodný především pro osobní a lehké nákladní automobily, které parkují na stálém místě a nejezdí nepřetržitě. Často je využíván i pro některá speciální vozidla. [44]

2.3.3 Plnicí stanice LNG

Doprava LNG na stanici je zajištěna cisternami, ze kterých je plyn přepouštěn do kryogenního zásobníku, kde je skladován při teplotě $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $0,1\text{ MPa}$ [47]. Tyto stanice jsou určeny výhradně pro LNG vozidla. Hlavní výhodou je možnost umístění LNG stanic, které může být téměř kdekoli a není závislé na poloze plynovodu, avšak je limitováno vzdáleností od terminálu, protože s rostoucí vzdáleností rostou náklady a stanice přestane být ekonomicky výhodná. Samotné investiční a provozní náklady stanice LNG jsou nižší než u CNG stanice stejné kapacity [47]. Nevýhody LNG stanic spočívají v nízkoteplotních technologiích, jedná se o čerpání, dlouhodobější skladování LNG a plnění vozidel.

2.3.3 Plnicí stanice LCNG

LCNG stanice pracují tak, že dopravený LNG je z cisteren stlačen vysokotlakým čerpadlem do na požadovaný tlak, dále veden přes odpařovač, kde je zplyněn teplem atmosférického vzduchu a výsledný CNG je uskladňován v tlakových zásobnících, ze kterých je plněn do vozidel. Výhodou LCNG stanic je stejně jako u LNG stanic nezávislost na plynovodech a nižší cena stanic a energetické požadavky. [47]

2.4 Použití zemního plynu ve vozidlech se zážehovými motory

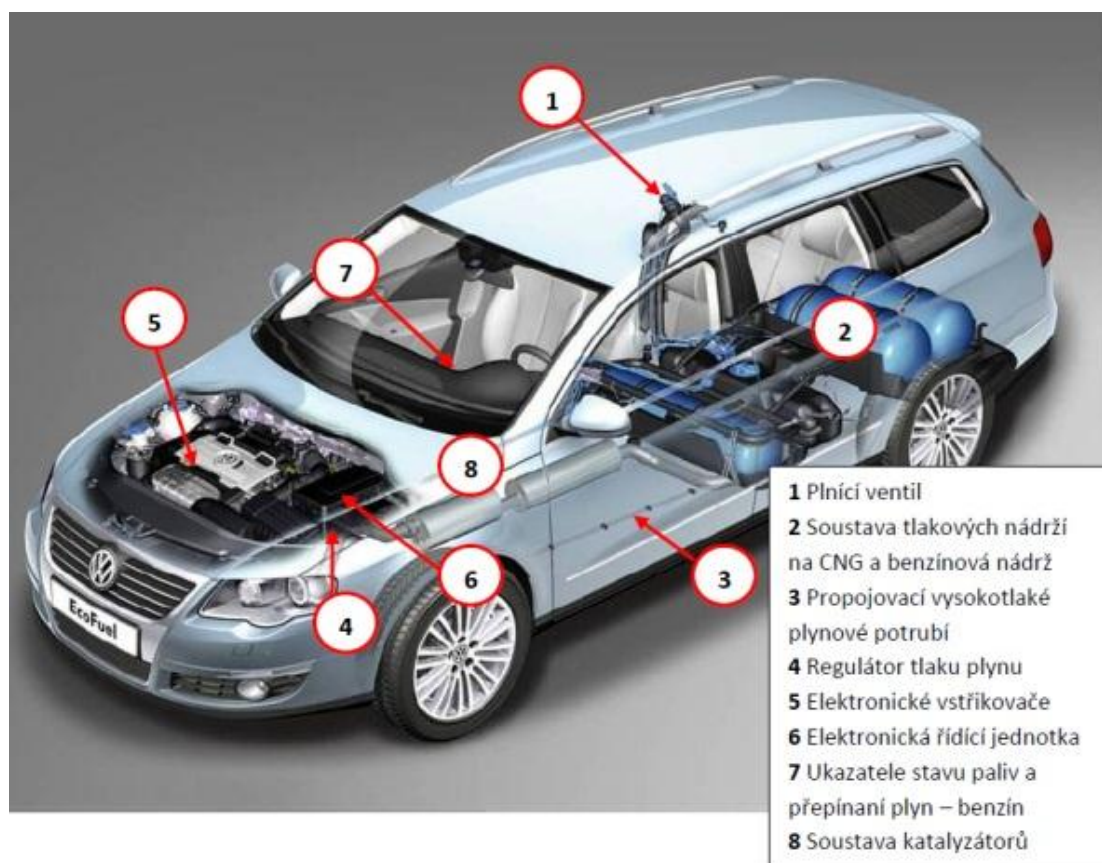
Použití zemního plynu pro pohon vozidel zážehovými motory existuje ve dvou variantách:

Vozidlo určené pouze na zemní plyn (dedicated NGV – Natural Gas Vehicle) – vozidlo s motorem určeným pouze pro pohon zemním plynem. Motor má konstrukční úpravy a řídicí jednotku přizpůsobené pro provoz na zemní plyn. Výhodou této technologie je optimalizovaný motor přímo pro spalování zemního plynu, což snižuje emise a je maximálně využit výkon motoru, další výhodou je potřeba pouze nádrže na jedno palivo a zbývá více užitečného prostoru, nevýhodou je menší dojezd vozidla vlivem nízké energetické hustoty. [1]

Dvou-palivové vozidlo (bi-fuel NGV) – vozidlo s motorem, který umožňuje provoz na zemní plyn i benzín. Klasický benzínový motor s řídicí jednotkou přizpůsobující parametry při přepnutí na dané palivo. Výhodou tohoto uspořádání je možnost volby paliva a větší dojezd díky nádržím na zemní plyn i na benzín. Nevýhodou je neoptimalizovaný motor přímo pro použití zemního plynu, což vede k vyšším emisím a snížení výkonu při provozu na zemní plyn, než u motoru určeného pouze na zemní plyn. [1]

2.4.1 Použití CNG v zážehových motorech a palivové příslušenství

Palivovou nádrží CNG je soustava plynových tlakových nádob, většinou ocelových, ale stále více se prosazují i vylehčené nádoby kompozitní. Při jízdě se CNG prostřednictvím vysokotlakého plynového potrubí dostává do vysokotlakého regulátoru, kde dochází k redukci tlaku plynu na potřebný provozní tlak. Krokový motorek na základě signálů z řídicí jednotky průběžně upravuje množství plynu do směšovače v optimálním režimu výkonu, spotřeby paliva a množství emisí. Ve směšovači dochází ke smísení paliva (zemního plynu) se vzduchem a vytvoření zápalné plynné směsi. Směšovač má stejnou funkci jako karburátor či vstřikování při použití benzínu. Elektronická část plynové zástavby (řídicí jednotka) a emulátor (přerušovač vstřiku) slouží k správnému provozu vozidla na zemní plyn, přerušuje vstřikování benzínu a řídí dávkování plynu. U přístrojové desky je umístěn ukazatel množství plynu, u dvou-palivových vozidel včetně přepínače plyn-benzín. [47]



Obr. 2.4: Schéma dvou-palivového vozidla poháněného CNG [9]

Plynová soustava CNG vozidla má následující základní komponenty:

Plnicí ventil – slouží k plnění tlakové nádoby vozidla zemním plynem na CNG plnicích stanicích. Plnicí ventil může být umístěn v motorovém prostoru (většinou u přestavovaných

automobilů), u čerpacího otvoru klasických paliv nebo samostatně. V praxi jsou používány 2 typy plnění – tzv. „italský“ systém používaný hlavně v Itálii a systém NGV 1 pro ostatní evropské země.

Tlakové nádoby + multiventil – palivová nádrž zemního plynu má objem 70 až 100 l, je osazena armaturami pro bezpečný a spolehlivý provoz – multiventilem. Ten má jak funkce provozní – uzavírá tlakovou nádobu při vypnutém zapalování, řídí odebírání plynu z nádoby, tak bezpečnostní – v případě poruchy potrubí (poklesu tlaku) automaticky přeruší průtok plynu, vypustí plyn při daném přetlaku, tepelná pojistka odpustí zemní plyn z nádoby v případě požáru. Tlakové nádoby jsou většinou ocelové, na trh však stále více začínají pronikat odlehčené tlakové nádoby z lehkých hliníkových nebo kompozitních materiálů, stejně pevných jako ocel, ale vážících až 3 x méně. U představovaných osobních automobilů bývají CNG tlakové nádoby většinou umístěny v zavazadlovém prostoru vozidla, u sériově vyráběných automobilů pod vozidlem nebo v jiných vhodných prostorech.

Propojovací vysokotlaké plynové potrubí – při plnění přivádí zemní plyn z plnicího ventilu do tlakové nádoby, při plynovém provozu přivádí zemní plyn z tlakové nádoby do regulátoru.

Manometr (volitelný) – ukazuje hodnotu tlaku ve vysokotlaké části plynové zástavby (v tlakové nádobě, propojovacím plynovém potrubí).

Regulátor tlaku plynu – slouží k redukci vysokého tlaku plynu na požadovanou hodnotu. Jeho součástí je rovněž uzavírací ventil. Regulátor je umístěn v motorovém prostoru a je napojen na vnitřní chladicí okruh motoru, z něhož odebírá teplo.

U vozidel s přímým vstřikováním plynu:

Elektronické vstřikovače – zařízení, které řídí vstřikování plynu do sacího potrubí jednotlivých válců. Pracuje sekvenčně, takže zemní plyn je vstřikován pro každý válec zvlášť.

Palivová lišta – je součástí vstřikovačů a přivádí zemní plyn od regulátoru tlaku k jednotlivým vstřikovačům.

U vozidel s centrálním směřováním plynu:

Krokový motorek – na základě signálů z řídicí jednotky průběžně upravuje množství plynu do směšovače v optimálním režimu výkonu, spotřeby paliva a množství emisí.

Směšovač – slouží ke smísení paliva (zemního plynu) se vzduchem a vytvoření zápalné plynné směsi. Má stejnou funkci jako karburátor či vstřikování při použití benzínu.

Elektronická řídící jednotka – slouží k správnému provozu vozidla na zemní plyn, spolupracuje s benzínovou řídící jednotkou a řídí dávkování plynu dle jízdních režimů a signálů motoru.

Přepínač plyn - benzín včetně ukazatele množství paliva – je umístěn v zorném poli řidiče u přístrojové desky, u sériových vozidel je její součástí. Přepnutím z benzínu na plyn se přerušuje přívod benzínu, otevírá přívod plynu z regulátoru, zapíná se regulace plynu v závislosti na údajích lambda sondy, uvede se do provozu ukazatel paliva – zemního plynu.

Katalyzátor s lambda-sondou – lambda sonda analyzuje složení výfukových plynů, na základě jejích údajů elektronická jednotka řídí dávkování plynu.

[47]

2.4.2 Použití LNG v zážehových motorech a palivové příslušenství

Nádrže LNG ve vozidlech (obr. 2.5) jsou vybaveny dvouplášťovou nádobou z nerezové oceli o minimální tloušťce 3 mm na vnitřním i vnějším plášti. Mezi oběma plášti je tzv. super-izolace, což je navinutá hliníková folie prokládaná sklo-vláknitým papírem a odčerpaná na vysoké vakuum. Nádrž je vybavena armaturami pro plnění, regulaci tlaku, odběr LNG do výměníku tepla, měřením hladiny a tlaku. Nádrže jsou konstruovány na tlak 1,6 MPa. Skutečný provozní tlak se řídí potřebou vstřikovacího zařízení motoru a pohybuje se od 0,3 do 1 MPa. Kromě LNG nádob a odpařovače je technologie LNG obdobná jako u CNG vozidel. [47] V porovnání s palivem CNG má výhody spočívající v nižší hmotnosti a objemu nádrží, nevýhodou je růst tlaku v nádrži. [34]



Obr. 2.5: Kryogenní nádrž na LNG [45]

Z hlediska bezpečnosti v případě úniku paliva z palivového systému je LNG méně nebezpečný než LPG, rozlije se po zemi, okamžitě se odpařuje a nezpůsobuje znečištění půdy ani vod. Páry LNG se vzduchem zředí, vzniká oblak, v němž zkondenzovaly vodní páry. Páry do teploty cca -100°C mají větší měrnou hmotnost než vzduch. Chování oblaku se řídí současně stupněm jeho rozředění, oteplováním a množstvím kondenzované vody. Oblak se chová jako těžký plyn do okamžiku, kdy se jeho měrná hmotnost přiblíží měrné hmotnosti vzduchu, pak je ovládán pohybem atmosféry jako okolní vzduch. Vznícení oblaku může nastat při koncentraci NG ve vzduchu 5 % až 15 % (tj. λ 0,7 až 2,0). Velmi snadno může dojít k zapálení např. jiskrou (minimální energie potřebná k zapálení směsi o obsahu 9% NG - λ = 1,1 jiskrou je nízká - 0,28 mJ). Ke vznícení při styku s teplými místy dochází méně snadno, teplota musí být vyšší než 520°C . Při vznícení oblaku par NG může dojít k výbuchu, nikoli k detonaci, přetlak vznikající ve volném prostředí je tedy relativně nízký. Hořící oblak vydává záření a okolní objekty jsou vystaveny vysokým teplotám. U LNG neexistuje na rozdíl od LPG při protržení nádrže s únikem zkapalněného plynu nebezpečí vzniku požáru ve formě nebezpečné a velmi ničivé ohnivé koule, tj. vzniku tzv. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). [34]

3 Bioplyn

Bioplyn je bezbarvý plyn skládající se hlavně z metanu CH_4 a oxidu uhličitého CO_2 . Energeticky využitelný bioplyn je vyráběn ve specializovaných technologických zařízeních, tzv. bioplynových stanicích. Bioplyn také vzniká v tělesech komunálních skládek, kde bývá pro další využití jímán systémem sběrných studní a čerpacích stanic.

3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti bioplynu

Hlavní výhřevnou složkou bioplynu je metan. V závislosti na původu bioplyn může obsahovat některé nežádoucí sloučeniny. Tyto komponenty mají především vliv na životnost vybraných technologických celků. Z hlediska legislativy ochrany ovzduší je nutno především věnovat pozornost dodržení emisních limitů sirnatých sloučenin v bioplynu. Proto jsou některé bioplynové stanice osazeny i odsiřovacími systémy bioplynu. Srovnání chemického složení a výhřevností různých druhů bioplynů uvádí tabulka 3.1.

Tab. 3.1: Složení a výhřevnost vybraných druhů bioplynu (teplota 15°C, tlak 101,3 kPa)
[7]

Parametr	Jednotka	Bioplyn (skládky odpadů)	Bioplyn (ČOV)	Bioplyn (prasečí kejda)
Výhřevnost	(MJ/m ³)	16,9	21,1	24
Vodík H ₂	(%)	1	1	-
Oxid uhelnatý CO	(%)	1	-	-
Kyslík O ₂	(%)	3	-	-
Dusík N ₂	(%)	-	-	-
Amoniak NH ₃	(mg/m ³)	-	-	40
Oxid uhličitý CO ₂	(%)	46	38	31
Metan CH ₄	(%)	49	61	69
Sulfan H ₂ S	(mg/m ³)	350	1000	2300

3.2 Výroba bioplynu

Bioplyn vzniká anaerobní fermentací organické hmoty. Anaerobní fermentace je biologický proces rozkladu organické hmoty, probíhající bez přístupu vzduchu. Tento proces probíhá přirozeně v přírodě např. v bažinách, na dně jezer nebo např. na skládkách komunálního odpadu. Při tomto procesu směsná kultura mikroorganismů postupně v několika stupních

rozkládá organickou hmotu. Produkt jedné skupiny mikroorganismů se stává substrátem pro další skupinu. Proces můžeme rozdělit do 4 hlavních fází:

Hydrolyza – působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky k hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).

Acidogeneze – působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky k hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).

Acetogeneze – dochází k dalšímu rozkladu kyselin a alkoholů za produkce kyseliny octové.

Metanogeneze – závěrečný krok anaerobního rozkladu, kdy z kyseliny octové, vodíku (H_2) a oxidu uhličitého (CO_2) vzniká metan (CH_4), tento krok provádějí metanogenní bakterie, což jsou striktně anaerobní organismy, podobné nejstarším organismům na Zemi. Tyto bakterie jsou citlivé především na náhlé změny teplot, pH, oxidačního potenciálu a další inhibiční vlivy.

Z hlediska reakčních teplot rozdělujeme anaerobní procesy, podle optimální teploty pro mikroorganismy na psychofilní (5–30 °C), mezofilní (30–40 °C), termofilní (45–60 °C) a extrémně termofilní (nad 60 °C). Výhodou procesů prováděných za vyšších teplot je hlavně vyšší účinnost hygienizace materiálu. Nejběžnější aplikací jsou zatím procesy mezofilní při teplotě cca 38 °C. Fermentace je obvykle prováděna ve velkých vyhřívaných a míchaných nádržích – fermentorech. Jedná se o kontinuální nebo semikontinuální proces. Pracovní sušina suspenze se dle materiálu a použitého míchacího systému pohybuje mezi 4–12%. Ve fermentorech dochází k odbourání cca 50–70 % organické sušiny materiálu. Velikost nádrží je dána množstvím a kvalitou materiálu, množstvím aktivní biomasy v reaktoru a požadovanou dobou zdržení. Tyto parametry významně ovlivňují produkci bioplynu i kvalitu výstupního materiálu. Hlavním produktem anaerobní fermentace organické hmoty je bioplyn. Vedlejším produktem je stabilizovaný anaerobní materiál (fermentační zbytek, digestát, fermentát), který je v současné době asi nejvíce využíván jako hnojivo.

[7]

Podle obrázku 3.2 je zřejmé, že v České republice je poměrně vysoké množství stanic pro výrobu bioplynu (cca 480 [22]), ale bioplyn bývá využíván především pro přímé spalování nebo jako palivo pro průmyslové spalovací motory k pohonu elektrických generátorů. Tento způsob jeho využití je ekonomicky výhodnější než jeho využití k pohonu vozidlových motorů. Pokud má být bioplyn použit jako pohonná hmota v dopravě, je ho třeba nejprve upravit na kvalitu blížíící se složení zemního plynu a po stlačení plnit do tlakových nádrží na vozidlech. Stlačený upravený bioplyn je pak možno použít k pohonu zážehových motorů přizpůsobených provozu na CNG (viz kapitola 2.4). [30]

V dopravě je bioplyn užíván především ve Švédsku, Švýcarsku, Francii a na Islandu. Jako pohon pro vozy se zážehovými motory je bioplyn používán např. ve Švýcarsku, kde je bioplyn (kompogas) upravený na kvalitu zemního plynu nazýván Naturgas. Veřejné plnicí bioplynové stanice jsou ve Švýcarsku v Bachenbülach, Meilen, Otelfingen, Rümlang, Wädenswil, Zürich (2 stanice), Winterthur (2 stanice). Celkově na metan jezdí ve Švýcarsku 520 aut, k dispozici mají 27 stanic. Bioplyn zde není zatížen daní. [42]



Obr. 3.3: Bioplynová plnicí stanice ve Švýcarsku [42]

4 Generátorový plyn

Generátorový plyn jako palivo pro spalovací motory je znám již od počátku 20. Století, kdy byl používán pouze pro pohon stabilních motorů. Ke zplyňování byl používán koks, hnědouhelné brikety a dřevo. S vývojem současných konvenčních paliv, bylo používání generátorového plynu potlačeno. K pohonu automobilů začal být generátorový plyn používán v meziválečném období a za 2. světové války při nedostatku benzínu a nafty, kde byl vytvářen v generátoru umístěném přímo na vozidle, a hlavní surovinou pro tyto generátory bylo dřevo. Takto vyráběný generátorový plyn byl nazýván dřevoplyn. V dnešní době je generátorový plyn používán pro výrobu tepla a elektrické energie spalováním v plynových motorech určených pro spalování generátorového plynu a pro přímé spalování pro technologické procesy, kde je plyn přiváděn potrubím na místo určení a spalován prostřednictvím speciálních hořáků.

4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti generátorového plynu

Složení generátorového plynu a s tím související vlastnosti jsou různé v závislosti na způsobu výroby a použitých surovinách. Hlavními spalitelnými složkami generátorového plynu jsou oxid uhelnatý, vodík, metan a malá množství dalších plynných uhlovodíků a nespalitelný oxid uhličitý a dusík. Složení a vlastnosti generátorového plynu jsou uvedeny v tabulce 4.1 [21].

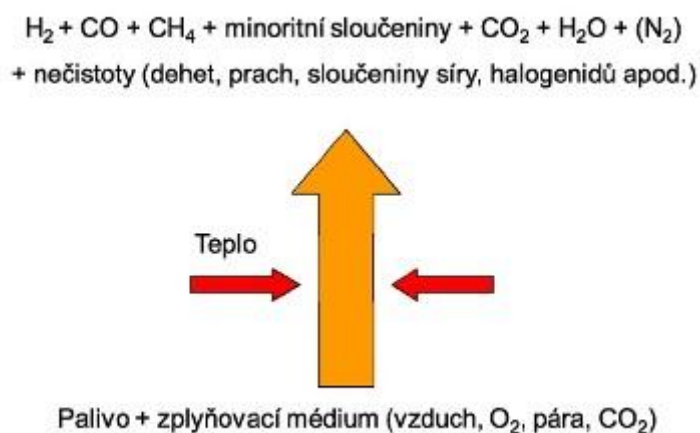
Tab. 4.1: složení a vlastnosti generátorového plynu [2], [21]

	Jednotka	Hodnota
Oxid uhelnatý CO	% objemu	20–25
Oxid uhličitý CO ₂	% objemu	8–10
Vodík H ₂	% objemu	8–10
Metan CH ₄	% objemu	2–4
Dusík N ₂	% objemu	45–55
Ostatní	% objemu	< 1
Výhřevnost (tlak 0,1 MPa, teplota 20 °C)	MJ/m ³	5,02
Výhřevnost stechiometrické směsi	MJ/m ³	2,5
Teplota plamene	°C	> 1000
Metanové číslo	-	64–67

Z vysokého podílu nespalitelných látek vyplývá nízká výhřevnost vztažená na objem 1 m³ generátorového plynu, která je v porovnání se zemním plynem je cca 7x nižší a cca 4x nižší než u bioplynu z ČOV. Výhřevnost stechiometrické směsi generátorového plynu je až o třetinu nižší než LPG nebo benzínu, avšak díky poměrně vysokému oktanovému číslu je generátorový plyn vhodný pro spalování v zážehovém motoru.

4.2 Výroba generátorového plynu

Generátorový plyn je vyráběn reakcí rozžhavených tuhých paliv se vzduchem, vodní párou nebo směsí vzduchu a vodní páry - zplyňováním.



Obr. 4.1: Schéma zplyňování [41]

Zplyňováním je myšlena termochemická konverze uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný generátorový plyn působením zplyňovacích médií a vysoké teploty. Jako zplyňovací médium bývá použit volný či vázaný kyslík nebo vodík. Produktem je plyn obsahující výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4 a další organické minoritní sloučeniny – C_xH_y), doprovodné složky (CO_2 , H_2O a N_2) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další). Proces se skládá z několika základních pochodů: sušení, pyrolýzy (odplynění prchavých podílů hořlaviny), redukce a oxidace. Tyto jednotlivé dílčí procesy mohou probíhat buďto postupně – v sesuvných generátorech, či souběžně – ve fluidních a hořákových generátorech. Teplo je do procesu dodáváno přímo (viz obrázek 4.2), tj. částečným spalováním biomasy v reaktoru (jedná se o tzv. autotermní zplyňování), anebo nepřímou – přísunem tepla zvenku, tzv. alotermní zplyňování. Přísun tepla pro alotermní zplyňování může být zajištěn následovně:

transportem tepla teplosměnnou plochou,

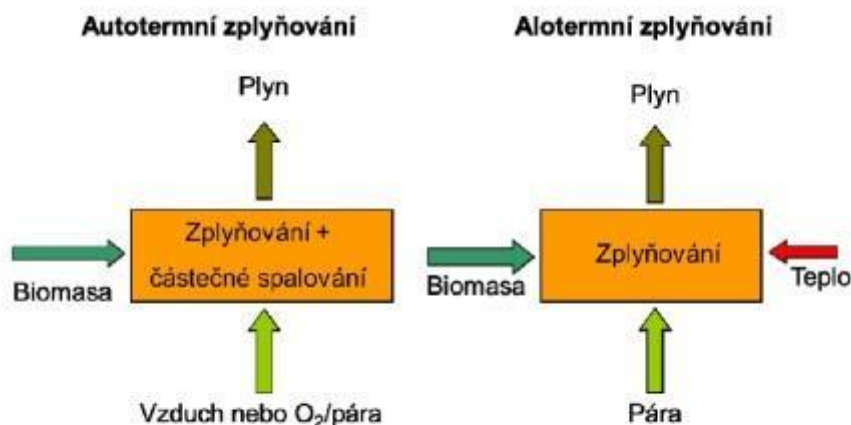
transportem tepla obsaženého v inertním materiálu, např. cirkulací fluidní vrstvy,

vstupními materiály, tj. předehřátým zplyňovacím médiem, palivem či plynem pro pneumatický transport.

Produkovaný generátorový plyn má variabilní vlastnosti zejména v závislosti na použitém zařízení a zplyňovacím médiu a nachází uplatnění především jako energetický plyn a syntézní plyn. Energetický plyn je využíván jak k topným účelům, tak pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie, a syntézní plyn pak zejména jako meziprodukt při transformaci pevných paliv a odpadů na chemické komodity – benzin, naftu, methanol, dimethylether, náhradní zemní plyn, vodík, methyl-terc-butylether apod. Kromě toho nachází uplatnění také v metalurgii, kde slouží pro přípravu redukčních plynů a ochranných atmosfér.

Vyráběný generátorový plyn bývá vždy doprovázen znečišťujícími látkami, které je nutné z plynu odstranit. Jedná se o pevné částice, dehet, alkálie, sloučeniny síry (H_2S , COS , CS_2 a organické sloučeniny), dusíku (NH_3 a HCN), halogenů a jiné. Zastoupení nečistot v plynu je závislé na technologii zplyňování a na složení biomasy. Nároky na čistotu plynu se liší dle jeho následné aplikace.

[41]



Obr. 4.2: Rozdíl mezi autotermním a alotermním zplyňováním [41]

4.3 Distribuce generátorového plynu

Generátorový plyn je v současné době využíván pro spalování v kogeneračních jednotkách pro výrobu elektrické energie či pohánění čerpadel, dále je využíván přímým spalováním pro výrobu tepla a pro technologické procesy apod. U všech procesů je plyn

přepravován na krátké vzdálenosti potrubím. Aby bylo možné použít generátorový plyn pro pohon vozidel, musel by být např. stlačen do tlakových lahví podobně jako zemní plyn. Generátorový plyn pro takové použití by musel mít odpovídající čistotu.

4.4 Použití generátorového plynu v zážehových motorech

Generátorový plyn pro možnost spalování v zážehovém motoru musí být zbaven nežádoucích nečistot, hlavně dehtu, jehož koncentrace v generátorovém plynu nesmí přesáhnout hodnotu 100 mg/m^3 [41].

V neupraveném zážehovém motoru dojde při použití generátorového plynu ke ztrátě výkonu o 30–50 % v závislosti na jeho kvalitě. Spalování generátorového plynu v neupraveném zážehovém motoru je ale v některých aplikacích ekonomicky výhodnější. Toto řešení je výhodné pro zařízení pracující při konstantním a nízkém zatížení (např. zavlažovací čerpadla). U automobilového motoru pracujícího v různých režimech zatížení je nutné použití řídicí jednotky přizpůsobené pro provoz na generátorový plyn a jsou nutné další úpravy:

Zvýšení kompresního poměru – vyšším kompresním poměrem lze dosáhnout vyšší účinnosti a tím částečnou náhradu ztraceného výkonu, avšak díky vodíku obsaženému v generátorovém plynu je snížena odolnost proti samovznícení. Zvýšením kompresního poměru můžou také nastat problémy s opotřebením pístů.

Zvýšení tlaku nasávaného vzduchu – přeplňování – použitím přeplňování pomocí turbodmychadla poháněného výfukovými spalinami. U upraveného motoru opatřeného turbodmychadlem při navýšení plnicího tlaku vzduchu o 1 bar by bylo zapotřebí dodat směs plynu se vzduchem ekvivalentní navýšení kompresního poměru o 5 - 10:1, toho lze dosáhnout vratnou pumpou, která může být poháněna výfukovými spalinami přes turbínu.

Dvou-palivový systém – nejrozšířenější metoda pro zvýšení účinnosti motoru spalujícího generátorový plyn je možnost spalování malého množství benzínu s generátorovým plynem. Podíl benzínu v palivové směsi závisí na zatížení motoru a použitém generátorovém plynu. Mezi nejčastěji používané metody použití obou paliv patří neměnné vstřikování malého množství benzínu do směsi vzduch / plyn, startování na benzín a přepínání na generátorový plyn po dosažení potřebných provozních parametrů nebo přidávání benzínu do palivové směsi pro překonání zvýšené zátěže (např. jízda do kopce).

[2]

4.5 Palivové příslušenství generátorového plynu

Pokud by byl generátorový plyn stlačován do tlakových lahví, bylo by možné tyto lahve použít jako nádrže pro generátorový plyn na vozidlech, ale díky velmi nízkému energetickému obsahu paliva v těchto nádržích by bylo toto použití značně nevýhodné, nádrže by měly i za použití kompozitních materiálů velkou hmotnost a zabíraly by mnoho místa. Dalším řešením by bylo použití zplyňovacích generátorů přímo na vozidlech, jak tomu bylo v minulosti, avšak obsluha takového vozu by byla v dnešních podmínkách nepříjemná. Z tohoto pohledu se generátorový plyn nejeví jako příliš vhodné palivo pro vozidla se spalovacími motory.

5 Vodík

Vodík (H_2) je nejlehčí nejjednodušší a nejrozšířenější prvek ve vesmíru. Za normálních podmínek je to bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Tvoří sloučeniny se všemi prvky kromě inertních plynů. Společně s uhlíkem, kyslíkem a dusíkem patří mezi tzv. biogenní prvky tvořící základ všech živých organismů. Čistý vodík se na Zemi vyskytuje pouze vzácně, většinou je vázán na jiné prvky ve sloučeninách.

5.1 Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku

Vodík je za normálních podmínek v plynném skupenství, je bezbarvý a bez zápachu. Vzhledem ke skutečnosti, že vodík je nejlehčí prvek, má velmi malou hustotu a proto i přes jeho vysokou výhřevnost v kapalném stavu vztaženou na 1 kg, která je téměř 3x vyšší než u konvenčního benzínu či motorové nafty, má výhřevnost vztaženou na objem 1 m^3 až 3,5x nižší než zemní plyn. Vybrané vlastnosti vodíku jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Vybrané fyzikální a chemické vlastnosti vodíku [35], [47]

Veličina	Jednotka	Hodnota
Molární hmotnost	g/mol	2,0158
Hustota kapalná fáze (-259,2 °C a 0,1 MPa)	kg/m ³	70,8
Hustota plynná fáze (20 °C a 0,1 MPa)	kg/m ³	0,0838
Bod varu	°C	-252,8
Bod tání	°C	-259,2
Spalné teplo (kapalná fáze)	MJ/kg	141,86
Spalné teplo (plynná fáze)	MJ/m ³	12,75
Výhřevnost (kapalná fáze)	MJ/kg	120,05
Výhřevnost (plynná fáze)	MJ/m ³	10,79
Meze výbušnosti se vzduchem (dolní – horní)	% objemu	4–75
Meze výbušnosti s kyslíkem (dolní – horní)	% objemu	4–95
Teplota samovznícení	°C	585
Stechiometrické množství vzduchu	kg/kg	34
Rozmezí zápalnosti (lambda palivové směsi)	-	0,5–10,5
Antidetonační odolnost (metanové číslo)	-	0
Maximální rychlost hoření se vzduchem	m/s	3,46

V porovnání s jinými motorovými palivy pro zážehové motory, např. benzinem, zemním plynem, případně tekutými rafinérskými plyny, má vodík následující výrazněji odlišné vlastnosti:

malá měrná hmotnost a malý obsah energie v objemové jednotce plynu (obtížné uskladnění plynného vodíku na vozidle),

velmi nízká teplota kapalného vodíku (problematické uskladnění kapalného vodíku na vozidle),

nízká energie jiskry potřebná k zapálení směsi vodíku se vzduchem v zážehovém motoru (snadná zápalnost a sklon k samozápalům),

široké rozmezí zápalnosti palivové směsi vodíku se vzduchem (umožňuje spalování i velmi chudých palivových směsí),

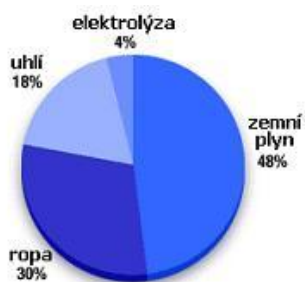
vysoká rychlost hoření palivové směsi a nízká antidetonační odolnost stechiometrické palivové směsi (vyžaduje relativně nízký kompresní poměr),

palivová směs vodíku se vzduchem neobsahuje uhlík (výfukové plyny neobsahují oxid uhličitý ani uhlovodíky, pro snížení oxidů dusíku redukcí pomocí katalyzátoru není ve výfukových plynech potřebný uhlík).

[35]

5.2 Výroba vodíku

Vodík se v přírodě prakticky nevyskytuje v elementární formě, ale pouze ve sloučeninách, ze kterých je získáván s využitím nemalého množství energie. Může být vyráběn mnoha způsoby z širokého spektra vstupních zdrojů. V celosvětové produkci vodíku dominuje v současné době výroba z fosilních paliv (viz obrázek 5.1).



Obr. 5.1: Zastoupení hlavních zdrojů výroby vodíku [46]

Hlavní technologie výroby vodíku jsou:

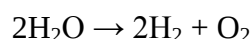
Parní reforming zemního plynu – tato technologie je v současnosti nejlevnějším a nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku. Teplo pro reformní reakci i následnou konverzi oxidu uhelnatého je dodáváno z přímého spalování části zemního plynu. Proces má dvě fáze, v první se za přítomnosti katalyzátoru do vodní páry (500–950 °C, 0,3–2,5 MPa) přivádí metan (dominantní část zemního plynu). Směs metanu a páry reaguje za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého a menšího podílu oxidu uhličitého. Reakce probíhá za výše zmíněných teplot a tlaků v reforméru. Poté následuje navyšování množství produkovaného vodíku konverzí oxidem uhelnatým z reforméru s další přidanou párou. Reakce probíhá již za nižších teplot.

reformní reakce: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$

konverze CO: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Účinnost produkce vodíku je závislá na poměru páry a uhlíku ve směsi; pohybuje se okolo 80 %. Značnou nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého - na 1 kg vodíku se vyprodukuje 7,05 kg CO₂.

Elektrolýza – elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem:



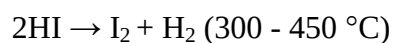
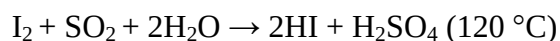
H⁺ poté reaguje na katodě za vzniku plynu, který je jímán a následně skladován. Proces elektrolýzy probíhá za pokojových teplot a pro jeho chod je nutná pouze elektrická energie. Tímto způsobem jsou vyrobena asi 4 % z celkové světové produkce vodíku. Ideální (reverzibilní) napětí dekompozice je 1,229 V, ale reálné napětí se pohybuje v rozmezí 1,85–2,05 V (kvůli ireverzibilitě v reakčním mechanismu a nutnosti dodání části tepla ve formě elektrické energie). Účinnost procesu se potom pohybuje v rozmezí 80–92 %. Výstupem elektrolýzy je kyslík a vysoce čistý vodíkový plyn, pro většinu aplikací bez nutnosti dodatečného dočišťování. Konvenční elektrolýza je výhodná zejména tam, kde je levná elektřina a dostatek vody. Příkladem může být Island s jeho geotermální energií. Elektrolytické zařízení je modulární, může být navrženo jako velká centrální jednotka či jako malé zařízení pro lokální použití se stejnou účinností. K výhodám elektrolýzy patří možnost použití různých zdrojů vstupní energie a vysoká čistota elektrolytického vodíku. Nevýhodou

jsou vysoké náklady na membránu v elektrolyzáru a vysoké ceny el. energie. Na celkové účinnosti elektrolytické výroby vodíku se podílí především účinnost výroby elektrické energie (3–40 % pro konvenční zdroje). Celková účinnost elektrolyzy se tedy pohybuje přibližně v rozmezí 25–35 %.

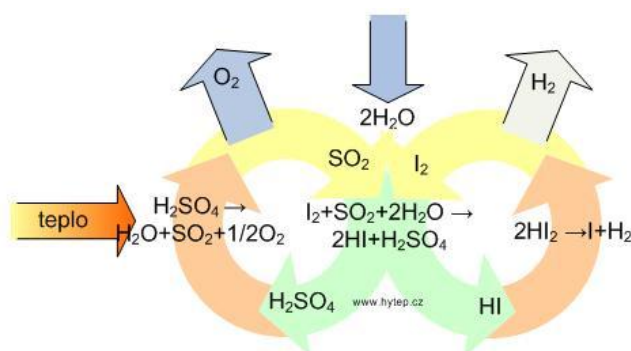
Vysokoteplotní elektrolyza – pro vysokoteplotní elektrolyzu, nazývanou též někdy parní elektrolyza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Reakce probíhající ve vysokoteplotním elektrolyzáru je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy. Do elektrolyzáru vstupuje pára a vodík. Vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % hmotnosti vodíku a 25 % hmotnosti páry. Z ní je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Další výhoda spočívá v cirkulaci samotných H_2O , H_2 a O_2 bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozí. Celková účinnost vysokoteplotní elektrolyzy může dosahovat až 45 %.

Termochemické cykly – termochemické cykly jsou známy již více jak 35 let; intenzivně byly studovány na přelomu 70. a 80. let 20. století (v době ropné krize, tedy v době hledání ekonomické výroby alternativních paliv). Při termochemickém štěpení vody je voda rozdělena na kyslík a vodík pomocí série chemických reakcí, které jsou iniciované teplem nebo v případě hybridních cyklů teplem a elektrickou energií. Cykly popisované níže jsou cykly uzavřené, tj. použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a znovu vstupují do procesu. Doplněnou vstupní surovinou je tedy pouze voda a výsledným produktem vodík a kyslík.

S-I cyklus – siřičito-jódový termochemický cyklus byl vyvinut v General Atomics (San Diego, USA) v polovině 70. let 20. století. Je předním kandidátem levné a účinné výroby vodíku pomocí jaderné energie. Vstupní surovinou je pouze voda a vysokopotenciální teplo; výstupními surovinami jsou kyslík s vodíkem a nízkopotenciální teplo. Všechny vstupní suroviny jsou tekuté. Jód a oxid siřičitý se recyklují a opětně používají, teoreticky se tedy neprodukuje žádný odpad (ve skutečnosti samozřejmě k určitým ztrátám dochází a je nezbytné tyto ztráty kompenzovat doplňováním chemických látek). Při produkci vodíku probíhají tyto termochemické reakce:



V prvním kroku, který je znám jako Bunsenova reakce, reaguje vstupující voda s jódem a oxidem siřičitým za vzniku kyseliny sírové a jodovodíkové. Jedná se o exotermickou reakci, kdy se z reakce odvádí teplo o teplotě 120 °C. Nejvíce tepla (při teplotě 800–1000 °C) vyžaduje endotermický rozklad kyseliny sírové. Rozklad kyseliny jodovodíkové a současná produkce vodíku vyžaduje teploty nižší (450 °C).

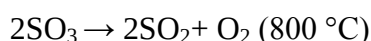
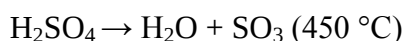
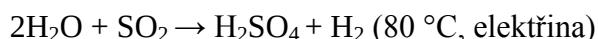


Obr. 5.2: Schematické znázornění S-I cyklu [46]

Účinnost takto komplexního cyklu není jednoduché stanovit. Účinnost celého výrobního cyklu vodíku se pohybuje v rozmezí 40–52 % (50 % při 950°C). S dalším nárůstem teplot bude růst i účinnost cyklu. Oproti elektrolýze má vyšší účinnost, protože nedochází ke ztrátám při výrobě elektrické energie. Nevýhoda tohoto cyklu je požadavek vysokých vstupních teplot a agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové, což vede k vysokým nárokům na chemickou odolnost použitých materiálů. Problematická bude kontrola podmínek reakcí v průmyslovém měřítku (v laboratorních podmínkách byla tato otázka již zvládnuta).

Hybridní termochemické cykly – hybridní termochemický proces kombinuje termochemický cyklus a elektrolytické štěpení vody. Obecně se mohou hybridní cykly jevit jako nekonkurenceschopné kvůli potřebě elektrické energie a vysokým investičním nákladům na elektrolyzátor. Na druhou stranu s využitím elektřiny umožňuje hybridní cyklus chod nízkoteplotních reakcí a snižuje se počet chemických kroků (ty mohou zanechávat nečistoty ve vyrobeném vodíku a zvyšovat tak náklady na dodatečné čištění).

Westinghouse proces – Westinghouse proces, nebo také hybridní cyklus kyseliny sírové, byl vyvinut společností Westinghouse v roce 1975; další výzkum probíhá v Research Center Jülich ve spolupráci s JRC Ispra. Do reakce vstupuje voda a oxid siřičitý a za přispění elektrické energie vzniká vodík a kyselina sírová, která se dalšími reakcemi rozpadá na vstupní suroviny a kyslík. Westinghouse proces se tedy skládá z těchto chemických reakcí:



Účinnost tohoto procesu je okolo 40 %. Výhodou cyklu je 3 - 4x nižší potřeba elektrické energie než při elektrolytickém štěpení vody. Jedná se o nejjednodušší ze skupiny sírových procesů (ne nutně nejúčinnější). Mezi nevýhody se řadí velké korozní problémy působené kyselinou sírovou.

[46]

Výroba vodíku z biomasy – zatím potencionálně nejvýhodnější způsob výroby vodíku. Při použití biomasy jako zdroje výroby je vyprodukovaný vodík nazýván biovodík. Vodík lze produkovat různými procesy v závislosti na zdroji a způsobu výroby:

termochemické procesy – parní reformování biomasy,

využití derivátů biomasy – katalytické parní reformování bioplynu (reformování oxidem uhličitým, parciální oxidace nebo termické krakování), katalytické parní reformování bioethanolu,

dekarbonizace uhlovodíků pomocí slunečního záření – termochemický proces s využitím sluneční energie může být použit ke štěpení uhlovodíků,

biotechnologická produkce vodíku – vodíková fermentace, fotofermentace [14].

5.3 Distribuce vodíku

Vodík lze přepravovat v potrubních systémech, v tlakových lahvích nebo ve zkapalněné formě v cisternách. Přeprava vodíku potrubím se zdá být poměrně snadná a efektivní, ale musela by být vybudována síť plynovodů, což je nemalá investice. Přeprava v tlakových lahvích je běžná, osvědčená metoda, ale vlivem nízké hustoty vodíku je při

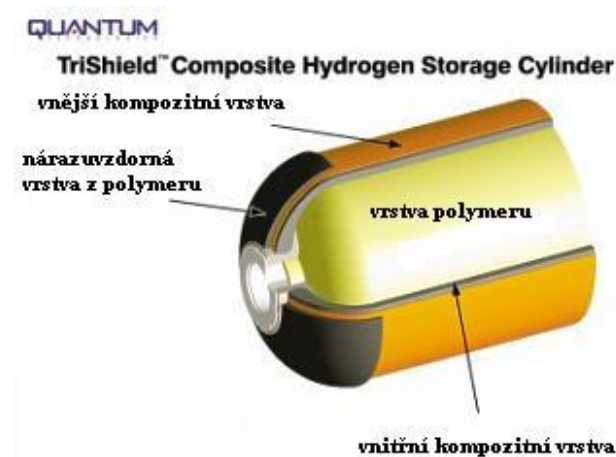
poměrně velkých hmotností nádob přepravován malý energetický obsah vodíku. Přeprava vodíku ve zkapalněné formě je z hlediska energetického obsahu velice výhodné, ale zkapalnění je energeticky velmi náročné a při skladování vodíku o teplotě před bodem varu (cca -253 °C [12]) dochází k odpařování a nárůstu tlaku v nádobě a ten musí být při dosažení maximální možné hodnoty snižován odváděním plynného vodíku přímo do volné atmosféry nebo do přidavných tlakových nádob.

5.3.1 Skladování vodíku

Skladování vodíku je prováděno **konvenčními** a **alternativními metodami**.

Konvenční metody skladování jsou ověřeny mnohaletou praxí, avšak v současné době jsou téměř dosaženy limity jejich efektivity, základní konvenční způsoby skladování jsou:

Skladování vodíku v plynné fázi – pro statické aplikace se obvykle používá ocelových bezešvých lahví z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Vyrábějí se v objemech od několika litrů až do přibližně 50 l pro běžné aplikace. V mobilních aplikacích se obvykle používá kompozitních tlakových nádob. Vyrábějí se v objemech od desítek litrů až přibližně do 300 l. Typickým provozním tlakem je 350 bar, v nejnovějších aplikacích potom 450 až 700 bar (současný technologický limit je 1000 bar). V mnoha aplikacích je válcový tvar mírně deformován v závislosti na potřebách zástavby do úložného prostoru vozidla. Vnitřní povrch kompozitních lahví tvoří obvykle tenká vrstva kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu.



Obr. 5.3: Řez kompozitní tlakovou lahví [12]

Pokud chceme skladovat vodík ve vysokotlakých nádržích, musíme jej nejprve stlačit na požadovaný tlak. Pro stlačování vodíku se používá zejména pístových kompresorů. Energie potřebná na stlačení vodíku na 350 bar dosahuje přibližně 30 % energie v palivu. [12]

Skladování vodíku v kapalně fázi - běžně využívaná fosilní paliva je možné skladovat v kapalném stavu za běžných teplot a při relativně nízkých tlacích, oproti tomu kapalný vodík je skladován při teplotě $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$; s tím souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění. Vodík je ze zásobníku čerpán jako kapalina - pro spalovací motory nebo jako plyn - pro palivové články. Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Tyto nádoby musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, kterým je regulován maximální přípustný přetlak. Při skladování vodíku v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a tedy zvyšování tlaku uvnitř této nádoby. Aby nedošlo k destrukci nádrže, musí být přebytečný tlak regulován odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují ztráty až 3 % z obsahu na den. V některých aplikacích je takto unikající vodík jímán a stlačován do přídatných tlakových lahví. Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. [12]

Alternativní metody skladování vodíku jsou stále ve stádiu výzkumu, ale do budoucna se zdají být velmi perspektivní. Hlavní alternativní technologie skladování vodíku jsou:

Skladování vodíku v hydridech – systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermní reakci, tzn. že je při absorpci vyvíjeno teplo. Opačného děje - desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu je naopak dosaženo dodáním tepla. Sledovanými parametry u těchto systémů jsou především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbátoru (případně celého systému), objemová kapacita absorbátoru a v neposlední řadě cena a složitost systému. Podskupinou hydridů jsou metalhydridy (v angl. lit. označované také jako Conventional Hydrides) a komplexní hydridy. V tabulce 5.2 jsou uvedeny nejčastější metalhydridy včetně vybraných parametrů.

Tab. 5.2: vybrané parametry nejčastějších metalhydridů [13]

Parametr	Jednotka	Nízkoteplotní metalhydridy		Vysokoteplotní metalhydridy	
		FeTiH_2	$\text{LaNi}_5\text{H}_{6,7}$	Mg_2NiH_4	MgH_2
Teplota desorpce (1,5 bar)	$^{\circ}\text{C}$	7	21	267	296
Teoretická reverze hmotnosti	% hm.	1,3	1,1	2,63	5
Objemová hustota	$\text{g}_{\text{H}_2}/\text{l}$	115	117	100	110

Z tabulky je patrné, že objemová kapacita systémů s metalhydridy je ve srovnání s konvečním způsobem skladování velmi vysoká (až 110 g_{H₂}/l u Mg-H₂ oproti 71 g_{H₂}/l pro zkapalněný vodík). U sloučenin s lehkými kovy, jako je například magnesium, vychází celková hmotnost systému pouze o 30 % vyšší oproti systému skladující kapalný vodík. Tyto příznivé parametry kompenzuje potřeba vysoké desorpční teploty, nízký tlak produkovaného vodíku a v neposlední řadě vysoká cena hydridu. Mezi reverzibilní komplexní hydridy patří alanáty, jsou to sloučeniny na bázi hliníku. Limitující pro alanáty je poměrně vysoká cena hydridu a vysoká desorpční teplota (nad 150 °C). Další komplexní sloučeniny vodíku jsou borohydridy, ve kterých se společně s borem vyskytují kovy, případně prvky alkalických zemin. Např. borohydrid NaBH₄ je v běžných podmínkách kapalný. Vodík se uvolňuje při reakci s vodou. [13]

Skladování vodíků v uhlíkatých strukturách – mezi uhlíkaté nanostruktury řadíme vysokoporézní grafit a uhlíkaté nanotrubice. V poslední době se pozornost zaměřuje na studium nanotubic s jednoduchou stěnou, které disponují velkým potenciálem pro skladování vodíku. Problematikou se zabývá mnoho výzkumných týmů po celém světě. Hodnoty hmotnostní kapacity adsorbovaného vodíku v nanostrukturách uhlíku se dle jednotlivých studií pohybují v rozmezí 0,4 - 7 % hm. Základním stavebním prvkem uhlíkatých nanotubic je grafit. Grafit je forma uhlíku s atomy tvořícími šestiúhelníkovou krystalovou mříž. Nanotrubice jsou tvořeny jednou příp. několika vrstvami stočenými do trubice konečné délky, mohou být zakončené polovinou fullerenu jak je patrné na následujícím obrázku. Průměr tubic se pohybuje od 0,7 - 3 nm. Existuje velké množství studií zabývajících se skladováním vodíku v uhlíkatých nanostrukturách. Jednotlivé závěry jsou natolik odlišné, že je velmi obtížné objektivně posoudit publikované údaje. Dle většiny těchto studií nedosahují uhlíkaté nanotrubice pro vodík vyšší hmotnostní kapacitu než 7 % hm., navíc za velmi krajních podmínek (80 K, 7 MPa). [13]

Skladování vodíku v skleněných mikrokuličkách – skleněné mikrokuličky jsou duté kuličky z křemitého skla, MgAlSi skla, polyamidu, atd. Typické rozměry jsou 25–200 μm při tloušťce stěny 0,5–20 μm. Mohou být plněny plynným vodíkem až do přetlaku 100 MPa. Plnění probíhá mechanismem difúze molekul vodíku skrze stěnu při zvýšené teplotě (200 °C) a vysokém tlaku. Uvolňování vodíku je dosaženo opětovným zvýšením teploty. Hmotnostní kapacita se pohybuje do 15 % hmotnosti při 700 barech, objemová kapacita do 20 g_{H₂}/l. Skleněné mikrokuličky naplněné vodíkem je možné čerpat do nádrže podobně jako tekutinu. Prázdné mikrokuličky mohou být poté opět odčerpány a znovu plněny. Skladování vodíku ve

skleněných mikrokuličkách je ve stádiu výzkumu a vývoje a v současnosti není známa žádná komerční realizace. [13]

Uchování v chemických sloučeninách obsahujících vodík – vodík lze skladovat a přepravovat také ve formě sloučenin bohatých na vodík. V jednom litru vody je paradoxně více atomů vodíku než v jednom litru kapalného vodíku. Nejznámější skupinou bohatou na vodík jsou uhlovodíky. Ty je možné skladovat v tlakových nádobách při běžných teplotách v kapalném stavu jako například propan, butan, zemní plyn, atd. Benzín a naftu, jako příklad směsi vyšších uhlovodíků, můžeme skladovat v kapalném stavu přímo za běžného tlaku a teploty. Tyto sloučeniny jsou obvykle chápány jako primární zdroj vodíku. [13]

5.3.2 Plnicí stanice s vodíkem

V současné době jsou plnicí stanice s vodíkem velmi ojedinělé (v ČR pouze 1 poblíž Neratovic). Obdobně jako u zemního plynu lze vodík poskytovat ve formě stlačeného plynu (GH₂) nebo ve zkapalněné formě (LH₂). Čerpací stanice provozovaná poblíž Neratovic poskytuje stlačený plynný vodík, který je uskladněn v centrálním zásobníku při tlaku 45 bar. Z tohoto zásobníku je vodík odebírán kompresní stanicí, stlačován na tlak 300 bar (30 MPa) a uskládáván ve svazcích tlakových lahví. Maximální plnicí tlak je zde 350 bar (35 MPa).

Měření množství odebraného vodíkového paliva je zajištěno hmotnostním průtokoměrem. Maximální rychlost plnění je asi 4 kg/min. Při plnění prázdné nádrže vozidla je tlak regulován na 250 bar (25 MPa), aby nedošlo k překročení maximálního průtoku při velkém tlakovém rozdílu. Tankování automobilu trvá přibližně 2 minuty.

Srdcem celé čerpací stanice je kompresorová stanice, která se skládá ze dvou částí. V první části se nachází zařízení pro stlačování vodíku a potrubní rozvody, ve druhé pak elektroinstalace a hydraulika. Kompresorová stanice je zejména z bezpečnostních důvodů umístěna v samostatně stojícím betonovém kontejneru, který je chráněn proti výbuchu. Vodík je zde stlačován na tlak 300 bar (30 MPa) ve dvou stupních. Oba stupně kompresoru jsou hydraulicky poháněny a jejich plášť chlazen olejem, takže se komprese blíží izotermickému ději. Vodík je ukládán ve dvou sekcích svazků tlakových lahví při tlaku 300 bar a třetí vysokotlaké sekci při tlaku 450 bar. [48]



Obr. 5.4: Vodíková plnicí stanice v ČR [28]

5.4 Použití vodíku v zážehových motorech a palivové příslušenství

5.4.1 Zážehové motory spalující vodík

Vodík je vhodným palivem zejména pro motory zážehové. Nabízí se několik různých koncepčních řešení motorů, odlišných hlavně způsoby tvorby palivové směsi vodíku se vzduchem ovlivňujícími důležité provozní parametry motoru, jako jsou jeho výkon, spotřeba paliva a množství škodlivých výfukových emisí. Z použitelných způsobů tvorby palivové směsi lze uvést následující:

plynný vodík se přivádí do sání motoru prostřednictvím směšovače,

stlačený plynný vodík se vefukuje do sání motoru elektricky ovládanými ventily,

stlačený plynný vodík se vefukuje do válců motoru elektricky ovládanými ventily,

zkapalněný vodík se vstřikuje do válců motoru elektricky ovládanými ventily.

Při tvorbě palivové směsi v sání motoru před vstupem do válců (ve směšovači) vzniká homogenní směs, ale v důsledku nízké měrné hmotnosti vodíku má náplň válců, zvláště u nepřepřlňovaných motorů, nízký energetický obsah a měrný výkon motoru je malý. Další nevýhodou je nebezpečí nežádoucího zapálení směsi s rozšířením plamene do sání motoru. Vhodnějším řešením je nasávání vzduchu a přivádění vodíku přímo do válců motoru buď v plynné fázi vefukovacím ventilem, nebo v kapalně fázi vstřikovacím ventilem. Přivedením vodíku během kompresního zdvihu pístu se dosáhne vyšší energetické náplně válců a vyloučí se nebezpečí zapálení směsi v sání. Na základě dosavadních výsledků výzkumu spalování

vodíku v zážehovém motoru se ukazuje jako vhodná a perspektivní varianta tvorba velmi chudé palivové směsi vefukováním vodíku do válců přeplňovaného motoru s relativně vysokým kompresním poměrem. Kromě odstranění výše uvedených nevýhod je přínosem spalování velmi chudé palivové směsi nízký obsah oxidů dusíku ve výfukových plynech. [35]

Pro budoucnost se jeví jako zajímavá tedy následující opatření:

všeobecné použití přeplňování pro snížení mechanických a tepelných ztrát motoru, regulace tvorby směsi, plnicí účinnosti a přeplňování s využitím možnosti mechatronického "inteligentního" regulátoru, např. eliminujícího dopravní zpoždění, spojeného s prediktivně-adaptivní regulací předstihu zážehu, případně s řízením časování ventilů (nutné pravděpodobně pro použití HCCI),

homogenizace směsi, zejména pro pozdní vstřik (vefuk) paliva v kompresi, a to řízeným pohybem vzduchu ve válci (regulace příčného nebo tečného víru různým průtokovým součinitelem kanálů víceventilových hlav – pomocí individuálních klapek nebo zdvihu ventilů),

spalování tvořící se směsi po pozdním vysokotlakém optimálně regulovaném vefuku paliva (akumulační systém Common Rail). Zápal zážehem, difusní plamen bez nebezpečí detonace, případně lze použít několikanásobný vefuk paliva. Možno použít z hlediska účinnosti optimální velký kompresní poměr. Pravděpodobně bude pro tento způsob nutno ošetřit spaliny (zvýšená tvorba NO_x , na rozdíl od vznětových motorů žádné saze).

Ošetření spalin:

řízené chemické reaktory s využitím absorpce v pasivní (Pt, Rh, Pd) nebo chemicky aktivní vrstvě (Ba pro vazbu NO_x) s periodicky proměnlivým režimem motoru (chudá/bohatá směs), přídavnou látkou (redukční činidlo, např. močovina pro selektivní katalytickou redukci SCR), masivní recirkulace chlazených výfukových plynů, nahrazujících nadbytečný kyslík ve směsi dusíkem nebo dusíkem s vodní parou.

[38]

5.4.2 Skladování vodíku ve vozidle

Uskladnění vodíku ve vozidle lze provést v tlakových lahvích se stlačeným plynným vodíkem nebo v kryogenních nádobách se zkapalněným vodíkem. Nebo lze využít

technologie, které jsou stále ve výzkumu, s nádržemi s hydridy, uhlíkatými strukturami, skleněnými mikrokuličkami či chemickými sloučeninami obsahujícími vodík (více k metodám skladování vodíku viz kapitola 5.3.1).

Z hlediska bezpečnosti je chování vodíku v mnoha ohledech velmi odlišné od stávajících fosilních paliv a hlavní jsou:

vodík tvoří spolu se vzduchem hořlavou a výbušnou směs v širokém rozsahu koncentrací (4 - 75 % objemu pro hořlavou směs a 19 - 59 % objemu pro výbušnou směs),

při rychlé expanzi může dojít k samovznícení,

vodík má velmi nízkou zápalnou energii, již velmi malý elektrostatický náboj (0,02 J) může iniciovat vzplanutí paliva,

nízká viskozita a malá velikost vodíkové molekuly kladou zvýšené nároky na utěsnění palivové soustavy,

únik vodíku není možné rozpoznat lidskými smysly,

velmi nízká hustota plynu napomáhá rychlému rozptýlu do okolí a tedy k rychlému snížení koncentrace pod zápalnou mez,

nebyly zjištěny toxické účinky na člověka, při hoření nevznikají toxické zplodiny,

za denního světla není vodíkový plamen téměř viditelný.

Přestože většina výše uvedených parametrů je z hlediska bezpečnosti oproti běžným palivům méně příznivých, mnoho praktických zkoušek prokázalo menší destrukční účinky vzplanutí vodíkové nádrže na vozidlo i menší riziko pro posádku.



Obr. 5.5: Únik paliva a následné vznícení vodíku (vlevo) a benzínu (vpravo) [11]

Při destrukci nádrže stoupá vodík díky své nízké hustotě velmi rychle vzhůru (viz obrázek 5.5) a případný požár vzniká ve větší míře vně vozidla. K zvýšení bezpečnosti paradoxně přispívá i menší množství paliva skladovaného ve vozidlech. Bezpečnost se dá dále zvýšit vhodným umístěním skladovací nádrže (například na střechu). U konvenčních skladovacích systémů je vodík skladován v nádobách za velmi nízkých teplot případně za vysokých tlaků. Takovéto systémy jsou velmi náchylné na porušení pláště skladovací nádoby. Při mechanickém poškození nádoby může dojít ve velmi krátké době k úniku celého obsahu nádrže a k případnému vzplanutí nebo výbuchu. Při skladování vodíku v kryogenní nádrži dochází vlivem přestupu tepla k pozvolnému odparu. V případě, kdy je odpařený vodík jednoduše vypouštěn do atmosféry je nutné dodržet zvýšená bezpečnostní opatření, aby se zabránilo hromadění vodíku v uzavřených prostorech. Velmi nízká teplota skladovaného vodíku představuje pro člověka vážné zdravotní riziko. Při kontaktu s pokožkou může dojít ke kryogenním popáleninám, omrzlinám a podchlazením; při vdechnutí studených par potom k vážnému poškození plic. Nebezpečné mohou být i vysoce podchlazené kovové části palivového systému, při manipulaci s takovými částmi systému je nezbytné používat ochranné rukavice. U alternativních systémů skladování vodíku je vodík vázán ve struktuře materiálu; při poruše pláště nádrže tedy nedochází k rychlému úniku vně nádrží vozidla.

[11]

6 Alkoholy

Alkoholy patří do skupiny hydroxysloučenin – uhlovodíky s hydroxylovou skupinou OH vázanou na uhlík místo jednoho atomu vodíku. Hlavní alkoholy použitelné jako palivo pro zážehové motory jsou etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), metanol (CH_3OH) a butanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$).

6.1 Etanol

Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) je druhý nejjednodušší alkohol. Většinou je produkovaný lihovým kvašením zemědělských plodin (biomasy) a proto je nazýván bioetanol. Z etanolu je vyráběn také etyl-tercier-butyl-éter (ETBE). ETBE lze vyrábět reakcí etanolu s nenasyceným plynným uhlovodíkem isobutanem (iso- C_4H_8) v přítomnosti kyselého katalyzátoru. Kapacitu výroby éterů zpravidla limituje disponibilní množství isobutanu [47].

6.1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti etanolu

Etanol je bezbarvá, hořlavá kapalina s charakteristickou vůní. Základní fyzikálně-chemické vlastnosti bioetanolu a z něho odvozeného ETBE a pro srovnání i automobilového benzinu jsou uvedeny v tab. 6.1. Etanol má vysoké oktanové číslo, vyšší než benzin, a je proto z tohoto pohledu vhodným alternativním palivem pro zážehové motory. Oproti tomu jeho cetanové číslo je nízké, proto se obtížně vzněcují, a je tedy podstatně méně vhodným palivem pro vznětové motory. Tlak par podle Reida, který je mírou těkavosti paliva je u čistého etanolu velmi nízký. Velkým problémem je však chování etanolu ve směsi s benzinem. Alkoholy totiž vytvářejí s přítomnými uhlovodíky azeotropická směs s nižším bodem varu a tedy s vyšším tlakem nasycených par. Aby byly splněny požadavky na limitní tlak par lihobenzinových směsí, musí být v benzinovém základu zmenšen podíl těkavé uhlovodíkové frakce. Větší hustota alkoholů ve srovnání s benzinem nemůže kompenzovat jejich výrazně menší energetický obsah na jednotku objemu, který odpovídá u etanolu cca 2/3 energetického obsahu benzinu. To se promítá do větší spotřeby jejich směsí s benzinem. Etanol samozřejmě vyžaduje při stechiometrickém spalování méně vzduchu než benzin. [47]

Tab. 6.1: Vybrané vlastnosti etanolu, ETBE a klasického automobilového benzínu [47]

Veličina	Jednotka	Etanol	ETBE	Benzín
Relativní molekulová hmotnost	g/mol	46	102	111
Oktanové číslo VM / MM	-	109 / 92	118 / 105	96 / 85
Cetanové číslo	-	11	-	8
Tlak par podle Reida	kPa	19,3	28,0	60–90
Hustota (20°C, 101,4 kPa)	kg/dm ³	0,79	0,74	0,75
Výhřevnost	MJ/kg	26,8	36,0	42,9
Výhřevnost	MJ/l	21,2	26,7	32,2
Stechiometrický poměr vzduch/palivo	kg/kg	9,0	-	14,7
Bod varu	°C	78	72	30–215
Zápalná teplota	°C	425	-	>280
Bod vzplanutí	°C	12	-19	-35
Meze výbušnosti dolní / horní	% v/v	3,5 / 15	1,2 / 9,1	1,3 / 7,6

Výhodou ETBE, jak již bylo řečeno výše, je ve srovnání s etanolem jeho větší výhřevnost, menší tlak par a vyšší oktanové číslo. Ve srovnání s alkoholy se s benzinem také lépe mísí a co je důležité, vzniklá směs je stabilní. Vysoké oktanové číslo éterů umožňuje reformulaci benzínu, tj. snížení obsahu aromatů. Z technického hlediska je vhodnější variantou využití bioetanolu v automobilových benzinech přídavek ETBE. Použití benzinů obsahujících ETBE v množství povoleném normou (15 % obj.) je bezproblémové a nevyžaduje žádné úpravy infrastruktury. Tyto benziny lze bez problémů i dlouhodobě skladovat. Použití ETBE je výhodné i z ekologického hlediska, protože je podstatně méně rozpustné ve vodě a rychleji se biologicky odbourává. [47]

6.1.2 Výroba etanolu

V současné době je nejvhodnější vyrábět etanol z obnovitelných zdrojů (biomasa), tedy bioetanol, který se získává lihovým kvašením (fermentací) zemědělských plodin. Výchozími surovinami k výrobě bioetanolu jsou v Evropě nejčastěji obilí, cukrová řepa, brambory a kukuřice, v místech se subtropickým a tropickým podnebím cukrová třtina. V klimatických podmínkách ČR je nejvhodnější obilí, a to pšenice nebo tritikale. Z jedné tuny pšenice se získá zhruba 360 litrů bioetanolu. Z hektarového výnosu pšenice 5,6 tun lze vyrobit přibližně 2 100 litrů bioetanolu. [30]

Výroba bioetanolu z biomasy začíná velikostním tříděním pomocí systému sít a vibrací, odstranění nečistot a následně šrotováním. Vzniklý šrot se dávkuje, a následně míchá s vodou a katalyzátory biochemických reakcí – enzymy. Následně se v prvním stupni

hydrolýzy za daných podmínek (teplota a čas) uvolňují procesem ztekucení škrobu krátké molekulové řetězce – dextriny, které se v druhém stupni hydrolýzy dále štěpí procesem zcukřování až na monosacharidy – glukózu, vyznačující se lehkou zkvasitelností pomocí kvasinek rodu *Sacharomyces Cerevisiae* – Ethanol red. Vlastní prokvašení probíhá v kvasných kádích, které slouží k nárůstu biomasy a částečnému prokvašení cukrů na ethanol a třech dokvasných kádích, které slouží k hlubokému prokvašení zbylých cukrů na ethanol. Doba kvašení se pohybuje okolo 55–60 hodin. Vlastní alkohol se poté odděluje od vodní fáze v komplexu destilace – záparové koloně s využitím fyzikálně chemických reakcí za vzniku ethanolu o koncentraci cca 55%, který je nastříkovan do rektifikační kolony a následně odtahován produkt o koncentraci 96%, který se odvodňuje na molekulových sítích tvořených zeolitu příbuzným materiálem za vzniku bioethanolu o koncentraci minimálně 99,7%.

Výpalky, ze kterých se právě oddestiloval alkohol se dekatují na odstředivkách, suší na trubkové sušárně a následně peletizují. Vzniklé pelety nalézají vhodné využití v krmivářském průmyslu, možné je i jejich spalování v kotlích na tuhá paliva. [15]

6.1.3 E85

E85 je směs tvořena 85% etanolu a 15% benzínu natural 95, který je přidáván kvůli snadnějšímu startování studeného motoru. Poměr etanol/benzín se v průběhu ročních období mění a zimní E85 má až 70 % etanolu, což je minimální možný podíl etanolu v této směsi. [16]

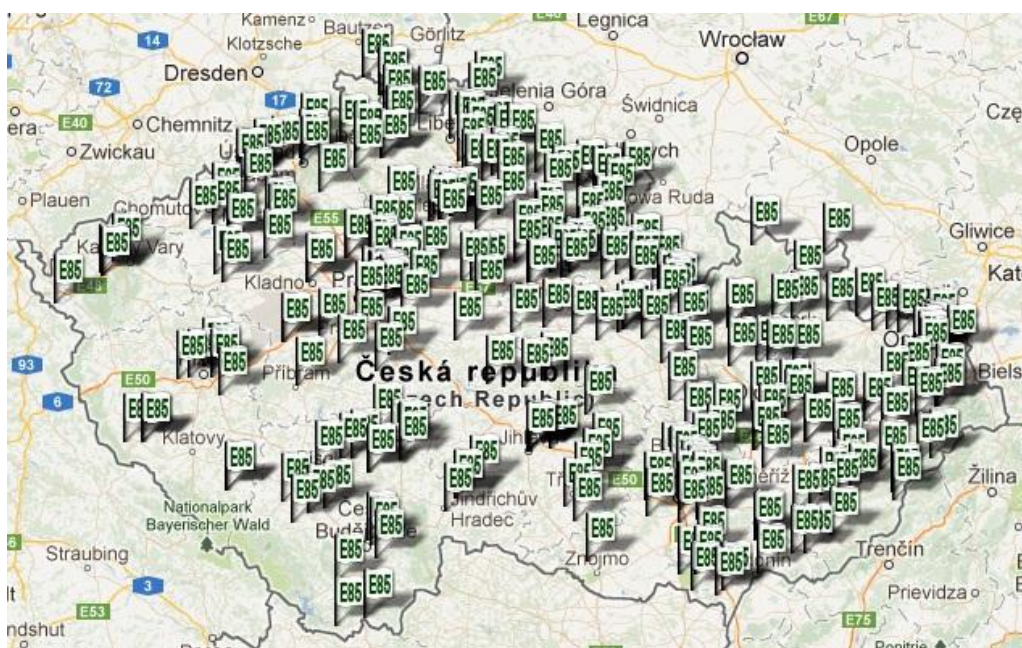
6.1.4 Přeprava a čerpací stanice E85

Přestože je E85 kapalně palivo s vlastnostmi podobnými s benzínu, musí se při distribuci dodržovat některá opatření. Ve skladovacích ani přepravních systémech nesmí být přítomna žádná voda. Již malé množství vody má totiž za následek, že směs etanol/benzín se ochotně rozdělí na dvě fáze, přičemž etanol přechází do vodné fáze, čímž dojde k významné změně kvality paliva. Na druhou stranu je třeba poznamenat, že etanol funguje rovněž jako kosolvent, který napomáhá přechodu malých množství vody (<0,05 % hm.) do lihoobenzinové směsi. Voda se shromažďuje u dna přepravních systémů, skladovacích nádrží a palivových systémů vozidel. Voda obvykle obsahuje částičky rzi a dalších pevných nečistot. Ty jednorázově nepředstavují vážný problém, nicméně opakovaným používáním E85 směsi se jejich množství v systému zvětšuje a je pak příčinou opakujících se problémů s ucpáváním filtrů a systémů dávkování paliva. Aby se zabránilo uvedeným problémům s vodou, je nutné vyloučit dopravu paliva potrubními přepravními systémy. Optimální postup distribuce je tedy opět doprava vyrobeného paliva přímo z terminálu výrobce do maloobchodní sítě. Nebo se

distribuční společnosti dopraví obě složky, bioetanol i benzin, odděleně a ta pak palivo namíchá a následně je toto palivo dopraveno do maloobchodní sítě. Bioetanol a benzin mají rozdílné vlastnosti, a tak benzin dodávaný distribuční společnosti musí mít „zvláštní specifikaci“, jinými slovy musí mít takové vlastnosti, aby po jeho smíchání s bioetanolem vyrobené palivo splňovalo požadavky normy.

E85 je možné přepravovat silničními autocisternami nebo po železnici za stejných podmínek jako běžné automobilové benziny. Předem se však musí ověřit kompatibilita použitých těsnění uzávěrů a ventilů tak, aby se předešlo narušení jejich těsnosti vlivem působení agresivního etanolu a úniku paliva do životního prostředí. [47]

V dnešní době je E85 poměrně rozšířeně a počet stanic v ČR je více než 200 a stále narůstá, přesto v některých částech ČR je E85 hůře dostupné, jak můžeme vidět na obrázku 6.1, kde je mapa rozmístění čerpacích stanic s E85.



Obr. 6.1: Mapa čerpacích stanic s E85 [25]

6.1.5 Použití E85 v zážehových motorech

Etanol má v porovnání s benzinem značně nižší výhřevnost, vysokou odolnost proti klepání a vysoké skupenské výparné teplo. Kvůli nízké výhřevnosti je hmotnostní měrná spotřeba etanolu (g/kWh) vyšší než spotřeba benzinu, měrná spotřeba tepla (MJ/kWh) může být u motorů na etanolová paliva, které mají vyšší kompresní poměr, nižší, než bývá u benzinových motorů. Pro vyšší spotřebu etanolu oproti spotřebě benzinu je nutné upravit palivové příslušenství, tj. vstřikovací zařízení tak, aby umožňovalo zhruba 1,5 krát vyšší

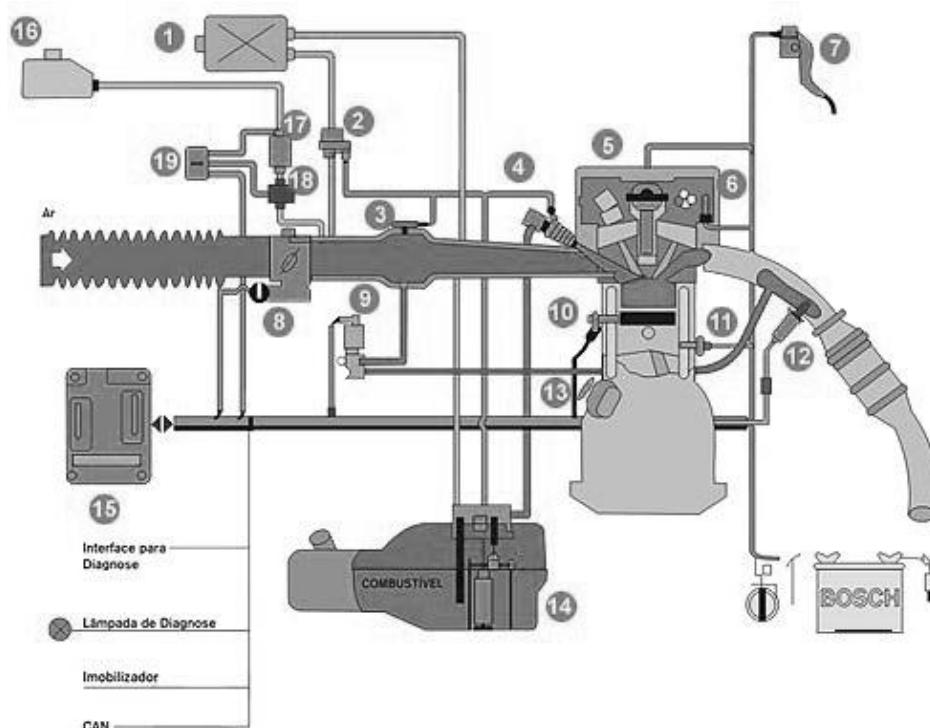
hmotnostní průtok paliva. Vysoká odolnost proti klepání umožňuje použití etanolu pro zážehové motory s vyšším kompresním poměrem, než je obvyklé u benzinových motorů. Kompresní poměr je možné zvýšit až na 14 : 1. Skupenské výparné teplo etanolu je v porovnání s benzinem vyšší a působí výraznější ochlazení palivové směsi přiváděné do motoru. V porovnání s benzinem se dosáhne vyššího naplnění válců palivovou směsí a tím i vyššího výkonu motoru. Vysoké skupenské výparné teplo působí problémy při spouštění motoru za nižších teplot. Bývá nutné použít pomocné zařízení pro spouštění za nízkých teplot, případně spouštět motor na benzin.

Etanolové palivo E85, obsahující téměř 30 % kyslíku, se provozuje na speciálně přizpůsobených zážehových motorech s konstrukčními úpravami a řídicí jednotkou určenou pro parametry etanolu.

Vozidla se zážehovými motory spalujícími pouze benzín (s nepřímým vstřikem paliva) lze snadno upravit pomocí přídatné řídicí jednotky a palivového čidla. První jednotka v ČR schválená Ministerstvem dopravy pro hromadnou přestavbu vozidel na etanol E85 je ELOTEC EC85, cena této přestavby je přibližně 12 000 Kč [17].

Automobily přizpůsobené pro etanolové palivo tzv. FFV (Flexible fuel vehicles) umožňují provoz jak na benzin, tak na etanolové palivo s různým podílem etanolu (až do 85% – tedy E85). Motor může mít vysoký kompresní poměr, vyhovující i pro benzin. Palivový systém je dimenzován pro provoz na etanolové palivo a přizpůsoben agresivnímu působení etanolu na některé součástky. Podle koncentrace kyslíku ve výfukových plynech získává řídicí jednotka informaci o složení paliva (obsahu etanolu) a tomu přizpůsobí seřizovací parametry, tj. dávkování paliva, předstih zážehu aj. V současné době je v České republice v provozu přes 2000 FFV a palivo E85 [46]. Schematické uspořádání takového motoru s příslušenstvím je na obr. 6.2.

[32]



Obr. 6.2: Schematické uspořádání motoru pro FFV

1 – zachycovač palivových par, 2 – ventil zachycovače palivových par, 3 – snímač tlaku, 4 – vstřikovače, 5 – zapalovací cívka, 6 – snímač polohy vačkového hřídele, 7 – pedál akceleraace, 8 – škrticí klapka, 9 – ventil recirkulace výfukových plynů, 10 – snímač klapání, 11 – snímač teploty, 12 – lambda sonda, 13 – snímač otáček, 14 – palivová nádrž s čerpadlem, 15 – řídicí jednotka motoru, 16 – nádrž na benzin, 17, 18, 19 – benzinový palivový systém pro spouštění motoru. [32]

6.1.6 Palivové příslušenství E85

Palivová soustava u nově vyráběných vozidel je přizpůsobená pro palivo E85, zatímco u upravených starších vozidel může dojít vlivem pročištění kalů v hadičkách palivového vedení, pokud jsou na hadičkách vlivem stárnutí mikrotřhliny, k prosakování paliva. Dále u hadiček z PVC měkčeného ftaláty může nastat, že ftaláty obsažené v hadičkách se postupně rozpustí a odplaví a dojde k jejich zkřehnutí a následnému porušení vlivem vibrací. U starších vozidel upravených pro provoz na E85 se z výše uvedených důvodů doporučuje výměna palivových hadiček.

6.2 Metanol

Metanol (CH_3OH) je nejjednodušší alkohol, je nazýván také dřevný líh, protože byl dříve vyráběn suchou destilací dřeva. Z metanolu je vyráběn také metyl-tercier-butyl-éter

(MTBE). MTBE je vyráběn obdobně jako ETBE reakcí metanolu, s nenasyceným plynným uhlovodíkem isobutanem ($\text{iso-C}_4\text{H}_8$) v přítomnosti kyselého katalyzátoru [47].

6.2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti metanolu

Metanol je bezbarvá, hořlavá kapalina s charakteristickým alkoholovým zápachem a je neomezeně mísitelný s vodou. Je pro lidský organismus jedovatý (přesněji produkty po reakci metanolu v játrech) a je od metanolu bez chemického rozboru nerozeznatelný.

Vlastnosti metanolu, MTBE a automobilového benzinu jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tab. 6.2: Vybrané vlastnosti metanolu, MTBE a klasického automobilového benzinu [47]

Veličina	Jednotka	Metanol	MTBE	Benzín
Relativní molekulová hmotnost	g/mol	32	88	111
Oktanové číslo VM / MM	-	110 / 92	116 / 100	96 / 85
Cetanové číslo	-	5	-	8
Tlak par podle Reida	kPa	31,7	57,0	60 - 90
Hustota (15°C, 101,4 kPa)	kg/dm ³	0,790	0,740	0,750
Výhřevnost	MJ/kg	19,8	35,2	42,9
Výhřevnost	MJ/l	15,6	26,0	32,2
Stechiometrický poměr vzduch/palivo	kg/kg	6,5	-	14,7
Bod varu	°C	65	55,3	30 - 215

Metanol má vysoké oktanové číslo, vyšší než benzin, a je proto z tohoto pohledu vhodným palivem pro zážehové motory. Oproti tomu jeho cetanové číslo je nízké, proto se obtížně vzněcuje, a je tedy podstatně méně vhodným palivem pro vznětové motory, přestože se o tomto jeho využití stále uvažuje. Tlak par podle Reida, který je mírou těkavosti paliva je u metanolu velmi nízký. Velkým problémem je však jeho chování ve směsi s benzinem. Metanol podobně jako etanol totiž vytváří s přítomnými uhlovodíky azeotropické směsi s nižším bodem varu a tedy s vyšším tlakem nasycených par. Aby byly splněny požadavky na limitní tlak par, musí být z benzinového poolu zmenšen podíl těkavé uhlovodíkové frakce. Větší hustota metanolu ve srovnání s benzinem nemůže kompenzovat jeho výrazně menší energetický obsah na jednotku objemu, který odpovídá pouze 1/2 energetického obsahu benzinu. To se samozřejmě promítá do větší spotřeby metanolu a jeho směsi s benzinem. Metanol vyžaduje při stechiometrickém spalování méně vzduchu než benzin. Velkou nevýhodou metanolu je skutečnost, že je toxický a jedovatý musí být aditivován, aby ho bylo možné odlišit od ostatních paliv. Při manipulaci s ním je třeba zabránit kontaktu s kůží a očima. Metanol může penetrovat kůží a vstoupit do krevního řetězce.

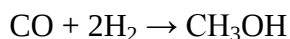
Výhodou MTBE je ve srovnání s metanolem jeho větší výhřevnost, menší tlak par a vyšší oktanové číslo. Ve srovnání s metanolem se s benzinem také lépe mísí a co je důležité, vzniklá směs je stabilní. Vysoké oktanové číslo éteru umožňuje reformulaci benzínu, tj. snížení obsahu aromátů.

[47]

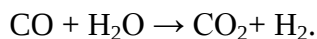
6.2.2 Výroba metanolu

Většina světové produkce metanolu je dnes realizována na bázi zemního plynu. Jen velmi malá část se vyrábí ze syntézního plynu vyrobeného z ropy nebo uhlí. V současné době jsou intenzivně studovány možnosti výroby biometanolu na bázi biomasy. Bylo uvedeno, že pro výrobu 1 t metanolu je potřeba něco málo přes 2 t suchého dřeva, což odpovídá výtěžku 550 l metanolu/t dřeva. V případě travní suroviny je výtěžek o něco menší, cca 450 l/t.

Při syntéze metanolu, která je katalyzovanou reakcí, probíhají následující základní chemické reakce:



paralelně s reakcemi a probíhá i reakce vodního plynu:



Syntéza metanolu je z technického hlediska jedním z nejlépe propracovaných průmyslových procesů. Velkokapacitní jednotky pro výrobu metanolu otvírají cestu pro jeho následné využití k výrobě motorových paliv a petrochemikálií, především etylénu a propylenu. Výrobu metanolu lze kombinovat i s výrobou elektrické energie. Po kondenzaci a oddělení metanolu lze zbylý syn-plyn využít k výrobě elektrické energie paroplynovým cyklem, případně pro další syntézy. Kombinovaná výroba metanolu a elektrické energie je považována za perspektivní.

[47]

6.2.3 Distribuce metanolu

Distribuci metanolu lze provádět obdobně jako v případě etanolu (viz kapitola 6.1.4), ale při manipulaci s metanolem musí být vzhledem k toxicitě metanolu dodržovány bezpečnostní zásady.

6.2.4 Možnost použití metanolu v zážehových motorech

Použití metanolu v zážehovém motoru je podobné jako v případě etanolu, avšak kvůli značně nízké výhřevnosti, která je menší a ve srovnání s benzinem poloviční, je potřeba zvýšení hmotnostního průtoku paliva. To způsobí značné zvýšení spotřeby. Na druhou stranu díky vysokému oktanovému číslu lze zvýšit kompresní poměr a tím účinnost motoru. Problémem je i toxicita metanolu, která komplikuje manipulaci pro běžné spotřebitele.

6.3 Butanol

Butanol (C_4H_9OH) je čtvrtý z řady základních alkoholů. Je dalším alkoholem, který by mohl připadat v úvahu jako motorové palivo nebo složka paliv pro zážehové motory. V současné době je butanol používán hlavně jako průmyslové ředidlo a v České republice se nevyrábí z biomasy, ale hydratací butanu [31].

6.3.1 Fyzikální a chemické vlastnosti butanolu

Butanol se může vyskytovat ve formě čtyř izomerů (n-butanol, sec-butanol, terc-butanol a i-butanol). Tyto izomery mají rozdílné chemické a fyzikální vlastnosti, ale všechny jsou mírně rozpustné ve vodě. Podobně jako většina alkoholů je i butanol jedovatý. [50] Terc-butanol nelze za normálních podmínek (20 °C, 101,3 kPa) použít jako palivo do zážehových motorů, protože je v pevném skupenství. Dále se budeme zabývat pod názvem butanol základním n-butanolem nebo směsí n-butanolu a i-butanolu. Vybrané vlastnosti butanolu v porovnání s benzinem a etanolem jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tab. 6.3: Vybrané vlastnosti butanolu, etanolu a benzínu [31]

	Jednotka	Butanol	Etanol	BA 95
Chemický vzorec	-	C_4H_9OH	C_2H_5OH	$CH_{1,87}$
Hustota při 15 °C	kg/dm ³	0,81	0,79	0,75
Kin. viskoz. při 20 °C	mm ² /s ¹	3,64	1,52	0,4–0,8
Bod varu	°C	118	78	30–215
Výhřevnost	MJ/kg	32,5	26,8	42,9
Výhřevnost	MJ/l	26,3	21,2	32,2
Výparné teplo	MJ/kg	0,43	0,92	0,36
Tlak par podle Reida	kPa	18,6	19,3	60–90
Obsah kyslíku	% hm.	21,6	34,7	<2,7
Oktanové číslo VM	-	96	109	96

Při úvahách o možnostech případné částečné náhrady benzinu butanolem je nutné vzít v úvahu hlavně ty vlastnosti butanolu, které jsou od vlastností benzinu výrazněji odlišné. Butanol má v porovnání s benzinem nízkou výhřevnost, vysokou viskozitu, nízký tlak par a vyšší výparné teplo. Oktanové číslo (OČVM) samotného butanolu je přibližně 95. Z hlediska průběhu spalování v motoru je výhodné určité množství kyslíku, který butanol obsahuje, ale jeho přítomnost snižuje výhřevnost paliva. Butanol může způsobit korozi některých součástí, zejména palivového příslušenství motoru. Tuto nepříznivou vlastnost je možné zmírnit přidáním inhibitoru koroze, který ale nezabrání agresivitě butanolu vůči některým plastům a pryži. Z ekologického hlediska je butanol dobře biologicky odbouratelný a při jeho úniku není ohrožena půda ani voda. [31]

6.3.2 Výroba butanolu

V současné době je butanol vyráběn synteticky hydratací butanu. Butanol lze ale vyrábět také zpracováním biomasy, takto vyráběný butanol se nazývá biobutanol a se může vyrábět kvasným procesem z obilí, kukuřice, brambor, cukrové řepy nebo z cukrové třtiny působením mikroorganismu *Clostridium acetobutylicum*, což je již sto let starý postup označovaný jako ABE, při kterém se získá směs obsahující vedle butanolu též etanol a aceton, z níž se destilací oddělí zpravidla přibližně 16 %, výjimečně 25 % butanolu. Novější postup využívá působení mikroorganismů *Clostridium tyrobutylicum* a např. z jedné tuny kukuřice umožní získat až 80 litrů butanolu nebo pouze 30 litrů etanolu. V České republice by jako surovina pro výrobu butanolu připadala v úvahu hlavně cukrová řepa nebo kukuřice. Nejnovější postupy umožňují získat butanol i z celulózy. Zefektivněním výroby butanolu se zabývá řada zahraničních firem. Na vývoji nových technologií výroby butanolu z biomasy spolupracují např. velké obchodní společnosti BP, DuPont a Fagen. [31]

6.3.3 Distribuce

Distribuci butanolu lze provádět obdobně jako v případě etanolu (viz kapitola 6.1.4).

6.3.4 Možnost použití butanolu v zážehových motorech

Benzinové motory mohou spalovat směsi benzinu s butanolem vytvořené v jakémkoliv poměru obou složek. V důsledku nižší výhřevnosti butanolu je spotřeba směsi benzinu s butanolem v motorech vyšší než spotřeba benzinu. V případě, že by směs měla vyhovovat podmínkám ČSN EN 228 "Motorová paliva - Bezolovnaté automobilové benziny - Technické požadavky a metody zkoušení", která připouští obsah kyslíku v benzinu max. do 2,7 %, bylo by možné do benzinu přimíchat až 11,7 % butanolu. V případě přimíchávání

etanolu je to pouze 5 %. Pro palivové směsi s vysokým podílem butanolu a nízkým podílem benzinu jsou potřebné technické změny původního benzinového palivového systému vozidla méně rozsáhlé než v případě směsí s vysokým obsahem etanolu. Dále také butanol nezpůsobuje takové problémy s vodou v palivu jak je tomu v případě etanolu, na druhou stranu je výroba butanolu nákladnější než výroba etanolu.

Pokud se jedná o porovnání množství škodlivých výfukových emisí oxidu uhelnatého, uhlovodíků a oxidů dusíku při provozu motoru na benzin a při provozu na směsi benzinu s butanolem, jsou výsledky zkoušek provedených na různých motorech a publikované jednotlivými autory odlišné. Přesto ukazují, že přimíchání 11,7 % butanolu do benzinu výsledky emisních testů výrazněji neovlivní.

[31]

6.3.5 Vliv butanolu na palivové příslušenství automobilu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.3.1, butanol může způsobit korozi některých součástí, zejména palivového příslušenství motoru. Tuto nepříznivou vlastnost je možné zmírnit přidáním inhibitoru koroze, který ale nezabrání agresivitě butanolu vůči některým plastům a pryži. [31]

7 Použití vybraných alternativních paliv v benzínovém motoru

Škoda-Auto 1,2 HTP

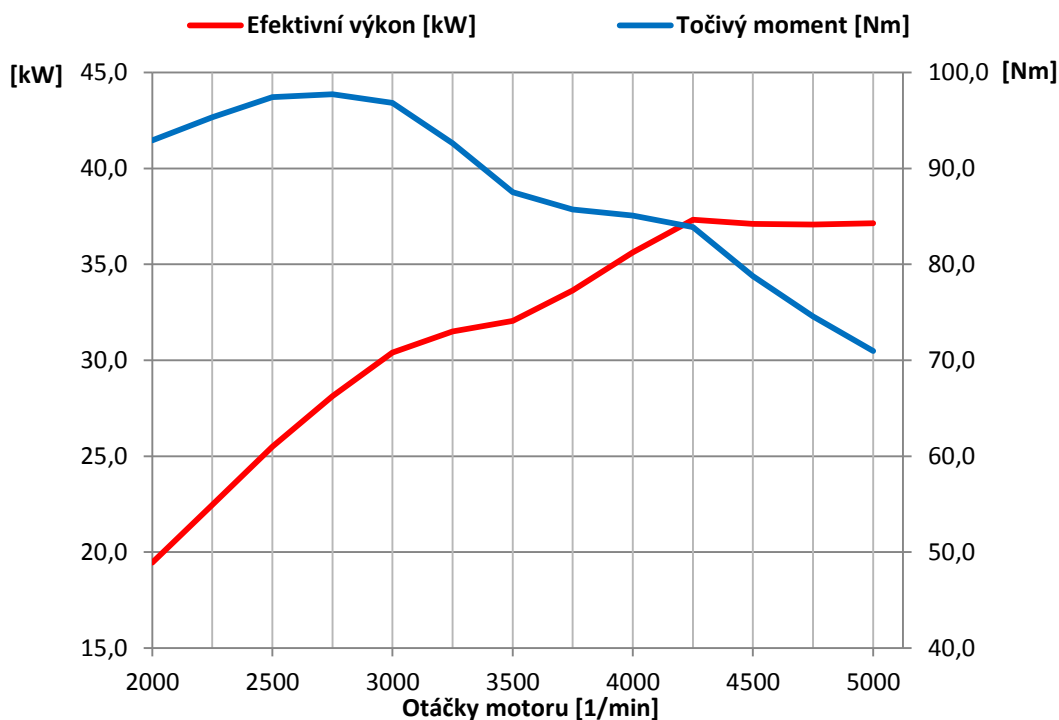
Pro porovnání provozu na vybraná alternativní paliva použijeme benzinový motor ŠA 1,2 HTP 40 kW. Tento motor je zážehový řadový tříválcový kapalinou chlazený nepřepřlňovaný motor s rozvodem OHC, sekvenčním vstřikováním benzínu před sací ventily, třísložkovým katalyzátorem a dvěma lambda-sondami. Motor je vybaven řídicím systémem s řídicí jednotkou SIMOS 3PD [37]. Hlavní konstrukční parametry motor jsou uvedeny v tabulce 7.1, odhadnuté hodnoty pro otáčkovou charakteristiku a vypočítané hodnoty jsou v tabulce 7.2 (zatížení $\alpha=100\%$, korekce bohatosti směsi na $\lambda = 1$) a graf 7.1.

Tab. 7.1: Hlavní konstrukční a provozní parametry motoru [37]

Parametr	Jednotka	Hodnota
Vrtání válců	mm	76,5
Zdvih pístů	mm	86,9
Zdvihový objem	cm ³	1198
Kompresní poměr	-	10,3:1
Max. točivý moment při 3000 ot/min	Nm	106
Max. výkon při 4750 ot/min	kW	40
Počet ventilů na válec	-	2

Tab 7.2: Hodnoty vnější otáčkové charakteristiky motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW [37]

Otáčky n [1/min]	Efektivní Výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]
2000	19,5	92,9
2500	25,5	97,4
3000	30,4	96,8
3500	32,1	87,5
4000	35,6	85,1
4500	37,1	78,8
5000	37,1	71,0



Graf 7.1: Vnější otáčková charakteristika motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW

7.1 Použití vybraných alternativních paliv v motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW

Vybraná alternativní paliva pro motor ŠA 1,2 HTP 40kW jsou LPG, zemní plyn, bioplyn, generátorový plyn, vodík, E85 a butanol. Údaje důležité pro porovnání jednotlivých paliv s benzínem jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Další hodnoty jsou pro zjednodušení zvoleny společné pro všechna paliva včetně benzínu: individuální plynová konstanta vzduchu $r_{vzd} = 287 \text{ J/kg.K}$; polytropický exponent $n = \kappa = 1,4$. Zbylé hodnoty volím: plnicí tlak $p_{pl} = 0,097 \text{ MPa}$; zatížení (poloha škrtkic klapky) $\alpha = 100 \%$; dopravní účinnost, $\eta_d = 0,94$; bohatost směsi $\lambda = 1 - \lambda < 1$ používá řídicí jednotka kvůli nižším teplotám spalin jdoucím ke katalyzátoru; celková účinnost η_{celk} je převzata z vypočítané celkové účinnosti pro benzín; kvůli korekci měrné spotřeby a celkové účinnosti provozu na benzín, volím teplotu směsi na dolní úvratí pro benzín $T_{DÚ/BA95} \approx 320 \text{ K}$, pro plynná paliva je teplota směsi na dolní úvratí o 10–15 K vyšší [5], takže $T_{DÚ/PL} \approx 335 \text{ K}$, pro E85 lze vypočítat teplotu směsi na dolní úvratí vztahem $T_{DÚ/E85} = T_{DÚ/BA95} + 15(1 - L_{v/E85}/L_{v/BA95})$, výparné teplo E85 je určeno vztahem $L_{v/E85} = 0,15L_{v/BA95} + 0,85L_{v/etanol}$, kde výparná tepla $L_{v/BA95} = 0,36 \text{ MJ/kg}$ a $L_{v/etanol} = 0,92 \text{ MJ/kg}$ [46], takže $L_{v/E85} = 0,836 \text{ MJ/kg}$, a výsledná $T_{DÚ/E85} = 300,2 \text{ K}$, pro butanol lze vypočítat teplotu směsi na dolní úvratí stejným vztahem

$T_{DÚ/butanol} = T_{DÚ/BA95} + 15(1 - L_{v/butanol} / L_{v/BA95})$, kde výparné teplo butanolu je $L_{v/butanol} = 0,43$ MJ/kg, takže výsledná $T_{DÚ/butanol} = 317,1$ K.

Dalším předpokladem je zajištění dostatečné dávky paliva.

Tab. 7.3: Hodnoty vybraných paliv [5], [6]

Palivo	Složení		H_u [MJ/kg]	L_{VT} [kg/kg]	r_{pal} [J/kg.K]
	Složka	[% vol.]			
Benzín (BA95)	natural 95	100	42,90	14,70	75,00
LPG	propan C_3H_8 butan C_4H_{10}	30 70	46,10	15,60	168,00
Zemní plyn (NG)	metan CH_4 ostatní uhlovodíky dusík N_2 oxid uhličitý CO_2	98,39 0,7 0,084 0,07	49,00	16,90	516,00
Bioplyn (BP)	metan CH_4 oxid uhličitý CO_2	65 35	20,20	7,01	322,20
Generátorový Plyn (GP)	oxid uhelnatý CO vodík H_2 metan CH_4 dusík N_2 kyslík O_2	34 7 1 57,5 0,5	4,64	1,17	318,70
Vodík (H_2)	vodík H_2	100	128,76	34,00	4124,65
E85	etanol C_2H_5OH natural 95	85 15	29,10	9,82	165,10
Butanol	butanol C_4H_9OH	100	32,50	12,50	112,20

Výchozí vzorec je pro výpočet hmotnostního toku (spotřeby) paliva:

$$\dot{m}_{pal} = \frac{p_{pl} \cdot \eta_d \cdot n \cdot \varepsilon \cdot V_z}{120000 \cdot T_{DÚ} \cdot (\varepsilon - 1) \cdot (\lambda \cdot L_{VT} \cdot r_{pal} + r_{vzd})} = [g/s] \quad (1)$$

Kde $\varepsilon = 10,3$ je kompresní poměr a $V_z = 1198 \text{ cm}^3$ je zdvihový objem.

Dalším potřebným parametrem je výkon, který lze vypočítat dle vzorců:

$$P_e = \dot{m}_{pal} \cdot H_u \cdot \eta_{celk} = [kW] \quad (2)$$

$$P_e = \frac{M_t \cdot \pi \cdot n}{30000} = [kW] \quad (3)$$

Z rovnice (2) lze vyjádřit vztah pro výpočet celkové účinnosti:

$$\eta_{celk} = \frac{P_e}{\dot{m}_{pal} \cdot H_u} = [-] \quad (4)$$

Z rovnice (3) lze vyjádřit vztah pro výpočet točivého momentu:

$$M_t = \frac{30000 \cdot P_e}{\pi \cdot n} = [\text{Nm}] \quad (5)$$

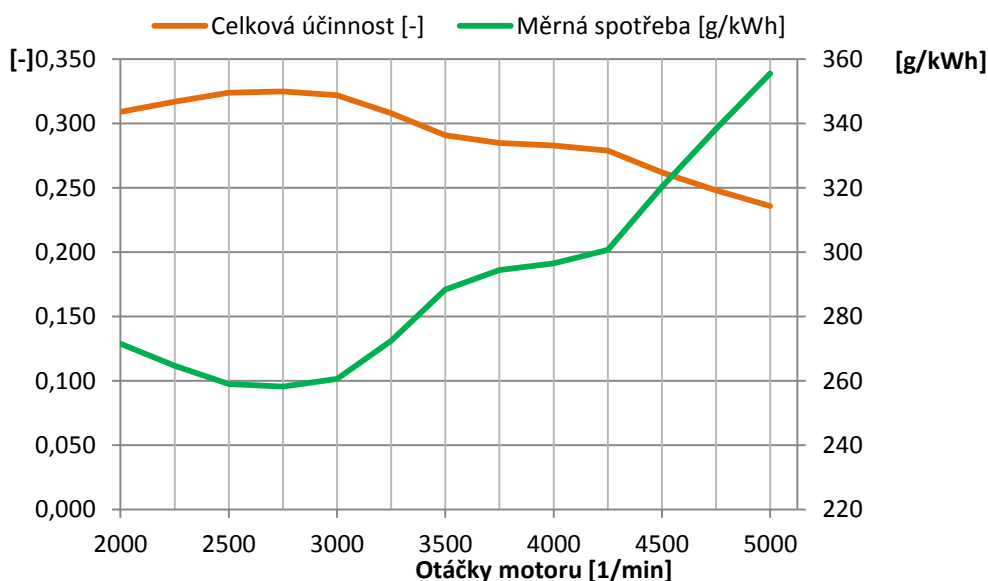
Dále je potřeba určit měrnou spotřebu paliva danou vztahem:

$$m_{pe} = \frac{\dot{m}_{pal}}{P_e} \cdot 3600 = [\text{g/kWh}] \quad (6)$$

Pomocí rovnic (1), (4) a (6) lze sestavit otáčkovou charakteristiku celkové účinnosti a měrné spotřeby benzínu. Hodnoty charakteristiky při provozu na benzín jsou uvedeny v tabulce 7.4 a průběhy v grafu 7.2.

Tab. 7.4: Hodnoty celkové účinnosti a měrné spotřeby benzínu (BA95)

Otáčky n [1/min]	Celková účinnost η_{celk} [-]	Měrná spotřeba paliva m_{pe} [g/kWh]
2000	0,309	272
2500	0,324	259
3000	0,322	261
3500	0,291	288
4000	0,283	297
4500	0,262	320
5000	0,236	356



Graf 7.2: Otáčková charakteristika celkové účinnosti a měrné spotřeby BA95 motoru ŠA 1,2 HTP 40kW

7.1.1 Použití LPG

Při provozu daného motoru na LPG bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Plynné LPG je vefukováno do sacího kanálu. Hodnoty vypočítaných parametrů pro LPG s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.5.

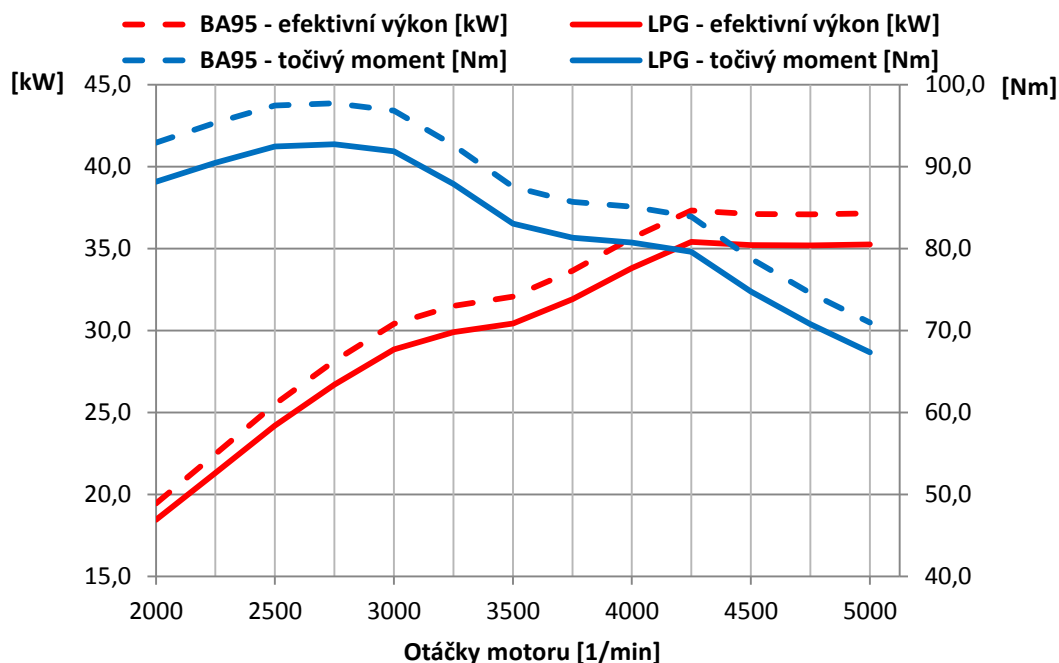
Tab. 7.5: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	18,46	88,2	252
2500	24,19	92,5	241
3000	28,85	91,9	243
3500	30,42	83,0	268
4000	33,81	80,8	276
4500	35,21	74,8	298
5000	35,24	67,3	331

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a LPG $P_{e/LPG}$ vyjde:

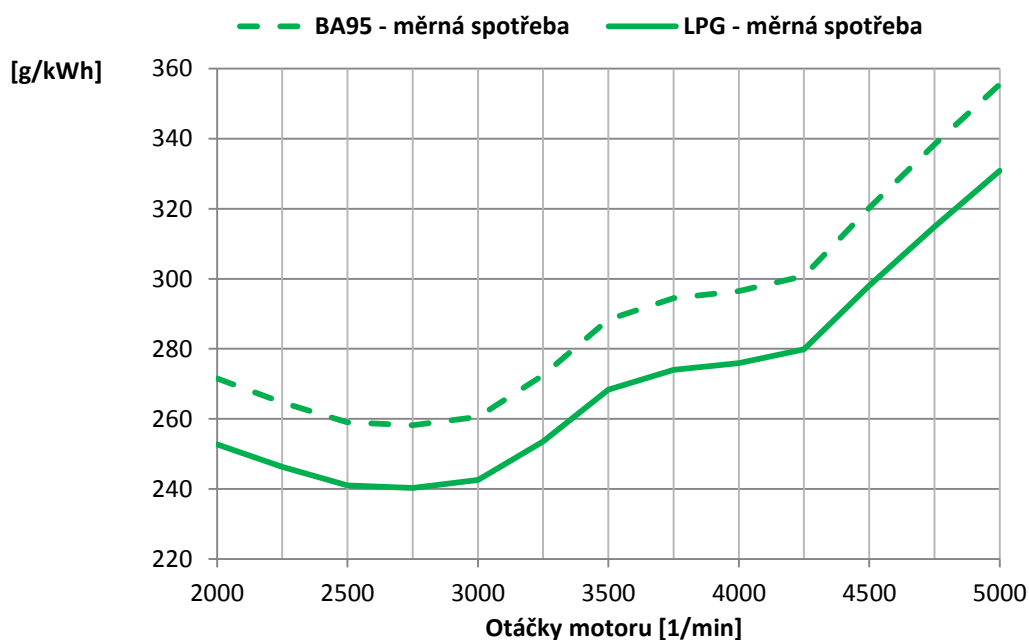
$$\frac{P_{e/LPG}}{P_{e/BA95}} = 0,949$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na LPG o 5,1 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu LPG v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.3.



Graf 7.3: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu LPG a benzínu

Měrná spotřeba LPG $m_{pe/LPG}$ poklesne o 6,9 %, ale vzhledem k nižší hustotě LPG proti benzínu dojde k nárůstu objemové spotřeby. Průběh měrné spotřeby LPG v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.4.



Graf 7.4: Porovnání průběhu měrné spotřeby LPG a benzínu

Výkonové parametry motoru při provozu na LPG lze zvýšit obohacením směsi, zvýšením kompresního poměru nebo vstřikováním kapalně fáze LPG do sání. Obohacení směsi zvýší výkonové parametry, měrná spotřeba se nezmění, ale může dojít ke zvýšení emisí. Zvýšení kompresního poměru zvýší celkovou účinnost motoru a s tím související výkonové parametry a sníží měrnou spotřebu, ale kompresní poměr lze zvýšit jen minimálně kvůli ne příliš velkému rozdílu oktanového čísla LPG a benzínu BA95. Vstřikováním kapalně fáze LPG do sání dostane výkonové parametry na úroveň benzínu, protože dojde ke snížení teploty nasávané směsi, ale prudké odpařování LPG může způsobovat námrazu (led z vody obsažené v nasávaném vzduchu) v sacím traktu motoru.

Pro vyrovnání výkonových parametrů s benzínem lze použít např. kombinace vstřikování kapalně fáze LPG a zvýšení kompresního poměru na $\epsilon = 12$. Zvýšení kompresního poměru zvýší celkovou účinnost, protože dojde ke zvýšení teoretické účinnosti dle vztahu:

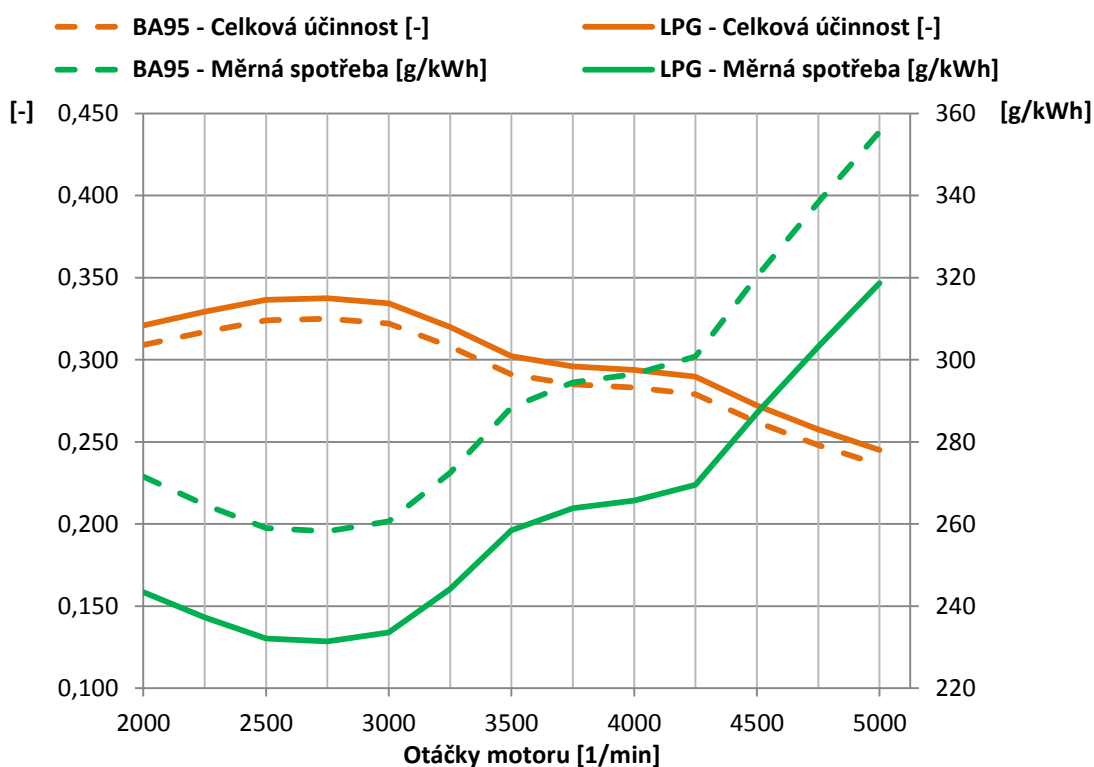
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}$$

Vstřikování kapalně fáze způsobí ochlazení vzduchu vlivem odpařování a teplota směsi na dolní úvratí se změní dle vztahu $T_{DÚ/LPG} = T_{DÚ/BA95} + 15(1 - L_{v/LPG}/L_{v/BA95})$, kde teplota směsi v dolní úvratí pro benzín $T_{DÚ/BA95} = 320$ K, výparné teplo benzínu $L_{v/BA95} = 0,36$ MJ/kg a výparné teplo LPG je $L_{v/LPG} = 0,30L_{v/propan} + 0,70L_{v/butan}$, přičemž výparná tepla jsou $L_{v/propan} = 0,441$ MJ/kg a $L_{v/butan} = 0,391$, výsledná teplota směsi LPG/vzduch je $T_{DÚ/LPG} = 318,1$ K. Tyto úpravy mírně zvýší výkon proti benzínu, proto je možné mírně ochudit směs na $\lambda = 1,02$,

což mírně sníží hmotnostní tok paliva srovná výkon s benzínem, ale může mít vliv na zvýšení teploty spalin (pouze minimálně). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.6. Celková účinnost stoupne o 3,8 % a měrná spotřeba LPG je nižší o 10,4 % proti benzínu, porovnání měrné spotřeby a celkové účinnosti LPG a benzínu je znázorněno v grafu 7.5.

Tab. 7.6: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na LPG po úpravách

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	19,51	93,2	243	0,321
2500	25,57	97,7	232	0,336
3000	30,49	97,1	233	0,334
3500	32,15	87,8	258	0,302
4000	35,73	85,3	266	0,294
4500	37,21	79,0	287	0,272
5000	37,25	71,2	319	0,245



Graf 7.5: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby LPG po úpravě a benzínu

7.1.2 Použití zemního plynu

Při provozu daného motoru na NG (zemní plyn) bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Plynný NG je vefukován do sacího kanálu. Hodnoty vypočítaných parametrů pro NG s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.7.

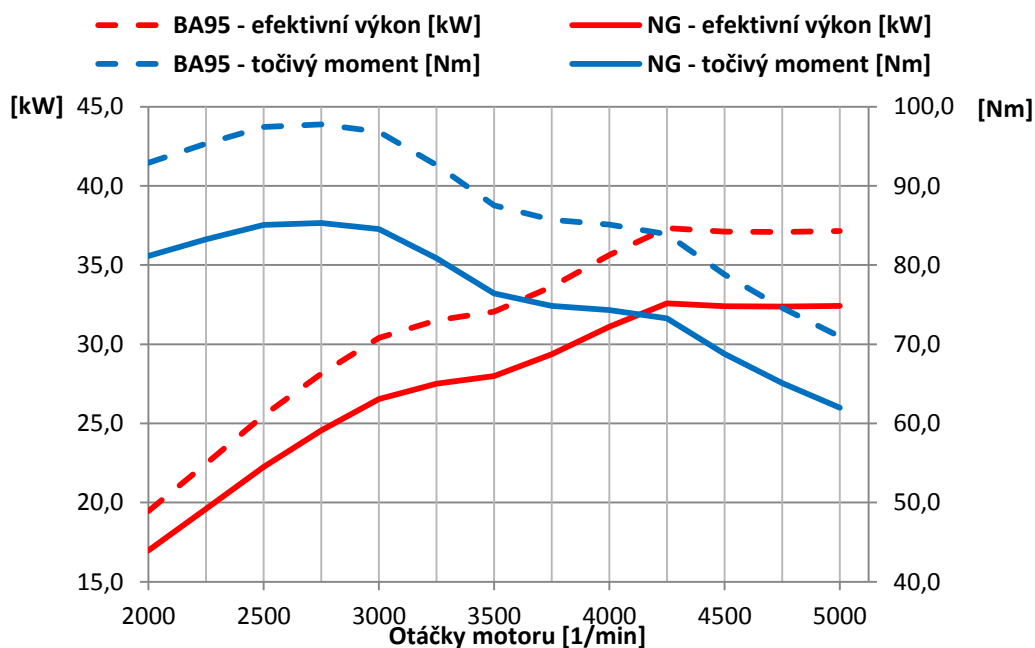
Tab. 7.7: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	16,98	81,1	238
2500	22,26	85,1	227
3000	26,55	84,5	228
3500	27,99	76,4	253
4000	31,11	74,3	260
4500	32,40	68,8	280
5000	32,43	62,0	311

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a NG $P_{e/NG}$ vyjde:

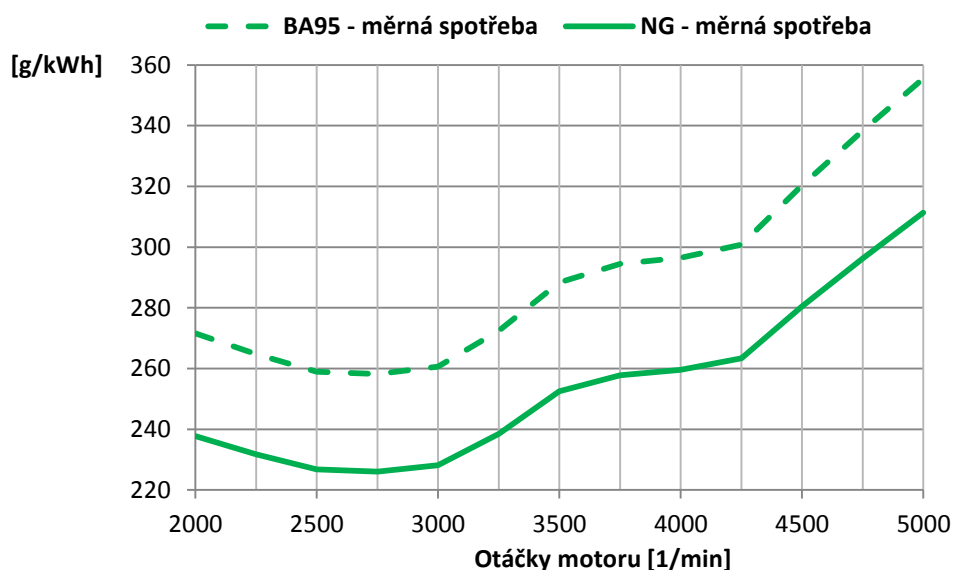
$$\frac{P_{e/NG}}{P_{e/BA95}} = 0,873$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na NG o 12,7 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu NG v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.6.



Graf 7.6: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu NG a benzínu

Měrná spotřeba NG $m_{pe/NG}$ klesne o 12,4 %. Průběh měrné spotřeby NG v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.7.



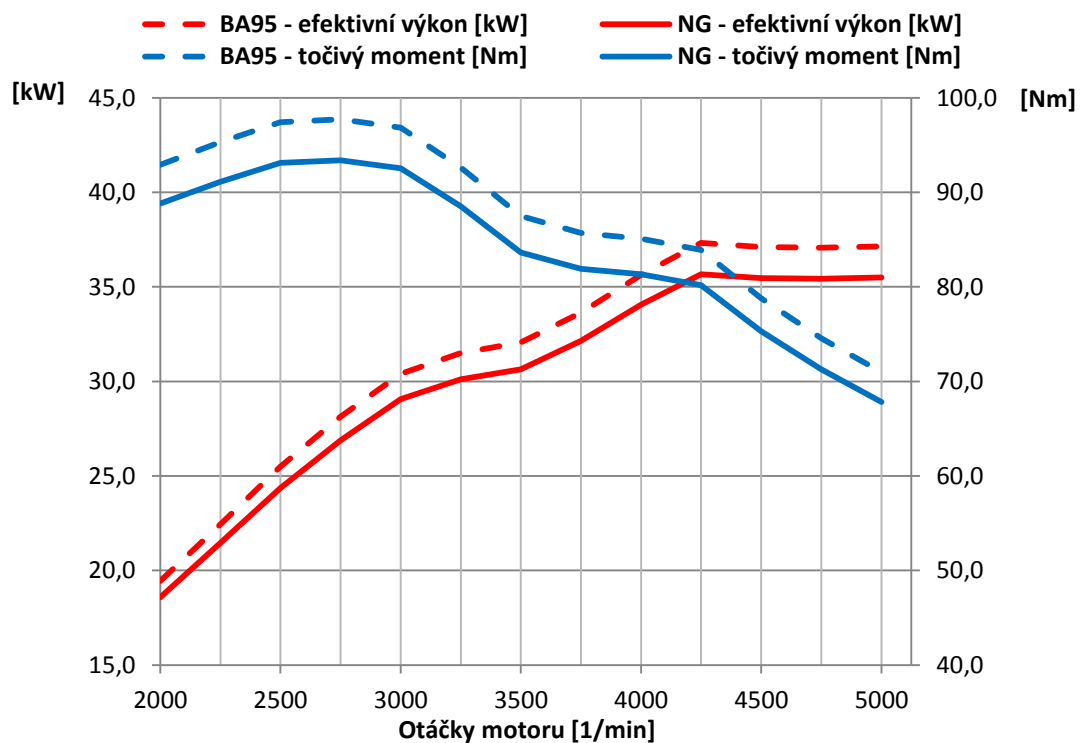
Graf 7.7: Porovnání průběhu měrné spotřeby NG a benzínu

Zvýšení výkonových parametrů motoru provozovaného na zemní plyn je možné realizovat zvýšením kompresního poměru (až 14 : 1) nebo obohacením směsi, což zvýší hmotnostní tok paliva a může vést k zvýšení emisí, ale sníží teplotu spalín. Výkonovou ztrátu lze také vyrovnat přepřínováním, které zvyšuje množství dopravené směsi do spalovacího prostoru, ale vyžaduje značné konstrukční úpravy motoru.

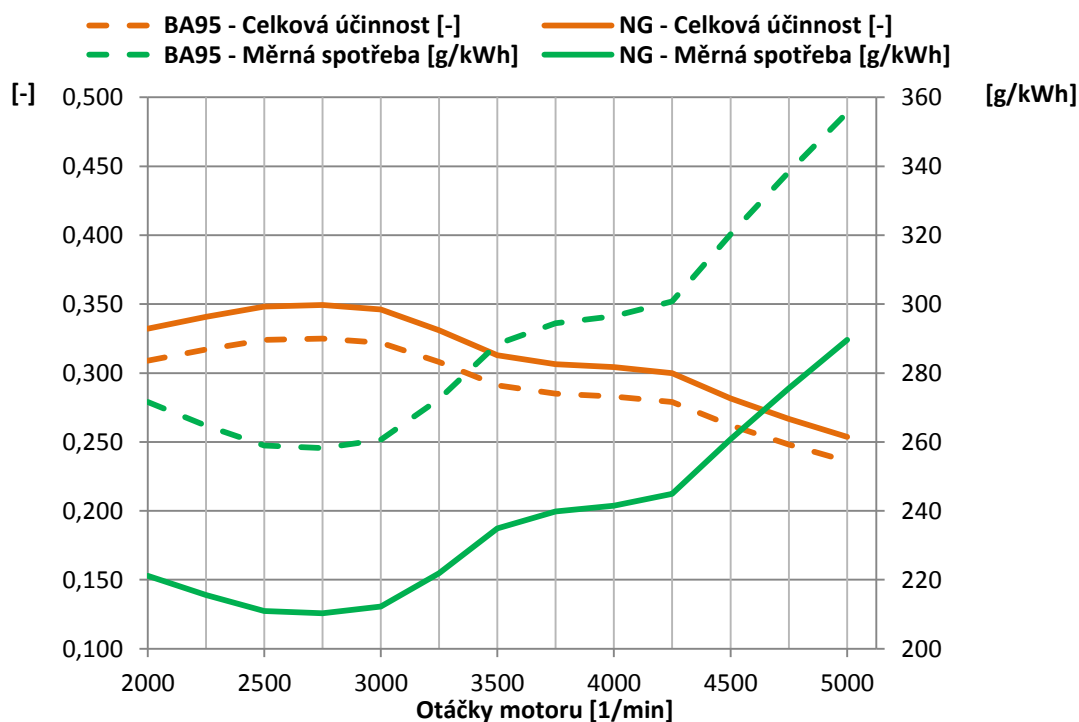
V případě zvýšení kompresního poměru na $\epsilon = 14$ dojde k zvýšení celkové účinnosti a s tím souvisejících výkonových parametrů. Dalšího srovnatelného zvýšení lze dosáhnout navýšením hmotnostního toku paliva obohacením směsi na $\lambda = 0,95$. Výkonové parametry po této úpravě jsou proti benzínu nižší už jen o 4,4 %, celková účinnost se zvýší o 7,5 % a měrná spotřeba klesne na úroveň o 18,6 % nižší než měrná spotřeba benzínu. Hodnoty vybraných parametrů po úpravě jsou v tabulce 7.8 a znázorněné průběhy sledovaných parametrů v grafech 7.8 a 7.9.

Tab. 7.8: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na NG po úpravách

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	18,59	88,8	221	0,332
2500	24,37	93,1	211	0,348
3000	29,06	92,5	212	0,346
3500	30,64	83,6	235	0,313
4000	34,05	81,3	242	0,304
4500	35,47	75,3	261	0,282
5000	35,50	67,8	290	0,254



Graf 7.8: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu NG po úpravě a benzínu



Graf 7.9: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby NG po úpravě a benzínu

7.1.3 Použití bioplynu

Při provozu daného motoru na bioplyn (BP) bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Plyný bioplyn je stejně jako v případě zemního plynu vefukován do sacího kanálu. Hodnoty vypočítaných parametrů pro bioplyn s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.9.

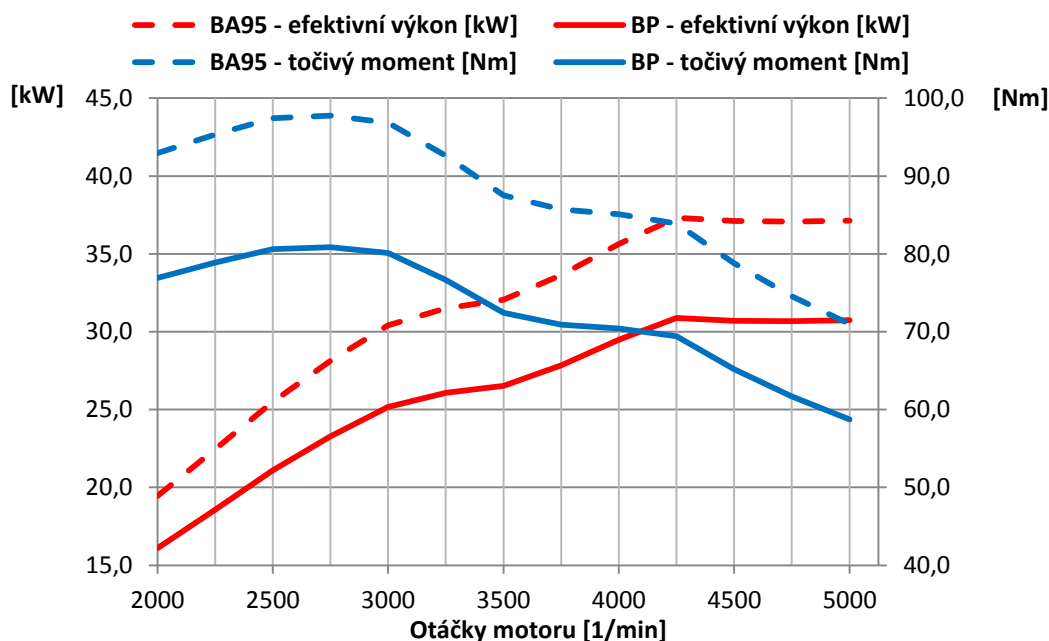
Tab. 7.9: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	16,10	76,9	578
2500	21,10	80,6	550
3000	25,16	80,1	553
3500	26,53	72,4	612
4000	29,48	70,4	630
4500	30,71	65,2	680
5000	30,73	58,7	755

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a bioplyn $P_{e/BP}$ vyjde:

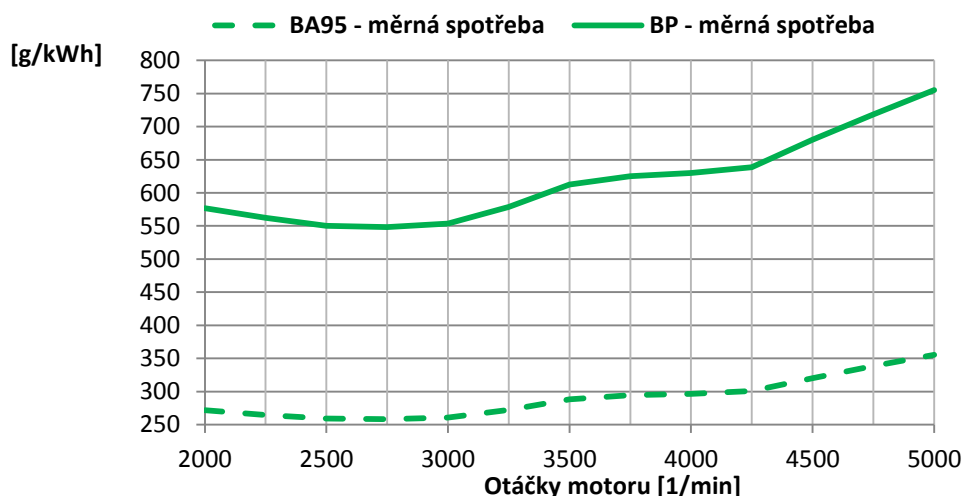
$$\frac{P_{e/BP}}{P_{e/BA95}} = 0,827$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na bioplyn o 17,3 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu bioplynu v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.10.



Graf 7.10: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu bioplynu a benzínu

Měrná spotřeba bioplynu $m_{pe/BP}$ stoupne o 112,4 % proti původnímu benzínu. Nízká výhřevnost bioplynu je ovlivněna zejména vysokým podílem oxidu uhličitého (CO_2). Průběh měrné spotřeby bioplynu v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.11.



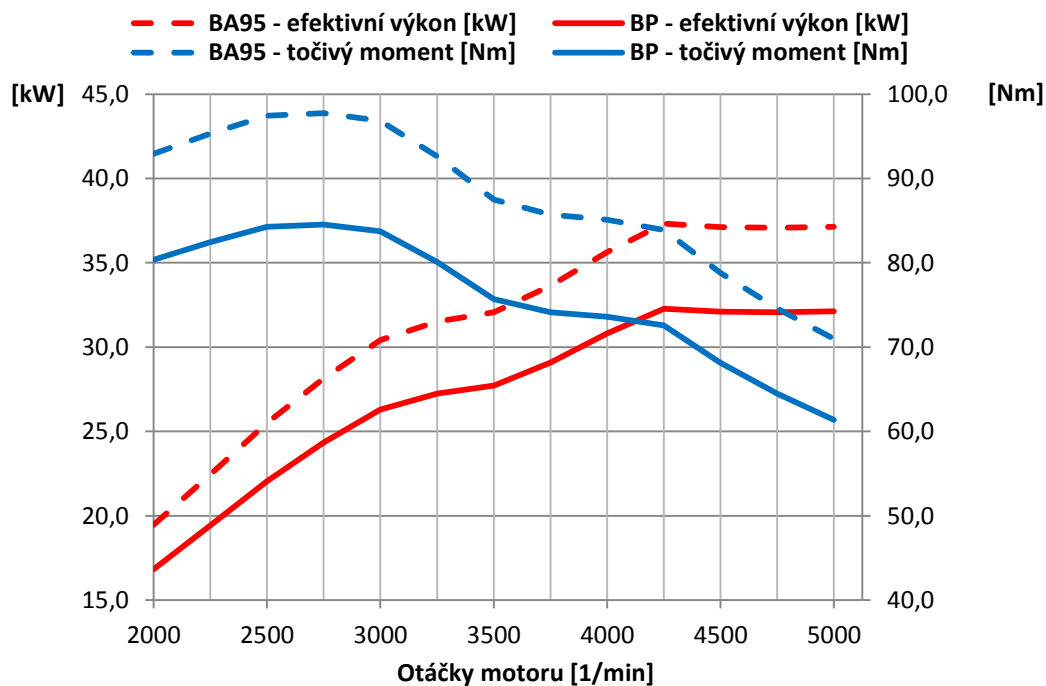
Graf 7.11: Porovnání průběhu měrné spotřeby bioplynu a benzínu

Zvýšení výkonových parametrů motoru provozovaného na bioplyn je možné realizovat zvýšením kompresního poměru díky vysokému metanovému číslu, které je vyšší než 100 právě díky vysokému obsahu nehořlavého CO_2 nebo obohacením směsi, což zvýší hmotnostní tok paliva, ale nemá příliš značný vliv na výsledné parametry. Vhodnější je ale úprava samotného bioplynu na kvalitu zemního plynu. Výkonovou ztrátu lze také vyrovnat přeplňováním, které zvyšuje množství dopravené směsi do spalovacího prostoru, ale vyžaduje značné konstrukční úpravy motoru.

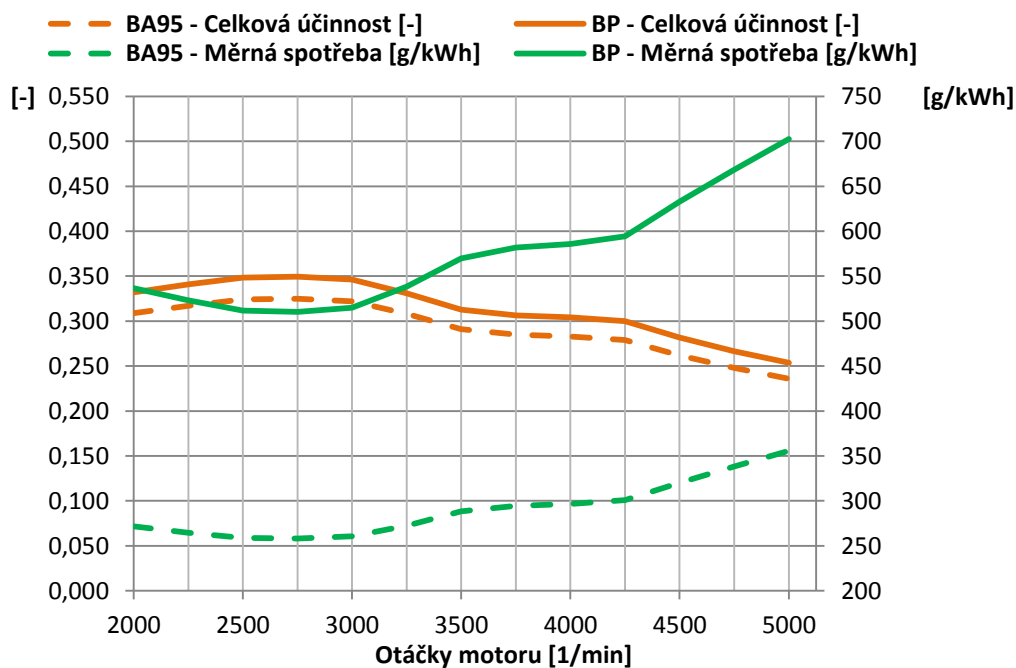
Při uvažování zvýšení kompresního poměru např. na $\epsilon = 14$ stejně jako v případě zemního plynu dojde k nárůstu celkové účinnosti o 7,5 %. Díky tomu dojde k nárůstu výkonových parametrů na úroveň o 13,5 % nižší proti benzínu a měrná spotřeba klesne na navýšení o 97,6 % v porovnání s benzínem. Z výsledných hodnot je zřejmé, že je vhodnější vyčištění bioplynu na kvalitu zemního plynu. Výsledné hodnoty sledovaných parametrů jsou v tabulce 7.10 a průběhy těchto parametrů jsou v grafech 7.12 a 7.13.

Tab. 7.10: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na bioplyn po úpravě

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	16,82	80,4	537	0,332
2500	22,05	84,3	512	0,348
3000	26,30	83,7	515	0,346
3500	27,73	75,7	570	0,313
4000	30,82	73,6	586	0,304
4500	32,10	68,1	633	0,282
5000	32,12	61,4	703	0,254



Graf 7.12: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu bioplynu po úpravě a benzínu



Graf 7.13: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby bioplynu po úpravě a benzínu

7.1.4 Použití generátorového plynu

Při provozu daného motoru na generátorový plyn (dále GP) bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Plyný GP je stejně jako v předchozích případech vefukován do sacího kanálu. Hodnoty vypočítaných parametrů pro GP s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.11.

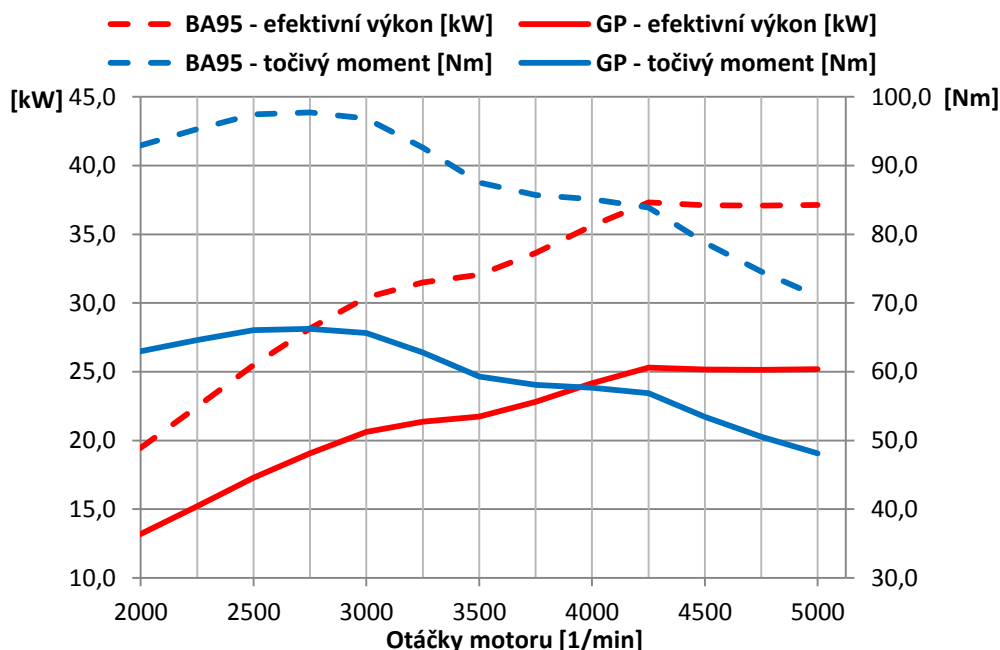
Tab. 7.11: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	13,19	63,0	2511
2500	17,28	66,0	2395
3000	20,61	65,6	2410
3500	21,73	59,3	2666
4000	24,15	57,7	2742
4500	25,15	53,4	2961
5000	25,18	48,1	3288

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a GP $P_{e/GP}$ vyjde:

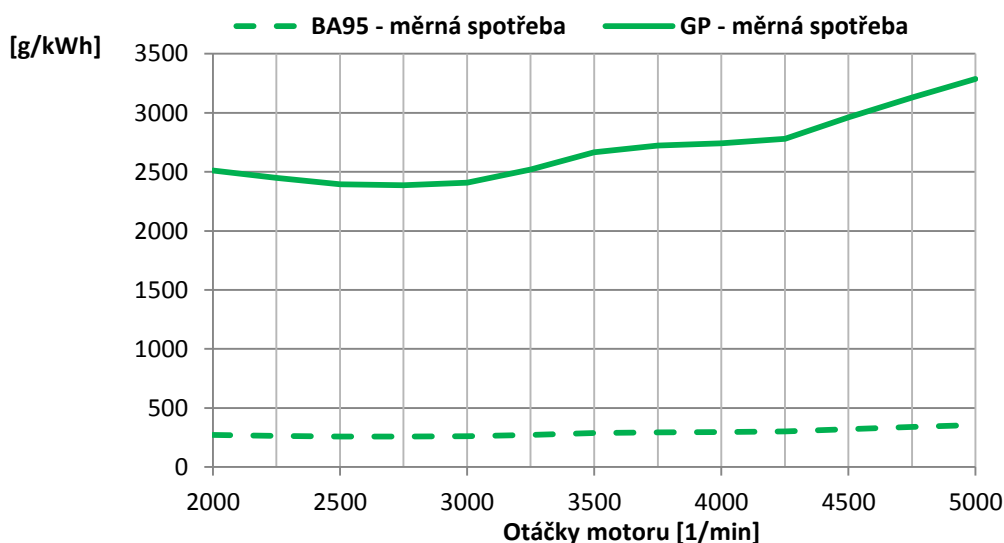
$$\frac{P_{e/GP}}{P_{e/BA95}} = 0,678$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na GP o 32,2 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu GP v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.14.



Graf 7.14: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu GP a benzínu

Měrná spotřeba GP $m_{pe/GP}$ stoupne o 824,6 %. Velmi nízká výhřevnost GP je zejména ovlivněna vysokým podílem dusíku. Průběh měrné spotřeby GP v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.15.



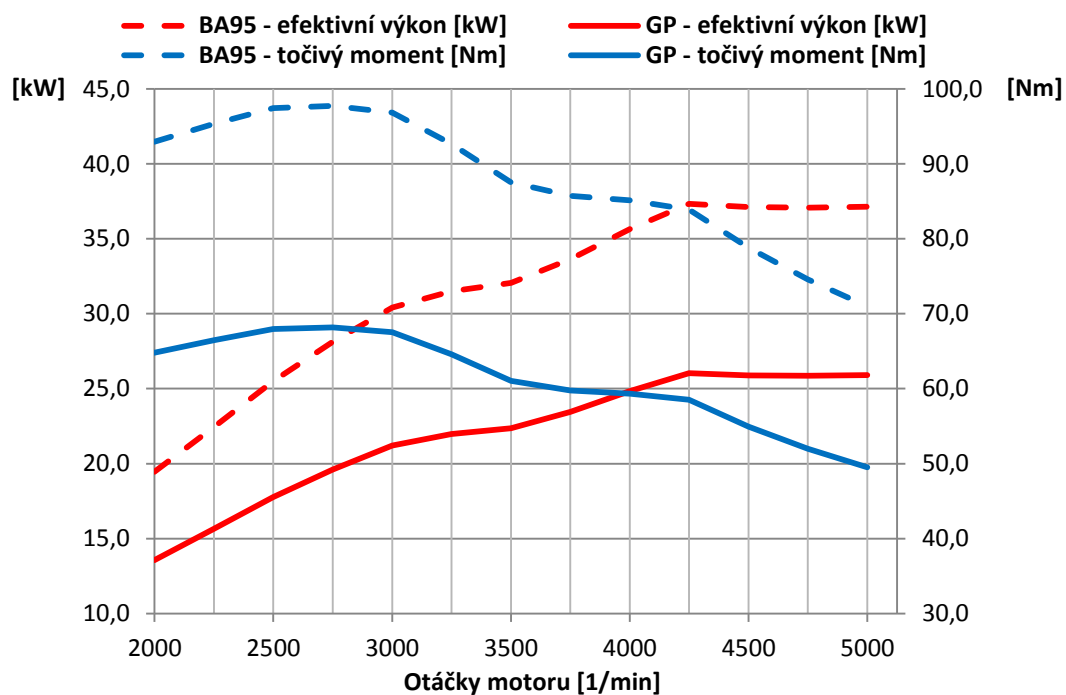
Graf 7.15: Porovnání průběhu měrné spotřeby GP a benzínu

Zvýšení výkonových parametrů motoru provozovaného na GP je možné v tomto případě realizovat zvýšením kompresního poměru díky relativně vysokému metanovému číslu nebo obohacením směsi, což zvýší hmotnostní tok paliva, ale nemá příliš značný vliv na výsledné parametry. Výkonovou ztrátu lze také vyrovnat přeplňováním, které zvyšuje množství dopravené směsi do spalovacího prostoru, ale vyžaduje značné konstrukční úpravy motoru.

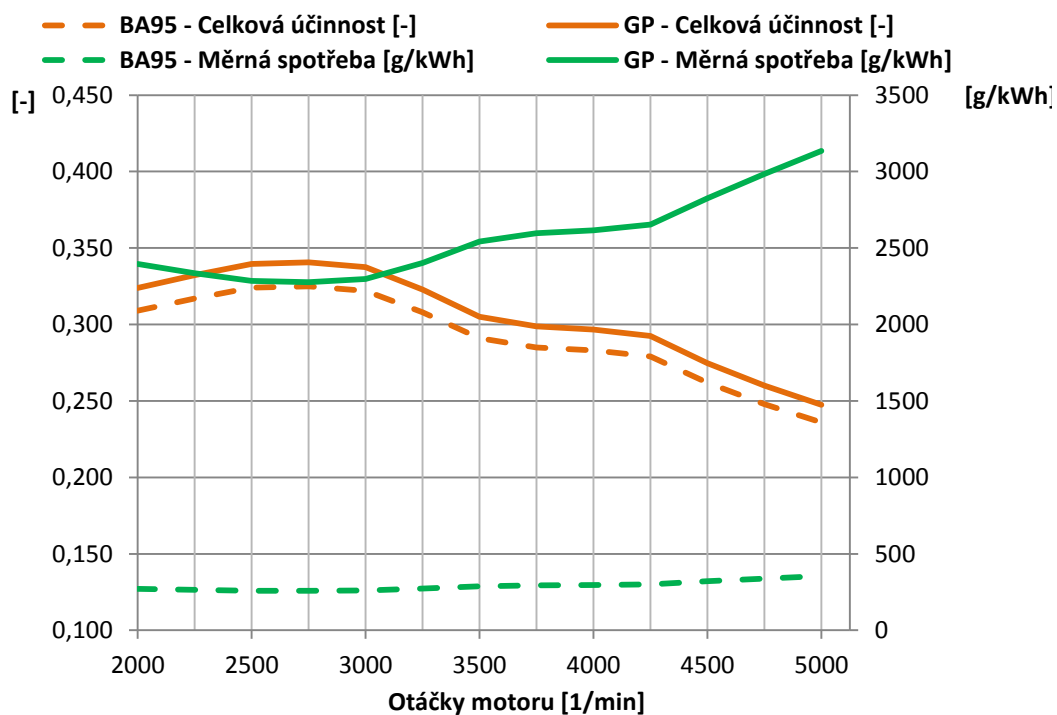
Při uvažování zvýšení kompresního poměru např. na $\epsilon = 12,5$ dojde k nárůstu celkové účinnosti o 4,8 %. Díky tomu dojde k nárůstu výkonových parametrů na úroveň o 30,3 % nižší proti benzínu a měrná spotřeba klesne na navýšení o 781, 9% v porovnání s benzínem. Z výsledných hodnot je zřejmé, že je vyšší kompresní poměr příliš parametry nezlepší. Výsledné hodnoty sledovaných parametrů jsou v tabulce 7.12 a průběhy těchto parametrů jsou v grafech 7.16 a 7.17.

Tab. 7.12: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na GP po úpravě

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	13,57	64,8	2395	0,324
2500	17,78	68,0	2284	0,340
3000	21,20	67,5	2298	0,338
3500	22,36	61,0	2543	0,305
4000	24,85	59,4	2615	0,297
4500	25,88	54,9	2825	0,275
5000	25,90	49,5	3136	0,247



Graf 7.16: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu GP po úpravě a benzínu



Graf 7.17: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby GP po úpravě a benzínu

7.1.5 Použití vodíku

Při provozu daného motoru na vodík (H_2) bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Plynný vodík je vefukován do sacího kanálu.

Hodnoty vypočítaných parametrů pro vodík s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.13.

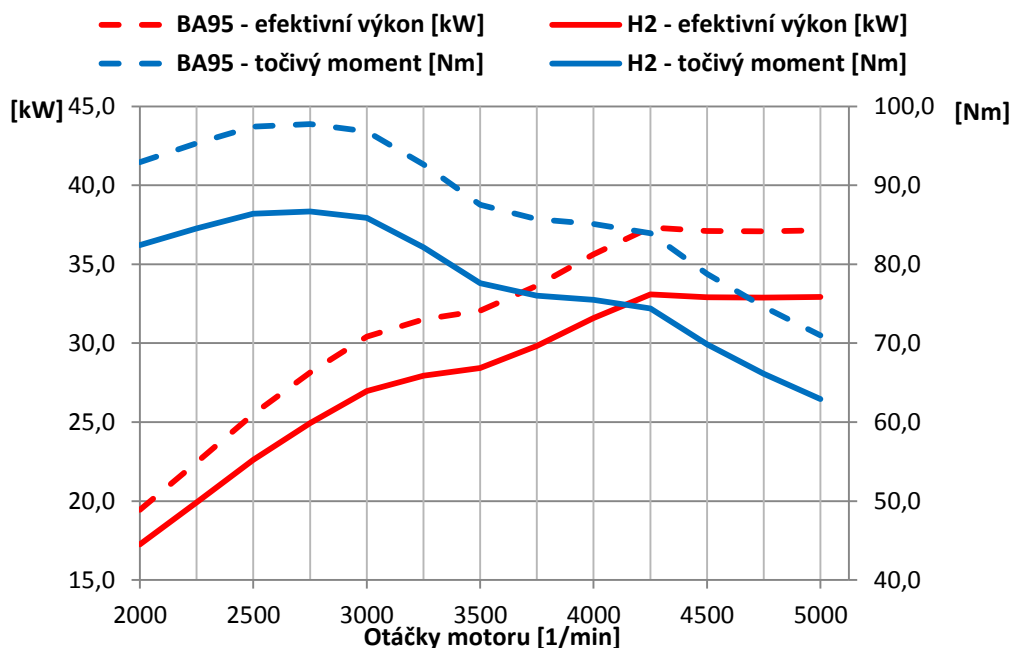
Tab. 7.13: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	17,25	82,4	90,5
2500	22,61	86,4	86,3
3000	26,96	85,9	86,8
3500	28,43	77,6	96,1
4000	31,60	75,5	98,8
4500	32,91	69,9	106,7
5000	32,94	62,9	118,5

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a vodík P_{e/H_2} vyjde:

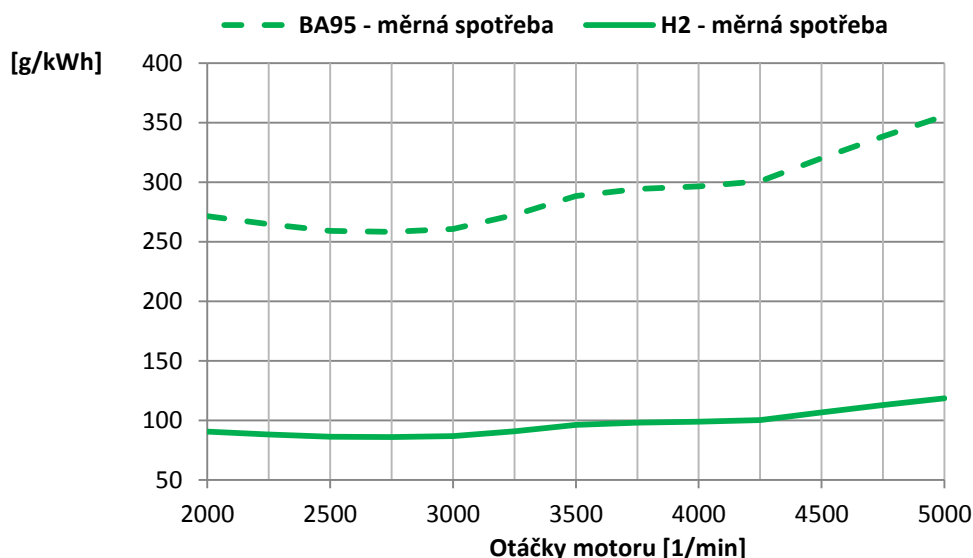
$$\frac{P_{e/H_2}}{P_{e/BA95}} = 0,887$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na vodík o 11,3 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu vodíku v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.18.



Graf 7.18: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu vodíku a benzínu

Měrná spotřeba vodíku m_{pe/H_2} klesne o 66,7 % proti benzínu. Průběh měrné spotřeby vodíku v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.19.



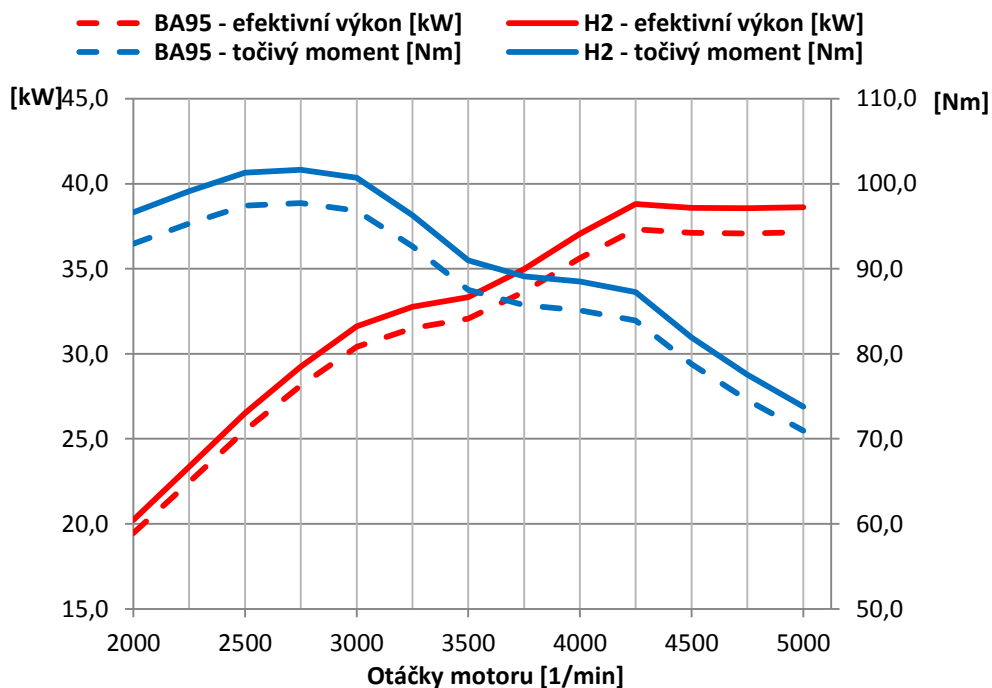
Graf 7.19: Porovnání průběhu měrné spotřeby vodíku a benzínu

Zvýšení výkonových parametrů motoru provozovaného na vodík je možné v tomto případě realizovat obohacením směsi, což zvýší hmotnostní tok paliva, směs s bohatostí $\lambda = 0,839$ by vyrovnala ztrátu výkonových parametrů, jenže kvůli nulovému metanovému číslu vodíku nelze zvýšit kompresní poměr – dokonce by bylo třeba jej snížit, a proto dojde vlivem snížení kompresního poměru ke snížení celkové účinnosti. Výslednou výkonovou ztrátu lze kompenzovat pouze přeplyňováním, které zvyšuje množství dopravené směsi do spalovacího prostoru, toto řešení ale vyžaduje značné konstrukční úpravy motoru.

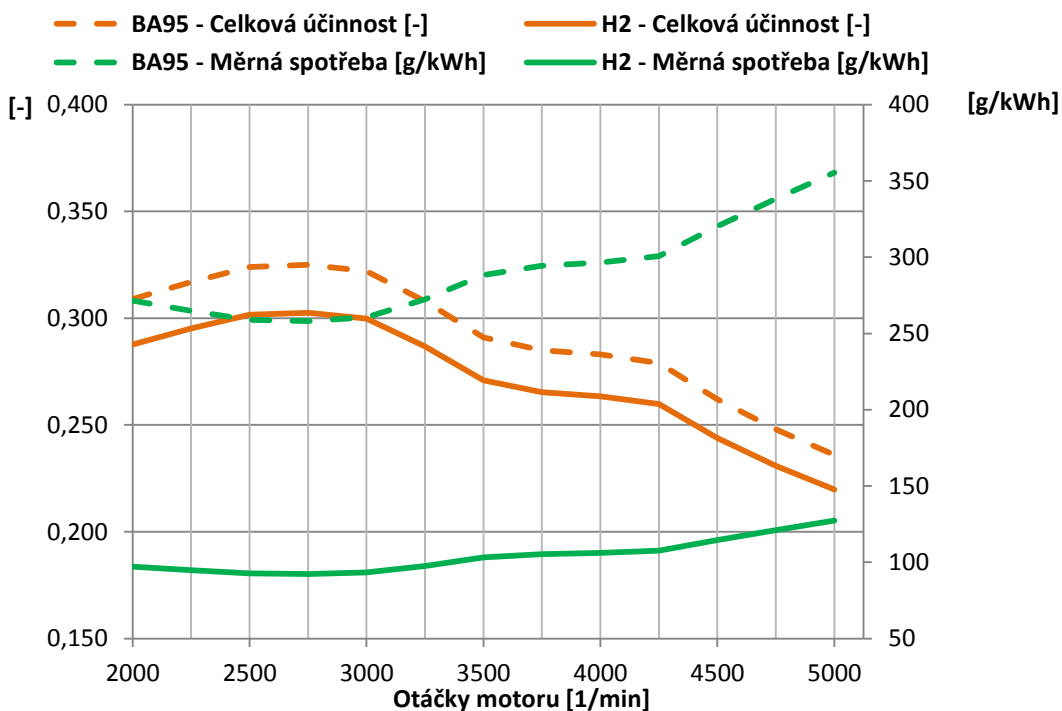
Při uvažování snížení kompresního poměru např. na $\varepsilon = 8$, navýšením plnicího tlaku na $p_{pl} = 0,16 \text{ MPa}$ a ochuzením směsi na $\lambda = 1,5$, dojde k poklesu celkové účinnosti o 6,9 %, k nárůstu výkonových parametrů na úroveň o 4,0 % vyšší proti benzínu a měrná spotřeba stoupne na hodnotu o 64, 2% nižší v porovnání s benzínem. Výsledné hodnoty sledovaných parametrů jsou v tabulce 7.14 a průběhy těchto parametrů jsou v grafech 7.20 a 7.21.

Tab. 7.14: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na vodík po úpravách

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	20,23	96,6	97,2	0,288
2500	26,51	101,3	92,7	0,302
3000	31,62	100,7	93,3	0,300
3500	33,33	91,0	103,2	0,271
4000	37,05	88,5	106,1	0,263
4500	38,59	81,9	114,6	0,244
5000	38,62	73,8	127,3	0,220



Graf 7.20: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu vodíku po úpravě a benzínu



Graf 7.21: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby vodíku po úpravě a benzínu

7.1.6 Použití E85

Při provozu daného motoru na palivo E85 bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. E85 je vstřikováno do sacího kanálu původními vstřikovacími tryskami za předpokladu (viz kap. 7.1), že splní požadavek hmotnostního toku paliva 1,5x vyššího než v případě benzínu. Hodnoty vypočítaných parametrů pro E85 s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.15.

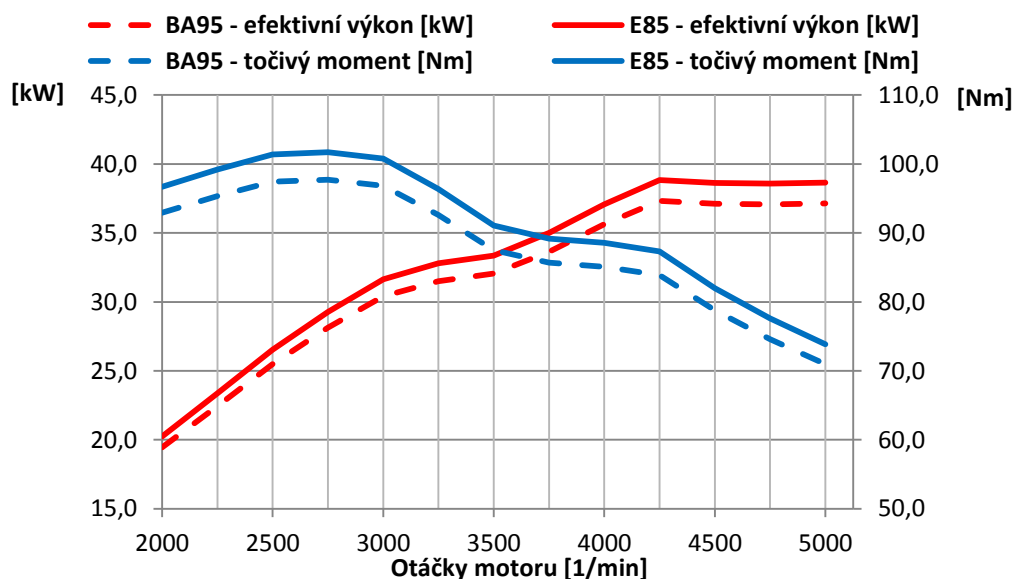
Tab. 7.15: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P _e [kW]	Točivý moment M _t [Nm]	Měrná spotřeba m _{pe} [g/kWh]
2000	20,24	96,7	400
2500	26,53	101,4	382
3000	31,64	100,8	384
3500	33,36	91,1	425
4000	37,08	88,6	437
4500	38,62	82,0	472
5000	38,65	73,9	524

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín P_{e/BA95} a vodík P_{e/E85} vyjde:

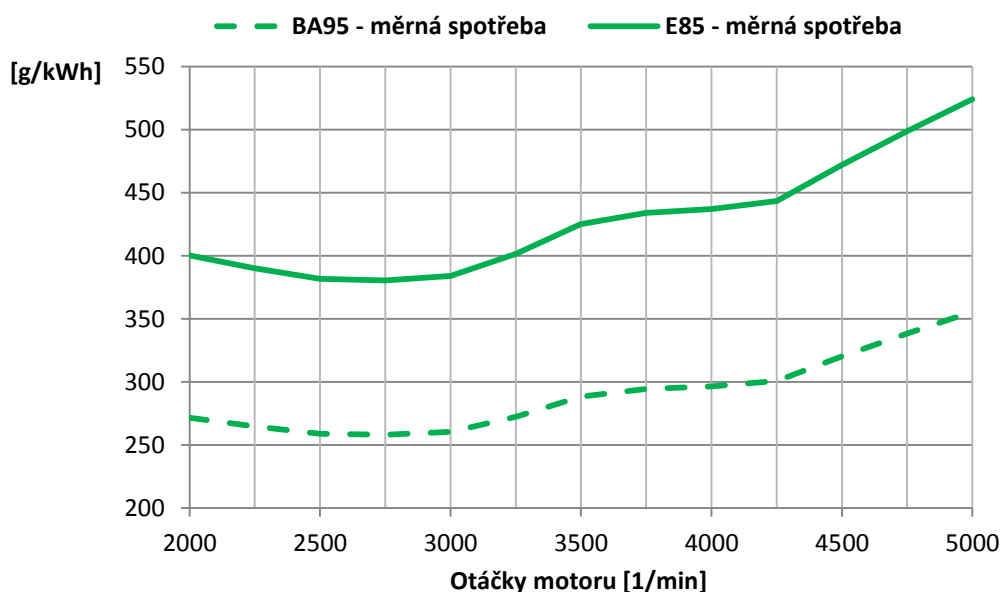
$$\frac{P_{e/E85}}{P_{e/BA95}} = 1,041$$

Což je nárůst výkonových parametrů při provozu na E85 o 4,1 %, způsobený vyšším výparným teplem etanolu. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu E85 v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.22.



Graf 7.22: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu E85 a benzínu

Měrná spotřeba E85 $m_{pe/E85}$ stoupne o 47,4 % proti benzínu. Průběh měrné spotřeby E85 v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.23.



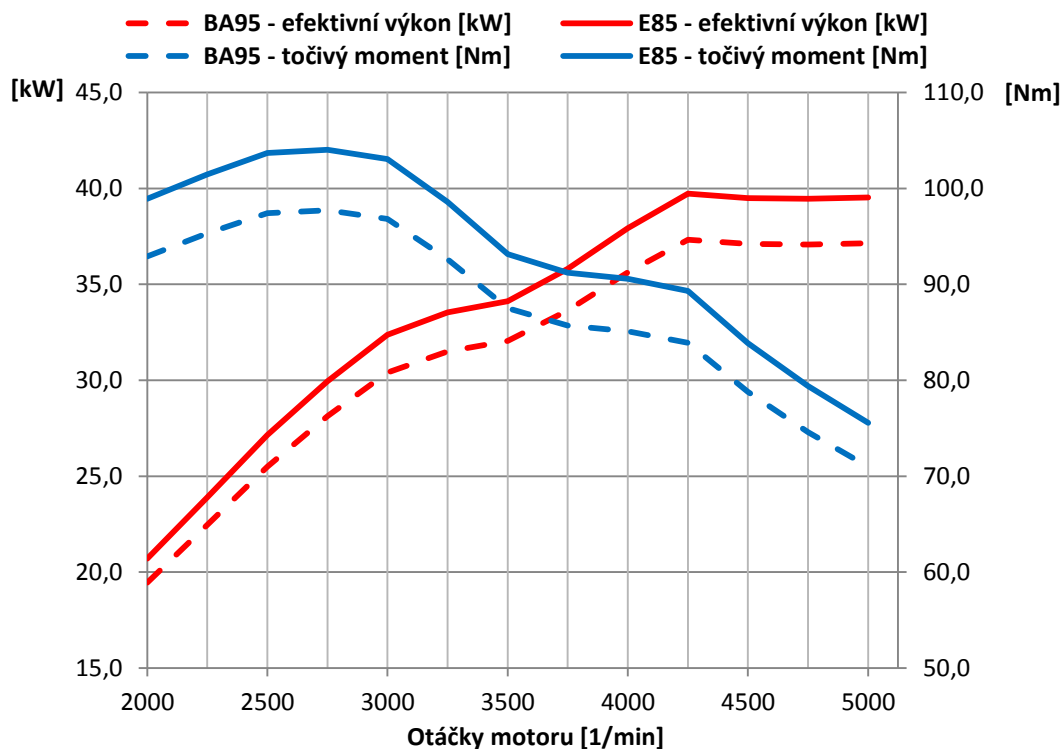
Graf 7.23: Porovnání průběhu měrné spotřeby E85 a benzínu

Výkonové parametry motoru provozovaného na E85 není nutné zvyšovat, avšak díky vyššímu oktanovému číslu E85 proti benzínu je možné v tomto případě zvýšit kompresní poměr, což zvýší celkovou účinnost a sníží měrnou spotřebu paliva. Se zvýšením celkové účinnosti také souvisí zvýšení výkonových parametrů motoru.

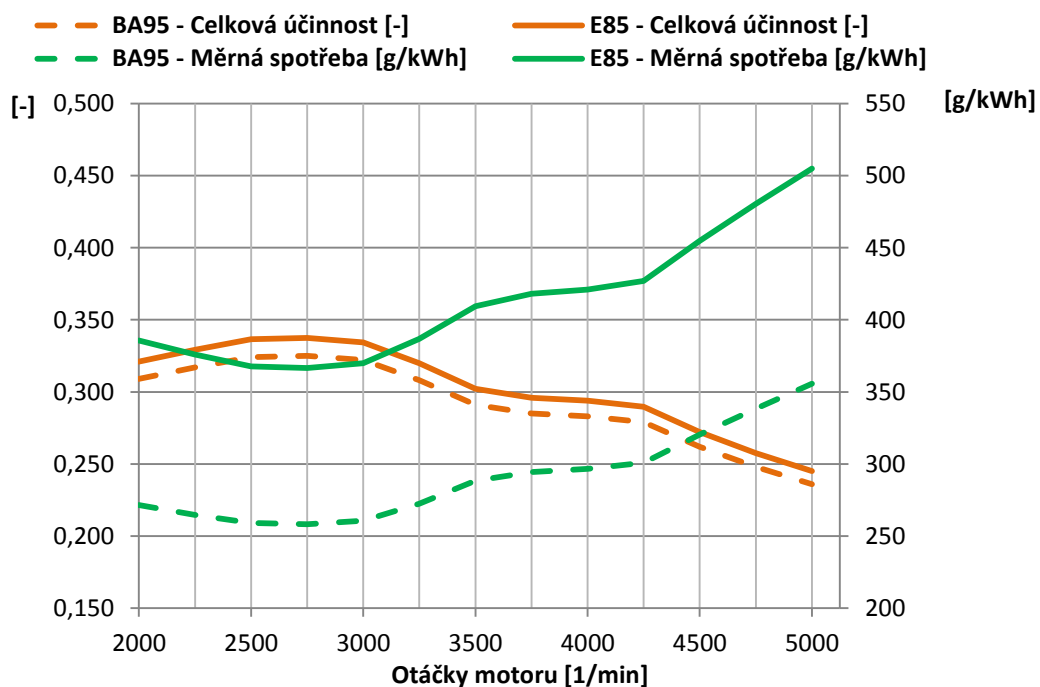
V případě zvýšení kompresního poměru na $\epsilon = 12$ dojde k zvýšení celkové účinnosti o 3,8 % a snížení měrné spotřeby paliva na hodnotu o 42 % vyšší proti benzínu a nárůst výkonových parametrů vyjde o 6,4 % vyšší než při provozu na benzín. Výsledné hodnoty sledovaných parametrů jsou v tabulce 7.16 a průběhy těchto parametrů jsou v grafech 7.24 a 7.25.

Tab. 7.16: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na E85 po úpravě

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]	Celková účinnost η_{celk} [-]
2000	20,71	98,9	386	0,321
2500	27,14	103,7	368	0,336
3000	32,37	103,1	370	0,334
3500	34,13	93,2	409	0,302
4000	37,93	90,6	421	0,294
4500	39,50	83,9	455	0,272
5000	39,54	75,5	505	0,245



Graf 7.24: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu E85 po úpravě a benzínu



Graf 7.25: Porovnání průběhu celkové účinnosti měrné spotřeby E85 po úpravě a benzínu

7.1.7 Použití butanolu

Při provozu daného motoru na butanol bez konstrukčních úprav za předpokladů a zjednodušení uvedených v kapitole 7.1. Butanol je vstřikován do sacího kanálu původními vstřikovacími tryskami. Hodnoty vypočítaných parametrů pro butanol s použitím rovnic (1), (2), (5) a (6) z kapitoly 7.1 jsou uvedeny v tabulce 7.17.

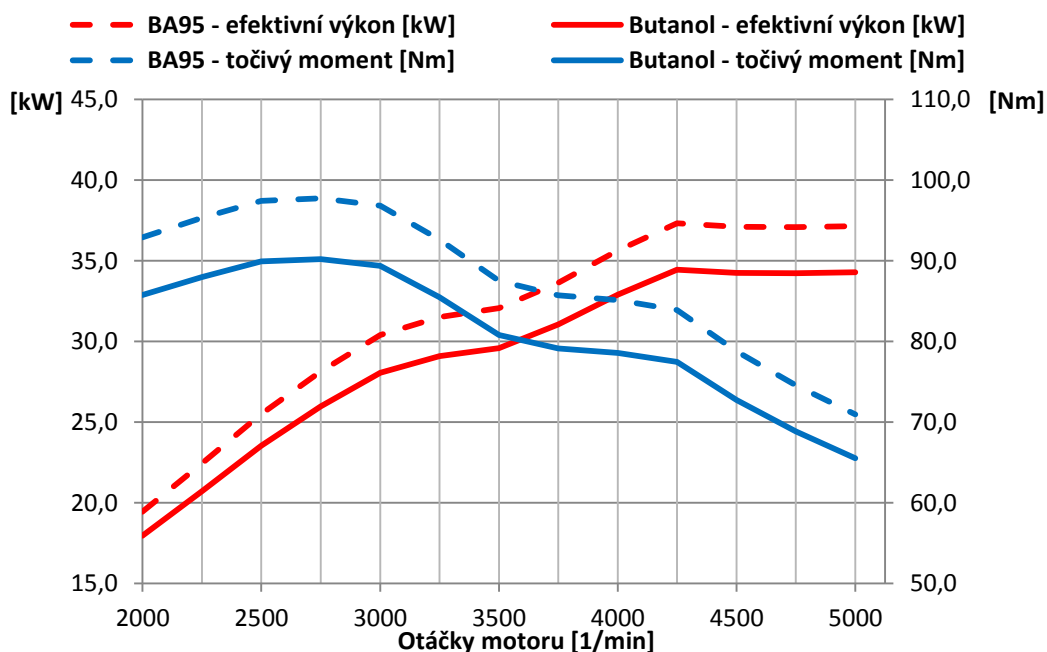
Tab. 7.17: Hodnoty motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW při provozu na butanol

Otáčky n [1/min]	Efektivní výkon P_e [kW]	Točivý moment M_t [Nm]	Měrná spotřeba m_{pe} [g/kWh]
2000	17,96	85,8	358
2500	23,54	89,9	342
3000	28,07	89,4	344
3500	29,59	80,8	381
4000	32,89	78,6	391
4500	34,26	72,7	423
5000	34,29	65,5	469

Při porovnání efektivního výkonu při provozu na benzín $P_{e/BA95}$ a vodík $P_{e/butanol}$ vyjde:

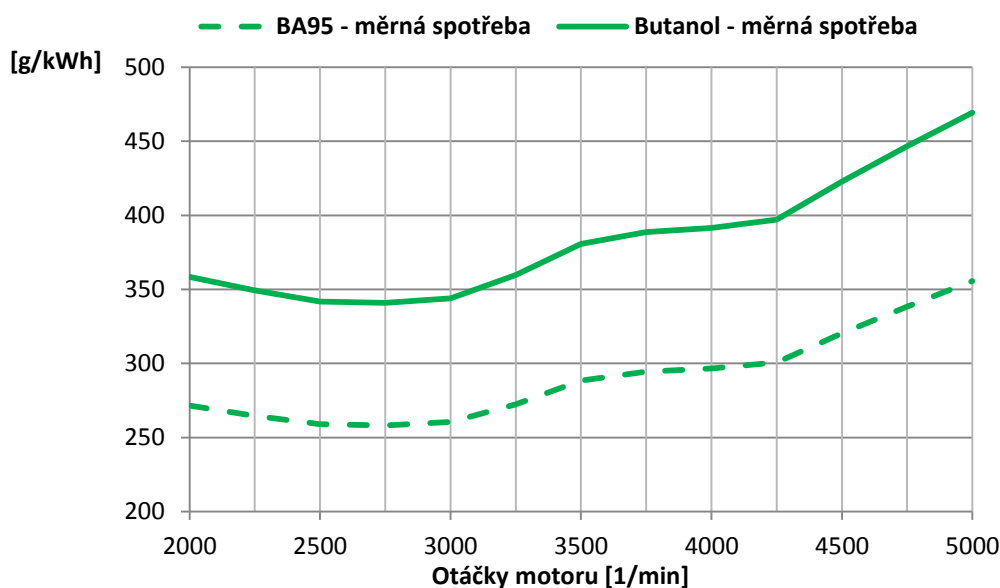
$$\frac{P_{e/butanol}}{P_{e/BA95}} = 0,923$$

Což je pokles výkonových parametrů při provozu na butanol o 7,7 %. Průběh efektivního výkonu a točivého momentu butanolu v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.26.



Graf 7.26: Porovnání průběhu efektivního výkonu a točivého momentu butanolu a benzínu

Měrná spotřeba butanolu $m_{pe/butanol}$ stoupne o 32,0 % proti benzínu. Průběh měrné spotřeby butanolu v porovnání s benzínem je znázorněn v grafu 7.27.



Graf 7.27: Porovnání průběhu měrné spotřeby butanolu a benzínu

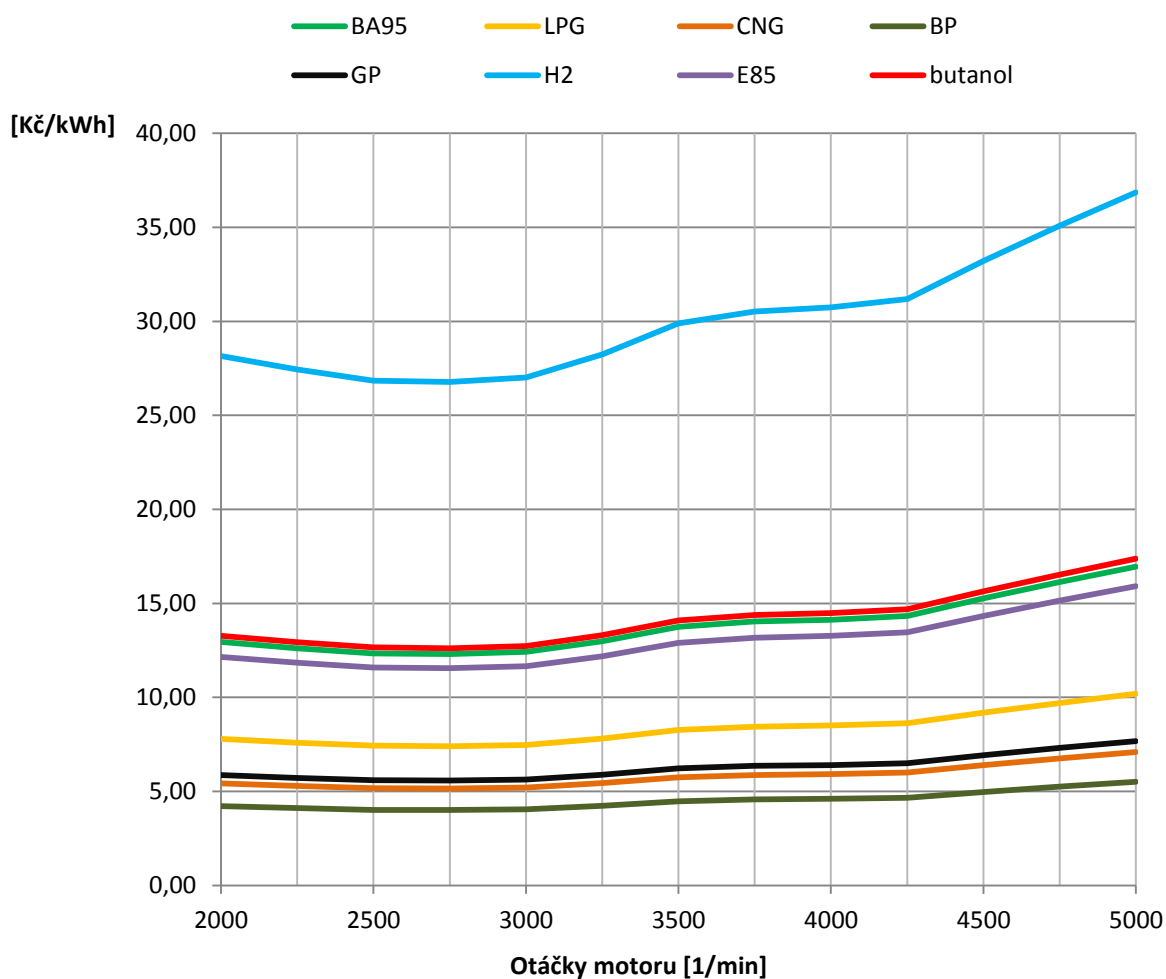
Butanol má oktanové číslo téměř stejné jako benzín BA95, proto pro zvýšení výkonových parametrů není vhodné zvýšení kompresního poměru, další možností je obohacení směsi, které však více ovlivní emise než samotný výkon. Možné je i přeplňování, ale vzhledem k náročnosti úpravy a nepříliš vysokému aktuálnímu rozdílu výkonových parametrů nemá význam.

7.2 Porovnání provozních a ekonomických parametrů motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW na benzín a na jednotlivá alternativní paliva

Nejvýznamnějšími parametry pro porovnání vybraných alternativních paliv (LPG, zemní plyn – v tomto případě stlačený – CNG, bioplyn – BP, generátorový plyn – GP, vodík, E85 a butanol) s benzínem BA95 jsou: maximální efektivní výkon P_{eMAX} , maximální točivý moment M_{tMAX} , minimální měrná spotřeba paliva m_{peMIN} , minimální spotřeba energie paliva na 1 kWh, tržní cena 1 kWh paliva (BA95 – Natural 95 – 4,00 Kč/kWh [49], LPG – 2,50 Kč/kWh [52], CNG – 1,80 Kč/kWh [43], BP – 1,40 Kč/kWh [8], GP – 1,90 Kč/kWh [3], vodík – 8,10 Kč/kWh [26], E85 – 3,90 Kč/kWh [49], butanol – 4,10 Kč/kWh [53]). Porovnání parametrů sledovaných paliv při použití v motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW po úpravách je v tabulce 7.18. Průběhy nákladů na provoz 1 kWh v závislosti na otáčkách pro všechna sledovaná paliva jsou znázorněny v grafu 7.28.

Tab. 7.18: Porovnání provozních a ekonomických parametrů motoru ŠA 1,2 HTP 40kW

Palivo	BA95	LPG	CNG	BP	GP	Vodík	E85	Butanol
Sledovaný parametr								
Cena 1 kWh paliva [Kč/kWh]	4,00	2,50	1,80	1,40	1,90	8,10	3,90	4,10
$P_{e/MAX}$ (4250 1/min) [kW]	37,3	37,4	35,7	32,3	26,0	38,8	39,7	34,5
$M_{t/MAX}$ (2750 1/min) [Nm]	97,7	98,0	93,4	84,5	68,2	101,6	104,0	90,2
$m_{pe/MIN}$ (2750 1/min) [g/kWh]	258	231	210	510	2277	92	367	341
Min. spotřeba energie paliva na 1 kWh [kWh/kWh]	3,08	2,96	2,86	2,86	2,94	3,30	2,96	3,08
Min. náklady na provoz 1 kWh [Kč/kWh]	12,31	7,41	5,15	4,01	5,58	26,77	11,56	12,62
Rozdíl ceny proti BA95 [-]	1,00	0,60	0,42	0,33	0,45	2,18	0,94	1,03



Graf 7.28: Porovnání průběhů nákladů na provoz 1 kWh pro benzín a sledovaná alternativní paliva v motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW

Závěr

Problematika alternativních paliv pro zážehové motory je velmi rozsáhlá a každé z těchto paliv se vyznačuje vlastnostmi vhodnými i nevhodnými pro využití při spalování v zážehových motorech. Proto je třeba nalézt vhodný kompromis vlastností při hledání využití pro dané palivo.

Při celkovém porovnání všech sledovaných paliv je zřejmé, že zásadní faktory při ovlivňování výkonových parametrů jsou výhřevnost paliva spolu s hmotností dodaného paliva do válce, které lze ovlivnit v největší míře plnicím tlakem a teplotou nasávané směsi. Při aplikaci paliv do neupraveného motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW dosahuje nejvyšších výkonových parametrů palivo E85 (max. efektivní výkon 38,8 kW, max. točivý moment 101,7 Nm), zejména díky vysoké hodnotě výparného tepla, které značně sníží teplotu nasávané směsi a umožní větší hmotnostní naplnění válce, avšak za cenu vyšší měrné spotřeby (min. 381 g/kWh) způsobené nižší výhřevností E85 (29,1 MJ/kg). Naopak nejnižších výkonů dosahuje generátorový plyn (max. efektivní výkon 25,3 kW, max. točivý moment 66,2 Nm), což je způsobeno velmi nízkou výhřevností tohoto plynu (4,64 MJ/kg), z těchto důvodů dosahuje měrná spotřeba generátorového plynu nejvyšších hodnot (min. 2387 g/kWh). Nejnížší měrné spotřeby dosahuje vodík (min. 86 g/kWh) díky jeho vysoké výhřevnosti (128,76 MJ/kg).

Při provozu motoru na jednotlivá paliva jsou potřeba úpravy vedoucí k optimalizaci provozních a ekonomických parametrů. Každé palivo vyžaduje specifické úpravy, které jsou zejména ovlivněny kombinací úprav kompresního poměru, plnicího tlaku, bohatosti směsi, teploty nasávané směsi.

Po úpravách motoru ŠA 1,2 HTP 40 kW jsou pro určení provozních nákladů 1 kWh nejdůležitějšími faktory celková účinnost motoru a cena 1 kWh paliva. Na celkovou účinnost nebo její převrácenou hodnotu – spotřebu energie paliva na 1 kWh má největší vliv kompresní poměr, avšak neovlivňuje provozní náklady do takové míry jako, ceny 1 kWh paliv, které ovlivňuje řada faktorů z procesu WTT (cesta paliva od zdroje k nádrži). Nejnižších nákladů na provoz 1 kWh dosahuje bioplyn (min. 4,01 Kč), což je ovlivněno zejména nízkou cenou 1 kWh (1,40 Kč/kWh) a v menší míře také vysokým kompresním poměrem, jehož zvýšení umožňuje vysoké metanové číslo. Naopak nejvyšší náklady na provoz 1 kWh motoru jsou při provozu na vodík (26,77 Kč/kWh), na kterých se významně podílí vysoká cena 1 kWh vodíku (8,10 Kč/kWh).

Ideálním kompromisem mezi rozdílem výkonových parametrů a nákladů na provoz 1 kWh je CNG. Nedostatkem CNG je, že toto palivo je získáváno ze zdrojů neobnovitelných,

přesto jsou zásoby zatím značné a CNG lze získávat i čištěním bioplynu, které ale zvyšuje tržní cenu. Jako vhodná paliva se také jeví E85 a butanol, která mají srovnatelné výkonové parametry a náklady na 1 kWh s benzínem. Výhoda těchto paliv spočívá v jejich zdrojích, které jsou obnovitelné (obilí, kukuřice, cukrová řepa apod.), a v jejich kapalném skupenství za normálních podmínek, které umožňuje skladování v konvenčních palivových nádržích. Nejrozšířenější vodík v současné době není příliš perspektivní právě z důvodu vysokých nákladů na jeho výrobu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] AFDC. *Natural Gas Vehicles* [online]. 2013 [citováno 2013-3-20]. URL: <http://www.afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas.html>
- [2] ARTES INSTITUTE. *Biomass Gasification Technology and Utilisation* [online]. 1997 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://cturare.tripod.com/eng.htm>>
- [3] ASET Pvt. Ltd. *Fuel cost savings in Thermal Applications* [online]. [citováno 2013-5-20]. URL: <<http://www.ankurscientific.com/saving.htm#wbg>>
- [4] AUTOPLYN-CENTRUM, S.R.O. *Informace o přestavbě na LPG - zkušenosti, rady, odpovědi* [online]. 2012 [citováno 2013-4-10]. URL: <<http://www.auto-plyn-lpg.cz/informace-o-lpg>>
- [5] BEROUN S. – BLAŽEK J. – HOLUBEC R. – MAREŠ J. – VENCL M. *Vlastnosti vozidlového zážehového motoru při provozu na alternativní paliva CNG a LPG*. 8. Mezinárodní sympozium Motorová paliva 2008, pp. 376 - 389. Slovnaft Bratislava, Tatranské Matliare, 2008. ISBN 978-80-969710-2-2 [citováno 2013-5-8].
- [6] BEROUN S. – ŠTECHR V. *Výkonové a emisní parametry plynových motorů kogeneračních jednotek při provozu na paliva různé kvality*. 7th International Symposium MOTOR FUELS 06. MF 2337, Slovnaft, Inc. Bratislava. Tatranské Matliare 2006, p. 434 - 451. ISBN 80-968011-3-9 [citováno 2013-4-20]. URL: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2006/2006_100_01.pdf>
- [7] BIOPROFIT. *Anaerobní technologie* [online]. 2007 [citováno 2013-3-20]. URL: <http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm>
- [8] BIOPROFIT. *Jak využít bioplyn?* [online]. 2007 [citováno 2013-5-20]. URL: <http://www.bioplyn.cz/at_bioplyn.htm>
- [9] CNG COMPANY S.R.O. *Volkswagen Passat 1.4 TSI EcoFuel* [online]. 2008 [citováno 2013-4-15]. URL: <http://www.cngcompany.cz/56-volkswagen_passat_1.4_tsi_ecofuel>
- [10] ČESKÝ SLOVNÍK ONLINE. *Schéma bioplynové stanice* [online]; 2012 [citováno 2013-4-15]. URL: <<http://slovníkonline.com/img/1040-schema-bioplyn-stanice-cz-300dp.jpg>>
- [11] DLOUHÝ P. – JANÍK L. *Bezpečnost* [online]. 1. 6. 2007 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/496-bezpecnost>>
- [12] DLOUHÝ P. – JANÍK L. *Skladování vodíku I* [online]. 17. 5. 2007 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/495-skladovani-vodiku-i>>
- [13] DLOUHÝ P. – JANÍK L. *Skladování vodíku II* [online]. 29. 5. 2007 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/494-skladovani-vodiku-ii>>
- [14] DOUCEK A. *Výroba vodíku z biomasy* [online]. 4. 2. 2008 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/434-vyroba-vodiku-z-biomasy>>
- [15] ETHANOLENERGY. *Technologie výroby bioetanolu* [online]. [citováno 2013-4-23]. URL: <<http://www.ethanolenenergy.cz/technologie>>
- [16] FLEXCAR.CZ. *Vše o Ethanolu E85* [online]. 2012 [citováno 2013-4-23]. URL: <<http://www.flexcar.cz/vse-o-ethanolu-e85>>
- [17] FLEXCAR.CZ. *Konverzní sada ELOTEC EC-85* [online]. 2012 [citováno 2013-4-23]. URL: <<http://www.flexcar.cz/konverzni-kit-elotec-ec-85>>

- [18] GAS, S.R.O. *Co je zemní plyn* [online]. 2010 [citováno 2013-3-15]. URL: <<http://www.zemniplyn.cz/plyn/>>
- [19] GAS, S.R.O. *Přeprava a uskladnění* [online]. 2010 [citováno 2013-4-10]. URL: <<http://www.zemniplyn.cz/doprava/>>
- [20] GASAUTO, S.R.O. *Bezpečnost LPG, máte strach jezdit na plyn?* [online]. 2009 [citováno 2013-3-5]. URL: <<http://www.gasauto.cz/bezpecnost-lpg/>>
- [21] GB GASIFIRED EUROPE. *Zplyňovací jednotky & použití* [online]. 2012 [citováno 2013-3-25]. URL: <<http://www.gbgasifired.com/cz/its.html>>
- [22] GOOGLE *Mapa bioplynových stanic v České republice* [online]. konec 2012 [citováno 2013-4-15]. URL: <<http://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-panic/>>
- [23] GOOGLE. *Mapa CNG stanic v ČR* [online]. Konec 2012 [citováno 2013-3-15]. URL: <<http://www.cngplus.cz/cerpaci-a-plnici-panic.html>>
- [24] GOOGLE. *Mapa LPG stanic v ČR* [online]. Konec 2012 [citováno 2013-3-5]. URL: <<http://seznamlpg.cz/>>
- [25] GOOGLE. *Seznam čerpacích stanic s E85* [online]; 2013 [citováno 2013-4-23]. URL: <<http://biopalivafrci.cz/mapy/seznam-cerpacich-panic-s-e85/>>
- [26] H2 Logic. *Hydrogen for transport* [online]. 10/2012 [citováno 2013-5-20]. URL: <http://newenergy.is/gogn/2012/Radstefna_4okt2012/4._ms_hydrogen_for_transport_october2012_v2.pdf>
- [27] HVGAS. *Jaký systém pro Váš vůz na LPG* [online]. 2013 [citováno 2013-4-15]. URL: <<http://www.lpgauto.cz/lpg>>
- [28] HYTEP.CZ. *Slavnostní zahájení provozu vodíkové čerpací stanice* [online]. 12/2009 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/409-slavnostni-zahajeni-provozu-vodikove-cerpaci-panic>>
- [29] KRALUPOL. *Časté otázky a odpovědi* [online]. 2013 [citováno 2013-3-5]. URL: <<http://www.kralupol.cz/auto-lpg/aste-otazky-odpovedi/>>
- [30] LAURIN J. *Biopaliva pro zážehové motory*. Ekoenergie. Listopad 2008, AGRO TISK, s.r.o., Hradec Králové. ISSN 1803-4764 [citováno 2013-3-20].
- [31] LAURIN J. *Butanol jako motorové palivo*. Alternativní energie. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2012, roč. 12, č. 3, s. 38-39, ISSN 1212-1673 [citováno 2013-4-23].
- [32] LAURIN J. *Kvasný líh v motorových palivech v české republice*. 7th International Symposium MOTOR FUELS 06. Str. 464-476. Slovenská spoločnosť priemyselnej chemie, pobočka SLOVNAFT Bratislava. Vysoké Tatry, 2006. ISBN 80-968011-3-9 [citováno 2013-4-23].
- [33] LAURIN J. *LPG jako palivo pro vozidlové motory*. Sborník příspěvků z mezinárodní konference LPG 2001. Str. 35 - 38. APB, GAS, ČSTZ, MEDIM Praha, Praha 2001. VCJB LN 00B073 [citováno 2013-3-25].
- [34] LAURIN J. *Palivo LNG pro vozidlové motory*. Ropa uhlie plyn a petrochemia. Str. 43 - 47, č. 4/2000, roč.42, Slovnaft VÚPR, a.s., Bratislava 2001. ISSN 1335-1141 [citováno 2013-3-15].
- [35] LAURIN J. *Vodík – palivo pro motorová vozidla*. Sborník přednášek 5. Mezinárodního sympózia MOTOROVÉ PALIVÁ 2002. 7 s. Slovenská spoločnosť priemyselnej chemie, pobočka SLOVNAFT Bratislava. Bratislava 2002. pp. 7. ISBN 80-968011-3-9 [citováno 2013-4-5].

- [36] LAURIN J. *Zemní plyn - palivo pro motorová vozidla*. Moderní pohonné hmoty a maziva pro motorová paliva 2003. Str. 56-61. Česká asociace petrolejářského průmyslu a obchodu. Brno 2003. Projekt LN 00B07 [citováno 2013-3-20]. URL: <<http://old.cappo.cz/veletrh2003/laurin.html>>
- [37] LAURIN J. – HOLUBEC R. – MAREŠ J. *Vývoj plynového motoru pro osobní automobil*. XXXVIII. mezinárodní vědecká konference pracovníků kateder a pracovišť spalovacích motorů vysokých škôl na Slovensku a v Čechách. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Bratislava 2007. ISBN 80-903634-2-3 [citováno 2013-4-29].
- [38] MACEK J. – DLOUHÝ P. *Vodíkové spalovací motory* [online]. 3. 12. 2007 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/498-vodikove-spalovaci-motory>>
- [39] PETROLEUM.CZ. *Zkapalněné ropné plyny* [online]. 2013 [citováno 2013-4-10]. URL: <<http://www.petroleum.cz/vyroby/zkapalnene-ropne-plyny.aspx>>
- [40] PRAŽSKÁ PLYNÁRENSKÁ, A.S. *Informace o zemním plynu* [online]. 2010 [citováno 2013-3-15]. URL: <<http://test.ppas.cz/cs/produkty-a-sluzby/plyn/informace-o-zemnim-plynu/vlastnosti/>>
- [41] POHOŘELÝ M. – JEREMIÁŠ M. – KAMENÍKOVÁ P. – SKOBLIA S. – SVOBODA K. – PUNČOCHÁŘ M. *Zpěňování biomasy*. Chem. Listy 106(4), 264-274 (2012) [citováno 2013-4-20]. URL: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_04_264-274.pdf>
- [42] RWE. *Bioplyn* [online]. [citováno 2013-4-15]. URL: <<http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-125/>>
- [43] RWE. *Ceny CNG* [online]. 1. 5. 2013 [citováno 2013-5-20]. URL: <<http://www.cng.cz/cs/618/>>
- [44] RWE. *Stanice skupiny RWE* [online]. [citováno 2013-3-15]. URL: <<http://www.cng.cz/cs/stanice/>>
- [45] RWE. *Zkapalněný zemní plyn - LNG* [online]. [citováno 2013-3-20]. URL: <<http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-126/>>
- [46] SOMOLOVÁ M. – DLOUHÝ P. *Výroba vodíku* [online]. 9. 5. 2007 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/491-vyroba-vodiku>>
- [47] ŠEBOR G. – POSPÍŠIL M. – ŽÁKOVEC J. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě* [online]. 2006 [citováno 2013-4-10]. URL: <http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoeekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_1.pdf>
- [48] TriHyBus. *Čerpací stanice* [online]. 2008 [citováno 2013-4-20]. URL: <<http://www.h2bus.cz/tankovani>>
- [49] VYHŇÁK M. *Výpis aktuálních cen E85 – středočeský kraj* [online]. 20. KT 2013 [citováno 2013-5-20]. URL: <<http://www.ceskybenzin.cz/aktualni-ceny-PHM/Stredocesky-kraj/E85>>
- [50] WIKIPEDIA. *Butanol* [online]. 2013 [citováno 2013-4-23]. URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Butanol>>
- [51] WWW.LPG.CZ. *Bezpečnostní prvky při přestavbě automobilů na propan butan* [online]. 2007 [citováno 2013-3-15]. URL: <<http://www.lpg.cz/prestavby/bezpecnost.php>>
- [52] WWW.LPG.CZ. *Ceny LPG v ČR* [online]. 18. KT 2013 [citováno 2013-5-5]. URL: <<http://www.lpg.cz/main/>>
- [53] ZAWORSKY F. *Oxo-Alcohols (USA)* [online]. 11/2012 [citováno 2013-5-20]. URL: <http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage153.asp>